Institut für Physik und Astronomie | Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät | Universität Potsdam
Potsdam Institut für Klimafolgenforschung | RD I Erdsystemanalyse | RD II Klimawirkung & Vulnerabilität

DIPLOMARBEIT

Klimaprojektionen und deren Unsicherheit für die Region Hyderabad (Indien) auf der Basis der IPCC-AR4-Rechnungen und lokaler Beobachtungsdaten.

Erstgutachter: Prof. Dr. Anders Levermann
Zweitgutachter: Dr. Matthias K. B. Lüdeke

Bearbeiter: Martin Budde
Schillerstraße 1
14471 Potsdam
Matrikelnr. 720749
Physik/Klimaphysik/Geographie Diplom

Eingereicht am: 14. Juni 2011

Inhalt

1 Einleitung 2
2 Kurzüberblick Hyderabad und projektspezifische Einordnung der Arbeit 4
2.1 Hyderabad – Megacity of Tomorrow 4
2.2 „Climate and Energy in a complex Transition Process towards Sustainable Hyderabad" 5

3 Grundlagen der Klimamodellierung für Hyderabad 6
3.1 Klimawirkungsanalyse und Klimavariablen 6
3.2 Beobachtungsdatensätze 10
3.3 Zum aktuellen Klima Hyderabads 11
a) Jahresdurchschnittstemperaturn und Hitzewellen 12
b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse 14

3.4 Emissionsszenarien 17
3.5 Globale Klimamodelle 20

4 Methodik 25
4.1 Regionalisierung von globalen Klimamodelldaten 25
4.1.1 Kurzdarstellung möglicher Regionalisierungsverfahren 25
4.1.2 Darstellung der verwendeten Regionalisierungsalgorithmen 27
a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen 28
b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignissen 31

4.2 Gewichtungen als Gütemaße 34
a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen 34
b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignissen 36

4.3 Methoden der Auswertung 38
4.3.1 Kerndichteschätzer 38
4.3.2 Vergleichsdiagramme 38

5 Auswertung der Klimamodellierung für Hyderabad 41
5.1 Gewichtete Dichteverteilungen der vier Klimavariablen 41
a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen 45
b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse 47

5.2 Klimaprojektionen für Hyderabad – Gleichgewichtete Auswertung der vier Klimavariablen 50
a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen 50
b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse 56

6 Ergebniszusammenfassung und Fazit 61

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 65
Literaturverzeichnis 68
Verzeichnis verwendeter Datenbanken 72
Appendix 73
Selbstständigkeitserklärung 91

1 Einleitung

Ein anthropogen verursachter Klimawandel ist nicht mehr zu vermeiden, denn auch mit den bis heute vom Menschen in die Atmosphäre emittierten Treibhausgasen wird sich die globale Durchschnittstemperatur, die im Mittel bereits 0.74°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau liegt (Meehl et al. 2007, Trenberth et al. 2007), künftig weiter erhöhen. Die weiter andauernden Emissionen von Treibhausgasen und das bisherige Nicht-Gelingen eines Anschlussabkommens an das Kyoto-Protokoll zur Begrenzung dieser Emissionen machen eine Auseinandersetzung mit den Folgen des Klimawandels wichtiger denn je. Das Thema Anpassung (Adaptation) an den Klimawandel und dessen Folgen erhält somit einen immer höheren Stellenwert für die Handlungsorientierungen gesellschaftlicher wie individueller Akteure. Für eine möglichst effektive Adaptation ist es von Bedeutung, dass nicht nur auf bereits veränderte Klimabedingungen reagiert wird, sondern auch zukünftige Entwicklungen des Klimas in die gesellschaftlichen und individuellen Entscheidungsprozesse einbezogen werden (Washington et al. 2009). Dabei spielen globale Klimamodelle eine wichtige Rolle, da mit ihnen die zukünftige Klimaentwicklung in Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen, in sogenannten Klimaprojektionen, berechnet werden kann. Auf dieser Basis können dann mögliche Folgen des Klimawandels abgeschätzt werden (vgl. Tebaldi & Knutti 2010).

Für eine regionale Folgenabschätzung sind solche globalen Modelle jedoch räumlich nicht hinreichend genau aufgelöst (McGuffie & Henderson 2005, 236). Räumlich feiner aufgelöste Klimaprojektionen werden mit Hilfe von regionalen Klimamodellen erstellt. Auf deren Basis können dann zum Beispiel Aussagen zu Desertifikation, Bodenerosion, Hochwassern oder auch Hitzewellen in der jeweils betrachteten Region gemacht, und entsprechende Adaptationsmaßnahmen, wie zum Beispiel eine Anpassung der Infrastruktur oder eine frühzeitige Umsiedlung, abgeleitet werden (vgl. van der Linden & Mitchell 2009).

