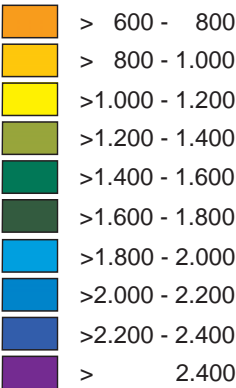


Karte 1: Mittlere Lufttemperatur 1971-2000
Karte 2: Mittlere Lufttemperatur 2031-2060
Angaben in [°C]



Karte 3: Mittlerer Jahresniederschlag 1971-2000
Karte 4: Mittlerer Jahresniederschlag 2031-2060
Angaben in [mm]



GLOBAL CHANGE ATLAS
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



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

S5.1 Simulation von Temperatur und Niederschlag mit MM5 skaliert & biaskorrigiert

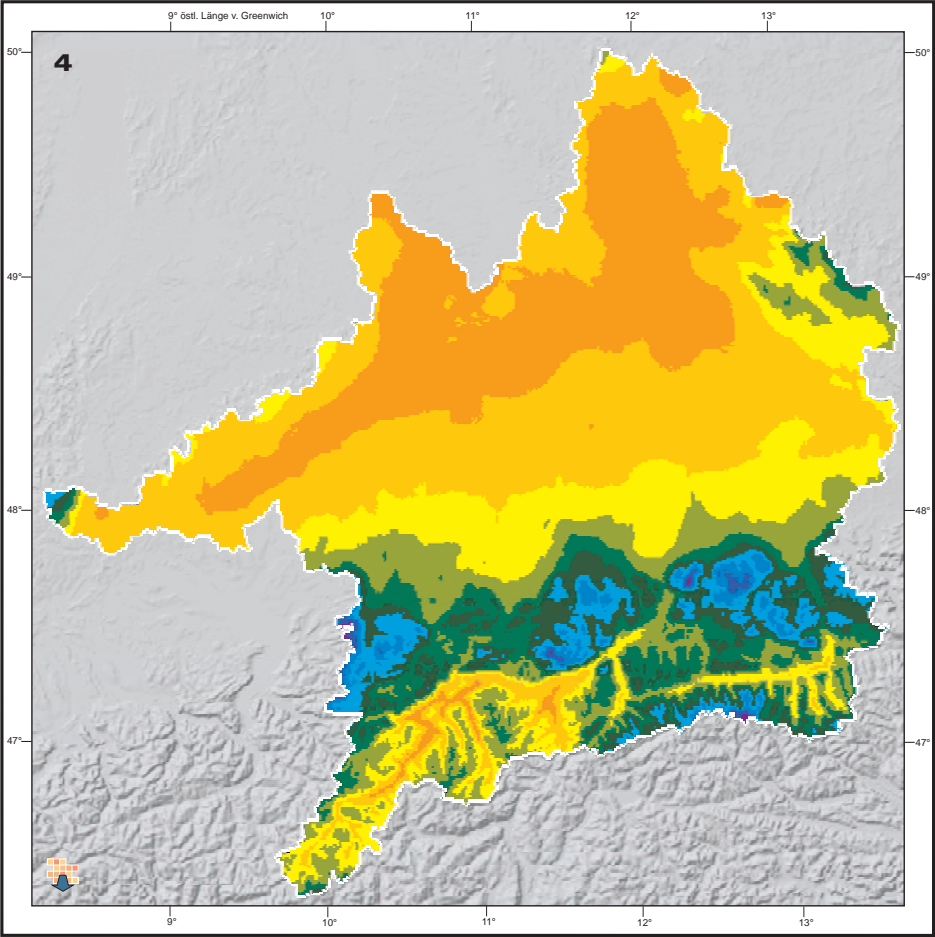
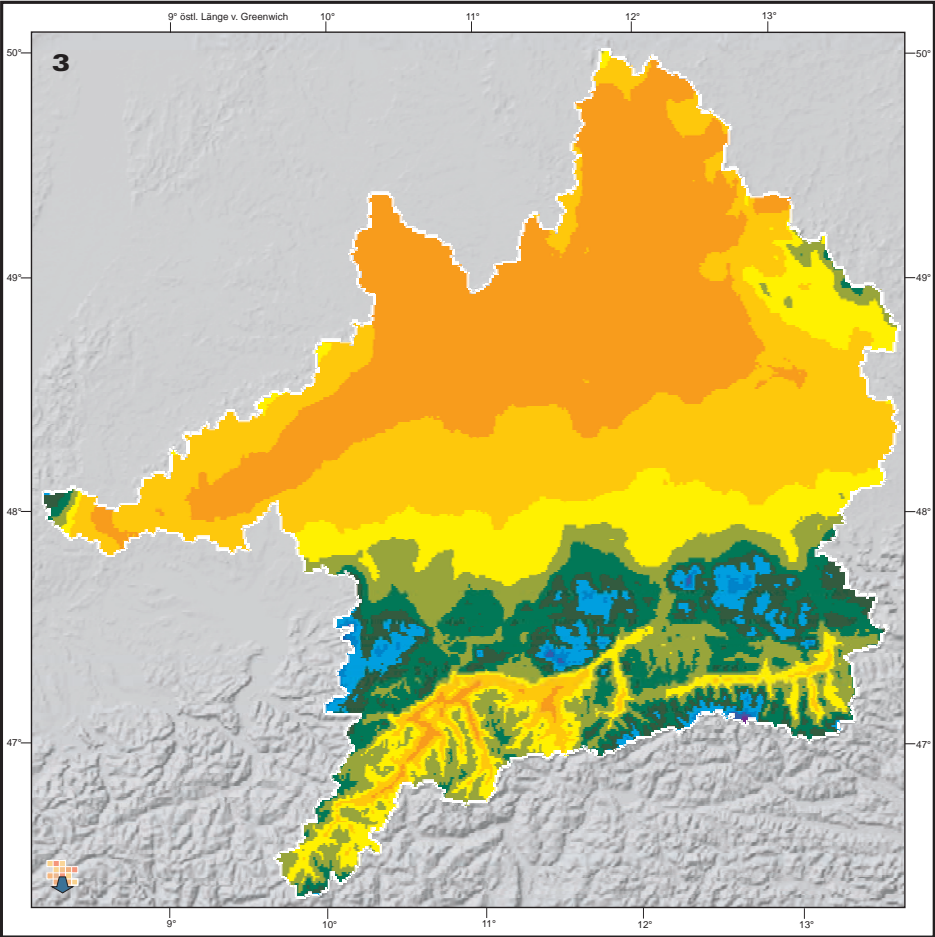
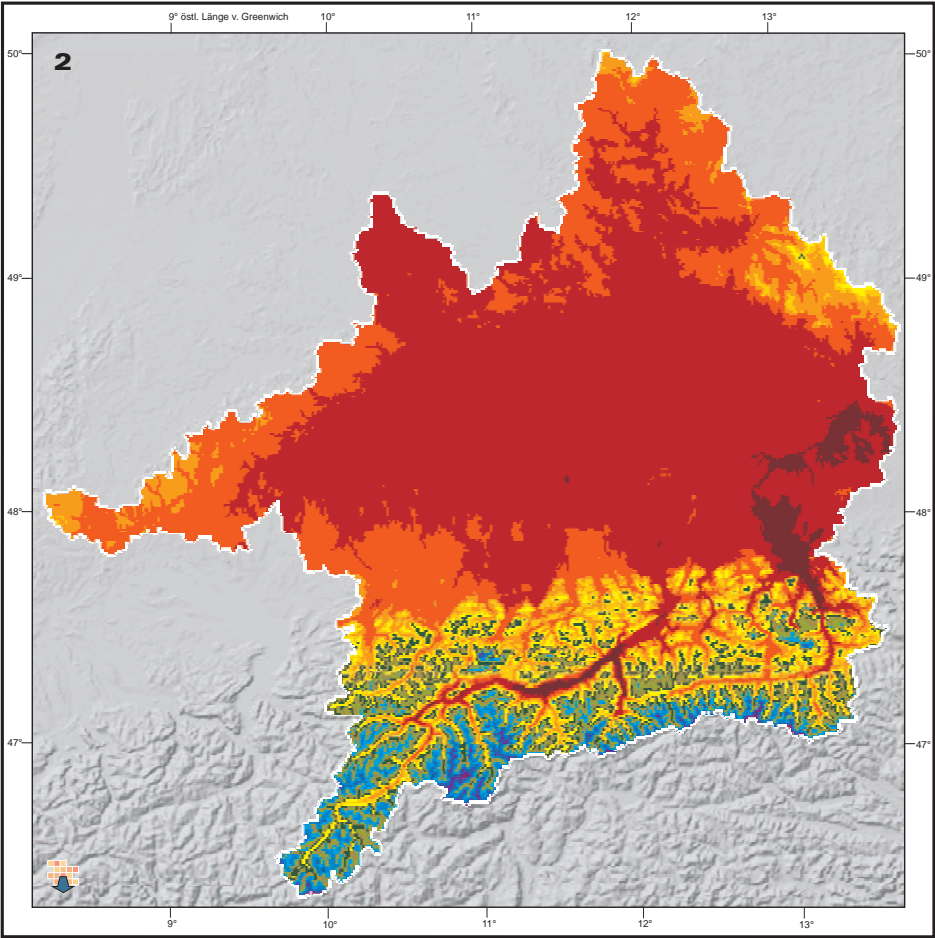
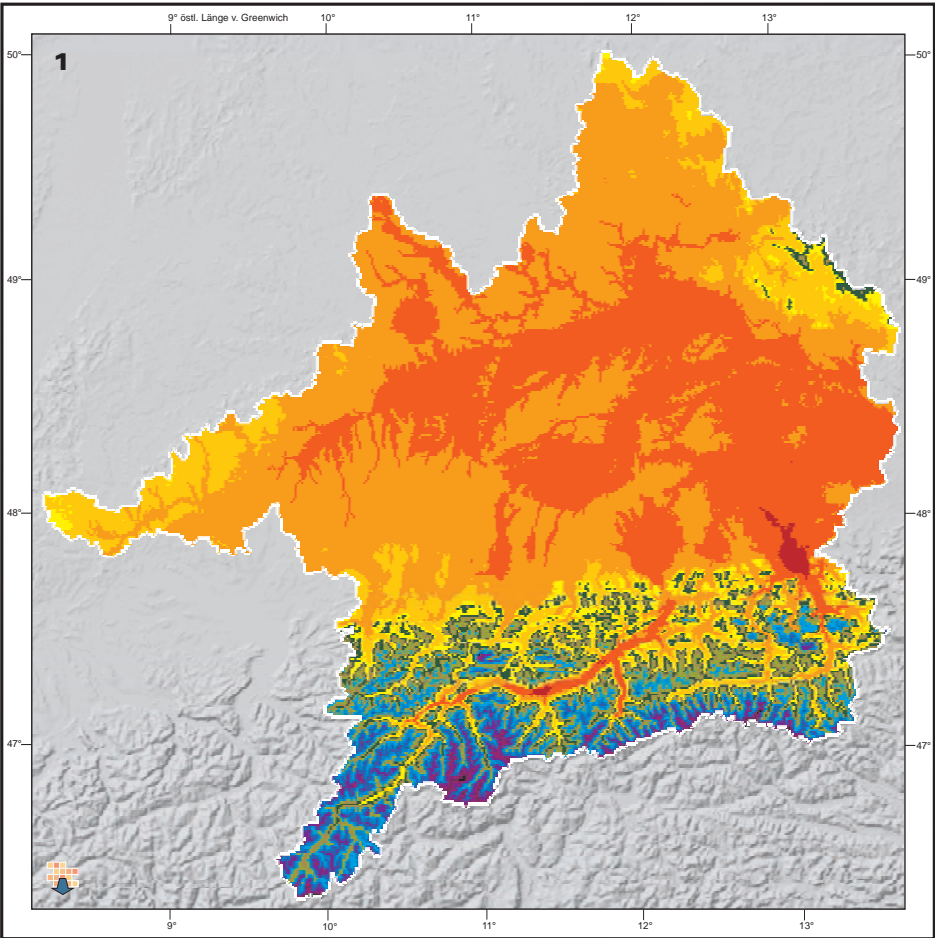
Rastergröße: 1 x 1 km²
Maßstab: 1: 3.800.000



