

1. Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung von Forschungsbeihilfe
Neuantrag
Antragsstellung der eigenen Stelle auf Zeit

Antragstellerin/ Antragsteller

Silke Trömel, Dr. phil. nat.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin, befristeter Arbeitsvertrag bis 31.04.2009
Geburtsdatum und Nationalität: 31. Oktober 1972, deutsche Staatsangehörigkeit

Dienstadresse: Auf dem Hügel 20, 53121 Bonn
Telefon: +49 (228)/ 735195
Fax: +49 (228)/ 735188
E-mail: silke.troemel@uni-bonn.de

Privatadresse: Nordstrasse 112, 53111 Bonn
Telefon: +49(228)/9296293

Thema

Statistische Modellierung von beobachteten Niederschlagsdaten und Anwendung auf die Extremwertstatistik in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen.

Statistical modelling of observed precipitation and its application to extreme value statistics in different spatiotemporal scales (Modex).

Fach- und Arbeitsrichtung

Meteorologie, Extremwertstatistik, regionale Klimavariabilität

Voraussichtliche Gesamtdauer

Beginn des Projekts: 01.05.2009
Beginn der DFG-Förderung: 31.04.2012
Dauer des Projekts: 36 Monate
Nötige Dauer der Förderung: 36 Monate

Antragszeitraum

36 Monate
Gewünschter Förderungsbeginn: 01.05.2009

Zusammenfassung

Zentrales Ziel des Projektes ist eine statistische Modellierung d.h. vollständige analytische Beschreibung beobachteter globaler monatlicher Niederschlagssummen des letzten Jahrhunderts sowie täglicher Niederschlagssummen Deutschlands der letzten 50 Jahre. Die Methode liefert einerseits robuste Trendschätzer für die nicht-Gauss-verteilte Klimavariablen und andererseits Risikoabschätzungen für extrem trockene und extrem nasse Ereignisse. Durch die Betrachtung verschiedener zeitlicher und räumlicher Skalen in der Form täglicher, mehrtägiger bis monatlicher Aggregate von Stationszeitreihen und auch Gebietsmitteln, beispielsweise von Flusseinzugsgebieten, werden viele Anwendungsgebiete erreicht. Hier seien städtische Abwassersysteme, Kanalisation, Verkehrssicherheit, Flusshochwasser und die Agrarwirtschaft genannt. Ebenso ist eine räumlich differenzierte Zuordnung der Einflüsse wie beispielsweise des Anstiegs anthropogener Treibhausgase zu beobachteten Änderungen in Lage, Streuung und Form der Verteilung und assoziierten Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten möglich.

Die Strategie beruht auf einem verallgemeinerten Ansatz der Zeitreihenzerlegung in einen deterministischen und einen statistischen Anteil. Im Rahmen der Modellierung werden physikalisch und klimatologisch plausible Einflussgrößen zur Beschreibung des deterministischen Anteils verwendet und dienen einer zeitkontinuierlichen Beschreibung der verschiedenen Parameter des jeweiligen Verteilungsmodells. Je nach zeitlicher Auflösung und Regenregime stellt die Weibull-, Gumbel- oder Gammaverteilung das geeignete Modell zur Beschreibung des statistischen Anteils dar. So können ebenfalls zeitkontinuierliche Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für beliebige Schwellen angegeben und globale Trendkarten unter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften des Niederschlags sowie der Änderungen der verschiedenen Verteilungsparameter erstellt werden. Die Herangehensweise vereint daher systematische Analysen zum Eintreten von Extremwerten mit systematischen Analysen maßgebender Zeitreihenstrukturen sowie deren Ursachen.

2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

2.1 Stand der Forschung

Sind natürliche oder anthropogene Klimaänderungen mit einer Zunahme von Extremereignissen wie Stürmen, Hitzewellen, Dürren und Überschwemmungen verbunden, so erregen sie besondere Aufmerksamkeit. Die Diskussionen um Extremwerte, ihre Intensivierung und Änderungen in ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit stehen bereits seit Jahrzehnten im Rampenlicht des öffentlichen Interesses, insbesondere da sie meist mit erheblichen Schäden und ggf. Todesfällen verbunden sind. Der Hitze- und Trockensommer 2003 (Schär et al., 2004; Schönwiese et al., 2004) als auch zahlreiche Überschwemmungen zeigten in den vergangenen Jahren die Brisanz des Themas auch für Deutschland. Erwähnt seien die Überschwemmungen in der Rheinregion im Dezember 1993 und Januar 1995, welche beide als Jahrhunderthochwasser bezeichnet wurden. Es folgten Hochwasser in der Oderregion im Juli 1997, das ‚Pfungsthochwasser‘ im Mai 1999 in der Donau- und Bodenseeregion und die Elbeflut im August 2002 und in der Nordalpenregion im August 2005 (Schönwiese et al., 2006).

Eine Fülle wissenschaftlicher Publikationen bestätigt, dass sich bereits sichtbare Änderungen im Extremverhalten in Beobachtungsdaten täglicher Temperatur- und Niederschlagsdaten widerspiegeln. Globale Analysen für den Zeitraum 1951-2003 (Alexander et al., 2006) zeigen verbreitet signifikante Zunahmen in den extremen Temperaturindizes und die Niederschlagsindizes zeigen ebenfalls eine Tendenz zu feuchteren Bedingungen. Moberg et al. (2006) finden ähnliche Ergebnisse für Europa

und die Analysen von Groisman et al. (2005) zeigen eine Zunahme in der Wahrscheinlichkeit für intensive Niederschlagsereignisse in vielen extratropischen Regionen. Klein Tank and Können (2003) detektieren einen verbreiteten Anstieg der Indizes für nasse Extreme in Europa im Beobachtungszeitraum von 1946-99. Zolina et al. (2005, 2008) und Brunetti et al (2004, 2006) zeigen eine Zunahme extremer Niederschläge während der Wintermonate und gegenteilige Tendenzen während der Sommermonate über Zentraleuropa. Ähnliche Ergebnisse werden von regionalen Studien belegt. Beispielsweise finden Frei and Schär (2001) für die Alpenregion einen statistisch signifikanten Anstieg im Auftreten intensiver Ereignisse (Wiederkehrzeit 30 Tage) im Herbst und Winter. Diese Analysen haben zum vierten Statusbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beigetragen (Trenberth et al., 2007). So finden sie sich auch unter den wichtigsten Resultaten des IPCC für Entscheidungsträger in der zusammengefassten Form wieder, dass

- Hitzewellen in den meisten Landgebieten bereits häufiger auftreten,
- die Häufigkeit extremer Niederschlagsereignisse über den meisten Landgebieten bereits zugenommen hat und
- seit den 1970ern intensivere und längere Dürre über größere Flächen beobachtet wurden (IPCC, 2007).

Viele der vorab genannten Analysen basieren auf abgeleiteten Indizes. Hier seien exemplarisch der Palmer Drought Severity Index (PDSI; siehe z. B. Dai et al., 2004) und der Standardized Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993) erwähnt. Ihre Aussagekraft ist sehr unterschiedlich. Die Berechnung des PDSI beruht auf Temperatur- und Niederschlagsdaten. Die Indizes repräsentieren eine Wasserbilanz, in der Angebot (Niederschlag), Bedarf (Evapotranspiration) und Verlust (Abfluss) gegenübergestellt werden. Kritik erfährt der ursprüngliche PDSI vor allem aufgrund einer schlechten Vergleichbarkeit der Indizes für verschiedene Klimate. Die Berechnung des SPI dagegen basiert ausschließlich auf Niederschlagsdaten. Er gibt die Anzahl der Standardabweichungen an, die der beobachtete Wert vom Langzeitmittel abweicht.

Andere vorab genannte Arbeiten betrachten die Änderungen hoher Perzentile der Verteilungen, welche stationär an die Daten einer Saison in jedem Beobachtungsjahr angepasst werden. Diese Betrachtungsweise ist nicht für die Analyse von Trockenperioden und Dürren geeignet, da sie nur Niederschlagsmengen und nicht die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Regenereignisses mit einbezieht. *In dem vorgeschlagenen Projekt sollen mit gewisser Willkür behaftete Definitionen durch physikalisch und klimatologisch erklärbare Einflüsse ersetzt werden und eine ganzheitliche Betrachtung anstelle einer getrennten Betrachtung jeweils eines Teilaspekts treten. Auch beschreiben analytische Funktionen der Zeit die beobachteten Änderungen weitaus besser als Vergleiche der Verteilungen für separat betrachtete Jahre bzw. Jahreszeiten (zeitlich gleitende Analyse). An deren Stelle tritt somit die zeitkontinuierliche Analyse.*

In dem vorgeschlagenen Projekt gehen wir nun einen Schritt weiter als in einer reinen Bestandsaufnahme beobachteter Änderungen, z. B. auf Basis definierter Indizes. Es erfolgt eine Analyse von Änderungen im Mittel und im Extremverhalten aufgrund der eingetretenen Verteilungsänderungen für die betreffenden Klimavariablen im Beobachtungszeitraum. Solche Betrachtungen der gesamten Verteilung der Variablen geben genauen Einblick in die beobachteten Änderungen, insbesondere in das Miteinander von Änderungen extrem trockener und nasser Ereignisse bzw. extrem kalter und warmer Ereignisse, sowie den möglicherweise einhergehenden Änderungen in der Variabilität und dem Erwartungswert.

Anstelle einer Vielzahl getrennter Analysen der verschiedenen Aspekte soll das ganzheitliche Beschreiben der Zeitreihen treten, die dann die vollständige Information beinhaltet, die mit statistischen Zeitreihenmodellen aus den Beobachtungen gewonnen werden kann. *In dem vorgeschlagenen Projekt sollen Änderungen in Lage, Streuung und Form der Verteilung täglicher, mehrtätiger und monatlicher Niederschlagssummen, stationsbezogen und gemittelt über größere Gebiete Deutschlands (zum Beispiel Flusseinzugsgebiete) analysiert werden um Änderungen in beiden Arten von Extremen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten besser verstehen und beschreiben zu können.* Buffoni et al. (2004), Groisman et al. (1999) oder Brunetti et al. (2000a, b) weisen beispielsweise auf Verteilungsänderungen in beobachteten Niederschlagsreihen hin. In dem vorgeschlagenen Projekt wird eine analytische Beschreibung dieser Verteilungsänderungen erreicht. Sind die Verteilung und ihre Änderungen bekannt, so können die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten jeglicher Ereignisse zu jedem Zeitpunkt angegeben werden.

In der Extremwerttheorie (EVT) werden dagegen zumeist die zwei folgenden Methoden verwandt: die Betrachtung und Modellierung von Schwellwertüberschreitungen (peak-over-threshold methods) einerseits und die Analyse der Maxima von Subintervallen (method of block maxima) andererseits. Die letztgenannte Methode führt zur so genannten generalisierten Extremwertverteilung (GEV; siehe z. B. Leadbetter et al., 1983). Das Maximum aus einer Stichprobe identisch verteilter Zufallsvariablen, etwa der größten täglichen Niederschlagssumme eines Jahres, genügt einer von drei möglichen asymptotischen Verteilungen: der Weibull-Verteilung, der Gumbel-Verteilung oder der Fréchet-Verteilung. Alle drei Extremwertverteilungen sind in der GEV enthalten. Welcher der drei asymptotischen Extremwertverteilungen nun die Maxima der jeweils betrachteten Stichprobe identisch verteilter Zufallsvariablen genügen, hängt von der Verteilung dieser Zufallsvariablen ab. Die Maxima der Gamma-Verteilung beispielsweise genügen der Gumbel-Verteilung. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von Zolina et al. (2005), dass der größte Wert einer Stichprobe von täglichen Niederschlagssummen keine signifikante Abweichung von der Gumbel-Verteilung aufweist. Die Verwendung der GEV hat jedoch den Nachteil, dass nur ein kleiner Anteil des jeweiligen verfügbaren Datensatzes verwendet wird.