Vor diesem Hintergrund sollen in der vorliegenden Arbeit für die indische Stadt Hyderabad regionale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert erstellt werden. Dabei soll es vor allem darum gehen, die Unsicherheiten in der globalen Klimamodellierung mit einzubeziehen um Fehlanpassungen zu vermeiden. Diese treten auf, wenn im Fall einer Projektion aufgrund von ungenügenden Unsicherheitsmargen eine (teure) Anpassungsmaßnahme gewählt wird, die nur für genau diese Projektion wirksam ist, anstatt angesichts der derzeitigen Unsicherheit breit wirksame, oder zumindest win-win-Optionen vorzuziehen Die Arbeit ist Teil eines größeren Projektes (DLR 2005), das sich mit der Erstellung nachhaltiger Stadtentwicklungspfade für diese Metropolregion befasst. Eine genauere Vorstellung des Projektes und der Stadt Hyderabad findet sich im zweiten Kapitel der Arbeit.

Im Rahmen dieses größeren Projektes wurde auf Basis des heutigen Klimas der Stadt eine Klimawirkungsanalyse für die Region durchgeführt, in der unter anderem vier für die Stadt besonders relevante (impaktrelevante) Klimavariablen identifiziert wurden (vgl. Reckien et al. 2009). Daher wird die Arbeit bei der Erstellung der Klimaprojektionen auch den Schwerpunkt auf diese vier Variablen legen. Kapitel 3 wird sich zunächst eingehender mit

den vier impaktrelevanten Klimavariablen beschäftigen, um dann die verwendeten Datensätze vorzustellen, um darauf aufbauend das heutige Klima der Stadt und Region im Hinblick auf die vier Variablen zu behandeln. Außerdem werden die weiteren Grundlagen der zu erstellenden Klimaprojektion für Hyderabad vorgestellt. Hierbei handelt es sich zum einen um so genannte Emissionsszenarien, die die zukünftige globale sozioökonomische Entwicklung und die damit verbundenen anthropogenen Treibhausgasemissionen beschreiben. Im Auftrag des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurden im Special Report on Emission Scenarios (SRES) (Nakićenović & Swart 2000) verschiedene Szenarien der globalen gesellschaftlichen Entwicklung und damit auch des Verlaufs der Treibhausgasemissionen im 21. Jahrhundert ausformuliert. Diese so genannten SRES-Szenarien basieren auf Variablen wie zum Beispiel der Entwicklung der Weltbevölkerung oder auch des technischen Fortschritts und bilden die Diskussionsbasis im internationalen Klimadiskurs. In der vorliegenden Arbeit wird mit zwei dieser SRES-Szenarien, den so genannten A1- und B2-Szenarien, gearbeitet. Neben den Emissionsszenarien spielen für eine regionale Klimaprojektion zum anderen die globalen Klimamodelle, genauer gesagt die Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs), eine zentrale Rolle. Nur in globalen Modellen können die komplexen Veränderungen in den Impuls-, Wärme- und Feuchteflüssen des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Systems erfasst und berechnet werden. Da es sich bei Modellen generell, und somit auch bei AOGCMs, aber immer um eine Vereinfachung komplexer Realität handelt, hat jedes Modell bestimmte Schwachstellen. Um dem zu begegnen und möglichst viele „blinde Flecken“ der Modelle in die darauf aufbauende Klimaprojektion für Hyderabad einzubeziehen, werden in dieser Arbeit, wie es auch aktueller Forschungsstand in den Klimawissenschaften ist (vgl. z.B. Tebaldi & Knutti 2010, 34), verschiedene AOGCMs für die Klimaprojektion herangezogen. Damit soll erreicht werden, die Unsicherheitsmarge der Klimaprojektion für Hyderabad möglichst gut zu erfassen. Im 4. Sachstandsbericht des IPCC wurden 23 AOGCMs einbezogen (Meehl et al. 2007, 761), von denen für die Klimaprojektion Hyderabads insgesamt 17 herangezogen werden. Die Arbeit basiert also auf fünf verschiedenen Daten-Grundlagen (Klimavariablen, lokalen und regionalen Beobachtungsdatensätzen, SRES-Szenarien und 17 AOGCMs), die auf verschiedene Weise miteinander verknüpft werden.