Datengrundlage:
Globaler Antrieb:
Gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM
Dynamische Regionalisierung:
Regionales Klimamodell REMO, Rechnungen Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), finanziert durch das Umweltbundesamt (UBA)
Regionales Klimamodell MM5, eigene Rechnungen Meteorologisches Institut, Universität München
Datengrundlage der statistischen Skalierung:
Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach a. Main, Deutschland
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien, Österreich

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

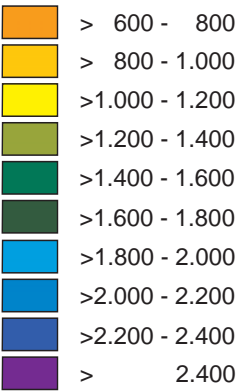
Grafik:
V. Falck
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,
Ludwig-Maximilians-Universität München



Karte 1: Mittlere Lufttemperatur 1971-2000
Karte 2: Mittlere Lufttemperatur 2031-2060
Angaben in [°C]



Karte 3: Mittlerer Jahresniederschlag 1971-2000
Karte 4: Mittlerer Jahresniederschlag 2031-2060
Angaben in [mm]



GLOBAL CHANGE ATLAS
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



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

S5.2 Simulation von Temperatur und Niederschlag mit *REMO skaliert & biaskorrigiert*

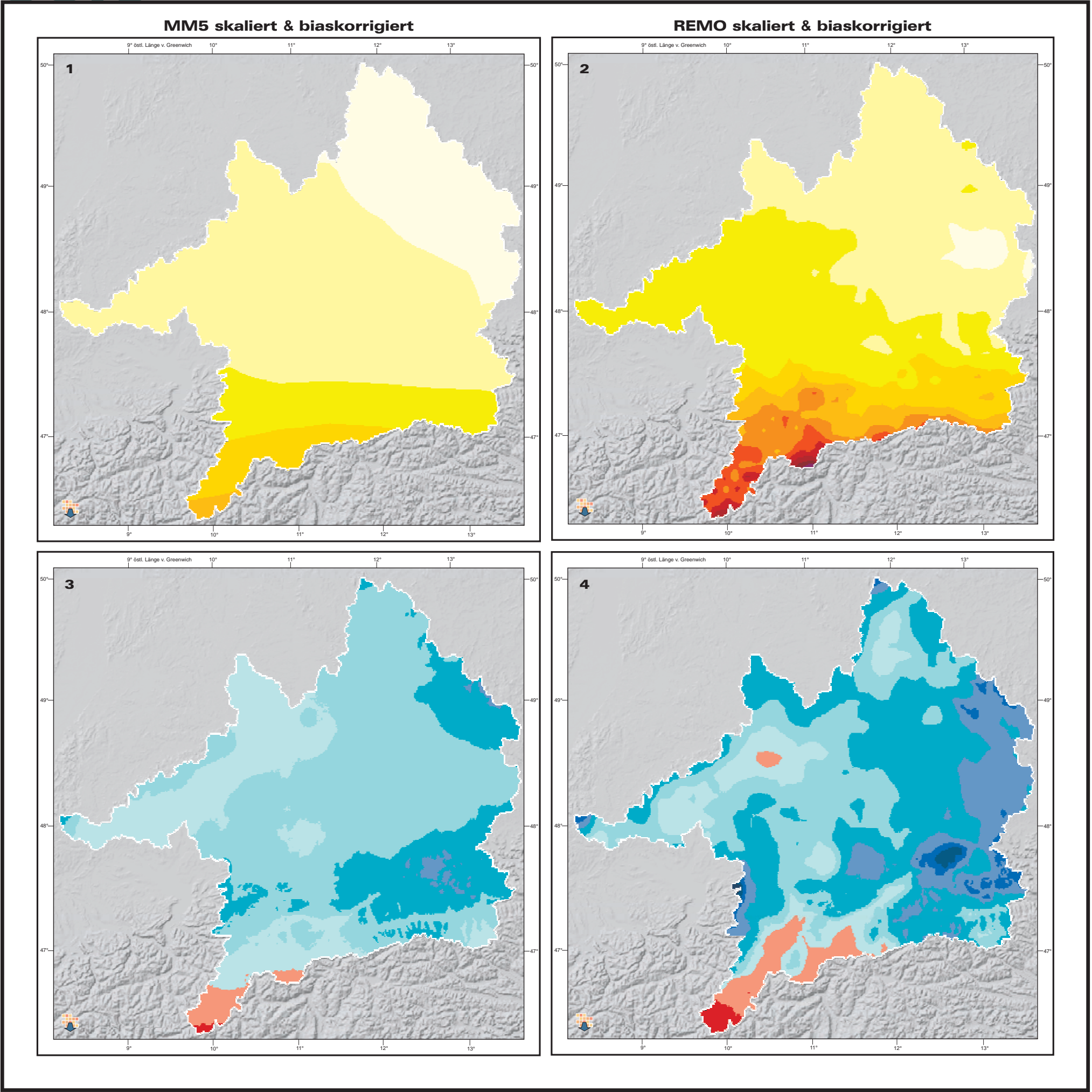
Rastergröße: 1 x 1 km²
Maßstab: 1: 3.800.000



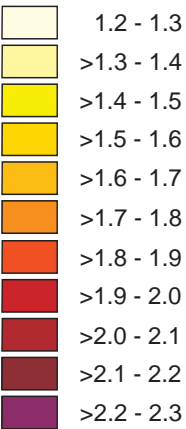
Datengrundlage:
Globaler Antrieb:
Gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM
Dynamische Regionalisierung:
Regionales Klimamodell REMO, Rechnungen Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), finanziert durch das Umweltbundesamt (UBA)
Regionales Klimamodell MM5, eigene Rechnungen Meteorologisches Institut, Universität München
Datengrundlage der statistischen Skalierung:
Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach a. Main, Deutschland
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien, Österreich