Für die Modellierung der Extreme durch zeitabhängige Extremwertverteilungen stehen ein zu geringer Stichprobenumfang dem Bestreben beobachtete Änderungen durch die Überlagerung verschiedener Einflussgrößen zu beschreiben gegenüber. In dem vorgeschlagenen Projekt ist jedoch die Berücksichtigung von Instationaritäten notwendig. Méndez et al. (2007) verwenden zwar zeitabhängige GEV, stützen aber ihre Analysen auf eine einzelne, stündliche Gezeitenmessung von San Francisco für den Zeitraum 1901 bis 2003. Sie repräsentiert die längste kontinuierliche Gezeitenmessung Nordamerikas (Bromirski et al., 2003). Die statistische Modellierung vollständiger Zeitreihen monatlicher und täglicher Auflösung für Beobachtungszeiträume von 50 bzw. 100 Jahren (siehe Kapitel 3.1) im Rahmen des Projekts liefert dagegen die räumliche Verteilung der zeitlichen Änderungen im Extremverhalten. Ebenso ist für den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Schäden in den meisten Fällen (z. B. Hochwasser) der Einbezug der Vorgeschichte bzw. die Betrachtung aggregierter Niederschlagssummen notwendig. Zur Anwendung von Extremwertverteilungen müssten dafür ebenso die jährlichen Maxima mehrtätiger Zeitintervalle separat analysiert werden. Ob die vorgeschlagene statistische Modellierung der gesamten Zeitreihe ebenso eine separate Analyse aggregierter Niederschlagssummen erfordert, wird im Projekt geklärt. Theoretisch ist dies jedoch nicht erforderlich. Auch kann die Analysemethode in der Hydrologie und im Hochwasserschutz zur Generierung abgeleiteter Produkte

wie Niederschlagsindizes (z. B. SPI) und Intensität-Dauer-Häufigkeit-Beziehungen (Willem, 2000) als Funktion der Zeit bereitgestellt werden, was einen weiteren Vorzug gegenüber der ausschließlichen Betrachtung der Maxima darstellt. So genannte Intensität-Dauer-Häufigkeit-Beziehungen werden verbreitet für die Planung und Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen verwendet. Die Beziehungen beschreiben den Zusammenhang zwischen mittlerer Niederschlagsintensität und Eintrittswahrscheinlichkeit für verschiedene Andauern bzw. Zeitperioden.

Die Beurteilung der grundlegenden Entwicklung des Klimas und somit die langzeitliche Veränderung des mittleren Zustands, die sich in Trends widerspiegeln, ist jedoch ebenso von großer Bedeutung. Die vorgeschlagene Methode der statistischen Modellierung schätzt die Verteilung für jeden Zeitpunkt, jeweils auf Basis der gesamten Zeitreihe. Folglich ist ebenso der Erwartungswert für jeden Zeitpunkt gegeben und eine alternative Methode zur Schätzung von Trends besteht. Der Vorteil dieser alternativen Methode tritt insbesondere bei Variablen in den Vordergrund, deren Verteilung weit von der Normalverteilung abweicht. Die signifikanten Abweichungen der Klimavariablen Niederschlag von der Normalverteilung sind ebenso bekannt wie der zwingend folgende Einfluss auf den Kleinst-Quadrat-Schätzer (Rousseeuw, 1987). Die resultierenden Fehler in produzierten und verbreiteten Trendkarten (Rapp et al., 1996; Schönwiese et al., 1997) können gravierend sein und sollten daher angesichts der gesellschaftlichen Relevanz nicht toleriert werden. *Im Rahmen des Projekts werden Niederschlagstrends durch die explizite Modellierung der gesamten Zeitreihe wesentlich robuster und vertrauenswürdiger geschätzt als mit herkömmlichen Verfahren.*

Vollständig wird schließlich das Bild der beobachteten Klimavariabilität und der eingetretenen Extreme, wenn ebenso Erklärungen für diese Änderungen geliefert werden können. Auch hierzu liefert die statistische Modellierung ein hervorragend geeignetes Werkzeug. In dem vorgeschlagenen Projekt werden klimatologische und physikalisch plausible Einflussgrößen zur Beschreibung deterministischer, strukturierter zeitlicher Änderungen in Lage, Streuung und Form der Verteilung angeboten. Einflüsse wie die Nord-Atlantik-Oszillation oder anthropogene Treibhausgaskonzentrationen können dann räumlich differenziert Änderungen in verschiedenen Verteilungsparametern zugewiesen werden, welche wiederum definierten Einfluss auf die Extreme an einem oder beiden Verteilungsrändern bewirken und möglicherweise ebenso auf den Erwartungswert (Trends) einwirken können.

Die Vollständigkeit der Modellierung und der abgeleiteten Produkte wird im Rahmen einer Residuenanalyse überprüft. Statistische Tests überprüfen die Erfüllung der Annahmen und zeigen, ob die vollständige Beschreibung durch das gewählte Verteilungsmodell und die Einflussgrößen gelungen ist. Dieser Qualitätskontrollschritt ist notwendig, da nur dann die Zerlegung/Modellierung der Zeitreihen als Werkzeug genutzt werden kann, um Trends, Extreme und weitere (z.B. episodische) Strukturen auf Einflussgrößen zurückzuführen.

2.2 Eigene Vorarbeiten, Arbeitsbericht

Die Antragstellerin arbeitete bereits in verschiedenen Gebieten der statistischen Klimatologie, Extremwertstatistik und insbesondere der Zeitreihenanalyse. Mithilfe der Techniken der Zeitreihenanalyse können Klimazeitreihen als Realisation eines stochastischen Prozesses, d.h. als eine Folge von Realisationen von Zufallsvariablen

verstanden werden. Die beobachtete Zeitreihe wird dadurch im Wesentlichen durch analytische Funktionen der Zeit sowie klar charakterisierbaren Abweichungen davon beschrieben. Diese analytischen Funktionen setzen sich aus der Summe zeitlich strukturierter Komponenten zusammen, welche aus klimatologischem Blickwinkel interpretierbar erscheinen. Es werden Änderungen zugelassen, die Trends, episodische Schwankungen, den Jahresgang und dessen Änderung beschreiben. Für die Beschreibung monatlicher Temperaturzeitreihen können die Zufallseinflüsse als Realisierung unabhängiger normalverteilter Zufallsvariablen mit dem Erwartungswert Null und im Zeitverlauf konstanter Varianz interpretiert werden (Grieser, Trömel und Schönwiese, 2002). Die analytische Funktion der Zeit, die Summe der detektierten Komponenten, beschreibt dann den zeitlichen Verlauf des Mittels.

Ein zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich beobachteter Wert kann dann als eine mögliche Realisation einer Zufallsvariablen interpretiert werden, die der Gaußverteilung mit dem Mittelwert $\mu(t)$ zum Zeitpunkt t und konstanter Varianz σ_0^2 genügt.

In einem ersten Schritt der Erweiterung der Methode können die angebotenen strukturierten Komponenten ebenfalls zeitliche Änderungen in der Varianz $\sigma^2(t)$ beschreiben (Schönwiese, Staeger und Trömel, 2004). Die Anpassung der Funktionen geschieht wie auch in dem Verfahren nach Grieser et al. (2002) nach dem Maximum-Likelihood Prinzip. Während dies zuvor zum bekannten Kleinst-Quadrate-Schätzer führte, ist die zu minimierende Distanzfunktion nun in Abhängigkeit beider Parameter definiert. Das verwendete Modellselektionskriterium, die Schrittweise Regression (siehe z.B. Storch und Zwiers, 1999), wurde ebenfalls zur simultanen Bestimmung beider Parameter erweitert. Hier ist ein rekursives Verfahren notwendig, da die Signifikanz eines Regressors zur Beschreibung des zeitabhängigen Verteilungsparameters ebenso von der Beschreibung des anderen Verteilungsparameters abhängig ist.

Zur Beschreibung anderer Klimazeitreihen, beispielsweise des Niederschlags, ist jedoch auch dieser Ansatz unzureichend. Im Rahmen ihrer Doktorarbeit (Trömel, 2005a) hat die Antragstellerin deshalb eine Verallgemeinerung dieses Konzepts der Zeitreihenzerlegung in einen deterministischen und einen statistischen Anteil eingeführt. Klimazeitreihen werden wieder als Realisation eines Zufallsprozesses verstanden, jedoch genügen die Zufallsvariablen nun einer frei wählbaren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Trömel und Schönwiese, 2005b). Die gängige Beschränkung auf die Schätzung einer zeitlich abhängigen Lokation (Lageparameter) wird somit aufgehoben und monatliche Niederschlagszeitreihen werden als Realisierung

- einer Gumbel-verteilten Zufallsvariablen mit zeitabhängigen Lage- und Streuparameter oder
- einer Weibull-verteilten Zufallsvariablen mit zeitabhängigen Streu- und Formparameter

interpretiert.

Im Rahmen eines rekursiven Detektionsverfahrens werden Trends, saisonale Schwankungen und episodische Schwankungen zur Beschreibung von Lage-, Streu- oder Formparameter der entsprechenden Verteilung angeboten. Können keine weiteren signifikanten Variationsanteile mehr beschrieben werden, erfolgt eine abschliessende Residuenanalyse. Diese gibt dann Aufschluss über den Erfolg oder Misserfolg der Zeitreihenanalyse. Analog zu einer Überprüfung der Residuen auf Normalverteilung mit konstanter Varianz sollten nun die a priori getroffenen

Annahmen zur Beschreibung der Niederschlagsreihen erfüllt sein. Dies sind beispielsweise stationäre Weibull-verteilte Residuen $W(0,1,1)$ mit dem Lageparameter Null, dem Streuparameter Eins und dem Formparameter Eins im Falle der Interpretation der Reihe als Realisation einer Weibull-verteilten Zufallsvariablen mit zeitabhängigen Streu- und Formparameter. Nur dann ist eine vollständige Beschreibung der Zeitreihe tatsächlich gelungen und kann als vertrauenswürdige Grundlage der Extremwertstatistik und Trendanalyse dienen.

So erlaubt die zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion die Schätzung von Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten beliebiger Schwellenwerte für jeden Zeitpunkt (entsprechend der zeitlichen Auflösung der Zeitreihe für jeden Tag oder jeden Monat) des Beobachtungszeitraums. Abb. 1 zeigt für 132 Stationen Deutschlands die Änderungen in den Überschreitungswahrscheinlichkeiten des jeweiligen 95%-Perzentils bzw. den Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des 5%-Perzentils für den Monat Januar. Die Änderungen wurden aus den Differenzen der Wahrscheinlichkeiten im Januar 2000 und Januar 1901 berechnet. Eine Zunahme extrem hoher und extrem niedriger monatlicher Niederschlagssummen wird insbesondere im Westen Deutschlands detektiert, während im Süden Deutschlands eine Verschiebung der Verteilung in Richtung höherer Niederschlagssummen dominiert. Letzteres geht mit einer Abnahme der niedrigen Niederschlagssummen und Zunahmen hoher Monatswerte einher. Im August beispielsweise (hier nicht dargestellt) zeigen sich im Süden ebenfalls positive Änderungen in der Überschreitungswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentils, während in den übrigen Teilen Deutschlands die negativen Änderungen überwiegen. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des 5%-Perzentils zeigen im August verbreitet negative Tendenzen.

