

## S3 Der statistische Klimaantriebs-Generator

Zur Simulation und Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen der Oberen Donau werden Klimawirkungsmodelle mit meteorologischen Daten angetrieben, in denen szenariobasierte Klimatrends wiedergegeben sind. Die Ergebnisse der Szenario-Simulationen und die daraus gezogenen Schlüsse hängen wesentlich sowohl von den Annahmen zu den zukünftigen Klimatrends wie auch von Verfügbarkeit, Art und Qualität des meteorologischen Antriebs ab.

In GLOWA-Danube besteht der meteorologische Antrieb der Klimawirkungsmodelle aus einer Zeitserie von Feldern der meteorologischen Parameter Niederschlag, Strahlung (einkommend kurz- und langwelliger Anteil), Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit. Diese Felder werden von den Wirkungsmodellen in einer räumlichen Auflösung von  $1 \times 1 \text{ km}^2$  und in einer zeitlichen Auflösung von 1 h erwartet. Für die Vergangenheit wird der meteorologische Antrieb in GLOWA-Danube aus Daten meteorologischer Messnetze durch raum-zeitliche Interpolation erzeugt (siehe Kapitel 1.5-1.7). Dieser Antrieb dient u.a. zur Validierung der hydrologischen Klimawirkungsmodelle. Dieses Vorgehen ist für Szenarien, die die Zukunft behandeln, nicht möglich. Es gilt deshalb über unterschiedliche Verfahren die meteorologischen Antriebe zur Simulation von Zukunftsszenarien bereitzustellen.

Als Quelle für den meteorologischen Antrieb können Ergebnisse regionaler Klimamodelle, wie von *MM5*, *REMO* oder *CLM*, dienen. Zwar liefern die Ergebnisse von *REMO* und *MM5* stündliche Werte, da aber die räumliche Modellskala der regionalen Klimamodelle in der Regel gröber als 1 km ist, müssen ihre Ergebnisse durch einen Downscaling-Prozess der Modellskala der Klimawirkungsmodelle von *DANUBIA* angepasst werden. Hinzu kommen Verfahren zur Beseitigung systematischer Verzerrungen in den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle, die als Bias-Korrekturen bezeichnet werden. Die dazu entwickelten Ansätze, die dabei auftretenden Probleme und die erzielten Ergebnisse werden ausführlich in Kapitel S5 beschrieben.

Als weitere Quelle meteorologischer Antriebe bietet sich an, die historischen Messdaten der meteorologischen Messnetze auf geeignete Weise so neu zusammenzustellen, dass der dem jeweiligen Szenario zugrunde gelegte Klimatrend wiedergegeben wird. Der dazu entwickelte statistische Klimaantriebs-Generator, der im Weiteren vorgestellt wird, gehört zur Familie der Wettergeneratoren und dort zu den „nearest-neighbour resampling“ Ansätzen (Yates et al. (2003), Buishand and Brandsma (2001), Young (1994), Orłowsky et al. (2007)). Er verzichtet im Gegensatz zu wetterlagenabhängigen Ansätzen (Spekat et al., 2006) auf die Analyse der jeweiligen Wetterlage, generiert dafür aber stündliche Felder eines szenariobasierten zukünftigen Witterungsverlaufs.

Der Klimaantriebs-Generator beruht auf der Annahme, dass in der Vergangenheit bereits gemessene Witterungsverläufe in ähnlicher Weise auch in Zukunft auftreten werden, allerdings in unterschiedlicher Reihenfolge und Häufigkeit. Als Zeitintervall zur Charakterisierung eines Witterungsverlaufs wird eine Woche gewählt. Der Witterungsverlauf einer Woche in der Vergangenheit wird durch die wöchentliche Mitteltemperatur und mittlere Niederschlagssumme über alle Messstationen im Einzugsgebiet der Oberen Donau charakterisiert. Der weitere Prozess der Erzeugung synthetischer meteorologischer Antriebe aus meteorologischen Messungen besteht aus drei Schritten:

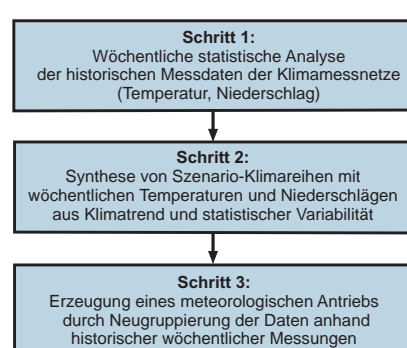


Abbildung S3.1: Schematisches Vorgehen bei der Erzeugung von zukünftigen meteorologischen Eingabedatensätzen mit Hilfe des statistischen Klimaantriebs-Generators.

### Schritt 1: Statistische Analyse der historischen Messdaten der Klimamessnetze

Im ersten Schritt werden die verfügbaren Daten des klimatologischen Messnetzes des DWD und des Österreichischen Wetterdienstes (siehe Kapitel 1.4) einer statistischen Analyse unterzogen. Dazu werden aus den Messdaten aller verfügbaren Stationen für jede wöchentliche Witterungsperiode Mitteltemperatur und gemittelte Niederschlagssumme aller Stationen im Untersuchungsgebiet bestimmt. Die Woche wurde als Zeitintervall gewählt, da sie gut mit der charakteristischen Zeitdauer der Wetterlagen im Untersuchungsgebiet korrespondiert. Sowohl Tief- als auch Hochdruckgebiete weisen in etwa diese Zeitdauer auf. Für jede Woche des verfügbaren historischen Datensatzes der 47 Jahre von 1960 bis 2006 erhält man damit je einen Wert für die Mitteltemperatur und für die gemittelte Niederschlagssumme. Für jede Woche des Jahres werden danach die 47 erhaltenen Wertepaare der Jahre 1960 bis 2006 einer linearen Regressionsanalyse unterzogen. Sie ergibt für jede Woche des Jahres für den betrachteten historischen Zeitraum die drei Größen mittlere Mitteltemperatur, mittlere gemittelte Niederschlagssumme sowie die Kovarianzmatrix zwischen beiden Größen. Die Kovarianzmatrix gibt sowohl Aufschluss über die Variabilität der Mitteltemperatur und der gemittelten Niederschlagssumme aller Stationen als auch über die Korrelation zwischen beiden Größen über den untersuchten Zeitraum. Zusammengefasst ergibt die Analyse den jahreszeitlichen Verlauf der genannten Größen und ihrer Kovarianz als wesentliche Charakteristika des regionalen Klimas der betrachteten Periode. Der aus den wöchentlichen Kovarianzmatrizen bestimmte wöchentliche Verlauf des Korrelationskoeffizienten zwischen Mitteltemperatur und gemittelter Niederschlagssumme im Analysezeitraum 1960-2006 ist in Abbildung S3.2 dargestellt.

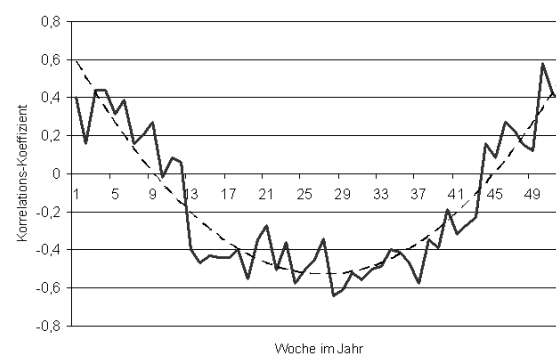


Abbildung S3.2: Verlauf des wöchentlichen linearen Korrelationskoeffizienten zwischen Mitteltemperatur und Niederschlagssumme der Stationen der klimatologischen Messnetze im Einzugsgebiet der Oberen Donau; Analysezeitraum: 1960-2006.

Abbildung S3.2 zeigt eine deutlich positive Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von ungefähr 0,4 um die Wochen 1 und 52. Dies bedeutet, dass eine Tendenz besteht, dass in diesen Wochen bei erhöhten mittleren Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet auch überdurchschnittlich viel Niederschlag fällt. Dieser Trend kehrt sich für die Sommerwochen 25 bis 28 um. Hier herrscht negative Korrelation, was bedeutet, dass in Wochen mit erhöhter mittlerer Lufttemperatur unterdurchschnittlich viel Niederschlag fällt. Beide Ergebnisse sind leicht nachzuvollziehen. Während im Winter eine überdurchschnittliche Temperatur im Untersuchungsgebiet i.d.R. mit südlichen Anströmrichtungen und erhöhtem Wasserdampfgehalt und damit mit mehr Niederschlag verbunden ist, ist eine erhöhte Temperatur im Sommer i.d.R. mit Hochdruckwetterlagen und damit reduziertem Niederschlag verbunden. In den Übergangsjahreszeiten um die Wochen 10 und 44 ist keine Korrelation vorhanden und damit auch keine Tendenz zu erkennen.