Kapitel 4 wird die dafür angewendeten und für die Arbeit zentralen Algorithmen genauer vorstellen. Bevor für jedes AOGCM die Verläufe der vier Klimavariablen einzeln abgeleitet werden, werden noch die verschiedenen Möglichkeiten dargestellt, globale Klimamodelle zu regionalisieren (Kapitel 4.1). Da 17 verschiedenen AOGCMs für die Klimaprojektionen verwendet werden, bietet es sich an ein Qualitätsmaß zu entwickeln, welches eine Aussage über die Vertrauenswürdigkeit des jeweils zugrunde liegenden AOGCMs ermöglicht. In dieser Arbeit werden dazu neun verschiedene Qualitätsmaße erarbeitet (Kapitel 4.2), die dann später miteinander verglichen werden (Kapitel 5.1). Die Qualität eines Modells wird dabei jeweils an seiner Übereinstimmung mit Beobachtungsdaten der Region um Hyderabad (Zeitraum 1961-2000) bemessen. Die Qualitätsmaße werden nun bei der Erstellung von den Ensemble-Projektionen für Hyderabad verwendet. Die Ensemble-Projektion eines Emissions-

szenarios besteht je Klimavariable aus einer Häufigkeitsverteilung, die man mit einiger Vorsicht als Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Projektion interpretieren kann. In dieser können die einzelnen Projektionen der AOGCMs mit einem der verschiedenen Qualitätsmaße gewichtet sein; ansonsten wird hier von einer ungewichteten Verteilung gesprochen, die nach einer kritischen Beurteilung der Vor- und Nachteile einer Gewichtung eingehender in Kapitel 5.2 analysiert wird. Neben der allgemeinen Auswertung der Ensemble-Projektionen in Kapitel 5.2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians wird eine für diese Arbeit eigens erarbeitete Darstellungsform zur Auswertung verwendet. Diese wurde zuvor in Kapitel 4.3 näher erläutert.

Die Ergebnisse der ungewichteten Auswertung werden zusammenfassend in Kapitel 6 dargestellt um, im Anschluss daran Vorgehen und Ergebnisse der Arbeit kritisch zu resümieren.

2 Kurzüberblick Hyderabad und projektspezifische Einordnung der Arbeit

2.1 Hyderabad – Megacity of Tomorrow

Hyderabad ist eine sich rasch entwickelnde Metropole im Süden Indiens und mit 4.1 Millionen Einwohnern die sechstgrößte Stadt des Landes (Anuradha 2011, Reckien et al. 2009). Sie ist die Hauptstadt des Bundesstaates Andra Pradesh und durch ein rapides Bevölkerungswachstum gekennzeichnet. Für das Jahr 2015 wird innerhalb der Metropolregion eine Einwohnerzahl von über 10 Millionen in Aussicht gestellt (MCH 2005). Damit einher geht auch ein sehr schnelles ökonomisches Wachstum. Hyderabad ist nach Bangalore der zweitwichtigste Wirtschaftsstandort der indischen IT-Branche. Biotechnology und Pharmazie sind weitere wichtige Wirtschaftszweige der Stadt. Neben dem prognostizierten starken Bevölkerungswachstum der Stadt und der industriell ausgerichteten Wirtschaft führt Hyderabads Transportsituation (2.2 Millionen Fahrzeuge, täglich rund 600 Neue) (Reckien et al. 2009, 9) zu einem stetig steigenden Energie- und Ressourcenverbrauch, und somit auch zu stetig steigenden Treibhausgasemissionen. Zu den Herausforderungen dieses starken Wachstums kommen zusätzlich auch naturräumliche Schwierigkeiten der Stadt. So hat Hyderabad zum Beispiel im Sommer mit Wasserknappheit und im Monsun mit starken Regenfällen, die innerstädtischen Überschwemmungen zur Folge haben, zu kämpfen (z.B. IFRE 2000). In ihren Auswirkungen verstärkt werden diese Phänomene durch die hügelige bis felsige Orographie der Stadt und den weiten Entfernungen zu großen Flüssen (vgl. Reckien et al 2009, 9).

Im Hinblick auf die globale Erwärmung ist mit einer Verschärfung dieser Situation zu rechnen. Steigende Temperaturen sorgen für höhere Verdunstungsraten und damit wahrscheinlich zu einer weiteren Verschlechterung der Wasserversorgung im Sommer. Zugleich bedeuten höhere Lufttemperaturen auch, dass größere Wassermengen aufgenommen und transportiert werden können und so für die Monsunzeit mit noch mehr oder stärkeren Starkregenereignissen zu rechnen ist (Bates et al. 2008). Die Folgen eines sich wandelnden Klimas treffen dabei in Hyderabad auf eine sehr vulnerable Gesellschaft, die zu einem Drittel der

Bevölkerung unterhalb der Armutsgrenze lebt und unter Ernährungs- und Gesundheitsproblemen leidet (Reckien et al. 2009, 15).

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass Hyderabad eine vor naturräumlichen, sozialen und wirtschaftlichen Herausforderungen stehende zukünftige Megacity ist.