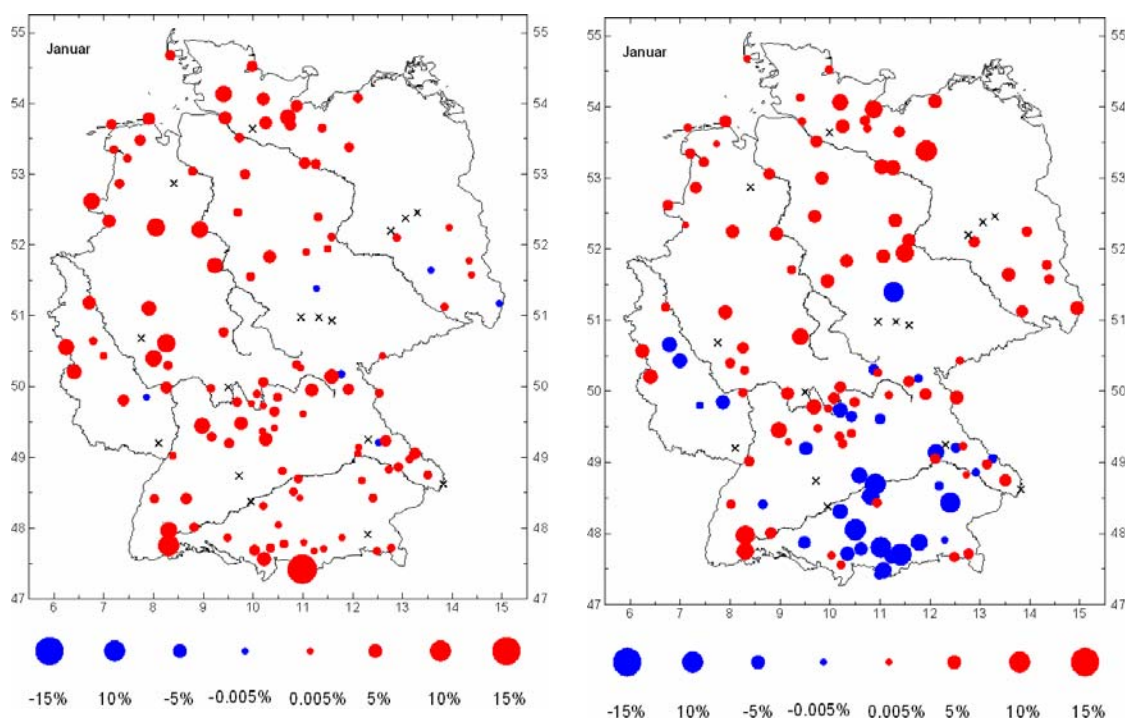


Abb.1: Änderungen in den Überschreitungswahrscheinlichkeiten des 95%-Perzentils (links) und den Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des 5%-Perzentils (rechts) im Januar in den Jahren 1901 bis 2000. Positive Änderungen sind durch einen roten und negative Änderungen durch einen blauen Punkt markiert, dessen Größe proportional zur Magnitude der Änderung gewählt ist. Schwarze Kreuze bezeichnen unveränderte Wahrscheinlichkeiten (modifiziert, nach Trömel und Schönwiese, 2007).

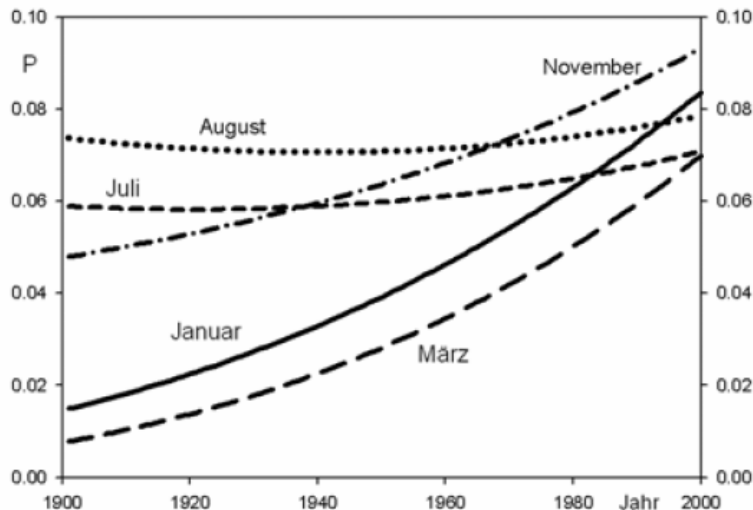


Abb.2: Zeitliche Entwicklung der Überschreitungswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentils des Niederschlags in Eppenrod (50.4°N, 8.0°E), ausgewählte Monate (Trömel und Schönwiese, 2007).

In Abb.2 sind nun die erhaltenen zeitlichen Verläufe der Überschreitungswahrscheinlichkeit des 95%-Perzentils an der Station Eppenrod für ausgewählte Monate dargestellt. Während zu Beginn der Beobachtung noch in den Sommermonaten die höchsten Niederschlagssummen erwartet werden, sind am Ende des Beobachtungszeitraums die Überschreitungswahrscheinlichkeiten des 95%-Perzentils in den Wintermonaten am höchsten.

Monte-Carlo-Simulationen zeigen, dass jahreszeitliche Trends von beobachteten Niederschlagszeitreihen auf Basis des Kleinst-Quadrate-Schätzers einen systematischen Bias und hohe Varianz aufweisen (Trömel und Schönwiese, 2008). Sie sind somit ungeeignet für die Analyse von monatlichen Niederschlägen. Die eingeführte Methode der statistischen Modellierung liefert ebenso den Erwartungswert für jeden Zeitpunkt der Beobachtung und beinhaltet somit die Möglichkeit einer alternativen Trendschätzung. Statt der direkten Anwendung des Kleinst-Quadrate-Schätzers den Umweg über die statistische Modellierung zu gehen, hat das den Vorteil, die zugrundeliegenden, oftmals von der Normalverteilung deutlich abweichenden, Verteilungen berücksichtigen zu können. Es können Auswirkungen von Änderungen in der Streuung oder der Verteilungsform auf den Erwartungswert zusätzlich zur Lokationsbetrachtung berücksichtigt werden. In Abb.3 sind die Trendschätzer auf Basis der statistischen Modellierung (links) dem Kleinst-Quadrate-Schätzer (rechts) gegenübergestellt. Im Januar zeigen die Methoden ähnliche räumliche Strukturen: positive Trends im Westen und Süden Deutschlands gehen mit negativen Trends oder nahezu unveränderten Erwartungswerten im Osten einher. Die Amplituden sind jedoch unter Berücksichtigung einer adäquaten Verteilung des Niederschlags deutlich geringer. Einzelne hohe Werte gehen im Kleinst-Quadrate-Schätzer mit einem zu starken Gewicht ein (Rousseeuw, 1987), denn unter der impliziten Annahme Gauss-verteilter Residuen werden hohe Werte, die mit stationären schiefen Niederschlagsverteilungen wie der Gumbel- oder Weibullverteilung konform sind, als sehr unwahrscheinlich eingestuft. Somit wird unter Gausschen Annahmen bereits eine Verschiebung der Verteilung zu höheren Werten - ein Trend - angenommen auch wenn dieser tatsächlich nicht vorliegt.

Die Antragstellerin hat bereits mit einer Zeitreihenanalyse für Monatsmitteltemperaturen (Grieser et al., 2002) unter besonderem Augenmerk auf extreme Ereignisse ihr Diplom erworben. Im Rahmen eines anschließenden Stipendiums der Münchener Rückversicherungsgesellschaft beschäftigte sie sich mit dem Auftreten von Temperatur-, Niederschlags- und Windextremen. Die Beobachtungen wurden als Markovketten (siehe z. B. MacDonald and Zucchini,

1997) dargestellt um die Veränderungen der Übergangswahrscheinlichkeiten, insbesondere für das Übertreten in die besonders warmen, nassen und starkwindigen Zustände zu analysieren. Zurück zur statistischen Modellierung erweiterte sie das Zeitreihenanalyseverfahren für die Beschreibung monatlicher Niederschlagsreihen. Dabei wurden bislang jedoch ausschließlich strukturierte Änderungen wie z. B. episodische Schwankungen detektiert ohne eine Verbindung zu meteorologischen und/oder physikalischen Erklärungen herzustellen. In dem hier beantragten Projekt kann dies durch das Anbieten plausibler Einflussgrößen wie z. B. Telekonnektionen innerhalb eines rekursiven Detektionsverfahrens geschehen. Das verallgemeinerte Konzept der Zerlegung von Zeitreihen in einen deterministischen und einen statistischen Anteil ist bereits anwendbar auf Monatsdaten für den überaus größten Teil Europas. Ebenso möchte die Antragstellerin innerhalb des Projekts eine globale Anwendbarkeit erreichen. Dies lässt sich durch eine Kombination der Erfahrungen mit Markovketten und der Zeitreihenanalyse von Niederschlagsreihen erreichen, da so der binäre Charakter des Niederschlags in die Modellierung einbezogen und die Anwendbarkeit der Methode auf (semi-)aride Gebiete ausgedehnt werden kann. Dasselbe Prinzip eröffnet die Möglichkeit auch tägliche Niederschlagssummen zu modellieren.



Abb. 3: Trends im Erwartungswert in mm auf Basis statistischer Zeitreihenmodellierung (links) und des Kleinst-Quadrate-Schätzers (rechts) im Januar, 1901-2000 (Trömel und Schönwiese, 2008).

Liste zitierter Publikationen von Dr. Silke Trömel

Grieser, J., S. Trömel and C.-D. Schönwiese (2002): Statistical time series decomposition into significant components and application to European temperature. *Theor. Appl. Climatol.* 71: 171-283.

Schönwiese, C.-D., T. Staeger and S. Trömel (2004): *The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis.* *Met. Z.* 13: 323-327.

Trömel, S. (2005a): Statistische Modellierung von Klimazeitreihen. Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main, Nr. 2. Im Eigenverlag des Instituts, Frankfurt a. M., 238pp.

Trömel, S. and C.-D. Schönwiese (2005b): *A generalized method of time series decomposition into significant components including probability assessments of extreme events and application to observational German precipitation data*. Met. Z. 14: 417-427.

Trömel, S., C.-D. and Schönwiese (2007): *Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany*. Theor. Appl. Climatol. 876: 29-39.

Trömel, S., C.-D. and Schönwiese (2008a): *Robust trend estimation of observed German precipitation*. Theor. Appl. Climatol. 93: 107-115.

Trömel, S., C.D. and Schönwiese (2008b): *Extreme value and trend analysis based on statistical modelling of precipitation time series*. In Kropp, J. P. and Schellnhuber, H. J. (Ed.): In Extremis: Trends, Correlations and Extremes in Hydrology and Climate, Springer Verlag, Berlin. In press.

3. Ziele und Arbeitsprogramm

3.1 Ziele

Im Rahmen des hier vorgeschlagenen Projekts wird eine Vielzahl von aktuellen wissenschaftlichen als auch anwendungsorientierten Aspekten adressiert. Hierbei wird zunächst die globale Skala in monatlicher Auflösung zur Beantwortung folgender Fragen betrachtet:

- a.) Wie sieht die globale Verteilung von Trends des Niederschlags unter Berücksichtigung ihrer statistischen Charakteristika aus (Rapp et al., 1996; Schönwiese et al., 1997)? Wie stark sind die beobachteten globalen Änderungen tatsächlich?
- b.) Wie groß sind die regionalen Änderungen im Auftreten extrem trockener als auch im Auftreten extrem nasser Monate?
- c.) Mit welcher Art von Änderungen haben wir es zu tun? Sind es beispielsweise Änderungen im Mittel, in der Varianz oder in der Verteilungsform?
- d.) Welchen Ursachen können diese Änderungen zugeordnet werden (Henderson-Sellers et al., 1995)? Trägt beispielsweise der Anstieg der anthropogenen Treibhausgaskonzentrationen einen signifikanten Anteil an beobachteten langfristigen Änderungen?
- e.) In welchem Verhältnis stehen Langzeitänderungen zu episodischen und kurzfristigen Änderungen? Welche Varianzanteile der beobachteten Zunahme im borealen winterlichen Niederschlag können beispielsweise durch die episodischen Schwankungen der Nord-Atlantik-Oszillation und welche dagegen durch langfristige, evtl. anthropogene, Trends (Palmer et al., 2002) erklärt werden?
- f.) Wie groß sind die saisonalen Änderungen im Mittel und in den Extremen (Zolina et al, 2008)?
- g.) Wie sehen die räumlichen Muster der signifikanten Einflussgrößen aus? In welchen Regionen erklärt beispielsweise die Nord-Atlantik-Oszillation signifikante Änderungen in welchen Parametern der Verteilung (Werner et al., 2002)?