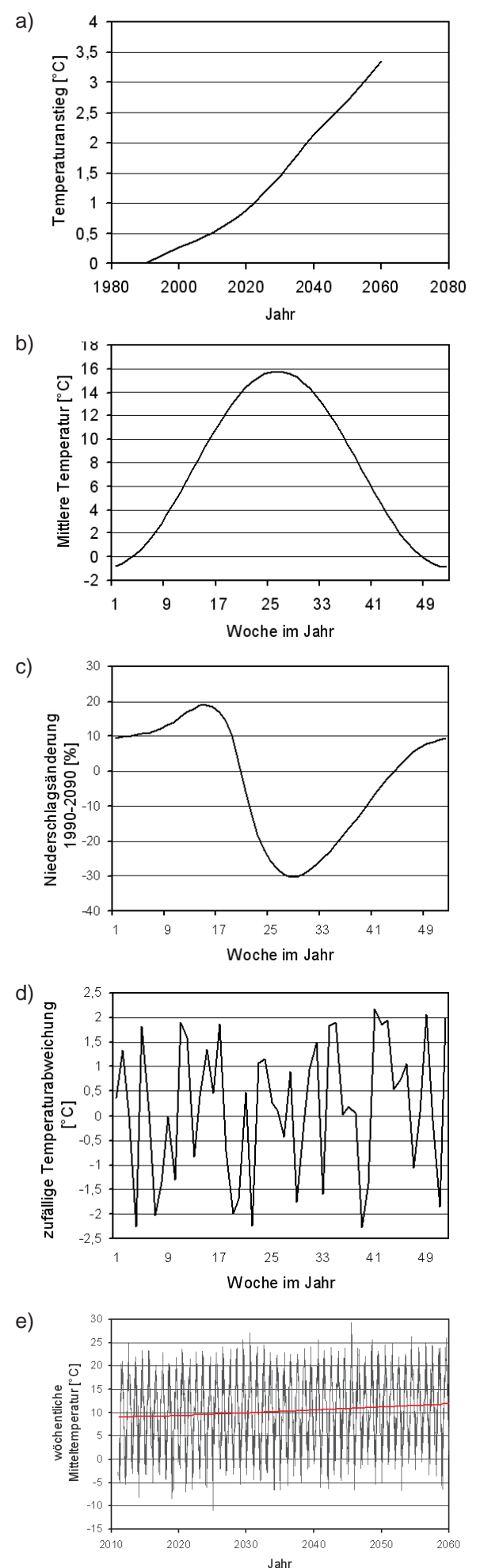
Der wöchentliche Verlauf der statistischen Kenngrößen Mitteltemperatur, Niederschlagssumme und ihre Kovarianzmatrix charakterisieren somit im gewählten Ansatz das Klima des historischen Untersuchungszeitraums. Nachdem die Analyse des historischen Klimas damit abgeschlossen ist, dienen die nächsten Schritte dazu, in einem umgekehrten Prozess mit Hilfe der statistischen Kenngrößen mögliche Witterungsverläufe eines zukünftigen Klimatrends zu synthetisieren. Dazu benötigt man zunächst wöchentliche Daten für Mitteltemperatur und mittlere Niederschlagssumme für den zukünftigen Szenariozeitraum.

### Schritt 2: Synthese von wöchentlichen Klima-Zeitreihen aus einem vorgegebenen Klimatrend

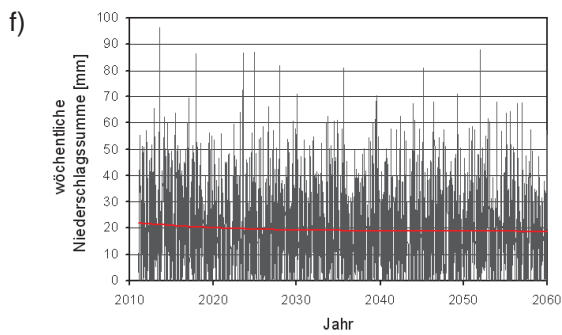
In Schritt 2 wird für einen gewählten regionalen Klimatrend (siehe Kapitel S2) für den Zeitraum von 2011 bis 2060 der zeitliche Verlauf der wöchentlichen Mitteltemperatur und der mittleren Niederschlagssumme bestimmt. Um für die Zukunft wöchentliche Wertepaare für die Mitteltemperatur und die Niederschlagssumme zu erhalten, werden vier Komponenten zeitlich überlagert:

1. die dem Klimatrend folgende Veränderung der jährlichen Mitteltemperatur
2. die jahreszeitliche Veränderung der Mitteltemperatur
3. die dem Klimatrend folgende Veränderung der mittleren Niederschlagssumme für jede Woche im Jahr
4. die statistisch-zufällige Schwankung von wöchentlicher Mitteltemperatur und Niederschlagssumme

Das Zusammenspiel der 4 Komponenten ist in Abbildung S3.3 a-f exemplarisch für die Erzeugung einer synthetischen wöchentlichen Klima-Zeitreihe für den Zeitraum von 2011 bis 2060 dargestellt.







**Abbildung S3.3:** Schematische exemplarische Darstellung der Erzeugung synthetischer wöchentlicher Zeitreihen von Mitteltemperatur und mittlerer Niederschlagssumme mit Hilfe des statistischen Klimaantriebs-Generators: a) angenommener Temperaturtrend an der Oberen Donau nach IPCC-A1B und einer Erwärmung von 5°C von 1990 bis 2100; b) Verlauf der wöchentlichen Mitteltemperatur im Untersuchungsgebiet 1960-2006; c) angenommener Niederschlagstrend als prozentuale Veränderung der wöchentlichen Niederschlagssumme zwischen 1990 und 2100 von Jacob et al. (2008); d) statistische Variabilität der wöchentlichen Mitteltemperatur aus den Kovarianzmatrizen der meteorologischen Daten von 1960-2006; e) Kombination von a), b) und d) zu einer Zeitreihe der wöchentlichen Mitteltemperatur 2011-2060; f) Kombination von a), c) und d) zu einer Zeitreihe der wöchentlichen Niederschlagssumme 2011-2060.

Es wird bei diesem fiktiven Beispiel angenommen, dass der Temperaturanstieg von 1990 bis 2100 im Untersuchungsgebiet einen Wert von 5°C betragen soll und in seinem Verlauf dem A1B-Szenario entsprechen soll (siehe Abbildung S3.3a), die jahreszeitliche Variation der Temperatur ist in Abbildung S3.3b dargestellt. Die angenommene prozentuale Veränderung des wöchentlichen Niederschlags von 1990 bis 2100 ist im vorliegenden Fall einer Trendanalyse des REMO-UBA Szenarios entnommen und in Abbildung S3.3c dargestellt. Sie wird der Temperaturerhöhung folgend für die laufenden Jahre anteilmäßig berücksichtigt. Abbildung S3.3d stellt die berechnete statistische Schwankung der Temperatur für ein beliebig herausgegriffenes Beispieljahr aus der Zeitserie von 2011 bis 2060 dar. Sie wurde mit einem Zufallsgenerator (Visual Numerics, 2006) aus den wöchentlichen Kovarianzmatrizen von Mitteltemperatur und Niederschlag bestimmt. Entsprechende statistische Schwankungen lassen sich durch fortgesetzte Anwendung des Zufallsgenerators für jede Woche des untersuchten Zeitraums bestimmen.

Eine synthetische Zeitreihe für den Verlauf der wöchentlichen Mitteltemperaturen der Jahre von 2011 bis 2060 entsteht nun, indem man den Temperaturtrend, die jahreszeitlichen Variationen der Temperatur und die statistischen Variabilitäten aller Wochen von 2011 bis 2060 überlagert. Der sich aus der Überlagerung ergebende Verlauf der wöchentlichen Mitteltemperaturen von 2011 bis 2060 ist in Abbildung S3.3e dargestellt. Neben den jahreszeitlichen Schwankungen sind der Trend (rote Linie) und die statistische Variabilität der Temperaturen klar zu erkennen. Die Erzeugung der Zeitreihe der wöchentlichen Niederschlagssummen geschieht entsprechend aus den Abbildungen S3.3a, S3.3c und einer Abbildung S3.3d entsprechenden statistischen Schwankung der mittleren Niederschlagssumme, wobei der Trend für seine jahreszeitliche Veränderung berücksichtigt wird und mit dem Zufallsgenerator die statistische Schwankung der Niederschlagssummen simuliert wird. Eine Zeitreihe der sich ergebenden wöchentlichen Niederschlagssummen für den Zeitraum von 2011 bis 2060 ist in Abbildung S3.3f dargestellt.