2.2 „Climate and Energy in a complex Transition Process towards Sustainable Hyderabad"

Im Hinblick auf die 2.1 schlaglichtartig dargestellten Herausforderungen für die Stadt Hyderabad, versucht das Projekt „Climate and Energy in a complex Transition Process towards Sustainable Hyderabad" nachhaltige Stadtentwicklungspfade zu erarbeiten (DLR 2005). Diese sollen zum einen eine regionale Ausrichtung von Nachhaltigkeit beinhalten, die sich auf lokalen Umweltschutz und vorausschauende, an klimatische Veränderungen angepasste Stadtplanung bezieht. Zum anderen sollen diese Stadtentwicklungspfade aber auch im globalen Kontext auf eine nachhaltige Entwicklung ausgerichtet sein. Dies beinhaltet dann auch die Vermeidung bzw. Verringerung von Treibhausgasemissionen und die Entwicklung von Strategien hin zu mehr Energieeffizienz und erneuerbaren Energien.

Die verschiedenen Probleme/Stressoren der Stadt drücken dabei kein Alleinstellungsmerkmal aus, sondern unterstreichen den prototypischen Charakter Hyderabads als eine sich entwickelnde Megacity. Das Projekt ist damit Teil des Förderschwerpunktes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Titel „Forschung für die nachhaltige Entwicklung der Megastädte von morgen" (BMBF 2010).

Die Zielsetzung der Projektes ist, dass Hyderabad bis zum Jahre 2030 eine „Low Emission City" wird. Dies soll durch eine Transformation relevanter Institutionen und Entscheidungsstrukturen umgesetzt werden. Dabei wird die Veränderung der Regeln und Organisation von menschlichem Handeln, sowohl individuell als auch kollektiv, als Schlüssel zu einer auf Nachhaltigkeit bedachten Entscheidungsfindung verstanden.

Mit seiner Fokussierung auf die Problematik des Klimawandels und der Energieeffizienz unterteilt sich das Projekt in drei Bereiche, so genannte cross-cutting issues (Hagedorn et al. 2009, 9):

1. Impact paths: Temperature Change and Change in Water Availability & Rainfall Patterns,
2. Lifesyle Dynamics, Greenhouse Gas Emission and Climate Change und
3. Energy Management for Hyderabad.

Innerhalb dieser drei cross-cutting issues werden jeweils die Themenblöcke Transport, Energie/Wasser/Umweltverschmutzung sowie die Themen Nahrungsmittelversorgung und Gesundheit bearbeitet (Hagedorn et al. 2009, 9).

Die Bearbeitung der unterschiedlichen Teile des Projektes findet an mehreren Instituten statt, wobei das cross-cutting issue 1, „Impact paths: Temperature Change and Change in

Water Availability & Rainfall Patterns“, vom so genannten Work-Package 1 (WP1) am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) bearbeitet wird und den spezielleren Rahmen der vorliegenden Arbeit bildet. Ziele dieses Work-Package 1 sind dabei:

1. die Erarbeitung der möglichen Klimaveränderungen in Hyderabad und der Metropolregion,
2. die Identifikation von etwaigen Auswirkungen dieses Klimawandels auf die Bereiche Ernährung, Armut, Verwaltung natürlicher Ressourcen und Gesundheit, sowie
3. die Ermittlung von potentiellen Adaptationsmöglichkeiten im Hinblick auf die zu erwartenden Klimawandelfolgen.

Im Besonderen geht es im Work-Package 1 darum, den Grad an Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Klimaentwicklung und dessen Folgen zu berücksichtigen (Hagedorn et al. 2009, 16f.). An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an.

3 Grundlagen der Klimamodellierung für Hyderabad

Das folgende Kapitel wird sich damit beschäftigen, die für die Klimamodellierung Hyderabads verwendete Datengrundlage vorzustellen. Zum einen handelt es sich dabei um die vier zentralen Klimavariablen für die Projektionen erstellt werden sollen. Unter Punkt 3.1 werden diese näher beschrieben. Zum anderen werden im darauffolgenden Abschnitt die Datensätze vorgestellt, aus denen die Beobachtungsdaten stammen. Diese werden unter Punkt 3.3 herangezogen, um zunächst das aktuelle Klima Hyderabads zu charakterisieren. In den späteren Abschnitten der Arbeit werden diese Daten dann verwendet, um die Qualität der Modellierungen zu beurteilen. Schließlich werden noch globale Klimamodelle (3.5) und die ihnen zugrunde liegenden Emissionsszenarien (3.4) im Allgemeinen, sowie im Spezielleren, d.h. die für diese Arbeit herangezogenen, vorgestellt.