Anschließend erfolgt eine räumliche als auch zeitliche Fokussierung auf tägliche Niederschlagssummen Deutschlands. Die regionalen Analysen wenden sich den folgenden Fragen zu:

h.) Wie gut sind die stationären Schätzer für extreme Ereignisse auf den verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen Deutschlands? Neben der stationsbezogenen Analyse täglicher Summen werden Extremwertwahrscheinlichkeiten und Wiederkehrzeiten räumlich auf Bundeslandebene und für Flussgebietseinheiten/Flusseinzugsgebiete (UBA, 2002) und zeitlich aggregiert über mehrere Tage und Wochen betrachtet.

i.) Ist eine statistische Modellierung täglicher Niederschlagssummen für Aussagen extremer Ereignisse über Zeitperioden mehrerer Tage ausreichend? Oder ist hier eine getrennte Analyse aggregierter Niederschlagssummen notwendig?

j.) Wie stark haben sich die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten extrem nasser und extrem trockener Tage und Zeitperioden unterschiedlicher Länge in den verschiedenen Jahreszeiten verändert? Für die Agrarwirtschaft sind aufgrund saisonal erhöhter Verwundbarkeit von Feldfrüchten Extreme im Frühjahr von besonderer Relevanz. Erosionsgefahr durch extremes Niederschlagsaufkommen besteht dagegen insbesondere im Winter.

k.) Treten verbreitet Häufigkeits- und/oder Intensitätsänderungen auf? Überwiegen beispielsweise die Änderungen im Eintreten von Niederschlag (Punktprozess) gegenüber den Änderungen in der Verteilung der Niederschlagsmenge (Osborn et al., 2002; Maraun et al., 2008)?

l.) Welche Änderungen sind in den Gebietsmitteln (Flusseinzugsgebiete, Bundesländer) detektierbar?

m.) Welche Einflüsse sind für die Änderungen im Extremverhalten des Niederschlags auf täglicher und mehrtägiger Basis in Punktmessungen oder Gebietsmitteln relevant?

Für die Betrachtung der globalen Skala ist seit Juli 2008 das neue globale monatliche Niederschlagsprodukt des GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) für den Zeitraum 1901 bis 2007 frei verfügbar (ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/html/fulldata_download.html). Die „GPCC Full Data Product Version 4“ ist in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $1^\circ \times 1^\circ$ und $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ erhältlich. Zu beachten ist jedoch, dass die verwendete Stationsdichte pro Monat zwischen etwa 10000 und 45000 Stationen schwankt (Schneider et al., 2008), was Inhomogenitäten erzeugen kann. Alternativ steht für den Zeitraum 1951 bis 2000 der homogenisierte VASCLimO-Datensatz (Beck et al., 2005) auf einem $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ Gitter zu Verfügung. Da hier das Risiko zur Generierung von zeitlichen Inhomogenitäten durch die Verwendung von Stationsreihen, die mindestens 90% des Zeitraums abdecken, minimiert wurde ist im Rahmen des Projekts dieser Datensatz wahrscheinlich zu bevorzugen.

Nach dieser Analyse monatlicher Niederschlagssummen für die gesamten Landgebiete der Erde stützt sich die Arbeit des Projekts auf das Niederschlagsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes. Es stellt eines der dichtesten und am besten gewarteten regionalen Beobachtungsnetze dar und lässt somit das klimatologisch diverse Deutschland als hervorragenden Prüfstand für neue Zeitreihenanalysen und Extremwertstatistiken von Tagesdaten fungieren. Dieses Niederschlagsmessnetz beinhaltet 2701 Stationsreihen, die mit maximal 5% Fehlwerten den Zeitraum 1950 bis 2004 abdecken (Zolina et al., 2008). Nahezu lückenlose tägliche Beobachtungen des Niederschlages (ein oder kein Fehlwert) liegen an 1769 Stationen innerhalb des Bundesgebietes für einen Zeitraum von 1951 bis 2000 vor (Grieser et al., 2007).

Zentrales, übergeordnetes Ziel des beantragten Projekts ist eine vollständige Beschreibung von beobachteten monatlichen und täglichen Niederschlagszeitreihen. Diese statistische Modellierung von Beobachtungsdaten liefert für jeden Zeitpunkt (Tag/Monat) des Beobachtungsintervalls die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten

möglicher Niederschlagssummen. Dies stellt ein umfassendes, vielseitig einsetzbares Werkzeug dar.

Änderungen im Niederschlagsverhalten, insbesondere im Auftreten extrem hoher Niederschlagssummen als auch das Auftreten extrem trockener Zeitperioden, sind in verschiedenen Zeitskalen für verschiedene Anwendungsgebiete und Personenkreise von Interesse. Auf der Zeitskala von einem Tag sind extreme Niederschläge für städtische Abwassersysteme und die Kanalisation, die Strassensicherheit und den Flugverkehr relevant. Extreme Ereignisse auf der Zeitskala von mehreren Tagen sind beispielsweise in Hinblick auf Flusshochwasser, die Schifffahrt und Überschwemmungen größerer Gebiete relevant. Mit der Betrachtung noch längerer Zeitintervalle von mehreren Wochen begeben wir uns schließlich in das Interesse der Agrarwirtschaft und des Tourismus.

Die konkrete statistische Modellierung wird auf einer zweiteiligen Beschreibung in der Form $f(NN,t)=p(t)\cdot\text{pdf}(NN,t)$ beruhen. Während $p(t)$ den zeitabhängigen Punktprozess für das Eintreten von Niederschlag (Niederschlagssumme > 0 mm) beschreibt, liefert die zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion die Information über die Niederschlagsmengen im Falle eines Niederschlagsereignisses. Das Produkt $f(NN,t)$ liefert für jeden Zeitpunkt t die Wahrscheinlichkeit für die Niederschlagssumme NN (≥ 0 mm). Der Punktprozess kann durch eine Markovkette, wahrscheinlich 1. Ordnung, beschrieben werden, der es erlaubt die Persistenz zu berücksichtigen. In diesem Fall hängt die Wahrscheinlichkeit für ein Regenereignis ausschließlich vom vorherigen Zeitschritt ab. Für die zeitliche Beschreibung der Parameter der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\text{pdf}(NN,t)$ und des Punktprozesses $p(t)$ werden wieder saisonale Schwankungen und langzeitliche Schwankungen berücksichtigt. Jedoch ist es ein Ziel in dem vorgeschlagenen Projekt, nicht ausschließlich eine Detektion/Bestandsaufnahme von langfristigen Änderungen wie Trends oder episodischen Schwankungen zu erlangen, sondern den beobachteten Änderungen Ursachen zuzuordnen.

Dieser Ursache-Wirkungs-Aspekt von anthropogenen und natürlichen Einflüssen auf Extreme, Mittel und Variabilität ist von besonderer gesellschaftlicher Relevanz. Da es sich bei der vorgeschlagenen Methode um ein statistisches Verfahren handelt, postulieren wir mit diesem Schritt Kenntnisse über das physikalische System Atmosphäre. Wir gehen davon aus, dass zumindest ein Anteil der beobachteten Variationen durch uns bekannte Einflüsse verursacht ist. Einflussgrößen werden zur Beschreibung der langzeitlichen Änderungen in Form klimatologisch bzw. physikalisch erklärter Zeitreihen angeboten. Neben saisonalen Schwankungen und Änderungen im Jahrgang treten nun Zeitreihen zur Beschreibung der Nord-Atlantik-Oszillation (NAO) nach Hurrell (1997), der Southern Oscillation Index (SOI) zur Beschreibung des El Niño-Southern Oscillation (ENSO) Phänomens (Philander, 1990), eine standardisierte Differenz der zeitgleich gemessenen Luftdruckwerte auf Tahiti und Darwin (Australien), explosiver Vulkansimus nach Grieser et al. (1998) und der anthropogene Treibhauseffekt (GHG). Als Einflussgröße des anthropogenen Treibhauseffekts dient der natürliche Logarithmus der mit dem vorindustriellen Wert normierten CO_2 -Äquivalentkonzentration (Wigley, 1987; Trenberth, 2007).

Durch die Detektion der verschiedenen Einflussgrößen zur Beschreibung der beiden Parameter der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und/oder der Parameter des Punktprozesses werden Zuordnungen der Einflüsse auf die Regenmenge oder das Eintreten von Niederschlagsereignissen möglich. So ist eine Änderung im Jahrgang denkbar, der höhere Niederschläge in einem bestimmten Zeitintervall erzeugt. Ein anderes Beispiel ist ein Anstieg der Überschreitungswahrscheinlichkeit bestimmter Niederschlagsschwellen, der mit einem positiven Trend im

Lageparameter der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $pdf(NN,t)$ aufgrund des anthropogenen Treibhauseffekts beschrieben werden kann. Die als signifikant detektierten Regressoren/ Einflussgrößen geben also Aufschluss über ihre Relevanz für beobachtete Änderungen im Extremverhalten.

Aussagen über Perioden mehrerer Tage mit relativ wenig bzw. relativ viel Niederschlag können einerseits durch eine getrennte Modellierung der entsprechenden Niederschlagsaggregate geschehen und andererseits auch mittels Faltung aus der statistischen Modellierung der täglichen Niederschlagssummen abgeleitet werden. Theoretisch liefert die statistische Modellierung der Zeitreihe täglicher Niederschlagssummen in der Form $f(NN,t)$ durch Faltung ebenso die Wahrscheinlichkeiten für die Niederschlagsaggregate über Zeitperioden in der Form $f(NN,t_1-t_3)$, $f(NN,t_4-t_6)$ oder beispielsweise $f(NN,t_{10}-t_{20})$. Das bedeutet, mittels Faltung kann die Wahrscheinlichkeit für die akkumulierten Regemengen über beliebig viele Tage zu jeder Zeit innerhalb des analysierten Zeitraums abgeleitet werden. Hierbei werden jedoch auch Unsicherheiten akkumuliert. Somit wird im Rahmen des Projekts die separate Modellierung der Niederschlagssummen einzelner Zeitperioden den Ergebnissen aus der Faltung der Wahrscheinlichkeiten für tägliche Niederschlagssummen gegenübergestellt.

Eine weitere Untersuchung soll zeigen, wie gut der einfache stationäre Schätzer für die Extremwerte auf den verschiedenen räumlichen Skalen ist. Durch Anpassung einer Gamma-Verteilung an die Stationszeitreihen und Gebietsmittel können Wahrscheinlichkeiten und Wiederkehrzeiten für beliebige Schwellenwerte auf Basis einer über den Beobachtungszeitraum konstant angenommenen Verteilung geschätzt werden. Dies ist automatisierbar und somit kann diese Information als interaktives Online-Tool auf der Internetseite des MIUB öffentlich zugänglich gemacht werden. Damit wird jeden Tag die Wahrscheinlichkeit (bzw. Wiederkehrzeit) für das Auftreten der beobachteten Niederschläge unter der Annahme, dass keinerlei Änderungen stattgefunden haben, im Internet bereitgestellt. Für welche räumlichen und zeitlichen Skalen eine signifikante Abweichung von dieser Nullhypothese existiert, ist für die Hydrologie von besonderer Relevanz und ebenfalls Gegenstand des vorgeschlagenen Projekts. Die Annahme der Stationarität findet hier noch überwiegend Anwendung zur Berechnung der Wiederkehrzeiten von Hochwasserabflüssen (z.B. HQ100).