Bei der Bestimmung der statistischen Variabilitäten ist zu berücksichtigen, dass wöchentliche Mitteltemperatur und mittlere Niederschlagssumme voneinander abhängig sind. Diese Abhängigkeit folgt, wie in Abbildung S3.2 dargestellt, einem jahreszeitlichen Verlauf. Dies hat zur Folge, dass eine für die Temperatur mit dem Zufallsgenerator ermittelte zufällige positive Abweichung vom jeweiligen wöchentlichen Mittelwert im Winter auch in einer zufälligen, positiven Abweichung der Niederschlagssumme resultiert. Für die Sommermonate gilt nach Abbildung S3.2 entsprechend eine negative, auch zufällige, Abweichung. Um die gegenseitige Abhängigkeit der beiden Größen bei der Erzeugung der Variabilitäten zu berücksichtigen, wurde der zwei-dimensionale Zufallsgenerator RNMVN der IMSL-Statistik-Bibliothek (Visual Numerics, 2006) benutzt. Er bestimmt bei jedem Aufruf (also für jede Woche) auf der Grundlage der Mittelwerte und Kovarianzmatrizen unter

Annahme der Normalverteilung der beteiligten Größen zwei voneinander abhängige, normal verteilte Zufallszahlen für die wöchentliche Mitteltemperatur und die wöchentliche mittlere Niederschlagssumme. Mit dem Zufallsgenerator werden für jede Woche der Zeitreihe von 2011-2060 auf Grundlage der jeweils unterschiedlichen Mittelwerte und Kovarianzen unterschiedliche Wertepaare von Mitteltemperatur und Niederschlagssumme ermittelt. Der zeitliche Verlauf des Zufallsanteils der erzeugten Zeitreihe ist durch den Startwert des Zufallsgenerators bestimmt. Unterschiedliche Startwerte erzeugen reproduzierbar unterschiedliche, statistisch äquivalente Verläufe des Zufallsanteils.

Als Resultat von Schritt 2 können nun voneinander abhängige synthetische, zukünftige Zeitreihen von wöchentlicher Mitteltemperatur und Niederschlagssumme für den Zeitraum von 2011 bis 2060 erzeugt werden. Folgende Annahmen wurden bei der Erzeugung der Zeitreihen in Abbildung S3.3e und Abbildung S3.3f gemacht:

1. im gewählten Zeitraum von 2011 bis 2060 werden sich Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen nach einem jeweils zugrundeliegenden Klimatrend ändern. Die in GLOWA-Danube verwendeten Klimatrends sind ausführlich in Kapitel S2 dargestellt. Der Klimaantriebs-Generator ist in seiner Funktionsfähigkeit nicht auf die in S2 dargestellten Klimatrends beschränkt und kann damit unmittelbar von den Fortschritten der Forschung zum regionalen Klimawandel profitieren.
2. die zukünftige jahreszeitliche Amplitude der wöchentlichen Mitteltemperaturen wird sich, auch wenn die Temperaturen ansteigen werden, nicht wesentlich ändern. Diese Annahme stützt sich auf die Aussagen des IPCC (2007), nach denen die Region der Oberen Donau zwar eine deutliche Zunahme der mediterranen Klimakomponente erfahren wird, der Klimawandel aber nicht zu gänzlich neuen Witterungsverläufen führen wird.
3. die Kovarianzen von wöchentlicher Mitteltemperatur und mittlerer Niederschlagssumme und ihre in Abbildung S3.2 gezeigte gegenseitige Abhängigkeit wird sich im Zeitraum von 2011 bis 2060 nicht wesentlich ändern. Diese Annahme ermöglicht es, die aus den Daten der Periode 1960-2006 ermittelten Kovarianzmatrizen für die Ermittlung der statistischen Schwankungen in den Szenario-Klima-Zeitreihen zu verwenden. Auch hier gilt die Annahme, dass das Einzugsgebiet der Oberen Donau trotz Klimawandel in der heutigen Klimazone verbleiben wird.

### Schritt 3: Erzeugung neuer Datenreihe durch Neugruppierung historischer Daten

Die in Schritt 2 erzeugten wöchentlichen Zeitreihen der Mitteltemperatur und der mittleren Niederschlagssumme reichen als meteorologische Eingaben für DANUBIA nicht aus. DANUBIA benötigt stündliche Felder der meteorologischen Parameter mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km<sup>2</sup>.

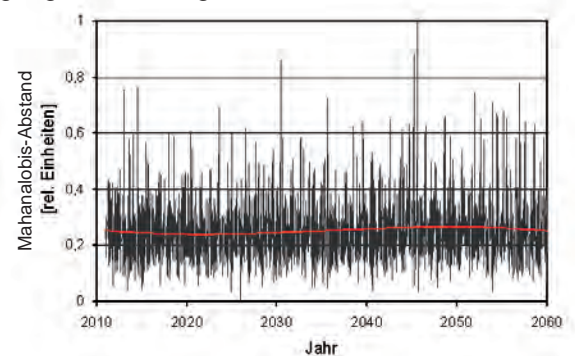
In Schritt 3 werden nun auf der Grundlage der Ergebnisse von Schritt 2 für den Zeitraum von 2011 bis 2060 aus den historischen meteorologischen Datensätzen des Deutschen und Österreichischen Wetterdienstes, die als Grundlage für die Validierung von DANUBIA dienen, die zukünftigen meteorologischen Datensätze durch Neugruppierung erzeugt.

Der Grundgedanke beim weiteren Vorgehen ist, dass die in Schritt 1 aus den historischen Zeitreihen ermittelten wöchentlichen Mitteltemperaturen und mittlere Niederschlagssummen den Witterungsverlauf der betrachteten Woche im gesamten Untersuchungsgebiet charakterisieren und damit für den Zugriff auf die in einer Datenbank wöchentlich abgelegten Messwerte aller benutzten Stationen einen Schlüssel bilden können. Für die Szenario-Zeitreihe von wöchentlicher Mitteltemperatur und mittlerer Niederschlagssumme als Ergebnis von Schritt 2 wird nun in der Datenbank für jede Woche diejenige historische Woche gesucht, die die ähnlichste Kombination von wöchentlicher Mitteltemperatur und Niederschlagssumme aufweist. Der komplette Datensatz der jeweils ausgewählten historischen Woche wird für die betrachtete Szenario-Woche übernommen. Er besteht aus allen me-

teorologischen Messdaten aller Stationen im Untersuchungsgebiet und bildet einen Satz in sich konsistenter, weil gemessener, meteorologischer Stationsdaten. Nachdem man dieses Vorgehen für alle Wochen der Periode 2011 bis 2060 durchgeführt hat, erhält man einen auf historischen Messdaten beruhenden, neu gruppierten meteorologischen Datensatz für den gesamten Szenariozeitraum. Er besteht zum einen aus gleichzeitigen historischen Messungen der benutzten Stationen und zeichnet zum anderen den gewählten zukünftigen Klimatrend nach.

Zur Identifikation derjenigen historischen Woche, die der zukünftigen Woche klimatologisch am ähnlichsten ist, wurde das maximum-likelihood Kriterium herangezogen. Dafür wird der Mahalanobis-Abstand zwischen allen historischen und der betrachteten zukünftigen Woche im Merkmalsraum, der durch die wöchentliche Mitteltemperatur und mittlere Niederschlagssumme aufgespannt wird (Mahalanobis, 1936), als Maß für die klimatologische Ähnlichkeit berechnet. Es berücksichtigt unter der Voraussetzung von Normalverteilungen durch Nutzung der Mittelwerte und Kovarianzen die unterschiedliche Streuung von Mitteltemperatur und mittlerer Niederschlagssumme sowie die Abhängigkeit beider Größen voneinander. Dieses Maß ist umgekehrt proportional zur Wahrscheinlichkeit, dass eine gesuchte historische Woche den gleichen Witterungsverlauf aufweist wie die untersuchte Referenzwoche im Szenario. Diejenige historische Woche, die den kleinsten Mahalanobis-Abstand zur betrachteten Szenario-Woche aufweist und ihr damit in ihrem Witterungsverlauf am ähnlichsten ist, wird in den neuen Datensatz übernommen, unabhängig davon, wann im Jahr sie aufgetreten ist.