3.1 Klimawirkungsanalyse und Klimavariablen

In einer ausführlichen Klimawirkungsanalyse für die Stadt Hyderabad wurden für die Sektoren Transport, Energie, Wasser, Ernährung und Gesundheit potentielle Wirkungen des Klimawandels erarbeitet (vgl. Reckien et al. 2009). Dafür wurden die fünf Bereiche mit Hilfe von Literaturrecherchen, Experteninterviews und Zeitungsanalysen untersucht. Auf Basis der Literaturrecherche wurden verschiedene Klimavariablen identifiziert, die Wirkungen auf die fünf Sektoren haben (McMichael et al. 2003, Revi 2007, Satterthwaite et al. 2007). Mit Hilfe der Experteninterviews und der Zeitungsanalyse wurde dann ihre Klimawirkung, die so genannte Impactrelevanz im Hinblick auf die Stadt Hyderabad verifiziert. Im weiteren Vorgehen wurden auf Basis dieser Vorarbeiten Klimawirkungsketten erstellt, die die spezifischen Auswirkungen von vier Klimavariablen auf die einzelnen Sektoren darstellen. Dabei sind auch

die Effekte dieser Wirkungsketten hinsichtlich des Klimawandels untersucht worden. Im Folgenden werden die vier identifizierten Klimavariablen, die in Hyderabad als besonders relevant hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Sektoren Transport, Energie, Wasser, Ernährung und Gesundheit einzustufen sind, kurz vorgestellt (Reckien et al. 2009, 22). Dabei handelt es sich um:

1. *Jahresdurchschnittstemperatur:* Die Jahresdurchschnittstemperatur in Hyderabad ist unter anderem ausschlaggebend für die Evapotranspiration und hat somit einen großen Einfluss auf die Bodenwasserverfügbarkeit und damit auf die peri-urbane Landwirtschaft. Desweiteren wirkt sie sich in zweierlei Hinsicht auf den Energiesektor aus; zum einen indem sie in Zusammenhang steht mit dem Energiebedarf für Kühlung und Wasserversorgung, und zum anderen da der Effizienzgrad der Kraftwerke mit den Umgebungstemperaturen negativ korreliert, d.h. der Effizienzgrad sinkt bei steigenden Umgebungstemperaturen.

2. *Hitzewellen:* Die Anzahl an Hitzewellen in der Stadt hat vor allem Auswirkung auf die Gesundheit und körperliche Belastbarkeit der Stadtbevölkerung. Es kommt aber auch wie im Falle der Jahresdurchschnittstemperatur zu Auswirkungen auf den Energiesektor, da die extremen Temperaturen zum Beispiel zu kurzfristigen Energiebedarfsspitzen der Stadt, bei den bereits genannten Problemen in der Kraftwerkskühlung führen.

3. *Jahresgesamtniederschlag:* Der Jahresgesamtniederschlag in der Metropolregion Hyderabad hat, indem er ausschlaggebend ist für die Grundwasserbildung, ebenfalls Auswirkungen auf die peri-urbane Landwirtschaft. Weiterhin hat er großen Einfluss auf die Trinkwasserverfügbarkeit und den Energiebedarf der Stadt, da im Falle von Wasserknappheit große Mengen Wasser unter erheblichem Energieaufwand von weiter entfernten Stauseen in die Stadt gepumpt werden müssen.

4. *Starkregenereignisse:* Die Häufigkeit von Starkregenereignissen in der Stadt Hyderabad führen zu einer Überlastung der Abwassersysteme und somit zu innerstädtischen Überflutungen. Daraus können Kontaminationen der Wasservorkommen mit Bakterien und Industrieabfällen resultieren. Desweiteren kommt es zu Beschädigungen von Wohngebäuden und Infrastruktur und damit zu kurz- und mittelfristigen Beeinträchtigungen der Verkehrsführung.

Für die Klimavariable der Hitzewellen gibt es keine eindeutige Definition. Einige Definitionen betonen eher den Temperaturkontext wie zum Beispiel das Indian Meteorological Department (IMD), andere die Dauer des Ereignisses, wie beispielsweise die World Meteorological Organization (WMO in Frich et al. 2009). Selbst innerhalb der indischen Institutionen gibt es keine einheitliche Definition. Da für die Arbeit die Anzahl der Hitzewellen eine zentrale Rolle

spielt, ist es für den weiteren Verlauf der Arbeit zunächst notwendig, eine geeignete Definition festzulegen. Dabei wurde versucht, die grundlegenden Ideen und Schlüsselgrößen verschiedener Definitionen aufzunehmen. Wichtigstes Element ist dabei die normale Maximaltemperatur (normal maximum temperature, NMT), da sie charakterisiert, an welche Temperatur die Bevölkerung angepaßt ist. Dabei ist jedoch oft unklar, ob es sich dabei um das klimatologische Mittel (z.B. das Mittel über 30 Jahre) der jährlichen, monatlichen oder wöchentlichen – maximalen oder durchschnittlichen Tageshöchsttemperatur handelt. Am ehesten scheidet dabei das jährliche Mittel der Tagesmaximaltemperatur aus, auch wenn, was in Hyderabad der Fall ist, der Jahresgang in den Temperaturen relativ flach ist.