Insgesamt werden aus dem Projekt eine Vielzahl wissenschaftlicher Produkte, also neue Zeitreihenanalysemethoden und Forschungsergebnisse, sowie Kartenmaterial und Online-Produkte, die für Privatpersonen, den Hochwasserschutz und die Agrarwirtschaft von fundamentalem Interesse sind, entstehen. Die Ergebnisse werden als Artikel in anerkannten Zeitschriften publiziert sowie auf Fachtagungen und Kongressen präsentiert.

Produkte aus der globalen Analyse sind:

- Eine global anwendbare Methode zur vollständigen Beschreibung beobachteter Zeitreihen monatlicher Niederschlagssummen durch klimatologische langzeitliche Einflüsse und saisonale Schwankungen.
- Globale Trendkarten des Niederschlags unter Berücksichtigung der statistischen Charakteristika des Niederschlags im Vergleich des konventionellen Kleinst-Quadrate-Schätzers.
- Identifizierung und Zuordnung der Einflussgrößen (z.B. NAO) für beobachtete Zu-/Abnahmen von extrem trockenen/nassen Niederschlagsmonaten.

- Fallstudien zu veränderten Wahrscheinlichkeiten im Auftreten mehrmonatiger Trocken- und Feuchtperioden etwa für semiaride Klimate oder Ländern mit deutlichen Niederschlagszunahmen.
- Globale Karten ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) der Änderungen in der Überschreitungswahrscheinlichkeit hoher Niederschlagssummen verschiedener Schwellen in den Jahren 1901-2007 bzw. 1951-2000 (monatliche Datenbasis).
- Globale Karten ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) der Änderungen in der Unterschreitungswahrscheinlichkeit niedriger Niederschlagssummen verschiedener Schwellen in den Jahren 1901-2007 bzw. 1951-2000 (monatliche Datenbasis).
- Räumliche Verteilung signifikant detektierter Einflussgrößen, beispielsweise der anthropogenen Treibhausgase.

Produkte aus der regionalen Analyse sind:

- Eine Methode zur vollständigen Beschreibung beobachteter täglicher Niederschlagssummen durch Persistenz, klimatologische langzeitliche Einflüsse und saisonale Schwankungen.
- Online-Tool zur Schätzung von stationsbezogenen und Gebietsmittel betreffenden stationären Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten beliebiger Schwellenwerte und Wiederkehrzeiten für Deutschland für Zeiträume von einem und mehreren Tagen.
- Identifizierung und Zuordnung der Einflussgrößen für beobachtete Zu-/Abnahmen von extrem trockenen/nassen Niederschlagstagen/-perioden in der stationsbezogenen Betrachtungsweise und für Gebietsmittel.
- Räumlich hochaufgelöste Karten Deutschlands für die beobachteten Änderungen in den Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten verschiedener Schwellen.

Die Beobachtung der Klimavariablen und ihre sorgfältige Analyse tragen zu einer verbesserten Planung von Adaptionsstrategien in der Agrarwirtschaft, dem Küstenschutz, im Wasser- und Risikomanagement sowie im Gesundheitswesen und auch in der Tourismusbranche bei. Die Ergebnisse des beantragten Projekts stehen somit im wissenschaftlichen als auch wirtschaftlichen Interesse. Sie werden zu einer besseren Schätzung der räumlich variablen Änderungen im Mittel (Trends) des Niederschlags als auch der Änderungen in den Rändern der Verteilung (Extremwerte) führen. Die Betrachtung der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen führt zu dem breit gefächerten Interesse und Anwendungsgebiet des Projekts und seiner Resultate.

3.2 Arbeitsprogramm

WP1. Statistische Modellierung beobachteter monatlicher Niederschlagszeitreihen.

Wie bereits in Kapitel 2.2 dargelegt, existiert eine von der Antragstellerin eingeführte Methode zu statistischen Modellierung monatlicher Niederschlagszeitreihen (Trömel, 2004). Eine offensichtliche Bedingung für die Anwendung der bereits existierenden Methode zur Modellierung von Zeitreihen mittels zeitlich veränderlicher Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen ist jedoch, dass zu jedem Zeitpunkt der beobachtete Wert als Realisierung einer Zufallsvariablen entsprechend einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion interpretiert werden kann. Wird jedoch zu immer gleichen Zeitpunkten eines Jahres, beispielsweise über mehrere Jahre hinweg, kein Niederschlag beobachtet, ist die Schätzung der Wahrscheinlich-

keitsdichtefunktion zu diesen Zeitpunkten des Jahres nicht möglich. Wesentliche Bedingung ist somit ein Mindestmaß an Niederschlag, so dass die Vorstellung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu jedem Zeitpunkt der Beobachtung realistisch ist. Eine Analyse von Zeitreihen für (semi-)aride Gebiete mit dieser Methode war somit bislang nicht möglich.

WP1.1 Erweiterung der verallgemeinerten Zeitreihenzerlegung für die globale Anwendbarkeit

Zusätzlich zur Modellierung der Niederschlagsmenge $pdf(NN,t)$ ist die zeitabhängige Wahrscheinlichkeit $p(t)$ für das Eintreten eines Regenmonats (Summe > 0 mm) zu modellieren um eine Beschreibung der beobachteten Zeitreihe $x(t)$ zu erhalten. Die Beschreibung dieses Punktprozesses wird durch einen Markovprozess (s. z.B. MacDonald and Zucchini, 1997) geschehen. Auf Basis des Ataike information criterion und des Bayesian information criterion (s. z.B. Storch and Zwiers, 1999) kann getestet werden, ob bereits eine Markovkette 1. Ordnung hinreichend ist. Wie bisher können dann die zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Niederschlagsmenge $pdf(NN,t)$ durch saisonale Schwankungen und langzeitliche Änderungen beschrieben werden.

Zur Beschreibung des mittleren Jahresgangs kann eine harmonische Schwingung mit der Wellenlänge von einem Jahr und ihre Oberschwingungen bis zur Wellenzahl 6 pro Jahr verwendet werden. Wie bereits in der Zeitreihenzerlegung nach Grieser et al. (2004) eingeführt, können durch eine Verallgemeinerung des Ansatzes langsam veränderliche Jahresgänge erfasst und beschrieben werden.

Im Rahmen einer Modifizierung werden zur Beschreibung langzeitlicher Schwankungen die bisher angebotenen Trendfunktionen und polynomialen Schwankungen durch Zeitreihen der El Niño-Southern Oscillation, der Nord-Atlantik-Oszillation, des explosiven Vulkanismus und durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen ersetzt, um später Änderungen im Extremverhalten erklären zu können.

Das El Niño-Southern Oscillation-Phänomen (ENSO) ist charakterisiert durch interne Wechselwirkungsvorgänge im Sub-System Ozean-Atmosphäre (Arntz und Fahrbach, 1991). ENSO beschreibt quasiperiodische Zirkulationsanomalien, die etwa alle drei bis acht Jahre verstärkt auftreten. Das El Niño-Phänomen beschreibt hierbei den ozeanischen Teilaspekt und ist stark antikorreliert mit dem atmosphärischen Teil, der so genannten Südlichen Oszillation. Der Southern Oscillation Index (SOI) ist definiert durch die Luftdruckdifferenz zwischen Tahiti und Darwin (Australien). Der SOI dient als atmosphärisches Maß für ENSO und soll auch im Rahmen der statistischen Modellierung als Einflussgröße bzgl. ENSO verwendet werden. Es werden Telekonnektionen bzgl. Temperatur-, Druck- und Niederschlagsanomalien insbesondere im Bereich der Tropen aber auch in höheren Breiten gefunden (Staeger, 1998). Abb. 4 zeigt die Jahresmittelwerte für den Zeitraum 1866-2004 (Quelle: Climate Research Unit, University of Norwich).

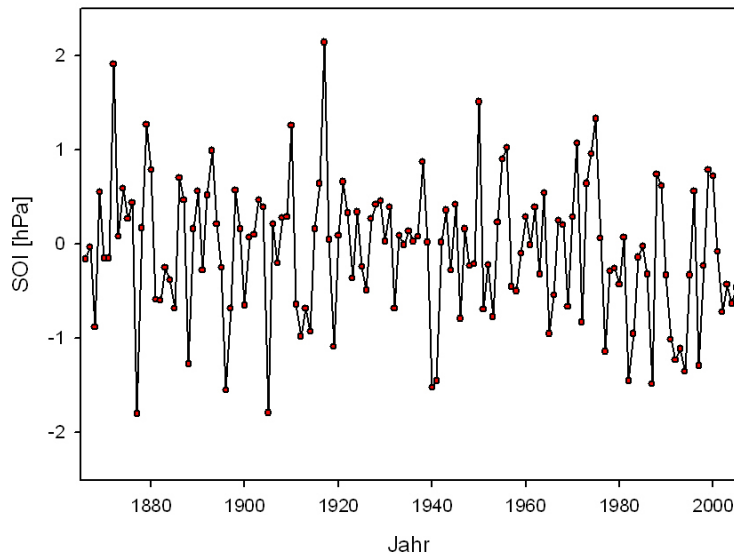


Abb. 4: Jahresmittelwerte des SOI (1866-2005). Berechnung nach Ropelewski and Jones (1987), Quelle: Climate Research Unit, University of Norwich.

Die atmosphärische Zirkulation im nordostatlantischen Raum wird durch die Ausprägung des Luftdruckgradienten zwischen dem subtropischen Azorenhoch und dem subpolaren Islandtief bestimmt. Die Schwankungen des Luftdruckunterschieds werden als Nord-Atlantik-Oszillation (NAO) bezeichnet. Der NAO-Index nach Hurrell (1997) wird als Differenz der normierten jährlichen bzw. monatlichen oder saisonalen Luftdruckanomalien der Stationen Stykkisholmur auf Island und Ponta Delgada auf den Azoren definiert. Der NAO-Index nach Jones (1997) verwendet statt der Station Ponta Delgada die Werte der Station Gibraltar. Hohe NAO-Indizes und somit hohe Luftdruckunterschiede gehen mit intensiveren Westwinden über dem Nordatlantik und verstärkter Zyklonentätigkeit über Mitteleuropa einher. Entsprechend ist eine Abschwächung der Westwinde im Falle niedriger NAO-Indizes festzustellen (Houghten, 1995). Insbesondere stark positive winterliche NAO-Indizes stehen in Verbindung zu trockeneren Episoden in Südeuropa und über dem Mittelmeer, während dann in Nordeuropa und Teilen Skandinaviens überdurchschnittlich feuchte Bedingungen angetroffen werden (Hurrell, 1995).

Beim explosiven Vulkanismus gelangen mit dem Auswurf Partikel bis in die Stratosphäre und vereinzelt auch bis in die Mesosphäre hinein. Hier ist ihre Verweilzeit aufgrund der stabilen Schichtung und der geringen Wasserdampfkonzentration gegenüber der Troposphäre deutlich erhöht, so dass ein merklicher klimatischer Effekt bewirkt werden kann. Zur Beschreibung der Klimawirksamkeit des Vulkanismus werden z.B. Vulkanindizes verwendet, die Ausbrüche nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. Die Skala startet bei Null für nicht-explosiven Vulkanismus und ist nach oben unbegrenzt. Eine andere Möglichkeit besteht in einer Parametrisierung durch charakteristische Größen wie die vulkanischen Partikelkonzentrationen oder Heizratenanomalien (Grieser et al., 2000). In dem vorgeschlagenen Projekt soll ein korrigierter Vulkanismusparameter (Grieser et al., 1999) verwendet werden, der proportional zum Logarithmus der geschätzten stratosphärischen vulkanischen Massenzufuhr ist.