Abbildung S3.4 zeigt exemplarisch den Mahalanobis-Abstand für alle Wochen von 2011 bis 2060 für die Klimavariante *Baseline* (siehe Kapitel S4) des Klimatrends *Fortschreibung* (siehe Kapitel S2). Der Mahalanobis-Abstand zeigt im betrachteten Szenario-Zeitraum keinen zeitlichen Trend. Dies bedeutet, dass sich die mittlere Ähnlichkeit zwischen den in Schritt 2 bestimmten zukünftigen wöchentlichen Mittelwerten und den gewählten, in der Vergangenheit gemessenen, wöchentlichen Mittelwerten während des Szenario-Zeitraums von 2011-2060 nicht ändert. Ein Anstieg des Mahalanobis-Abstandes mit der Zeit würde bedeuten, dass die Ähnlichkeit der Szenario-Wochen aus Schritt 2 mit der aus den gemessenen Wochen jeweils gewählten Woche mit zukünftig stärkerem Einfluss des Klimawandels immer schwächer würde. Dies wäre ein Zeichen dafür, dass im Szenario vermehrt Wochen auftreten, für die man in der Vergangenheit keine Entsprechung findet und die somit so in der Vergangenheit nicht gemessen wurden.



**Abbildung S3.4:** Mahalanobis-Abstand zwischen der gewählten historischen und der zukünftigen Woche auf der Grundlage von wöchentlicher Mitteltemperatur und Niederschlagssumme.

Nach Ausführung der Schritte 1-3 steht ein neuer meteorologischer Antrieb zur Verfügung, der einen definierten Temperaturtrend aufweist, einer vorgegebenen zeitlichen Veränderung des Niederschlags folgt und die gleichen Variabilitäten wie der gemessene historische Datensatz aufweist. Er besteht aus räumlich und physikalisch konsistenten, weil gemessenen, Daten in gleichem Format, gleicher Güte und gleicher räumlicher und zeitlicher Auflösung wie diejenigen historischen Daten, die zur Validierung von DANUBIA benutzt wurden. Aus ihm wird dann, wie im Fall der Validierung von DANUBIA, durch raumzeitliche Interpolation der meteorologische Szenario-Antrieb erstellt.

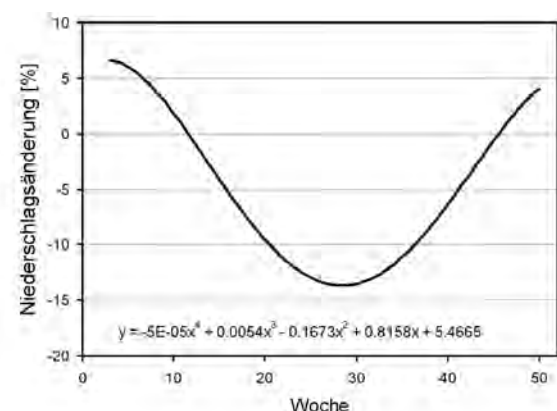
Neben diesen Vorteilen besitzt das beschriebene Vorgehen auch Nachteile. So sind extreme Stark-



niederschläge, die über die bereits erfassten Niederschlagsereignisse hinaus gehen, nicht darstellbar. Auch kann eine Veränderung der Persistenz von Wetterlagen für Zeiträume, die über eine Woche hinausreichen, nicht berücksichtigt werden und es entstehen, zufällig verteilt, zwischen angrenzenden Wochen Sprünge, die in ihrem Ausmaß allerdings nicht über das in der Natur beobachtete hinaus gehen. Das vorgestellte Verfahren des statistischen Klimaantriebs-Generators ist aber durchaus in der Lage neue, bisher nicht aufgetretene Feucht- oder Trockenperioden zu generieren, indem der ansteigende Temperaturtrend häufigere und länger andauernde Aneinanderreihungen bisheriger wöchentlicher Trocken- bzw. Feuchtperioden hervorbringt.

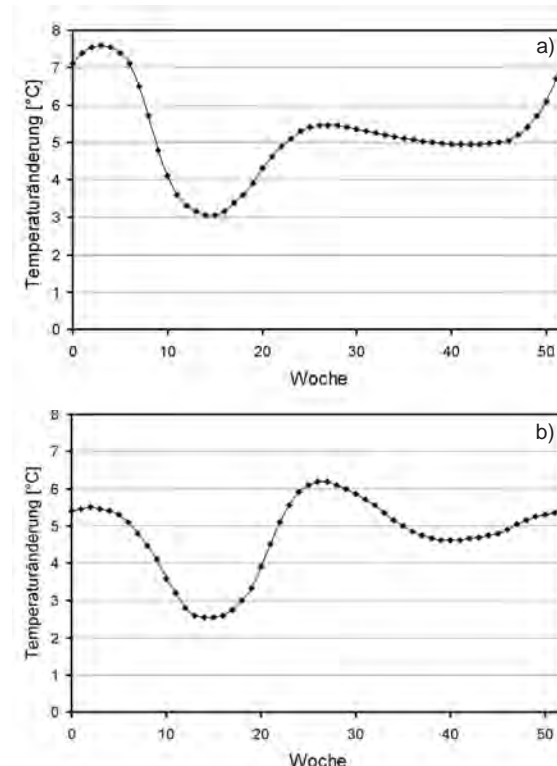
### Wöchentliche Verläufe der Klimatrends

Der Klimaantriebs-Generator wurde bisher in seiner prinzipiellen Funktionsweise exemplarisch dargestellt. Er bildet eine Grundlage für die weitere Umsetzung der in Kapitel S2 vorgestellten vier Klimatrends. Neben dem jährlichen Temperaturtrend wird im statistischen Klimaantriebs-Generator damit für jeden Klimatrend neben dem Jahresgang der Veränderung der wöchentlichen Mitteltemperatur auch die Veränderung der wöchentlichen Niederschlagssumme als Eingabe benötigt. Es gilt also, die wöchentliche Verteilung der Niederschlagsänderung aus den jahreszeitlichen Angaben zu den möglichen Niederschlagsänderungen in Tabelle S2.4 des Kapitels S2 abzuleiten. Dies geschieht durch Interpolation zwischen den in der Tabelle vorgegebenen Stützstellen unter Sicherstellung der vorgegebenen jahreszeitlichen Mittelwerte der Veränderung. Für den wöchentlichen Verlauf der Veränderung der Niederschlagssumme zwischen 1990 und 2100 wurde im Klimatrend *IPCC regional* der in Abbildung S3.5 aufgezeigte Verlauf interpoliert.



**Abbildung S3.5:** Wöchentlicher Verlauf der prozentualen Veränderung des Niederschlags im Einzugsgebiet der Oberen Donau aus dem Vergleich der Ergebnisse der globalen Modelle nach IPCC (2007) im Zeitraum von 1990 bis 2100.

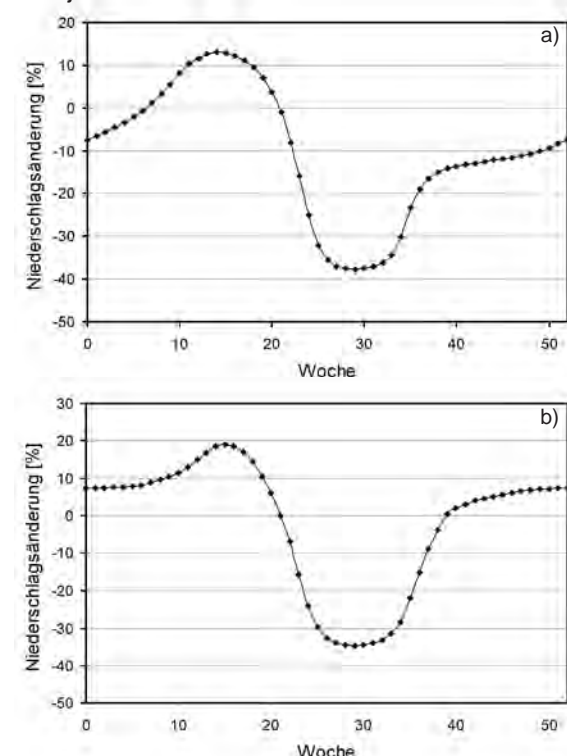
Die jahreszeitlichen Angaben zur Veränderung des Niederschlags und der Temperatur der regionalen Klimatrends von *REMO* und *MM5* (siehe Kapitel S2, Tabelle S2.4) erlauben eine Interpolation sowohl auf wöchentliche prozentuale Ver-



**Abbildung S3.6:** Wöchentlicher Verlauf der Veränderung der Temperatur im Einzugsgebiet der Oberen Donau auf Basis der saisonalen Ergebnisse a) des regionalen Klimamodells *REMO* nach Jacob et al. (2008) und b) des regionalen Klimamodells *MM5* im Zeitraum von 1990 bis 2100.