Für die vorliegende Arbeit wurde eine Definition von Hitzewellen gewählt, die eine Mischung aus zwei Elementen darstellt: dem klimatologischen Mittel der Tagesmaximaltemperaturen des heißesten Kalender*monats* (welches die typische Temperatur widerspiegelt, die die Bevölkerung in diesem heißen Monat erwartet) und dem klimatologischen Mittel der Tagesmaximaltemperatur am heißesten Kalender*tag*. Das zweite Element ist ein Maß für die Variabilität, die die Bevölkerung erwartet. Das arithmetische Mittel dieser beiden Temperaturen wurde dann als normale Maximaltemperatur (NM) definiert. Als Schwellwert für eine Hitzewelle wurden 3,5K oberhalb der NM festgelegt, da Hyderabads NM 39.7°C. Der Aspekt der Dauer des Ereignisses wurde in Anlehnung an das IMD nicht einbezogen.

Für die Klimavariable Starkregenereignis wird in der Arbeit der Schwellenwert von 80mm Niederschlagsmenge festgelegt. Solche oder stärkere Niederschläge führen zu längerfristigen Beschädigungen der städtischen Bausubstanz und Infrastruktur (vgl. auch Kapitel 3.3).

Tabelle 3.1.1 stellt die vier Variablen noch einmal überblickshaft mit ihren Auswirkungen, Konsequenzen und möglichen Adaptationsmaßnahmen zusammen, bevor im folgen Kapitel eine Charakterisierung des Klimas Hyderabads mit besonderen Augenmerk auf diese vier Variablen erfolgt.

Tabelle 3.1.1: Schematische Zusammenfassung der Klimavariablen mit ihren Auswirkungen auf das städtische Subsystem Hyderabads, sowie möglichen Adaptationsmaßnahmen (verändert, nach Reckien et al. 2009) (*hauptsächlich im Rahmen der saisonalen Durchschnittstemperaturen relevant).

Klimavariable	beeinflusst …	hat Auswirkungen auf …	mit Konsequenzen für … (-) = vermindert, (+) = verstärkt	mögliche Adaptationsmaßnahmen
Jahres-durchschnitts-temperatur	· Bodenwasserverfügbarkeit	· Grundwasserneubildung	(-) Trink- und Nutzwasserverfügbarkeit (-) landwirtschaftliche Erträge (-) Effizienz der Energieproduktion (-) Wasserqualität der Brunnen (+) Kühlungsbedarf in Gebäuden und bei Transporten (+) (verbesserte Bedingungen für Krankheitsüberträger)* (+) (Nahrungsmittelvergiftungen)*	· Entwicklung zusätzlicher Wasserversorgungsinfrastruktur · Landnutzungswandel · (Anpassung der medizinischen Versorgung)*
Anzahl an Hitzewellen	· städtischen Wärmeinsel-Effekt	· hohe Temperaturbelastung	(-) Energieproduktion (-) Grundwasserbildung (-) Trinkwasserverfügbarkeit (-) Leistungsabfall im Transportsektor (+) Verteilung von Krankheitserregern durch Klimaanlagen (+) Beschädigungen der Infrastruktur (+) Hitzebelastung (+) Kühlungsbedarf	· Entwicklung zusätzlicher Wasserversorgungsinfrastruktur · Anpassung der medizinischen Versorgung
Jahres-gesamt-niederschlag	· Oberflächenabfluss · Bodenwasserverfügbarkeit	· Trinkwasserversorgung durch Stauseen · Grundwasserbildung	(-) Trink- und Nutzwasserversorgung (-) Grundwasserbildung (+) Schwankungen in den landwirtschaftlichen Ernteerträgen	· Entwicklung alternativer Wasserversorgungsquellen (Wassertransport über lange Strecken, Entwicklung zusätzlicher Infrastruktur)
Anzahl an Stark-regen-ereignisse	· Entwässerung · Flussläufe und Wasserstandspegel	· Anzahl an und Ausmaß von Überflutung	(+) Verunreinigung der Wasservorkommen mit Bakterien/Industrieabfällen (+)Zerstörung der Ernte und Lebensmittelvorräte (Speiselagern) (+)Beschädigung der Infrastruktur & Verkehrsstörungen (+) Anzahl von Verletzungen/Ertrinken	· Entwicklung der privaten und öffentlichen Infrastruktur · Landnutzungswandel · Änderung der Verkehrsführung

3.2 Beobachtungsdatensätze

Wie in der Einleitung bereits angedeutet, sollen im Rahmen der Arbeit die von den AOGCMs für Hyderabad modellierten Flächendaten zum einen mit Hilfe von lokalen und regionalen Beobachtungsdaten verglichen, und im Anschluß daran gewichtet werden. Zum anderen werden die lokalen und regionalen Beobachtungsdaten herangezogen, um einen statistischen Zusammenhang zwischen den Flächen- und den Stationsdaten herzustellen. Im Folgenden sollen die lokalen und regionalen Datensätze, die dafür verwendet werden kurz vorgestellt werden.