Anthropogene Emissionen verstärken den natürlichen Treibhauseffekt. Die wichtigsten Treibhausgase in diesem Zusammenhang sind CO_2 , CH_4 , N_2O und

FCKW (s. z.B. Grieser und Schönwiese, 2001). Mit Hilfe des Treibhauspotentials und unter Berücksichtigung weiterer Eigenschaften wie Verweildauer und Konzentrationen lassen sich alle relevanten Treibhausgase in so genannte CO₂-Äquivalente umrechnen. Das heißt es können alle Treibhausgase in einer Größe zusammengefasst werden, indem für jedes Treibhausgas die äquivalente Konzentration von CO₂ berechnet wird, welche denselben Beitrag zum Treibhauseffekt leisten würde. Allerdings stellt sich eine Art Sättigungseffekt mit immer weiter ansteigender Konzentration in einem bestimmten Wellenlängenbereich ein. Nach Wigley (1987) ist die Beziehung zwischen der CO₂-Konzentration und den Heizratenanomalien im Konzentrationsbereich bis etwa 1000 ppm in sehr guter Näherung logarithmisch und der natürliche Logarithmus der mit dem vorindustriellen Wert (279ppm) normierten CO₂-Äquivalentkonzentration dient als Einflussgröße des anthropogenen Treibhauseffekts.

Ein Modellselektionskriterium, welches Kolinearitäten unter den Einflussgrößen berücksichtigt und möglichst sparsame Modelle erzielt, ist die Schrittweise Regression (Stepwise Regression, s. z.B. Storch and Zwiers, 1999). Eine Erweiterung dieses Kriteriums zur simultanen Bestimmung von zwei statt nur einem Parameter der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion hat die Antragstellerin bereits eingeführt. Anstelle des für gewöhnlich verwendeten F-Tests tritt ein Likelihood-Quotienten-Test (Schrader and Hettmansperger, 1980).

Die abschließende Residuenanalyse entscheidet über Erfolg oder Misserfolg der Zeitreihenzerlegung. Das bedeutet erstens die Überprüfung der Nullhypothese, die Residuen $e(t)$ entstammen der a priori angenommenen Verteilung kann nicht widerlegt werden (Kolmogorov-Smirnov-Statistik). Zweitens erfolgt eine Überprüfung der strengen Stationarität der Residuen. Hierbei erfolgt eine Unterteilung des Beobachtungszeitraums in zwei Subintervalle und die empirischen Verteilungen werden sowohl auf Basis der Kolmogorov-Smirnov-Statistik als auch der χ^2 -Statistik (s. z.B. Schlittgen und Streitberg, 1999) miteinander verglichen. Das Vorgehen ist analog zur gebräuchlichen Standardisierungsvorschrift $e_{\text{Gauß}}(t) = (x(t) - \mu(t)) / \sigma_0$, mit dem zeitlich veränderliche Mittel $\mu(t)$ und der konstant angenommenen Standardabweichung σ_0 unter der Annahme einer Normalverteilung. Als Beispiel sei hier die Interpretation der Zeitreihe als Realisation einer Gumbel-verteilten Zufallsvariablen mit zeitabhängigen Lage- und Streuparameter aufgeführt. Zur Eliminierung aller signifikant detektierten strukturierten Änderungen gilt nun die Vorschrift $e_{\text{Gumbel}}(t) = (x(t) - a(t)) / b(t)$ mit dem zeitabhängigen Lageparameter $a(t)$ und Streuparameter $b(t)$. Im Falle einer gelungenen Beschreibung der Zeitreihe sollten die Residuen nicht von einer stationären $G(0,1)$ -Verteilung (Gumbelverteilung mit dem Lageparameter Null und dem Skalenparameter Eins) zu unterscheiden sein.

WP1.2 Anwendung der verallgemeinerten Zeitreihenzerlegung auf den aktuellen monatliche Niederschlagsdatensatz des GPCC 1901-2007 bzw. des VaslimO-Datensatzes 1951-2000

Die in WP1.1 entwickelte Zeitreihenanalysemethode liefert die Wahrscheinlichkeit $f(NN,t)$ für eine Niederschlagssumme größer oder gleich Null zu jedem Zeitpunkt der Beobachtung. Die Zeitfunktionen zur Bestimmung der Parameter des Punktprozesses $p(t)$ und der Parameter der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $\text{pdf}(NN,t)$ werden jeweils auf Basis der gesamten Zeitreihe geschätzt. Die Anwendung erfolgt auf den globalen monatlichen Gitterpunkt-Niederschlagsdatensatz „GPCC Full Data Product Version 4“ für den Zeitraum 1901 bis 2007 oder des VaslimO-Datensatzes mit einer räumlichen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ für den Zeitraum 1951-2000. Die Entscheidung erfolgt aufgrund der Qualität/Homogenität des aktuelleren Datensatzes. Es ist zu vermuten, dass die

Weibull- und die Gumbelverteilung zur Beschreibung der Niederschlagsmenge $\text{pdf}(NN,t)$ auch global geeignet ist. Im gegenteiligen Fall wird die Gammaverteilung ebenso einbezogen.

Die bereits dargelegte Residuenanalyse gibt Aufschluss über die Vollständigkeit der analytischen Beschreibung der Zeitreihe. Sollten unerklärte strukturierte Varianzanteile in den Zeitreihen verbleiben, müssen möglichst weitere Einflussgrößen einbezogen werden. Hier sei ein möglicher Einfluss der lunisolaren Oszillation mit einer Periode von 18.61 Jahren erwähnt (Cook, et al., 1997). Beispielsweise können aber auch weitere Telekonnektionen wie die PNA (Pacific-North America) oder die PDO (Pacific Decadal Oscillation) einbezogen werden (Woodworth et al., 2002).

WP1.3 Visualisierung der Ergebnisse

Die Anwendung der statistischen Modellierung auf den globalen, Gitterpunkt-Niederschlagsdatensatz des GPCC, 1901 bis 2007, liefert eine Vielzahl wertvoller Informationen, die in globalen Karten visualisiert wird (siehe Produkte der globalen Analyse in 3.1).

WP2 Stationäre Extremwertstatistik täglicher Niederschlagssummen Deutschlands

Haben auch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten bereits eingetretene Änderungen hinsichtlich des Mittels und der Extreme (IPCC, 2007) bestätigt, so soll in diesem Projekt doch der stationäre Schätzer den eingetretenen Änderungen gegenübergestellt werden können. Änderungen der Wahrscheinlichkeiten im Auftreten von sehr nassen und sehr trockenen Tagen an den betrachteten Stationen, sowie hohe akkumulierte Niederschlagssummen über Zeitperioden mehrerer Tage und Wochen an den Stationen und in Gebietsmitteln werden zunächst unter der Annahme stationärer Bedingungen geschätzt. Damit kann überprüft werden, auf welchen raum-zeitlichen Skalen dieser einfache zu berechnende Schätzer noch hinreichend ist. Denkbar ist beispielsweise, dass bzgl. Trockenperioden der stationäre Schätzer zumindest in Teilgebieten Deutschlands noch für praktische Zwecke brauchbare Ergebnisse liefert oder, dass für grössere Gebietsmittel aggregierte Niederschlagssummen über 1 Woche und mehr noch keine signifikanten Änderungen im Überschreiten hoher Schwellen aufzeigen.

WP2.1 Stationäre Extremwertstatistik Deutschlands aggregierter Niederschlagssummen in unterschiedlichen Flächen

Während Niederschlagssummen monatlicher Auflösung zumeist als Realisierung einer Gumbel-verteilten oder Weibull-verteilten Zufallsvariablen interpretiert werden können, genügen beobachtete Tagessummen der Gammaverteilung (Zolina et al., 2004). Zunächst werden also zeitlich aggregierte und räumlich gemittelte Zeitreihen aus den täglichen Niederschlagssummen abgeleitet und verschiedene Verteilungsfunktionen an den Beobachtungszeitraum angepasst. Die Anpassungsgüte wird sowohl durch die Kolmogorov-Smirnov-Teststatistik (s. z.B. Wilks, 1995) als auch durch den χ^2 -Test (s. z.B. Bosch, 1997; Schlittgen und Streitberg, 1999) überprüft. Die vorliegende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion liefert dann durch Integration die Eintrittswahrscheinlichkeiten für die jeweils betrachtete Schwelle.

Aus den Analysen wird ein Online-Produkt entstehen, welches für unterschiedliche Gebietsmittel wie Bundesländer, Flusseinzugsgebiete, Ost-/Westdeutschland und verschiedene Zeitperioden wie 1,3,7 Tage und 2,3, 4 Wochen Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten beliebiger Schwellen und Wiederkehrzeiten unter den Annahme stationärer Bedingungen schätzt. Dies erlaubt die Bewertung aktueller Ereignisse unter der Nullhypothese eines sich nicht signifikant ändernden Klimas.

Zusätzlich wird ein Vergleich mit den Wiederkehrzeiten extremer täglicher Niederschlagssummen von Grieser et al. (2007) durchgeführt. Ihre Schätzer basieren ebenfalls auf der Annahme von Stationarität, jedoch unter Anwendung der GEV.

WP3 Statistische Modellierung täglicher Niederschlagszeitreihen

Analog zum Vorgehen in WP1 ist die Modellierung der Niederschlagsmenge $pdf(NN,t)$ und die zeitabhängige Wahrscheinlichkeit $p(t)$ für das Eintreten eines Regentages (Summe > 0 mm) zu modellieren, um eine Beschreibung der beobachteten täglichen Zeitreihe $x(t)$ zu erhalten.

WP3.1 Anpassung der Methode für die Analyse täglicher Reihen

Das Prinzip und Vorgehen der statistischen Modellierung globaler monatlicher und täglicher Niederschlagssummen sind nahezu identisch. Unterschiede sind beispielsweise in der Ordnung der Markovkette zur Beschreibung des Punktprozesses $p(t)$ zu erwarten, d.h. die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Regentages hängt dann nicht nur vom Vortag, sondern von ein oder zwei weiteren vorangegangenen Tagen ab. Die Ordnung wird durch Anwendung des Akaike information criterion (AIC) und des Bayesian information criterion (BIC) geschätzt (siehe z. B. MacDonald and Zucchini, 1997). Durch die ausschließliche Betrachtung Deutschlands werden einerseits zuvor relevante Einflussgrößen keine Rolle keine signifikanten Varianzanteile erklären. Andererseits kann die Betrachtung weiterer neuer Einflussgrößen nötig werden.

WP3.2 Änderung der Wahrscheinlichkeiten von extremen Ereignissen für verschiedene Zeitperioden aus der Modellierung täglicher Niederschlagszeitreihen

Aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Regenmenge zusammen mit der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Niederschlagstages für jeden Zeitpunkt (Tag) des analysierten Zeitraums, wird mittels Faltung ebenso die Wahrscheinlichkeit für die akkumulierten Regenmengen über beliebig viele Tage zu jeder Zeit innerhalb des analysierten Zeitraums abgeleitet. Theoretisch ist das möglich. Zwar ist mit der erfolgreichen Modellierung täglicher Niederschlagssummen auch alle Information über die Regenwahrscheinlichkeiten aggregierter Niederschlagssummen von mehreren Tagen gegeben. Problematisch ist hierbei jedoch das mit der Faltung einhergehende Akumulieren von Ungenauigkeiten. Deshalb sollen die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes dann mit den Ergebnissen des folgenden Arbeitspaketes WP4 verglichen werden.