änderungen des Niederschlags als auch auf wöchentliche Temperaturänderungen für die Periode 1990-2100. Auch hier wurde die Interpolation so durchgeführt, dass die jahreszeitlichen Durchschnittswerte bei der Interpolation erhalten bleiben. Die Ergebnisse sind in Abbildung S3.6 zu sehen.

Der wöchentliche Verlauf der Temperaturänderung von *REMO* in Abbildung S3.6a weist mit mehr als +7°C in der Spitze ein ausgeprägtes Maximum im Spätwinter auf. Demgegenüber fällt der Temperaturanstieg im Frühjahr mit minimal 3°C bedeutend geringer aus. In den restlichen Jahreszeiten bewegt er sich um die 5°C. Die Änderungen der Temperaturen bei *MM5* bewegen sich in derselben Größenordnung, sind allerdings in ihren jahreszeitlichen Schwankungen deutlich weniger ausgeprägt. Das Minimum des Temperaturanstiegs liegt bei beiden Modellergebnissen im Frühjahr.



**Abbildung S3.7:** Wöchentlicher Verlauf der prozentualen Veränderung des Niederschlags im Einzugsgebiet der Oberen Donau auf Basis der saisonalen Ergebnisse a) des regionalen Klimamodells *REMO* nach Jacob et al. (2008) und b) des regionalen Klimamodells *MM5* im Zeitraum von 1990 bis 2100.

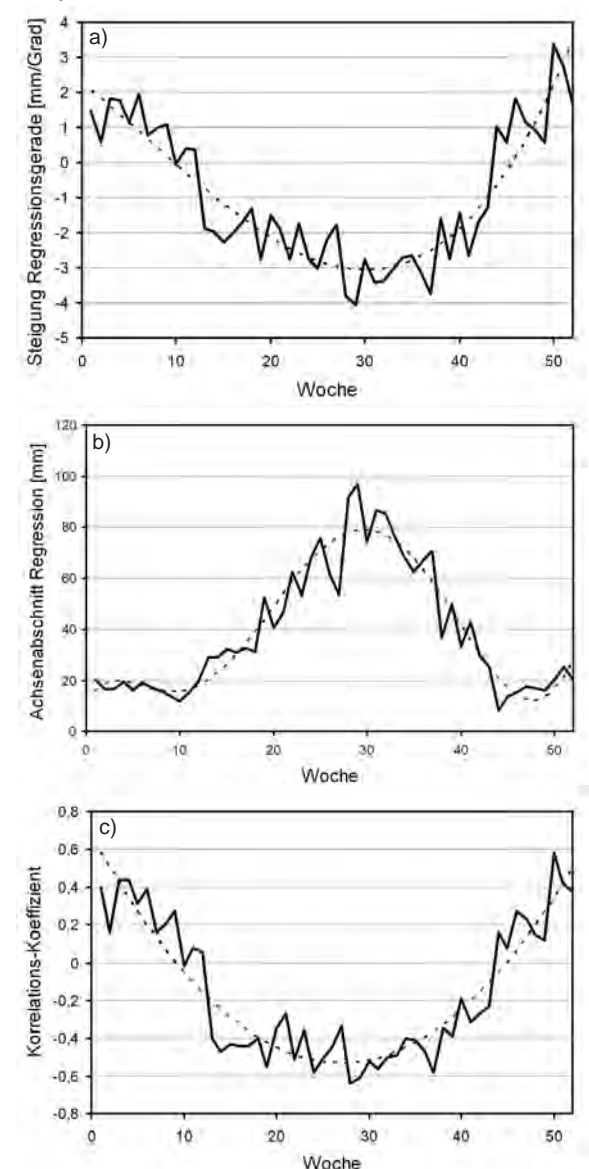
Die Veränderung des Niederschlags im Einzugsgebiet nach IPCC (siehe Abbildung S3.5) und der regionalen Klimamodellierung mit *REMO* (siehe Abbildung S3.7a) unterscheiden sich in ihrem generellen Trend vor allem im Winter. Hier zeigt IPCC eine Zunahme des Niederschlags, während bei der *REMO*-Simulation der Niederschlag im betrachteten Zeitraum abnimmt. *REMO* zeigt dem gegenüber eine deutliche Zunahme des Niederschlags in den Frühjahrsmonaten. Insgesamt sind die jahreszeitlichen Veränderungen in den Ergebnissen des regionalen Klimamodells *REMO* bedeutend stärker ausgeprägt als in den gemittelten Ergebnissen der globalen Klimamodelle.

Dasselbe gilt generell auch für die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung mit *MM5*, wobei der Trend zur Austrocknung bei *MM5* gegenüber *REMO* gedämpfter ausfällt. Auch hier nimmt allerdings der Niederschlag bis 2100 am stärksten im Frühjahr zu, im Winter ist ebenfalls eine Zunahme des Niederschlags zu verzeichnen während auch *MM5* eine deutliche Reduzierung der Niederschläge während der Sommermonate zeigt.

Für den vierten gewählten Klimatrend, die *Fort-schreibung* des weiteren Temperaturverlaufs auf Basis der bereits gemessenen historischen Temperaturerhöhungen, ist eine Abschätzung der wöchentlichen zukünftigen Veränderungen des Niederschlags in Form jahreszeitlicher prozentualer Veränderungen aufgrund der in Kapitel 1.9 bereits gezeigten geringen statistischen Signifikanz der historischen Niederschlagstrends nicht angebracht. Für die Ermittlung der möglichen zukünftigen Niederschlagsänderung musste daher eine andere Strategie gewählt werden.

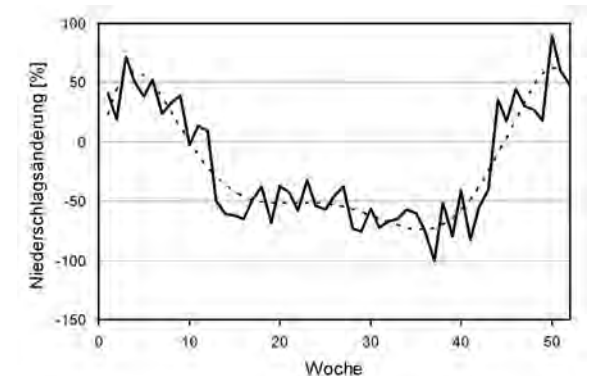
Diese besteht darin, den in den historischen Messdaten enthaltenen statistischen Zusammenhang zwischen der wöchentlichen Mitteltemperatur und der wöchentlichen Niederschlagssumme zu analysieren. Hierfür wurde für jede

Woche im Jahr für die 47 vorliegenden Messjahre eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die sich im Verlauf des Jahres ändernde Beziehung zwischen beiden Größen ist in den Abbildungen S3.8a-c zusammengefasst. In Abbildung 3.8a ist die Sensitivität der mittleren Niederschlagssumme gegenüber Temperaturänderungen als Steigung der Regressionsgeraden für jede Woche im Jahr aufgetragen. In Abbildung 3.8b ist der Achsenabschnitt der Regressionsgeraden dargestellt, Abbildung 3.8c stellt den wöchentlichen Korrelationskoeffizienten der Regressionsgeraden dar. Abbildung 3.8c zeigt deutlich positive Korrelationskoeffizienten im Winter und negative Korrelationskoeffizienten im Sommer. Wenn man für die Zukunft annimmt, dass sich diese Beziehungen nicht verändern, bedeutet dies bei steigenden Lufttemperaturen steigende Niederschläge im Winter und sinkende Niederschläge im Sommer. Dies entspricht den Ergebnissen des IPCC und mit Einschränkungen auch des UBA in Abbildung S3.6 und S3.7. Die gezeigten wöchentlichen Beziehungen können nun dazu genutzt werden, um die mit dem zukünftigen Temperaturanstieg verbundenen Niederschlagsänderungen zu quantifizieren.