a) Stationsdaten Begumpet (78,47° Ost; 17,45° Nord)

Die Wetterstation liegt südlich vom alten Flughafen Begumpets und nördlich des Hussain Sagar, einem großen See mitten in der Stadt. Für die Arbeit liegen monatliche Temperatur- und Niederschlagsdaten für den Zeitraum 1891 bis 2007 aus der xDat-PIK Datenbank (xDat) vor. Zudem liegen Tagesdaten der Station aus derselben Datenbank aus dem Zeitraum 1997-2007 vor. Zudem liegen weitere Tagesdaten dieser Station für den Zeitraum 1901-1970 aus der KNMI-Datenbank vor (KNMI). Keiner der Datensätze der Station Begumpet ist dabei vollständig (vgl. auch Kapitel 3.3).

b) CRU-Datensätze

Die verwendeten Flächendatensätze stammt aus der Climate Research Unit (CRU) der Universität East Anglia in Norwich. Zum einen wird der CRU TS 2.1-Datensatz für den Bereich zwischen 76,5-80° Ost und 15,5-19° Nord herangezogen. Dieser ist für die benötigten Niederschlags- und Temperaturdaten über den Zeitraum 1961-1990 und einer Fläche von 0.5 x 0.5° gemittelt.

Als weiterer Flächendatensatz dient der CRUTEM3-Temperaturtagesdatensatz für den Bereich 75-80° Ost und 15-20° Nord, der über den Zeitraum 1850-2011 mit einer Auflösung von 5x5° gemittelt ist.

c) IMD-Datensatz

Zudem wird noch ein Flächendatensatz des Indian Meteorological Department (IMD) für die Tagesniederschläge im Zeitraum 1951-2007 verwendet. Dieser deckt ganz Indien auf einem Raster von 1°x1° ab und wird im Rahmen der Arbeit für den Bereich zwischen 76-79° Ost und 16-19° Nord verwendet.

Im folgenden Abschnitt soll es nun darum gehen, das aktuelle Klima Hyderabads anhand dieser Datensätze genauer zu beschreiben.

3.3 Zum aktuellen Klima Hyderabads

Hyderabad hat mit seiner Lage im Zentrum des Dekan Plateaus auf einer Höhe von 536m über NN für indische Verhältnisse ein relativ mildes Klima. Abbildung 3.3.1 zeigt im typischen Jahresgang die monatlichen Durchschnittstemperaturen (oberer Teil) sowie die Boxplots der monatlichen Niederschläge (unterer Teil). Grundlage sind dabei die Daten der Wetterstation Begumpet aus den Jahren 1891-2007.