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

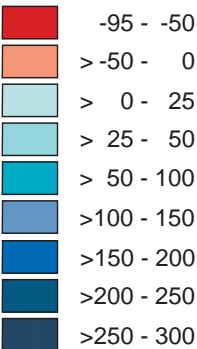
Grafik:
Abt. Kartographie
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,
Ludwig-Maximilians-Universität München



Temperaturänderung [°C]
zwischen 2031-2060 und 1971-2000
Karte 1: nach *MM5 skaliert & biaskorrigiert*
Karte 2: nach *REMO skaliert & biaskorrigiert*



Niederschlagsänderung [mm]
zwischen 2031-2060 und 1971-2000
Karte 3: nach *MM5 skaliert & biaskorrigiert*
Karte 4: nach *REMO skaliert & biaskorrigiert*



GLOBAL CHANGE ATLAS
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



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

S5.3 Veränderung von Temperatur und Niederschlag zwischen 2031-2060 und 1971-2000 nach *MM5* und *REMO*, beide *skaliert & biaskorrigiert*

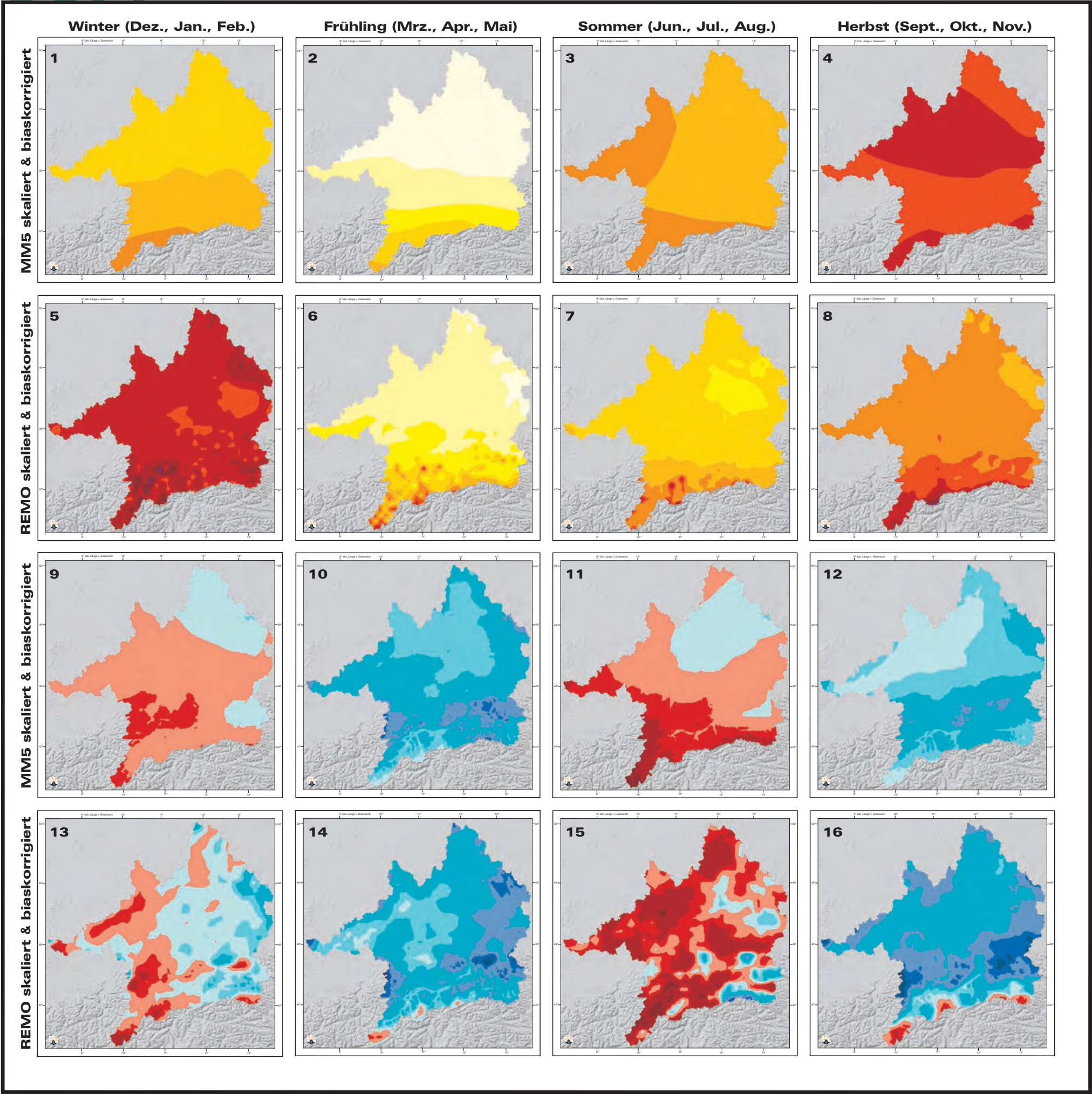
Rastergröße: 1 x 1 km²
Maßstab: 1: 3.800.000



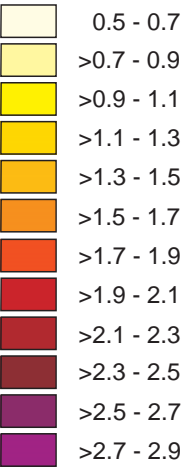
Datengrundlage:
Globaler Antrieb:
Gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM
Dynamische Regionalisierung:
Regionales Klimamodell REMO, Rechnungen Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), finanziert durch das Umweltbundesamt (UBA)
Regionales Klimamodell MM5, eigene Rechnungen Meteorologisches Institut, Universität München
Datengrundlage der statistischen Skalierung:
Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach a. Main, Deutschland
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien, Österreich

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

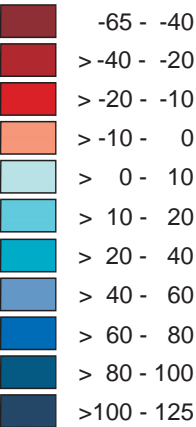
Grafik:
V. Falck
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,
Ludwig-Maximilians-Universität München



Karten 1-8:
Temperaturänderung [°C]



Karten 9-16:
Niederschlagsänderung [mm]



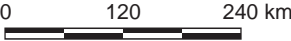
GLOBAL CHANGE ATLAS
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



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

S5.4 Jahreszeitliche Änderung von Temperatur
und Niederschlag zwischen 2031-2060
und 1971-2000 nach *MM5* und *REMO*,
beide *skaliert & biaskorrigiert*

Rastergröße: 1 x 1 km²
Maßstab: 1: 7.700.000



Datengrundlage:
Globaler Antrieb:
Gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM
Dynamische Regionalisierung:
Regionales Klimamodell REMO, Rechnungen Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M),
finanziert durch das Umweltbundesamt (UBA)
Regionales Klimamodell MM5, eigene Rechnungen Meteorologisches Institut,
Universität München
Datengrundlage der statistischen Skalierung:
Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach a. Main, Deutschland
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Wien, Österreich

Autoren:
T. Marke, W. Mauser
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,
Ludwig-Maximilians-Universität München
A. Pfeiffer, G. Zängl
Institut für Meteorologie,
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

S5 Klimavarianten der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*

1. Regionale Klimamodelle

Klimaszenarien auf globaler Skala werden weltweit von vielen Instituten bereitgestellt. Mit Hilfe von computergestützten Modellen wird dabei das Klima des Erdsystems aufgrund physikalisch basierter Gleichungen berechnet. Die räumliche Auflösung der globalen Modelle ist jedoch trotz immenser Entwicklungen der Computertechnologie während der letzten Jahrzehnte noch immer durch die verfügbaren Rechnerkapazitäten begrenzt. Als direkte Folge können viele topographisch-atmosphärische Wechselwirkungen, die gerade im stark alpin geprägten Einzugsgebiet der Oberen Donau von großer Bedeutung sind, von globalen Modellen noch nicht aufgelöst werden. Regionale Klimamodelle sind daher ein wichtiges Werkzeug für eine verfeinerte Betrachtung globaler Klimasimulationen auf der regionalen Skala. Ihre Gitterweite ist mit ca. 10-50 km deutlich feiner als die globalen Klimamodelle, wodurch kleinräumige topographische Eigenschaften und meteorologische Prozesse besser erfasst werden können.

nestung. Für den Einsatz in DANUBIA wurde jedoch nur eine einzelne Nestungsstufe (45 km) verwendet. Dies erscheint dadurch gerechtfertigt, dass unter Verwendung von Reanalysedaten als lateralem Antrieb bereits mit der Einfach-Nestung in einer nochmals optimierten Konfiguration des *MM5* recht realitätsnahe Simulationen insbesondere des Niederschlags im Alpenraum für das Jetztzeitklima erzielt werden konnten. Außerdem findet, anders als mit *REMO*, auch eine „online“-Einbindung des *MM5* über Zwei-Wege-Kopplung in die Simulationsläufe von DANUBIA statt, was aufgrund des hohen Rechenzeitbedarfs eines meteorologischen Modells auf feinerer räumlicher Auflösung praktisch nicht durchführbar wäre. Die Kombination aus der physikalisch-dynamischen Verfeinerung der globalen Simulationen durch das regionale Klimamodell *MM5* und dem nachgeschalteten statistisch basierten Downscaling auf 1 km (siehe Abschnitt 2) bildet hier den bestmöglichen Kompromiss zwischen den technischen Möglichkeiten und den Anforderungen an hochaufgelöste meteorologi-

mamodelle nicht wiedergegeben werden. Während die Modellskala von *DANUBIA* bei 1 km liegt, liegen die Modellskalen der Modelle *REMO* und *MM5* bei 10 km bzw. 45 km. In den regionalen Klimamodellen verschwinden dadurch hydrologisch wichtige Details wie Täler oder Gletscher (siehe Abbildung S5.1). Dieser Skalenunterschied muss durch eine Verfeinerung der räumlichen Auflösung (Downscaling) der regionalen Klimasimulationen überbrückt werden.