WP4 Statistische Modellierung aggregierter Niederschlagssummen in unterschiedlichen Flächen

In diesem Arbeitspaket werden zunächst Zeitreihen aggregierter Niederschlagssummen über beispielsweise 3 und 5 Tagen gebildet. Weiterhin werden Gebietsmittel über Flussgebietseinheiten, Flusseinzugsgebiete und die Bundesländer entstehen. Das Umweltbundesamt hat im Jahr 2002 10

Flussgebietseinheiten für die Bundesrepublik Deutschland ausgewiesen. Darunter sind die vier nationalen Gebietseinheiten Eider, Schlei/Trave, Warnow/Peene und Weser. Ebenso hat im Rahmen dieser Einteilung Deutschland Anteil an internationalen Flussgebietseinheiten der Donau, der Maas, des Rheins, der Elbe und der Oder. Für diese 10 Flussgebietseinheiten werden, jedoch bei ausschließlicher Betrachtung der nationalen Anteile, die Zeitreihen der Niederschlagsmittel gebildet. Für das Untersuchungsgebiet Rhein werden dann ebenfalls die beinhalteten Flusseinzugsgebiete Ems, Erft, Ruhr, Wupper und Sieg betrachtet. Für alle zuvor gebildeten Gebietsmittel werden ebenfalls Zeitreihen von Niederschlagsaggregaten gebildet, nun jedoch auch über längere Zeitperioden wie 1 Woche und 2 Wochen.

Auf alle generierten verschiedener räumlicher und zeitlicher Skalen wird wieder die Methode der statistischen Modellierung angewendet. Die dann ableitbaren Ergebnisse der Extremwertstatistik aggregierter Niederschlagssummen werden den Resultaten aus der Faltung (WP3.2) gegenübergestellt. Stichprobenhaft kann so überprüft werden, ob die Akkumulierung von Ungenauigkeiten bei der mathematischen Faltung zu hoch ist und somit eine separate Modellierung der generierten Zeitreihen notwendig ist. Sind die Übereinstimmung jedoch hinreichend, so kann aus der Modellierung täglicher Daten jegliche Information über die Wahrscheinlichkeiten und ihre zeitlichen Veränderungen für Niederschlagsaggregate über Zeitperioden abgeleitet werden.

Ebenso dienen insbesondere die Ergebnisse bzgl. aggregierter Niederschlagssummen von Gebietsmitteln zum Vergleich mit den stationären Extremwertstatistiken aus WP2. Sind auch bereits die Änderungen im Auftreten von Extremen täglicher Niederschlagssummen vielseitig belegt, so kann der stationäre Schätzer beispielsweise für trockene Ereignisse oder nasse Ereignisse bestimmter Intensität in bestimmten räumlichen und zeitlichen Skalen noch hinreichend sein.

WP5 Vergleich der Ergebnisse aus WP2, WP3 und WP4

Es werden die erhaltenen Schätzer aus WP2, WP3 und WP4 für das Eintreten extremer Ereignisse miteinander verglichen. Einerseits wird überprüft, ob und in welchen zeitlichen und räumlichen Skalen die Nullhypothese eines sich nicht ändernden Klimas (noch) erfüllt ist. Stationsbezogene und für Gebietsmittel berechnete Eintrittswahrscheinlichkeiten für tägliche und mehrtägige Niederschlagssummen werden in WP2 unter der Annahme von Stationarität und in WP3 bzw. WP4 bei Berücksichtigung natürlicher und anthropogener Schwankungen berechnet. Der statistische Vergleich der Wahrscheinlichkeiten (siehe z. B. Bosch, 1997) zeigt in welchen Skalen eine signifikante Abweichung besteht und somit die Instationaritäten zur Ableitung vertrauenswürdiger Schätzer zwingend berücksichtigt werden müssen.

Andererseits zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse von WP3 und WP4, ob die Betrachtung von Extremereignissen auf der Zeitskala mehrerer Tage eine separate Modellierung aggregierter Niederschlagssummen erfordert. Da die Faltung der Wahrscheinlichkeitsdichten zweier Zufallsvariablen die Dichte der Summe dieser Zufallsvariablen ergibt, kann durch die mathematische Operation beispielsweise die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(NN, t_4-t_5)$ für die Niederschlagsmenge NN der zwei aufeinander folgenden Tage zur Zeit t_4 und t_5 aus den bereits in WP3 modellierten Wahrscheinlichkeitsdichten $f(NN, t_4)$ und $f(NN, t_5)$ der Regenmengen zu den Zeitpunkten t_4 und t_5 abgeleitet werden. Die analytische Beschreibung täglicher Niederschlagssummen beinhaltet somit theoretisch vielseitig einsetzbare Information. Für jede betrachtete räumliche Skala, d.h. stationsbezogen oder Gebietsmittel betreffend, ist somit ausschließlich die Modellierung der kleinsten betrachteten

zeitlichen Skala notwendig. Zeigen die statistischen Vergleiche in diesem Arbeitspaket jedoch, dass durch die Operation zu viele Ungenauigkeiten akkumuliert werden, ist für jede räumliche und zeitliche Skala eine getrennte statistische Modellierung der abgeleiteten Zeitreihe notwendig. Der statistische Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichten aggregierter Niederschlagssummen aus der Faltung einerseits und der separaten Modellierung andererseits kann wiederum auf dem Kolmogorov-Smirnov-Test basieren. Dieser vergleicht ursprünglich eine empirische Verteilung mit einer theoretischen Verteilung. Hier angewendet kann der Test beispielsweise den Vergleich von Stichproben (Realisierungen) der modellierten Verteilungen aggregierter Niederschlagssummen zu verschiedenen Zeitpunkten mit den theoretischen Verteilungen, die aus der Faltung resultieren, beinhalten.

Tabelle 1: Zeitplan der Arbeitsschritte.

Arbeitspaket	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr			
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12
WP1	■	■	■	■	■	■						
WP1.1	■	■	■	■								
WP1.2					■	■						
WP1.3					■	■						
WP2					■	■	■					
WP2.1					■	■	■					
WP3						■	■	■	■			
WP3.1						■	■	■				
WP3.2								■	■			
WP4									■	■	■	
WP5											■	■

Die Arbeitsschritte werden entsprechend des in Tabelle 1 dargestellten Zeitplans bearbeitet. Einige Arbeitsschritte, wie die Erweiterung der statistischen Modellierung und die stationäre Extremwertstatistik täglicher Niederschlagsdaten (WP1 und WP2) sind unabhängig voneinander und können parallel bearbeitet werden. Die Einteilung der Arbeitsschritte erscheint der Antragstellerin gut abgestimmt und sollte zu einer erfolgreichen Durchführung des Projekts führen.

Literaturverzeichnis:

Alexander, L. V. et al., (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.

Arntz, W. E. and E. Fahrbach (1991): *El Niño – Klimaexperiment der Natur: die physikalischen Ursachen und biologischen Folgen*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.

Beck, C., J. Grieser and B. Rudolf (2005): *A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000*. DWD, Klimastatusbericht 2004, 181-190.

Bosch, K. (1997): *Elementare Einführung in die angewandte Statistik*. Vieweg studium, Braunschweig/ Wiesbaden.

Bromirski, P. D., R. E. Flick and D. R. Cayan (2003): *Storminess variability along the California Coast: 1858-2000*. *J. Climate*, 16: 982-993.

Brunetti, M., L. Buffoni, M. Maugeri and T. Nanni (2000a): *Trends of minimum and maximum daily temperatures in Italy from 1865 to 1996*. *Theoretical and Applied Climatology*, 66: 49-60.

Brunetti, M., S. Cecchini, M. Maugeri and T. Nanni (2000b): *Solar and terrestrial signals in precipitation and temperature in Italy from 1865 to 1996*. *Advances in Geosciences*, W. Schroeder (Editor), IAGA, pp. 124-133.

Brunetti, M., M. Maugeri, F. Monti and T. Nanni (2004): *Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years*. *J. Geophys. Res.*, 109, doi: 10.1029/2003JD004296.

Brunetti, M., M. Maugeri, T. Nanni, I. Auer, R. Boehm and W. Schoener (2006): *Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800-2003 period*. *J. Geophys. Res.*, 111, D11107, doi: 10.1029/2005JD006674.

Buffoni, L., M. Maugeri and T. Nanni, (1999): *Precipitation in Italy from 1833 to 1996*. *Theoretical and Applied Climatology*, 63: 33-40.

Cook, E. R., D. M. Meko and C. W. Stockton (1997): *A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bidecadal drought Rhythm in the Western United States*. *J. Climate*, 10: 1343-1356.

Dai A., K. E. Trenberth and T. Qian (2004): *A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming*. *J. Hydrometeorology*, 5: 1117–1130.

Frei, C., and C. Schär (2001): *Detection probability of trends in rare events: theory and application to heavy precipitation in the Alpine region*. *J. Climate*, 14, 1568-1584.

Grieser, J. and C.-D. Schönwiese (1998): *Parameterization of spatio-temporal patterns of volcanic aerosol induced stratospheric optical depth and its climate radiative forcing*. *Atmosphäre*, 12: 111-133.

Grieser, J. T. Staeger, C.-D. Schönwiese (2002): *Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes*. Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main, Eigenverlag des Instituts, Frankfurt a. M.

Grieser, J. and C.-D. Schönwiese (2001): *Process, forcing, and signal analysis of global mean temperature variations by means of a three-box energy balance model*. *Clim. Change*, 48: 617-146.

Grieser, J. T. Staeger, C.-D. Schönwiese (2007): *Estimates and uncertainties of return periods of extreme daily precipitation in Germany*. *Met. Z.* 16, 553-564.

Groisman, P.Ya., T.R. Karl, D.R. Easterling, R.W. Knight, P.B. Jamason, K.J. Hennessy, R. Suppiah, C.M. Page, J. Wibig, K. Fortuniak, V.N. Razuvaev, A. Douglas, E. Førland and P.M. Zhai (1999): *Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change*. *Clim. Change*, 42: 243-283.

Groisman, P. Y., R. W. Knight, D. R. Easterling, T. R. Karl, G. C. Hegerl and V. N. Razuvaev (2005): Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Climate*, 18: 1343-1367.

Henderson-Sellers, A. and A.-M- Hansen (1995): *Climate Change Atlas*. Kluwer, Dordrecht, 159pp.

Houghten, J.T, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

Hurrell, J.W., 1995: *Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation*. *Science* 269, 676-679.

Hurrell, J. W. and H. v. Loon (1997): Decadal variations in climate associated. *Climatic Change* 1997, 301-326.

IPCC (2007): *Summary for Policymakers*. In: *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.

Jones, P. D., T. Jonsson and D. Wheeler (1997): *Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South West Iceland*. *Int. J. Clim.* 17: 1433-1450.

Klein Tank, A. M. G. and G. P. Koennen (2003): *Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99*. *J. Climate*, 16: 3665-3680.

Leadbetter, M. R., G. Lindgreen, H. Rootzén (1983): *Extremes and related properties of random sequences and processes*. Springer, New York, 336pp..

MacDonald, I. L. and W. Zucchini (1997): *Hidden Markov and Other Models for Discrete-valued Time Series*. Monographs on Statistics and Applied Probability 70, Chapman and Hall/Crc, Washington D.C.

Maraun, D., T. J. Osborn and N. P. Gillet (2008): *United Kingdom daily precipitation intensity: improved early data, error estimates and an update from 2000 to 2006*. Int. J. Climatol. 28: 833-842.

McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist. (1993): *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, pp. 179-184. January 17-22, Anaheim, California.

Méndez, F., J., M. Menéndez, A. Luceño and I. J. Losada (2007): *Analyzing monthly extreme sea levels with a time-dependent GEV model*. JTECH, 24: 894-911.