**Abbildung 3.8:** Ergebnisse der linearen wöchentlichen Regressionsanalyse der Beziehung zwischen Mitteltemperatur und Niederschlagssumme in den gemessenen Klimadaten des Zeitraums 1960 bis 2006 (n=47) im Einzugsgebiet der Oberen Donau a) Steigung, b) Achsenabschnitt, c) Korrelationskoeffizient der Regressionsgeraden.

Aus den statistischen Analysen lassen sich unter der Annahme, dass sich die gefundenen statisti-



**Abbildung S3.9:** Prozentuale Veränderung der wöchentlichen Niederschlagssumme zwischen 1990 und 2100 im Klimatrend *Fortschreibung* bei einem angenommenen Temperaturanstieg von 5.2°C von 1990 bis 2100 unter Nutzung der historischen statistischen Beziehung zwischen Temperatur und Niederschlag aus Abbildung S3.8.

schen Beziehungen auf die zukünftigen meteorologischen Verhältnisse übertragen lassen, die pro-



zentualen Änderungen der wöchentlichen Niederschlagssumme bei einer im Klimatrend *Fort-schreibung* angenommenen Temperaturerhöhung von 5.2°C im Zeitraum 1990 bis 2100 bestimmen. Diese sind in Abbildung S3.9 dargestellt und korrespondieren mit den Ergebnissen in Abbildung S3.5.

Fasst man die prozentuale Veränderung des Niederschlags in Abbildung S3.9 für die verschiedenen Jahreszeiten zusammen, so ergeben sich die in Tabelle S3.1 angegebenen Werte.

Jahreszeit	Niederschlagsveränderung 1990-2100 [%]
Winter (DJF)	+47.0
Frühjahr (MAM)	-41.8
Sommer (JJA)	-68.8
Herbst (SON)	-2.1
Jahresmittel	-16.4

**Tabelle S3.1: Jahreszeitliche Veränderung des Niederschlags im Einzugsgebiet der Oberen Donau auf der Grundlage des Klimatrends Fortschreibung.**

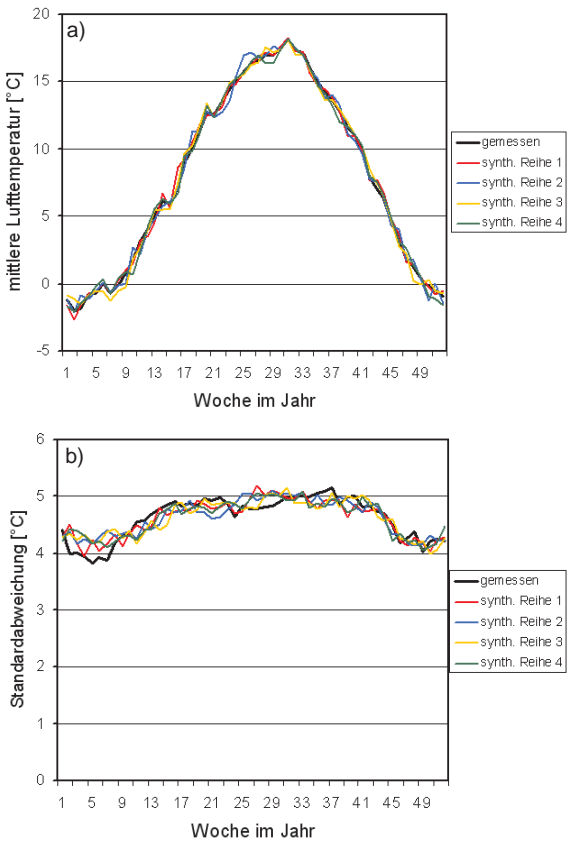
Der in Abbildung S3.9 gezeigte Verlauf der prozentualen Niederschlagsänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau zwischen 1990 und 2100, der auf der Basis des historischen statistischen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Niederschlag im Zeitraum von 1960 bis 2006 ermittelt wurde, ähnelt dem des Klimatrends *IPCC regional*, der in Abbildung S3.5 dargestellt wurde, zeigt allerdings bedeutend größere Ausschläge im Winter wie auch im Sommer.

### Validierung des statistischen Klimaantriebs-Generators

Voraussetzung für eine Nutzung des statistischen Klimaantriebs-Generators im Projekt GLOWA-Danube ist die erfolgreiche Validierung des Ansatzes. Nachdem, wie in Abbildung S3.4 gezeigt, sicher gestellt ist, dass der Fehler bei der Auswahl der ähnlichsten historischen Woche für den meteorologischen Szenario-Datensatz nicht mit der Szenario-Zeit anwächst, soll nun untersucht werden, wie gut der Klimaantriebs-Generator dazu geeignet ist, das Klima der Vergangenheit und seine statistischen Eigenschaften zu reproduzieren. Hierzu wurden mit der beschriebenen Methode vier synthetische meteorologische Antriebe für die Jahre 1960 bis 2006 erzeugt. Sie unterscheiden sich durch den jeweils gewählten Startwert für den Zufallsgenerator. Die Startwerte wurden wiederum zufällig ausgewählt, um eine systematische Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden. Die vier Datensätze sind zu dem gemessenen Datensatz statistisch äquivalent, was im betrachteten Fall bedeutet, dass sie:

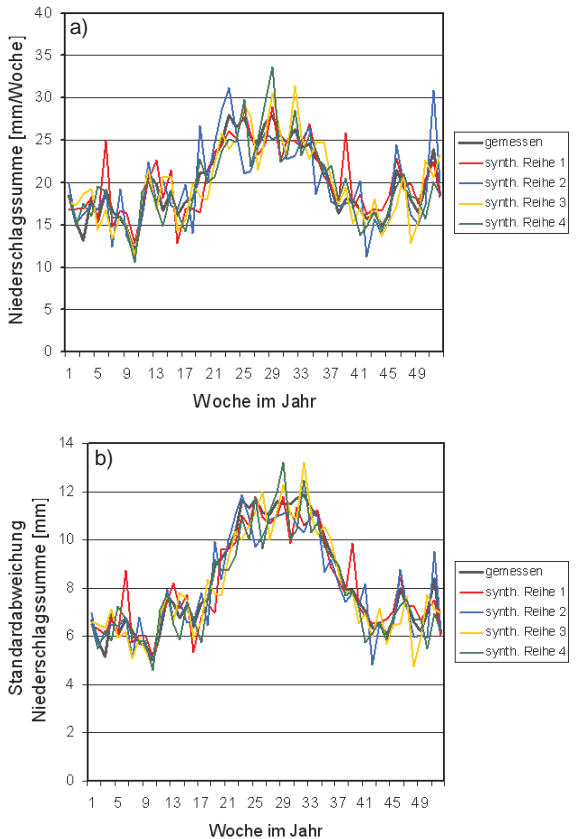
1. im Betrag und jahreszeitlichen Verlauf der wichtigsten mittleren klimatologischen Parameter Temperatur und Niederschlag mit den gemessenen Klimadaten ähnlich sind, das heißt der gleichen statistischen Grundgesamtheit angehören. Für einen Vergleich wurden die wöchentliche Mitteltemperatur und ihre Streuung, die mittlere wöchentliche Niederschlagssumme und ihre Streuung sowie die Intensität der Niederschläge und die Anzahl der Niederschlagsereignisse pro Woche herangezogen. Die Nutzung des Zufallsgenerators auf der Grundlage der aus den gemessenen Daten bestimmten Mittelwerte und Kovarianzmatrizen gewährleistet diese Annahme.
2. für abgeleitete statistische meteorologische Kennwerte des historischen Klimas vergleichbare Werte wie die gemessenen Daten liefern. Hierzu wurden die Kennwerte Jahresmitteltemperatur, mittlere jährliche Niederschlagssumme, Anzahl der Sommertage und Anzahl der Frosttage gewählt.
3. beim Antrieb von DANUBIA für statistische hydrologische Kenngrößen vergleichbare Werte liefern wie die gemessenen meteorologischen Daten. Hierzu wurden die Kenngrößen mittlerer Abfluss MQ, 1-jährlicher Hochwasserabfluss HQ<sub>1</sub>, 100-jährlicher Hochwasserabfluss HQ<sub>100</sub>, 100-jährlicher mittlerer 7-tägiger Niedrigwasserabfluss MN7Q<sub>100</sub> sowie die mittlere Dauerlinie am Pegel Achleiten (Auslass des Einzugsgebiets der Oberen Donau, A = 77 000 km<sup>2</sup>) sowie Oberaudorf am

Inn gewählt (Zufluss des Inn nach Deutschland, A = 9 000 km<sup>2</sup>).