- b) Die akkurate quantitative Niederschlagsmodellierung vor allem im topographisch stark gegliederten Alpenraum stellt für Klimamodelle eine große Herausforderung dar, wodurch es auf der Skala der regionalen Modelle zu Niederschlagsüber- bzw. unterschätzungen u.a. durch einen horizontalen Versatz der simulierten Niederschläge kommen kann.

Niederschlagsabweichungen gegenüber Beobachtungsdaten sind nicht zwingend auf die interne Prozessmodellierung der regionalen Klimamodelle, sondern in hohem Maße auch auf den verwendeten globalen Antrieb zurückzuführen (siehe Kapitel S2). So zeigt der Vergleich von mit *REMO* bzw. *MM5* modellierter historischer Klimatologie (unter ECHAM5-Antrieb) mit einem im Rahmen des GLOWA-Danube Projektes erstellten Beobachtungsdatensatz (siehe Kapitel 1.5-1.7) systematische Abweichungen beider Modelle von den Messungen. Vor allem im Winterhalbjahr werden die monatlichen Niederschläge im Einzugsgebiet von beiden regionalen Klimamodellen deutlich überschätzt (siehe Abbildung S5.2).

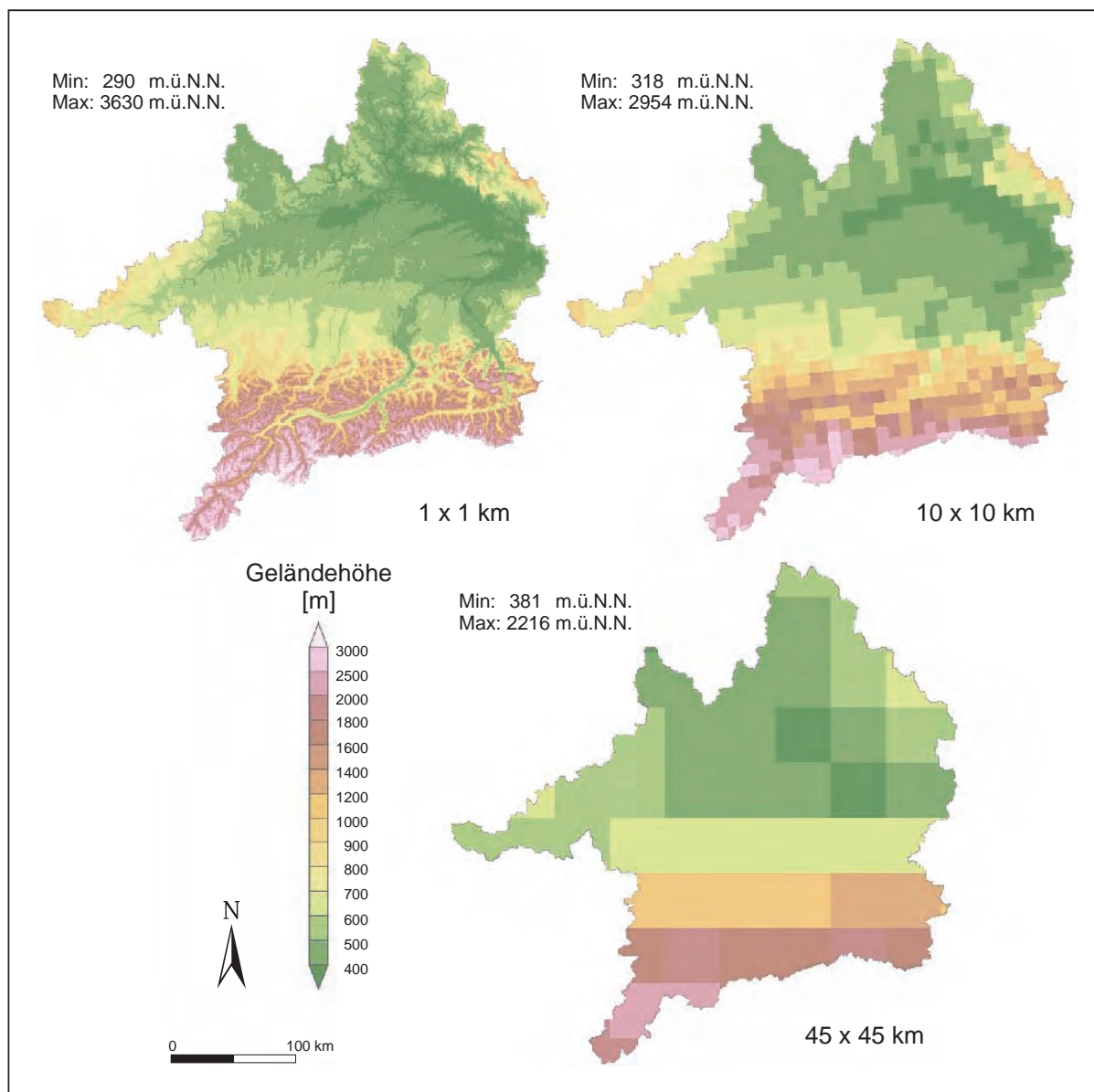


Abbildung S5.1: Die Topographie im Einzugsgebiet der Oberen Donau in den unterschiedlichen räumlichen Auflösungen der Modelle *DANUBIA* (1 km), *REMO* (10 km) und *MM5* (45 km).

Ein Modell zur regionalisierten Klimaberechnung wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelt. Das regionale Klimamodell *REMO* verwendet ein doppeltes Nestungsprinzip, um den Skalensprung zwischen der globalen und der regionalen Skala zu bewerkstelligen. Dabei wird zunächst mit einem globalen Modell in einer groben räumlichen Auflösung von ~180 km und dann in zwei weiteren Schritten mit dem Regionalmodell in jeweils feinerer Auflösung (~40 km, ~10 km) das Klima simuliert, wobei die Ergebnissdaten des jeweils größeren Datensatzes in die jeweils feinere Berechnung als lateraler Antrieb eingehen. *REMO* wurde u.a. im Auftrag des Umweltbundesamtes verwendet, um auf Basis der vom IPCC ausgearbeiteten Emissionsszenarien mögliche regionale Klimaänderungen bis zum Jahr 2100 für Deutschland, Österreich und die Schweiz in einer Auflösung von 10 x 10 km zu berechnen. Aufgrund der bisher einmaligen räumlichen Auflösung sind diese Daten als Antrieb für *DANUBIA* von besonderem Interesse.

Ein zweites Modell, das bereits seit Projektbeginn in GLOWA-Danube eingesetzt wird, ist das Modell *MM5* (siehe auch Kapitel 2.5.1). *MM5* verfügt ebenfalls über die Möglichkeit der Mehrfach-

sche Modellergebnisse in *DANUBIA*.

In Kapitel S2 wurde bereits beschrieben, wie regionale Klimatrends aus den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* abgeleitet werden können. Durch die Betrachtung der den Ergebnissen innewohnenden Trends für die Entwicklung von Temperatur und Niederschlag in Kombination mit einem statistischen Klimaantriebs-Generator konnten Klimavarianten erzeugt werden, die sich als meteorologische Eingaben für *DANUBIA* eignen (siehe Kapitel S3 und S4).