Moberg, A. et multi. (2006): *Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000*. J. Geophys. Res.: 111, D22106, doi: 1029/2006JD007103.

Osborn, T., J. and M. Hulme (2002): *Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 360: 1313-1325.

Palmer, T. N and J. Räisänen (2002): *Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate*. Nature, 415: 512-514.

Philander, S. G. (1990): *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. International geophysics series, Vol. 46. Academic Press, San Diego, NY.

Rapp, J. and C.-D. Schönwiese (1996): *Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990*. Hrsg. Vom Fachbereich Geowissenschaften der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt.- 2., korr. Aufl.- Frankfurt am Main: Institut für Meteorologie und Geophysik. Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten: Ser. B, Meteorologie und Geophysik; Bd. 5.

Ropelewski, C.F. and Jones, P.D. (1987): *An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index*. Monthly Weather Review 115, 2161-2165.

Rousseeuw, P. J., A. M. Leroy (1987) : *Robust Regression and Outlier Detection*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, New York.

Schär, C. and G. Jendritzky (2004): *Climate change: Hot news from summer 2003*. Nature 432: 559-560.

Schlittgen R. und B. H. J. Streitberg (1999): *Zeitreihenanalyse*. Oldenbourg Verlag, München/Wien.

Schneider, U., T. Fuchs, A. Meyer-Christopher, B. Rudolf (2008): *Global Precipitation Analysis Products of the GPCC*. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publikation, 1-12. GPCC Homepage: <http://gpcc.dwd.de>

Schönwiese, C.-D. and Rapp, J. (1997): *Climate Trend Atlas of Europe Based on Observations 1891-1990*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 228pp.

Schönwiese, C.-D., T. Staeger, S. Trömel (2004): *The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis*. Met. Z. 13: 323-327.

Schönwiese, C.-D., S. Trömel (2005): *Langzeitänderungen des Klimas in Deutschland*. In: Lozan, J.L., H. Graßl, P. Hupfer, L. Menzel, C.-D. Schönwiese

(Hrsg): Warnsignal Klima. Genug Wasser für alle? Wiss. Auswert./GEO, Hamburg: 182-187.

Schönwiese, C.-D., S. Trömel (2006): *Mehr extreme Niederschläge in Deutschland ? Eine innovative statistische Analyse der Eintrittswahrscheinlichkeiten*. Naturwiss. Rdsch., 59: 194-199.

Schrader, K. and T. Hettmansperger (1980): *Robust analysis of variance upon a likelihood ratio criterion*. Biometrika, 67, 93-101.

Staeger, T. (1998): *Statistische Analyse des ENSO- und Vulkanismus-Signals in Klimazeitreihen*. Diplomarbeit, Inst. F. Meteorologie u. Geophysik, Universität Frankfurt.

Storch, H. v. and F. W. Zwiers (1999): *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, 494pp.

Trenberth, K. E., P. D. Jones, P. Amenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai (2007): Observations: surface and atmospheric climate change. In: *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.

Trömel, S. (1999): *Extremwertstatistik europäischer Temperaturzeitreihen 1871-1990*. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie und Geophysik, Frankfurt a.M.

Trömel, S. (2004): *Statistische Modellierung von Klimazeitreihen*. Dissertation. Fachbereich Geowiss./Geographie, Univ. Frankfurt/M.; (2005): Bericht Nr. 2, Inst. Atmosph. u. Umwelt, Univ. Frankfurt/M.

UBA (2002): Homepage des Umweltbundesamt <http://www.umweltbundesamt.de/>

Werner, A. and C.-D. Schönwiese (2002): *A statistical analysis of the North Atlantic Oscillation and its impact on European temperature*. The Global Atmosphere and Ocean System, 8: 293-306.

Wigley, T. M. L. (1987): Radiative contribution of different trace gases to the Greenhouse Effect. *Climate Monitor* 16: 14-28.

Wilks, D. S. (1995): *Statistical methods in atmospheric science*. Academ. Press, London, 467pp.

Willems, P. (2000): *Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two seasons and two storm types*. *J. Hydrology*, 233: 189-205.

Zolina, O., A. Kapala, C. Simmer and S. K. Gulev (2004): *Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: a comparative assessment*. *Glob. Planet. Change*, 44: 129-161.

Zolina O., C. Simmer, A. Kapala and S. K. Gulev (2005): *On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe*. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14707, doi: 10.1029/2005GL023231.

Zolina, O., C. Simmer, A. Kapala, S. Bachner, S. K. Gulev, H. Maechel (2008): Seasonality of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. J. Geophys. Res. 113, D06110, doi: 10.1029/2007JD008393.

3.3 Untersuchungen am Menschen oder an vom Menschen entnommenem Material

Nicht geplant.

3.4 Tierversuche

Nicht geplant.

3.5 Gentechnologische Experimente

Nicht geplant.

4. Beantragte Mittel

4.1 Personalkosten

Die Antragstellerin beantragt die Finanzierung ihrer eigenen Stelle nach BAT2a. Sie wird den Großteil der aufgeführten Analysen im Arbeitsplan durchführen.

Zusätzlich beantragt die Antragstellerin eine studentische Hilfskraft (SHK) für 19h/Woche über einen Zeitraum von 2 Jahren. Im Rahmen des Projekts fallen immer wieder Arbeiten an, die durch eine studentische Hilfskraft mitgetragen werden können. Hierbei sind die Visualisierung von Ergebnissen (WP1.3), die Erstellung von Niederschlagsaggregaten und Gebietsmitteln (im Rahmen von WP4) oder der Vergleich von Ergebnissen (im Rahmen von WP5) zu nennen.

Summe 4.1: 1 Stelle nach BAT2a/Jahr für 3 Jahre
1 studentische Hilfskraft (19Std./Woche) für 2 Jahre

4.2 Wissenschaftliche Geräte

Die Antragstellerin beantragt keine wissenschaftlichen Geräte.

4.3 Verbrauchsmaterial

Die Antragstellerin bittet um einen Beitrag der DFG zu Unkosten für Verbrauchsmaterial (Druckertoner und -papier, Speichermedien u.s.w) in Höhe von € 500/ Jahr.

Summe 4.3: € 1500 für 3 Jahre.

4.4 Reisen

Für 2009:

- EGS General Assembly, Wien, Österreich – **€1200**

Für 2010:

- EGS General Assembly, Wien, Österreich – **€1200**
- 11th International Meeting on Statistical Climatology, Sommer 2010, Edinburgh, Scotland (voraussichtlich) – **€1300**
- DACH-Meteorologentagung - **€1000**

Für 2011:

- Tagungsreise – **€2000**

4.5 Publikationskosten

Die Antragstellerin beantragt eine Beteiligung an Publikationskosten von 750€/ Jahr.

Summe 4.5: € 2250

4.6 Sonstige Kosten

Es werden voraussichtlich keine sonstigen Kosten entstehen.

5. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

Die folgenden aufgeführten Personen beteiligen sich an der Realisierung des Projekts:

- Prof. Dr. Clemens Simmer, Meteorologisches Institut der Universität Bonn (MIUB), Lehrstuhl für Allgemeine und Experimentelle Meteorologie, allgemeine wissenschaftliche Beratung, finanziert durch die Universität Bonn
- Prof. Dr. Andreas Hense, MIUB, Lehrstuhl für Klimadynamik, Beratung zur Zeitreihenanalyse, finanziert durch die Universität Bonn
- Dr. Petra Friedrichs, wissenschaftliche Assistentin, MIUB, Beratung zu Punktprozessen und Markovketten, finanziert durch die Universität Bonn
- Dr. Alice Kapala, MIUB, wissenschaftliche Mitarbeiterin, MIUB, Beratung bei statistischen Methoden, finanziert durch die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften
- Dr. Olga Zolina, wissenschaftliche Mitarbeiterin, MIUB, Beratung bei klassischer Extremwertstatistik und Datenvorkontrolle, finanziert durch die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften
- Dr. Victor Venema, wissenschaftlicher Mitarbeiter, MIUB, Beratung bezüglich Homogenität von Daten, finanziert durch die DFG (SFB TR32)
- Dr. Ralf Lindau, wissenschaftlicher Mitarbeiter, MIUB, Beratung bezüglich Homogenisierung, finanziert durch das BMBF (LandCaRe 2020)
- Dr. Susanne Bachner, wissenschaftliche Mitarbeiterin, MIUB, Beratung bei nichtparametrischen Tests, finanziert durch die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften

5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern

- Prof. Dr. C.-D. Schönwiese, Institut für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt a.M., Widmung für Meteorologische Umweltforschung/Klimatologie, Beratung bzgl. Trendanalyse und Klimavariabilität, im Ruhestand
- Prof. Dr. F.-W. Gerstengarbe, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, geschäftsmäßiger Stellvertreter des Vorstandes, Beratung bzgl. Regionalisierung und anthropogener Klimabeeinflussung, finanziert durch das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
- Dr. Jürgen Grieser, Senior Catastrophe Risk Modeller, Risk Management Solutions Ltd. (RMS), London, U.K., Beratung zur Statistik von Tagesdaten sowie Anwenderprogramme, finanziert durch RMS

5.3 Apparative Ausstattung

Das Meteorologische Institut der Universität Bonn (MIUB) verfügt über die notwendige Ausstattung für eine erfolgreiche Durchführung des Projekts. Das MIUB besitzt einige leistungsstarke UNIX und LINUX Workstations, die zur Verarbeitung und Analyse der Daten im Projekt verwendet werden können. Weiterhin stehen zur Zeit RAID-Speicher mit einer Speicherkapazität von insgesamt 12 TB zur Verfügung.

5.4 Laufende Mittel für Sachausgaben

Das MIUB wird alle weiteren Kosten decken, die nicht im Antrag aufgeführt sind. Dies sind insbesondere zusätzliche Publikationskosten oder Kosten für weitere Speichereinheiten. Zusätzlich stellt die Universität jedem erfolgreichen Antragsteller zusätzlich 5% der bewilligten Projektsumme (Anreizmittel) zur Verfügung, die ebenso in das Projekt zur Deckung zusätzlicher laufender Kosten einfließen.

5.5 Interessenkonflikte bei wirtschaftlichen Aktivitäten

Keine.

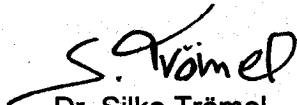
5.6 Sonstige Voraussetzungen

Keine.

6. Erklärungen

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn ich einen solchen Antrag stelle, werde ich die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

7. Unterschrift(en)



Dr. Silke Trömel

24. September 2008, Bonn

8. Verzeichnis der Anlagen

- | | |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Anschreiben | <i>Anschreiben.pdf</i> |
| 2. Antrag | <i>Antrag.pdf</i> |
| 3. Lebenslauf | <i>Lebenslauf_Trömel.pdf</i> |
| 4. Komplettes Publikationsverzeichnis | <i>K_Publikationsverzeichnis_Trömel.pdf</i> |
| 5. Antragsrelevantes Publikationsverzeichnis | <i>A_Publikationsverzeichnis.pdf</i> |
| 6. Fragebogen Mitarbeiter | <i>Fragebogen_Trömel.pdf</i> |
| 7. Zeugnisse: | <i>Diplom_Trömel.pdf</i>
<i>Dissertation_Trömel.pdf</i> |
| 8. Befürwortungen | <i>Befürwortung_Schönwiese.pdf</i>
<i>Befürwortung_Gerstengarbe.pdf</i>
<i>Befürwortung_Simmer.pdf</i> |
| 9. Publikationen | <i>2005_Trömel_MetZ.pdf</i>
<i>2007_Trömel_TheorApplClimatol.pdf</i>
<i>2008_Trömel_TheorApplClimatol.pdf</i> |