**Abbildung S3.10: a) Vergleich der Verläufe der mittleren wöchentlichen Mitteltemperaturen im Untersuchungsgebiet für die Jahre 1960-2006 für die gemessenen und vier synthetisch erzeugten Klimadatenreihen, b) Vergleich der Standardabweichung der wöchentlichen Mitteltemperaturen für die Jahre 1960-2006 für die gemessenen und vier synthetisch erzeugten Klimadatenreihen.**

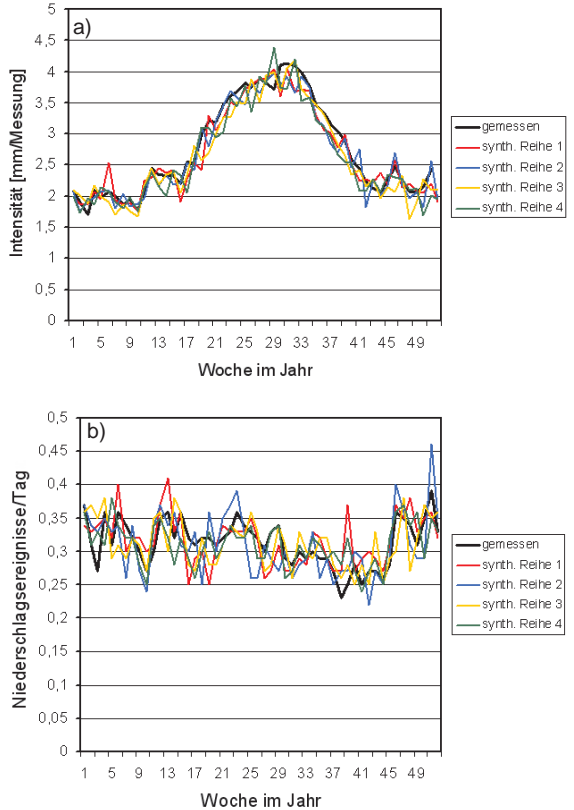
In Abbildung S3.10a werden die Verläufe der mittleren wöchentlichen Mitteltemperaturen im Einzugsgebiet für den Zeitraum von 1960 bis 2006 aus dem gemessenen Datensatz mit denen der synthetisch erstellten Datensätze verglichen. Die Verläufe aller fünf Datensätze stimmen im Wesentlichen überein. Abbildung S3.10b zeigt die Standardabweichungen der wöchentlichen Mitteltemperaturen um den Mittelwert aus Abbildung S3.10a. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den synthetisch erstellten Daten zu erkennen.



**Abbildung S3.11: a) Vergleich der Jahresverläufe der mittleren wöchentlichen gemittelten Niederschlagssummen im Untersuchungsgebiet für die Jahre 1960-2006 für die gemessenen und vier synthetisch erzeugten Klimadatenreihen, b) Vergleich der Standardabweichung der wöchentlichen gemittelten Niederschlagssummen für die Jahre 1960-2006 für die gemessenen und vier synthetisch erzeugten Klimadatenreihen.**

Abbildung S3.11 zeigt die entsprechenden Verläufe für die mittleren wöchentlichen über alle Stationen gemittelten Niederschlagssummen. Auch hier fällt die generelle Übereinstimmung zwischen gemessenem und den synthetisch bestimmten Verläufen auf, allerdings zeigen die synthetisch erstellten Datensätze in manchen

Wochen eine deutlichere Abweichung vom gemessenen Mittelwert. Die in Abbildung S3.11b gezeigte Streuung der wöchentlichen Niederschlagssummen um den Mittelwert ist in allen Datensätzen weitgehend identisch und nimmt mit den konvektiven Niederschlägen im Sommer stark zu.



**Abbildung S3.12: a) Vergleich der Verläufe der mittleren wöchentlichen Niederschlagsintensität im Untersuchungsgebiet für die Jahre 1960-2006 für die gemessenen und vier synthetisch erzeugten Klimadatenreihen, b) Vergleich der mittleren täglichen Anzahl von Niederschlagsereignissen für die Jahre 1960-2006 für die gemessenen und vier synthetisch erzeugten Klimadatenreihen.**

Als weitere Kriterien für den Vergleich zwischen den gemessenen und synthetisch erzeugten Klimadaten wurden die mittlere Intensität des Niederschlags (mm Niederschlag pro Messzeitpunkt) sowie die mittlere Anzahl der Niederschläge pro Tag herangezogen. Diese sollen zeigen, ob sich die mittlere Dynamik der Niederschläge bei der Erzeugung der synthetischen Datenreihen verändert hat. Die Ergebnisse der Analyse in Abbildung S3.12 bestätigen die große Übereinstimmung der gemessenen und synthetischen Klimadatenreihen.

Zusammenfassend sind in Tabelle S3.2 die Ergebnisse der Analyse der vier Klimaparameter Mitteltemperatur, Jahresniederschlag, Anzahl der Sommertage und Anzahl der Frosttage sowohl für die gemessenen als auch für die vier synthetisch erzeugten Datenreihen über den Zeitraum 1960 bis 2006 gegenüber gestellt. Für die Ermittlung der Klimaparameter wurden die Werte aller Rasterzellen des Einzugsgebiets der Oberen Donau gemittelt. Tabelle S3.2 zeigt, dass auch die gewählten Klimaparameter für die gemessenen und synthetisch erzeugten meteorologischen Antriebe weitgehend übereinstimmen. Als zweiter Schritt der Validierung des statistischen Klimaantriebs-Generators wurden der gemessene Datensatz und die vier synthetisch erzeugten Datensätze als Eingabedaten für DANUBIA genutzt, um für den Zeitraum von 1960 bis 2006 für jedes Proxel im Einzugsgebiet der Oberen Donau den Abfluss stündlich zu berechnen und auf Tageswerte zu aggregieren. Die Abflussdaten, die unter Benutzung des gemessenen Datensatzes erzielt wurden, entsprechen denen der Karte 2.1.2, in der die Validierungen des hydrologischen Teils von DANUBIA dargestellt sind. Für die Abflusszeitreihen der 5 Simulationen wurden die in Tabelle S3.3 dargestellten Größen ermittelt.

Während der mittlere Abfluss als Resultat der gemessenen und synthetischen Antriebe ähnliche Werte liefert, fällt zunächst eine deutliche Überschätzung des HQ<sub>100</sub> in Spalte 3 auf, der auf der Grundlage von gemessenen Klimadaten berechnet wurde. Die Überschätzung des HQ<sub>100</sub> im Modell ist vor allem auf die Vernachlässigung der menschlichen Eingriffe auf den Hochwasserverlauf durch gezielte Steuerung der vorhandenen Speicher sowie auf die Vernachlässigung der Ausuferung der Flüsse im Modell zurückzuführen.

Zeitreihe 1960-2006	Gemessene Werte	Synth. Reihe 1	Synth. Reihe 2	Synth. Reihe 3	Synth. Reihe 4	Mittelwert Spalte 3-6
Mitteltemperatur [°C]	7.95	7.97	7.92	8.14	8.00	8.00
Jahres-Niederschlag [mm]	1039.9	1034.6	1031.1	1060.0	1037.2	1040.7
Anzahl Sommertage	19,5	19,7	20,2	19,3	19,6	19,7
Anzahl Frosttage	130,6	129,2	131,5	133,2	131,7	131,4

Tabelle S3.2: Vergleich von Klimaparametern der gemessenen Daten mit den vier synthetischen Zeitreihen für das Einzugsgebiet der Oberen Donau im Zeitraum 1960-2006.

	aus Pegeldaten 1960-2006	modelliert mit gem. Klimadaten	modelliert mit Synth. Reihe 1	modelliert mit Synth. Reihe 2	modelliert mit Synth. Reihe 3	modelliert mit Synth. Reihe 4	Mittelwert aus Spalte 4-7
MQ	1450.0	1498.1	1463.7	1456.5	1560.1	1454.0	1483.6
HQ <sub>1</sub>	3827	4206.4	3841.6	3900.3	3928.3	3506.1	3794.1
HQ <sub>100</sub>	6755	8187.4	6662.6	9987.4	6045.5	6828.5	7381.0
NM7Q <sub>100</sub>	476	418.9	350.7	345.6	291.4	296.7	321.7