Jenseits des aus den Ergebnissen abgeleiteten Trends beinhalten die Ausgaben der regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* auch stündliche Felder der meteorologischen Variablen Strahlung, Wind, Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlag. Diese Ausgaben sind, zumindest im Prinzip, dazu geeignet, als meteorologische Antriebe von *DANUBIA* zu dienen. Zwei Faktoren verhindern die direkte Nutzung der Ausgaben der regionalen Klimamodelle als Antrieb für *DANUBIA*:

- a) Die kleinräumige klimatische Variabilität, v.a. im alpinen Süden des betrachteten Einzugsgebietes, kann trotz der vergleichsweise hohen räumlichen Auflösung der regionalen Kli-

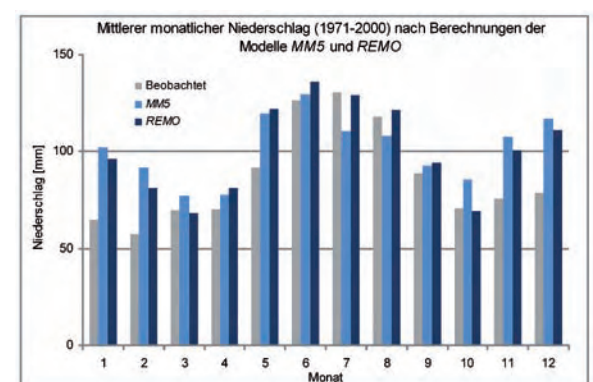


Abbildung S5.2: Mittlerer monatlicher Niederschlag im Einzugsgebiet der Oberen Donau für den Zeitraum (1971-2000) nach unkorrigierten Berechnungen der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*.

Würde man die Ergebnisse der Modelle für die Vergangenheit direkt als Eingabe in *DANUBIA* nutzen, so wäre es nicht möglich, die statistischen Eigenschaften der gemessenen Hydrologie realitätsnah wiederzugeben. Die systematischen Abweichungen müssen, unter der Annahme, dass sie sich in gleicher Weise in der Zukunft

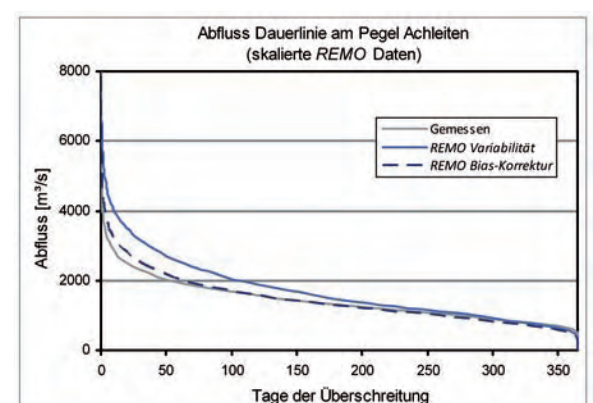
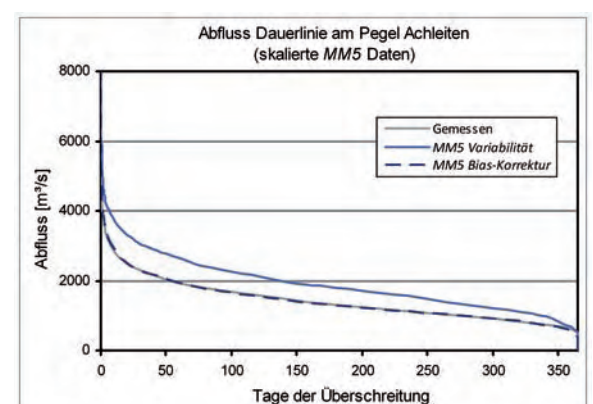


Abbildung S5.3: Dauerlinie des Abflusses am Auslass des Einzugsgebietes in Achleiten (1972-2000) berechnet aus Abflussmessungen und *DANUBIA* Simulationen mit Klimamodellantrieb ohne Bias-Korrektur (lediglich Korrektur der subskaligen Variabilität) und mit Biaskorrektur.

fortsetzen, durch eine Bias-Korrektur entfernt werden.

Die hydrologische Relevanz der Biaskorrektur wird durch Abbildung S5.3 verdeutlicht. Dargestellt ist die unter Verwendung der skalierten *MM5*- und *REMO*-Daten modellierte Dauerlinie des Abflusses am Auslass des Einzugsgebietes in Achleiten. Wie Abbildung S5.3 zeigt, reicht bei den Modellergebnissen beider regionaler Klimamodelle die Korrektur der subskaligen Variabilität (siehe Abbildung S5.2) allein nicht aus um die aus Messdaten berechnete Dauerlinie am Auslass mit *DANUBIA* zu reproduzieren.

Die überhöhten Niederschläge in den meteorologischen Simulationen beider Modelle führen bei nicht durchgeführter Bias-Korrektur zu einer deutlichen Abflussüberschätzung. Erst durch Hinzunahme der Bias-Korrektur in die Skalierung kann der tatsächliche Verlauf der Dauerganglinie am Auslass realitätsnah modelliert werden.

2. Skalierung und Bias-Korrektur der Modellergebnisse

Die Skalierung und Bias-Korrektur der stündlichen Berechnungen der Modelle *MM5* und *REMO* erfolgt über die Skalierungs-Schnittstelle *SCALMET* (Marke, 2008). *SCALMET* vereint verschiedene Verfahren zum Up- und Downscaling derjenigen meteorologischen Parameterfelder, die als meteorologische Antriebe für *DANUBIA* dienen. Bei den hier präsentierten Ergebnissen kam ein statistisch-empirisches Skalierungsverfahren zum Einsatz. Das benutzte Verfahren basiert auf Früh et al. (2006) und verwendet monatliche Skalierungsfunktionen für das Downscaling der regionalen Klimasimulationen auf die für Rechnungen mit *DANUBIA* benötigte räumliche Auflösung von 1 x 1 km (siehe Abbildung S5.4).

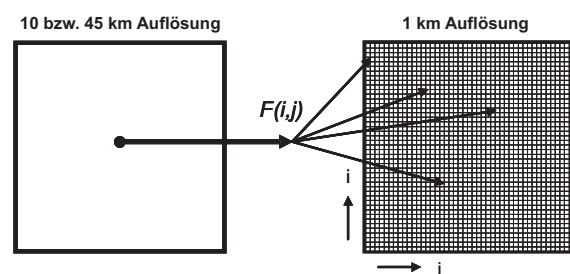


Abbildung S5.4: Schematische Darstellung der Skalierung von Klimamodelldaten mithilfe statistischer Skalierungsfunktionen.

Dabei wird in einem ersten Schritt die subskalige Variabilität des beobachteten Klimas innerhalb jeder Gitterbox des jeweiligen regionalen Klimamodells aus einer hochaufgelösten Klimatologie abgeleitet (siehe Kapitel 2.5.1). Hierzu wird die hochaufgelöste Klimatologie (1 km²) unter Erhaltung von Energie und Masse auf die räumliche Auflösung des jeweiligen regionalen Klimamodells aggregiert, so dass als Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes eine Beobachtungsklimatologie mit der Auflösung der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO* vorliegt. Durch Vergleich des so entstandenen Datensatzes mit den ursprünglichen Beobachtungsdaten (1 km²) wird die subskalige Variabilität innerhalb jedes Klimamodellpixels abgeleitet, d.h. für jedes 1 km² Pixel innerhalb eines Klimamodellpixels berechnet, inwieweit z.B. die monatlichen Temperaturen hier über dem Mittelwert eines Pixels in Auflösung des betrachteten Klimamodells liegen.

Da dieser erste Verarbeitungsschritt nur die subskalige Variabilität, nicht aber Abweichungen zwischen der modellierten und der beobachteten Klimatologie korrigiert, werden in einem zweiten Schritt aus der groben Beobachtungsklimatologie und der modellierten Klimatologie für beide Modelle modellspezifische Funktionen zur Bias-Korrektur abgeleitet. Diese Funktionen werden aus den Abweichungen der groben Klimasimulationen im monatlichen Mittel von den aggregierten Beobachtungen abgeleitet. Aus den Funktionen zur Korrektur der subskaligen Variabilität ($f_{\text{Variabilität}}$) und den Funktionen zur Bias-Korrektur (f_{Bias}) ergibt sich folgende Gesamtkorrektur (f_{Gesamt}):

$$f_{\text{Gesamt}} = f_{\text{Variabilität}} * f_{\text{Bias}}$$

Durch den Vergleich zwischen beobachteter Klimatologie und Modellklimatologie nach obigem Verfahren liegen für alle verwendeten meteorolo-

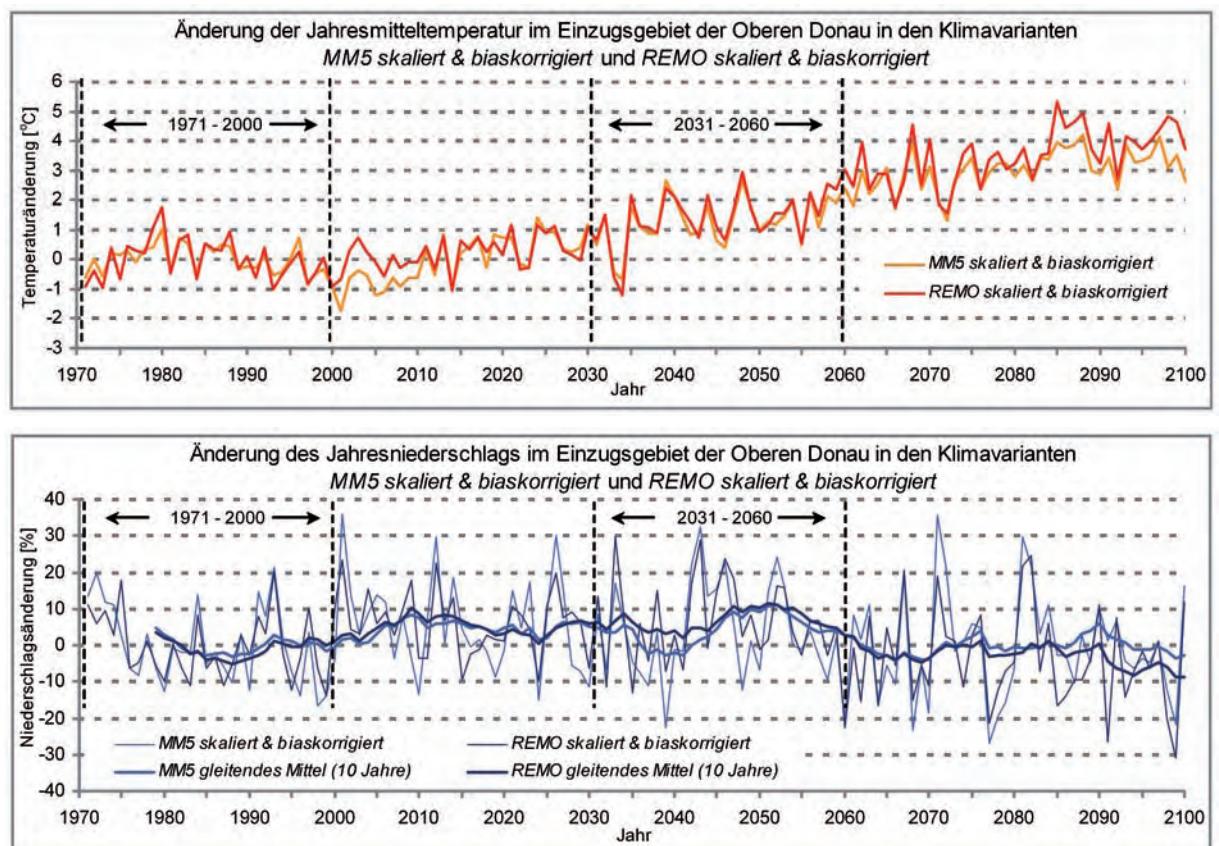


Abbildung S5.5: Entwicklung des Klimaänderungssignals von Temperatur und Niederschlag über die Jahre 1971 bis 2100 nach den skalierten und biaskorrigierten Berechnungen der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO*.

gischen Parameter Korrekturfunktionen für jeden Monat im Jahr vor. Diese berücksichtigen sowohl die subskalige Variabilität als auch den Bias auf Ebene des jeweiligen Modellgitters.

Im Fall des Niederschlags entstehen dabei räumlich verteilte Korrekturfaktoren in einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km für jeden Monat im Jahr, die mit den stündlichen Niederschlagsfeldern der regionalen Klimamodelle verschnitten werden. Bei anderen meteorologischen Parametern, wie z.B. der Temperatur, kann die Korrektur auch anhand additiver Korrekturwerte erfolgen, die mit den simulierten Werten verrechnet werden. Durch dieses Verfahren werden die modellierten Daten des Jetztzeitklimas an die Beobachtungsdaten angeglichen, so dass die skalierten Modellklimatologien der Vergangenheit dann per Konstruktion des Skalierungsverfahrens identisch zu der beobachteten Klimatologie sind.

Die jeweils zugehörigen modellspezifischen Skalierungsfunktionen werden dann auf die Modellergebnisse der Zukunftssimulationen angewandt, wodurch man den erwünschten Effekt einer beobachtungs- und statistisch basierten Auflösungsverfeinerung auf 1 x 1 km erreicht. Die im Rahmen dieses Kapitels gezeigten Kartenabbildungen stellen somit das Resultat einer Kombination von dynamischen (regionale Klimamodelle) und statistisch-empirischen Skalierungsansätzen (*SCALMET*) dar. Die gezeigten Daten sind aufgrund der verwendeten Korrekturverfahren zu unterscheiden von den ursprünglichen Klimasimulationen der Modelle *MM5* und *REMO*, die zur Ableitung der regionalen Klimatrends in Kapitel S2 verwendet wurden. Die aus der Skalierung und Bias-Korrektur resultierenden Modelldaten werden im Folgenden entsprechend der in Kapitel S1 dargestellten Logik der *GLOWA*-Dunube Szenarien als Klimavarianten bezeichnet, wobei je nach dem zugrundeliegenden regionalen Modell die Bezeichnungen "*MM5 skaliert & biaskorrigiert*" und "*REMO skaliert & biaskorrigiert*" verwendet werden.

3. Darstellung der Ergebnisse

Die simulierte Klimaänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau soll im Folgenden für die meteorologischen Größen Temperatur und Niederschlag aufgezeigt werden. In Abbildung S5.5 (oben) ist der zeitliche Verlauf der Änderung der Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1970-2100 im Vergleich zur mittleren Jahresmitteltemperatur der Referenzperiode (1971-2000) nach vorhergehender Skalierung und Bias-Korrektur dargestellt. Da die Skalierung im Fall der Temperatur über einen additiven Korrekturterm erfolgt, bleibt die Temperaturänderung von der Skalierung unbeeinflusst. Der in Abbildung S5.5 (oben) gezeigte Verlauf der Temperaturänderung entspricht somit der in Abbildung S2.7 in Kapitel S2 gezeigten Temperaturänderung der unskalierten

Klimamodelldaten. Die Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert* beinhalten beide einen deutlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur. Es zeigt sich weiter, dass beide Klimavarianten einen sehr ähnlichen Verlauf der Temperaturänderung über die Zeit zeigen, nur zu Beginn und im letzten Drittel des 21. Jahrhunderts weisen die beiden Varianten unterschiedliche Temperaturänderungen mit ungefähr einem Grad Celsius Differenz auf (siehe Abbildung S5.5 oben). Die für das Einzugsgebiet der Oberen Donau berechnete Erwärmung zeigt einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von bis zu 3°C bis zum Jahr 2060. Während in diesem Zeitraum noch Jahre mit einer Jahresmitteltemperatur unter dem durchschnittlichen Wert der Referenzperiode auftreten, liegen die Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für beide Modellsimulationen ausnahmslos (bis zu +5°C) über dem Mittel der Referenzperiode.

Der zeitliche Verlauf der relativen Niederschlagsänderung ist in Abbildung S5.5 (unten) dargestellt. Zur Veranschaulichung wurde das jeweils 10-jährige gleitende Mittel (dicke Linien) mit den stark schwankenden jährlichen Änderungen (dünne Linien) hinterlegt. Im Gegensatz zur Skalierung der Temperatur wird im Fall des Niederschlags ein multiplikativer Korrekturterm verwendet. Dies hat zur Folge, dass neben den räumlichen Mustern und absoluten Werten auch die Niederschlagsänderung durch die Skalierung verändert wird. Ein Vergleich von Abbildung S5.5 (unten) mit den Niederschlagstrends aus Abbildung S2.7 in Kapitel S2 zeigt aber, dass der Einfluss der Skalierung auf die Niederschlagsänderung sehr gering ist und im Vergleich zu den Unsicherheiten in der simulierten Niederschlagsentwicklung zu vernachlässigen ist.

Vergleicht man die beiden Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert*, zeigt sich für beide Klimavarianten ein gleichgerichteter Verlauf der errechneten Niederschlagsänderung. Dabei ist allerdings darauf hinzuweisen, dass der hohe Grad an Übereinstimmung zum Großteil auf den gemeinsamen globalen Antrieb der Modelle *MM5* und *REMO* zurückzuführen ist (*ECHAM5*, siehe Kapitel S.2, Abbildung S2.6). Ein tatsächliches Eintreten der simulierten Klimaänderung wird dadurch allerdings nicht wahrscheinlicher, da die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ergebnisses des zugrunde liegenden *ECHAM*-Laufes nicht bekannt ist.

Während für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts keine signifikante Zu- oder Abnahme der jährlichen Niederschläge resultiert, weichen die Daten der beiden Klimavarianten ab 2060 stärker voneinander ab. Während *MM5 skaliert & biaskorrigiert* erhebliche Niederschlagszunahmen bis knapp 40% aufweist, sind bei *REMO skaliert & biaskorrigiert* die Abnahmen stärker ausgeprägt (bis zu -30%). Im gleitenden Mittel zeichnet die

Entwicklung in den Klimavarianten im Fall des Modells *MM5* in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts somit tendenziell mehr Niederschlagszunahmen, für *REMO* hingegen tendenziell mehr Niederschlagsabnahmen nach.