Tabelle S3.3: Vergleich hydrologischer Kennwerte mittlerer Abfluss MQ, 1-jährlicher (HQ<sub>1</sub>), 100-jährlicher Hochwasserabfluss (HQ<sub>100</sub>) und 100-jährlicher mittlerer 7-tägiger Niedrigwasserabfluss NM7Q<sub>100</sub> der vier synthetischen Zeitreihen und deren Mittelwerte mit den am Pegel Achleiten gemessen Abflüssen und den mit den gemessenen Klimadaten modellierten Abflüssen der Periode 1960 bis 2006.

ren. Beide haben bei den gehäuft auftretenden großen Hochwässern vor allem im Zeitraum zwischen 1997 und 2005 zu einer Reduzierung der gemessenen Hochwasserspitzen geführt. Weiter fällt die starke Streuung der HQ<sub>100</sub>-Werte innerhalb der Ergebnisse der vier benutzten synthetischen Zeitreihen auf. Dies deutet darauf hin, dass der HQ<sub>100</sub> sehr empfindlich auf die in der betrachteten Periode (hier 1960-2006) auftretenden Extremniederschläge reagiert. Ebenfalls auffällig ist die leichte Unterschätzung des NM7Q<sub>100</sub> in den Modellergebnissen mit gemessenen Daten sowie eine mittlere bis starke Unterschätzung des NM7Q<sub>100</sub> in den Ergebnissen mit den synthetischen Zeitreihen. Die leichte Unterschätzung in Spalte 3 ist darauf zurückzuführen, dass die in den letzten Jahren einsetzenden Maßnahmen zur Niedrigwasseraufhöhung durch Nutzung der Speicher im Einzugsgebiet im Modell z.Zt. nicht abgebildet werden. Die Ursache für die mittlere bis starke Unterschätzung des extremen Niedrigwassers in den Ergebnissen der synthetischen Zeitreihen konnte bisher nicht geklärt werden.

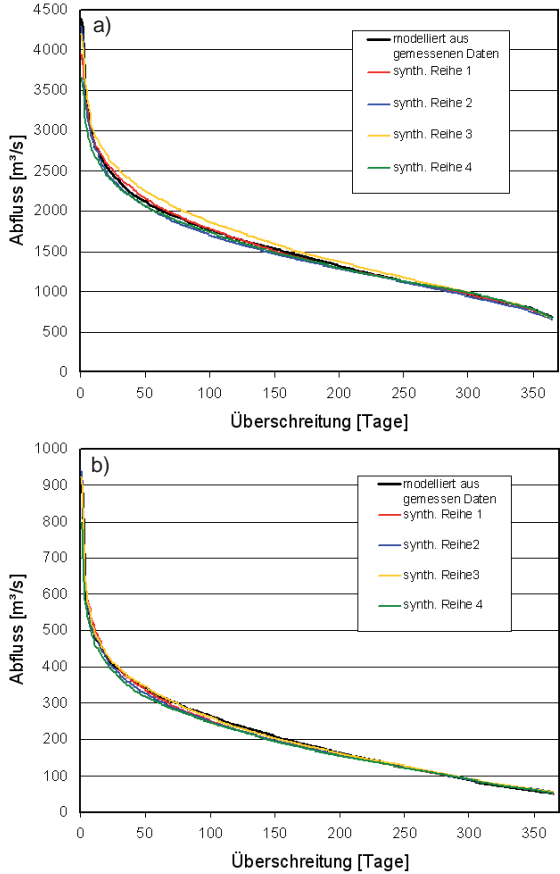


Abbildung S3.13: Überschreitungs-Dauerlinien für den Zeitraum 1960-2006 für die mit den gemessenen Klimadaten modellierten Abflüsse sowie für die 4 synthetischen Datenreihen, a) Pegel Achleiten (Donau), b) Pegel Oberaudorf (Inn).

Als dritter Schritt wurden die mit den gemessenen und den synthetischen Datenreihen erzeugten Dauerlinien an den Pegeln Achleiten am Ausgang des Untersuchungsgebiets und Oberaudorf am Ausgang des Innals ins Alpenvorland miteinander verglichen. Die Dauerlinien geben Auskunft darüber, an wie vielen Tagen ein bestimmter Abfluss über- bzw. unterschritten wird und stellen damit die Dynamik des Abflusses im Untersuchungsgebiet dar. Sie bilden eine wichtige Planungsgrundlage für die Wasserwirtschaft und speziell die Wasserkraftnutzung. In Abbildung

S3.13a und S3.13b ist der Verlauf der mittleren Dauerlinie an den Pegeln Achleiten bei Passau und Oberaudorf für die Jahre 1960 bis 2006 dargestellt. Die Resultate zeigen eine generell gute bis sehr gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs der Dauerlinie, die mit der gemessenen Datenreihe modelliert wurde (schwarze Linie) und der Dauerlinien, die mit den vier synthetischen Datenreihen modelliert wurden (bunte Linien). In Abbildung S3.13a fällt allerdings auf, dass die synthetischen Dauerlinien teilweise über der mit gemessenen Daten modellierten Dauerlinie liegen, was auf die generelle leichte Überschätzung des Niederschlages im statistischen Klimaantriebs-Generator zurückzuführen ist.

#### Schlussfolgerung

Zur Erzeugung von synthetischen meteorologischen Antrieben, die mögliche zukünftige Entwicklungen des Klimas darstellen können und die gleichzeitig die zeitliche und räumliche Auflösung besitzen, die für regionale Studien benötigt werden, wurde ein statistischer Klimaantriebs-Generator entwickelt. Er bewältigt den Skalenübergang zwischen den Aussagen zur weiteren Entwicklung des globalen Klimas und den für die regionalen Klimawirkungsmodelle benötigten hoch aufgelösten, physikalisch konsistenten meteorologischen Eingaben. Seine Ergebnisse lassen sich mit denen der regionalen Klimamodelle vergleichen, die ähnliche Ziele verfolgen.

Es konnte gezeigt werden, dass der statistische Klimaantriebs-Generator im historischen Zeitraum von 1960-2006 das in diesem Zeitraum im Untersuchungsgebiet herrschende Klima und die daraus resultierenden Reaktionen des Einzugsgebiets der Oberen Donau gut wiedergeben kann. Der statistische Klimaantriebs-Generator ist damit ein flexibles Werkzeug, um auf der Grundlage der im Projekt entwickelten Klimatrends die meteorologischen Antriebe für die Szenario-Simulationen bereitzustellen. Wie das Vorgehen bei der Validierung des gewählten Ansatzes gezeigt hat, ist es leicht möglich, durch einfache Veränderung des Startwertes des verwendeten Zufallsgenerators für jeden Klimatrend eine Vielzahl von statistisch äquivalenten meteorologischen Antrieben zu erzeugen und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit anzugeben. Dies wird in Kapitel S4, in dem die GLOWA-Danube Klimavarianten vorgestellt werden, genutzt.

#### Autor

W. Mauser  
Department für Geographie, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München

#### Literatur

**Buishand, T. A. & Brandsma, T. (2001):** *Multisite simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine Basin by nearest-neighbour resampling.* Water Resources Research, Vol. 37, No.11, pp.2761-2776.

**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., 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.

**Mahalanobis, P.C. (1936):** On the generalised distance in

*statistics.* Proceedings of the National Institute of Science of India Vol. 12, pp. 49-55.

**Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.W. & Werner, P.C. (2007):** *A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM.* Theoretical and Applied Climatology, Vol.92, No.3-4, pp. 209-223.

**Spekat, A., Enke, W. & Kreienkamp, F. (2006):** *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2.* Projektbericht im Rahmen des F+E- Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“, 94 S.

**Visual Numerics (2006):** *IMSL FORTRAN Numerical Library User's Guide Version 6*, Visual Numerics Ltd, Houston, Texas.

**Yates, D., Gangopadhyay, S., Rajagopalan, B. and Strzepek, K. (2003):** *A technique for generating regional climate scenarios using a nearest neighbour algorithm.* Water Re-sources Research, Vol. 39, No. 7, pp. 1-15.

**Young, K.C. (1994):** *A multivariate chain model for simulating climatic parameters from daily data.* Journal of Applied Meteorology, Vol.33, 661–671.