Berechnet man den linearen Trend der Klimaänderung über die Jahre 1990-2100, so ergeben sich die in den Tabellen S5.1 und S5.2 dargestellten Änderungen von Temperatur und Niederschlag. Neben den Jahresmittelwerten und linearen Trends können für manche Fragen der Klimafolgenforschung natürlich auch die räumlichen Muster und die saisonalen Änderungen von Temperatur und Niederschlag von entscheidender Bedeutung sein. Das in den Kartenblättern S5.3 und S5.4 dargestellte Klimaänderungssignal wurde als Differenz zwischen den skalierten und biaskorrigierten Modellrechnungen für den Szenariozeitraum 2031-2060 und den skalierten Modellergebnissen der Vergangenheit von 1971-2000 berechnet.

Temperatur

Wie in Tabelle S5.1 dargestellt, zeigen die Daten der Klimavariante *REMO skaliert & biaskorrigiert* im Jahresmittel eine stärkere Temperaturzunahme als die *MM5* basierte Klimavariante.

Temperaturänderung 1990-2100 [°C]		
Zeit	<i>MM5 skaliert & biaskorrigiert</i>	<i>REMO skaliert & biaskorrigiert</i>
Winter	+5.2	+6.7
Frühjahr	+3.2	+3.7
Sommer	+5.8	+5.3
Herbst	+4.8	+5.1
Jahr	+4.7	+5.2

Tabelle S5.1: Linearer Trend der Temperaturänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau (1990-2100) gemessen am Mittel 1971-2000.

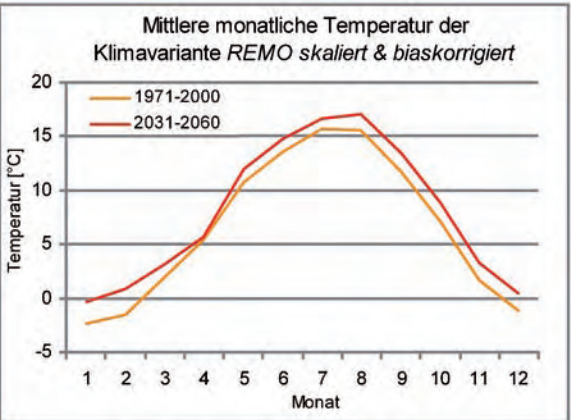
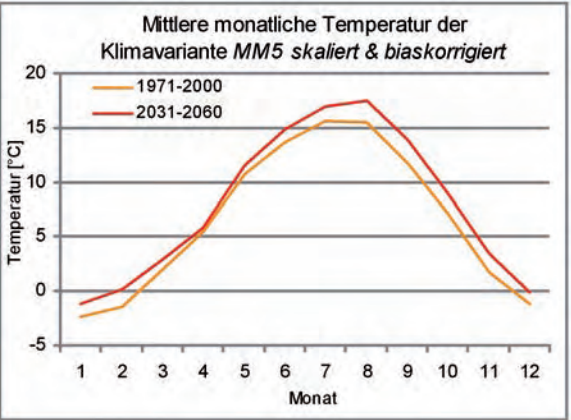


Abbildung S5.6: Mittlere monatliche Temperatur im Einzugsgebiet der Oberen Donau für den Referenzzeitraum (1971-2000) und den Szenariozeitraum (2031-2060) nach *MM5 skaliert und biaskorrigiert* (oben) und *REMO skaliert & biaskorrigiert* (unten).

Die jahreszeitlichen Temperaturänderungen zeigen bei Untersuchung der linearen Trends v.a. im Winter deutliche Unterschiede in den Klimavarianten. Dabei ist in den letzten zwei Dekaden des 21. Jahrhunderts die aus *MM5*-Daten abgeleitete Temperaturänderung im Winter mit +5.2°C um 1.5°C geringer als die aus den skalierten und biaskorrigierten *REMO*-Daten berechnete Zunahme.

Die über den Zeitraum 2031-2060 gemittelte Jahresmitteltemperatur im Einzugsgebiet der Oberen Donau ist den Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert* zufolge gleichermaßen um ungefähr 1.5°C höher als das Mittel des Referenzzeitraums (siehe Karten S5.1 und S5.2). Betrachtet man allerdings nur die höheren Gebirgslagen, beträgt

die stärkste Erwärmung für die aus *MM5*-Daten abgeleitete Klimavariante ungefähr 1.6°C, für die aus *REMO*-Simulationen berechnete Variante hingegen ungefähr 2.3°C.

Das räumlich verteilte Änderungssignal, abgeleitet aus der Klimavariante *MM5 skaliert & biaskorrigiert*, ist durch eine eher gleichmäßige Zunahme der Temperaturänderung von Nord nach Süd gekennzeichnet, dagegen sind für die Änderungen nach *REMO skaliert & biaskorrigiert* kleinräumigere Muster zu erkennen. Diese im Vergleich zu den *MM5*-basierten Daten deutlich kleinräumigere Variabilität der Temperaturänderung ist durch die höhere räumliche Auflösung des zugrundeliegenden Modells *REMO* zu erklären. Zwar bringt die Skalierung der Modellergebnisse im Fall beider Modelle subskalige Muster in einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km hervor (siehe Karten S5.1 und S5.2), die Skalen der Temperaturänderungssignale sind jedoch durch die horizontale Auflösung des jeweiligen regionalen Klimamodells dominiert.

Für die Wintersaison DJF sind, ähnlich wie bei der Trendbetrachtung, deutliche Unterschiede in den Differenzbildern beider Klimavarianten zu verzeichnen. Während der Winter nach *REMO skaliert & biaskorrigiert* mit +2°C die Jahreszeit mit der höchsten Temperaturzunahme darstellt, fällt die aus den *MM5*-Daten errechnete Zunahme im Winter deutlich geringer aus und liegt mit +1.3°C sogar unter der Zunahme von +1.5°C im Sommer und +1.9°C im Herbst. Diese Unterschiede sind auf die verschiedenartigen Entwicklungen in den einzelnen Monaten zurückzuführen (siehe Abbildung S5.6).

Wie im Kartenblatt S5.4 dargestellt, zeigen die Daten der Variante *REMO skaliert & biaskorrigiert* eine maximale Erwärmung im Winter und Herbst, während *MM5 skaliert & biaskorrigiert* höchste Temperaturzunahmen für den Sommer und Herbst aufweist.

Niederschlag

Die linearen Trends der Niederschlagsentwicklung im Einzugsgebiet der Oberen Donau zeigen im Fall beider Klimavarianten eine Abnahme des Jahresniederschlags bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, die im Fall der Klimavariante *MM5 skaliert & biaskorrigiert* allerdings geringer ausfällt (siehe Tabelle S5.2).

Was die saisonale Niederschlagsänderung betrifft, zeigen die aus den Klimavarianten abgeleiteten Trends vor allem im Sommer und Frühjahr große Übereinstimmungen.

Niederschlagsänderung 1990-2100 [%]		
Zeit	<i>MM5 skaliert & biaskorrigiert</i>	<i>REMO skaliert & biaskorrigiert</i>
Winter	+8.4	-1.4
Frühjahr	+14.5	+10.7
Sommer	-29.4	-32.6
Herbst	-2.7	-12.6
Jahr	-6.2	-12.4

Tabelle S5.2: Linearer Trend der Niederschlagsänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau (1990-2100) relativ zum Mittel 1971-2000.

Die linearen Trends auf Grundlage beider Klimavarianten zeigen eine erhebliche Abnahme der Niederschläge im Sommer und eine deutliche Zunahme der Niederschläge im Frühjahr. Die zukünftige Entwicklung der Winterniederschläge stellt sich in den linearen Trends der beiden Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert* unterschiedlich dar. Während sich im linearen Trend im Fall von *MM5 skaliert & biaskorrigiert* bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Zunahme der winterlichen Niederschläge um 8.4 % abzeichnet, nehmen die Winterniederschläge in der Variante *REMO skaliert & biaskorrigiert* um 1.4% ab.

Vergleicht man die aus den Klimavarianten abgeleiteten Niederschlagstrends mit den Ergebnissen des Vergleichs von Referenz und Szenariozeitraum, so werden Unterschiede deutlich: Während der lineare Trend der Niederschlagsänderung (1990-2100) bei beiden Modellen eine Abnahme des Jahresniederschlags beschreibt, zeigt der Vergleich der mittleren Jahresniederschläge im Szenariozeitraum (2031-2060) mit den Niederschlägen im Referenzzeitraum (1971-

2000) bei beiden Klimavarianten eine Zunahme der Niederschläge (siehe Karten S5.3 und S5.4). Diese Umstände verdeutlichen die Abhängigkeit des Klimaänderungssignals von der Länge und der Lage des untersuchten Zeitraums innerhalb der modellierten Zeitreihe sowie die Abhängigkeit der Ergebnisse von der zur Untersuchung der Klimaänderung verwendeten Methodik.

Während die Zunahme der Jahresniederschläge in den Daten der Klimavariante *REMO skaliert & biaskorrigiert*, berechnet durch Gegenüberstellung der Zeiträume 1971-2000 und 2031-2060, im Vergleich zur Klimavariante *MM5 skaliert & biaskorrigiert* in einigen Gebieten etwas höher ausfällt, stimmt die horizontale Verteilung des Niederschlagsänderungssignals beider skalierten Modellergebnisse weitgehend überein. Sie ist durch eine Niederschlagszunahme im Bereich des Bayerischen Waldes vor allem aber im Bereich des nordöstlichen Alpenbereiches gekennzeichnet. Eine Abnahme der jährlichen Niederschlagswerte kennzeichnet dagegen den südwestlichsten Teil des Einzugsgebietes. Auch die saisonalen Niederschlagsänderungen im Einzugsgebiet der Oberen Donau werden in beiden Klimavarianten sehr ähnlich abgebildet (siehe Kartenblatt S5.4, Karten 9-16). Beide skalierten Modellergebnisse zeigen eine Zunahme des mittleren Gebietsniederschlags für den Frühling (*MM5 skaliert & biaskorrigiert*: +27mm, *REMO skaliert & biaskorrigiert*: +32mm) und Herbst (*MM5 skaliert & biaskorrigiert*: +19mm, *REMO skaliert & biaskorrigiert*: +38mm) sowie eine Abnahme der Niederschläge im Sommer (*MM5 skaliert & biaskorrigiert*: -6mm, *MM5 skaliert & biaskorrigiert*: -13mm).

Die Resultate für den Winter zeigen im Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2031-2060 insgesamt zwar eine geringe Differenz aber eine gegenläufige Entwicklung der beiden Klimamodelle. Während aus den *REMO* basierten Daten eine absolute Zunahme des Niederschlags um 2mm im Winter resultiert, zeigen die aus den *MM5* Modellrechnungen abgeleiteten Ergebnisse eine Abnahme der Niederschläge im Winter von ca. 3mm.

Betrachtet man die Darstellung der monatlichen Niederschläge im Referenz- und Szenariozeitraum für beide Modelle (siehe Abbildung S5.7), so wird deutlich, dass die unterschiedliche Niederschlagsänderung im Winter im wesentlichen auf unterschiedliche Niederschläge für den Monat Februar (2031-2060) zurückzuführen sind. In Abbildung S5.7 zeigt sich weiter, dass die maximale Zunahme und maximale Abnahme bei beiden Klimavarianten in den gleichen Monaten erfolgen (März: Zunahme bzw. August: Abnahme).

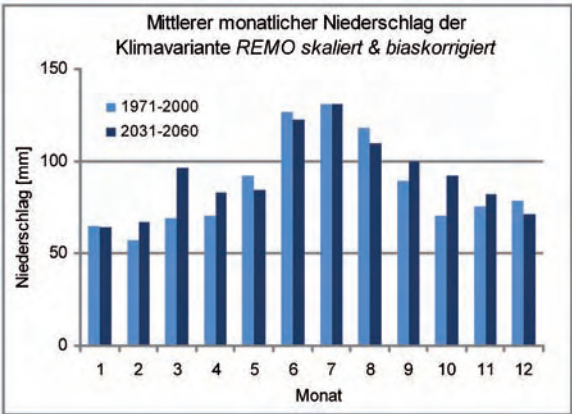
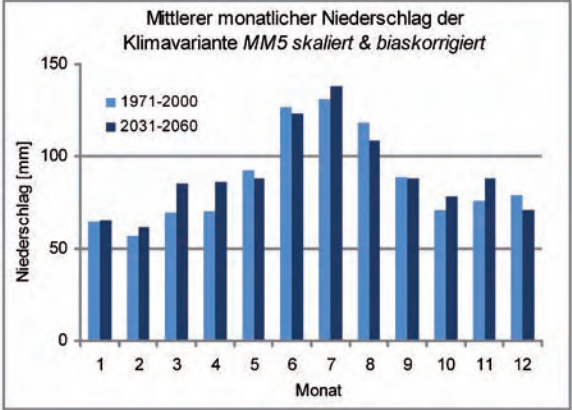


Abbildung S5.7: Mittlerer monatlicher Niederschlag im Einzugsgebiet der Oberen Donau für den Referenzzeitraum (1971-2000) und den Szenariozeitraum (2031-2060) nach *MM5 skaliert und biaskorrigiert* (oben) und *REMO skaliert & biaskorrigiert* (unten).

Zusammenfassung

Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, beschreiben die beiden Klimavarianten als skalierte und biaskorrigierte Modellergebnisse der regionalen Klimamodelle *MM5* und *REMO* für die untersuchten Zeiträume sehr ähnliche Änderungen von Temperatur und Niederschlag. Dies ist vor allem auf den lateralen Antrieb zurückzuführen, der bei beiden Modellen gleich ist und aus den Ergebnisdaten der selben ECHAM5-Simulation (A1B, Member 1) besteht.

Der Vergleich unterschiedlicher Analysemethoden (Vergleich von Referenz- und Szenariosimulationen sowie Trendanalysen) und Analysezeiträume hat gezeigt, dass das Klimaänderungssignal z.T. sehr stark von den verwendeten Methoden und den betrachteten Zeiträumen abhängt. Vor allem im Fall des Jahres- sowie des Winterniederschlags resultieren aus der verschiedenartigen Datenanalyse unterschiedliche, teilweise sogar gegensätzliche Änderungssignale. Die Unterschiede in den simulierten Änderungen des Niederschlags zwischen den Modellen in Kombination mit der Tatsache, dass bei Anwendung unterschiedlicher Analysemethoden und bei Betrachtung unterschiedlicher Zeiträume eine Differenz von ca. 10 % bei den Niederschlagsänderungen in Herbst und Winter bei beiden Klimavarianten aufgetreten ist, zeigen die Schwierigkeiten und Unsicherheiten in den Berechnungen zukünftiger Niederschlagsmengen.

Bei der Analyse und Interpretation der gezeigten Ergebnisse ist es wichtig zu berücksichtigen, dass hier nur eine einzelne Realisation innerhalb eines einzelnen global vorgegebenen Klimatrends berücksichtigt werden konnte, die dann mit *MM5* bzw. *REMO* weiter verfeinert wurde. Damit ist es noch nicht möglich, auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung Aussagen über Bandbreiten des zu erwartenden Klimawandels bzw. zu Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Klimaverläufe zu machen. Für eine genauere Abschätzung der Bandbreite möglicher Klimaänderungen und deren Auswirkungen müssen unterschiedliche Realisierungen innerhalb der Szenarien betrachtet werden. Die benötigte Fülle an Modellrealisationen steht bis heute leider nicht zur Verfügung, nicht zuletzt aufgrund des enorm hohen Rechenaufwandes derartiger Simulationen.

Die Ergebnisse aus den Simulationen von *REMO* und *MM5* weisen aber schon auf die zu erwartende Variabilität der simulierten Klimaentwicklungen hin. So zeigen die linearen Trends des Niederschlags in den Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert* für die Jahreszeiten Herbst und Winter eine Differenz von knapp 10 Prozentpunkten auf. Für Frühling und Sommer aber stimmen die Entwicklungen des Niederschlags nach den Berechnungen beider Modelle, mit einem Unterschied von nur 3 Prozentpunkten, im Wesentlichen überein. Der Vergleich des Verlaufs zeigt, dass *MM5* und *REMO* erst für die letzten 15-30 Jahre stärkere Abweichungen im Niederschlag simulieren, während sie für den Zeitraum 1970 bis ungefähr 2070 in ihren Ergebnissen sehr ähnliche Verläufe aufweisen.

Die Zunahme der Temperatur im Einzugsgebiet der Oberen Donau stellt sich in den Klimavarianten *MM5 skaliert & biaskorrigiert* und *REMO skaliert & biaskorrigiert* sehr ähnlich dar, wobei die Temperaturzunahme in der auf *REMO* Berechnungen basierenden Variante generell etwas höher ausfällt. Auch hier resultieren die Unterschiede in der Temperaturänderung zwischen den beiden Klimavarianten aus den unterschiedlichen Berechnungen der regionalen Klimamodelle für die letzten 2 Dekaden des 21. Jahrhunderts.

Literatur

Früh, B., Schipper, J. W., Pfeiffer, A. & Wirth, V. (2006): *A pragmatic approach for downscaling precipitation in alpine-scale complex terrain.* Meteorologische Zeitschrift, 15 (6), 631-646.

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., Bärring, L., Christensen, O., Christensen, J., de Castro, M., Déqué, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sánchez, E., Schär, C., Seneviratne, S., Somot, S., van Ulden, A. & B. van den Hurk (2007): *An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate.* Climatic Change, 81, S. 31-52.

Marke, T. (2008): *Development and application of a model interface to couple regional climate models with land surface models for climate change risk assessment in the Upper Danube watershed.* Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 188, München (<http://edoc.ub.uni-muenchen.de/9162/>).