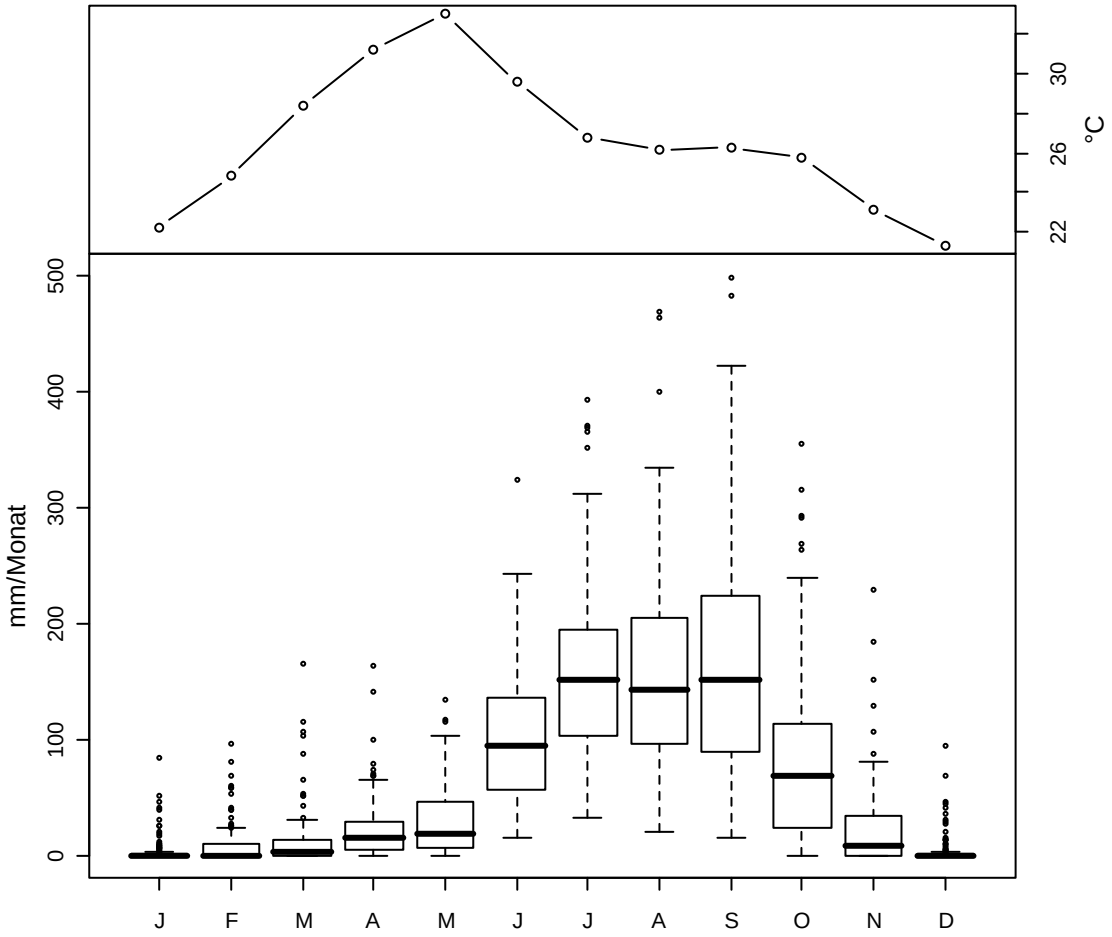

Abb. 3.3.1: Klimadiagramm Hyderabad mit monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagsboxplots (Whisker mit maximum 1,5 IQR), Begumpet, Hyderabad, Indien (1891-2007) (Datenquelle: xDat).

Die Winter sind mit einer durchschnittlichen Monatstemperatur von 21°C im kältesten Monat (Dezember) sehr mild. Mitte Februar beginnt in Hyderabad der Sommer und damit steigen die Temperaturen. Der Mai ist mit 33°C der heißeste Monat, da die Temperaturen mit dem Einsetzen des Monsuns im Juni wieder sinken. In den Hauptmonsunmonaten Juli, August und September bleibt die monatliche Durchschnittstemperatur dann annähernd konstant bei ca. 26°C, um dann mit Ende des Monsuns und dem Winteranfang Mitte Oktober

wieder abzufallen. Die Jahreszeiten Frühling und Herbst sind im klimatischen Jahresgang Hyderabads nicht signifikant ausgeprägt.

Der durchschnittliche Monsun hat, wie man Boxplot erkennen kann, im Juli und September zwei Niederschlagspeaks. Auffällig ist, dass die Ausdehnung der Box (Interquartilsabstand), also der Bereich in dem die mittleren 50% der Daten zu finden sind, vom Juli zum September immer größer wird. Auch die Werte der Ausreißer, die außerhalb der Whisker, also der Linien die sich an die Box anschließen, liegen, nehmen im Verlauf der Monate Juli bis September zu. Die Whisker enden dabei mit einem Strich bei der minimalen und maximalen Monatsniederschlagssumme, die noch innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilsabstandes (IQR) vom jeweiligen oberen oder unteren Quartil ist. Im gesamten Verlauf der Aufzeichnungen gab es zudem, wie man der Abbildung entnehmen kann, keinen Juni, Juli, August oder September mit null mm Niederschlag. Zudem läßt sich in der Grafik erkennen, dass im Dezember und Januar auch das obere Quartil nahezu 0 ist und somit in 3 von 4 Jahren so gut wie kein Niederschlag in diesen Monaten fällt. Zusammenfassend kann man also sagen, dass Hyderabads Klima durch eine ausgeprägte Trocken- wie auch Feuchtperiode gekennzeichnet ist.

Im Folgenden sollen die in 3.1 vorgestellten Klimavariablen im Hinblick auf Hyderabad genauer beschrieben werden. Dabei wird zuerst auf die Jahresdurchschnittstemperaturen und die Hitzewellen eingegangen, um daran anschließend die Jahresgesamtniederschläge und die Starkregenereignisse zu betrachten. Datengrundlage sind dabei die in 3.2 vorgestellten Datensätze.

a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen

Um die Stabilität der Jahresdurchschnittstemperatur zu untersuchen wurden in Abbildung 3.3.2 die Jahresdurchschnittstemperaturen für den Zeitraum 1891 bis 2007 (Begumpet), und zur besseren Vergleichbarkeit mit zwei verschiedenen arithmetischen Mitteln über einer Zeitachse dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung sind die jährlichen Durchschnittstemperaturen dargestellt. Der mittlere und obere Teil der Abbildung zeigt das 20-jährige, bzw. das 40-jährige laufende Mittel. Schwarz ist die Kurve, wenn zur Berechnung des Mittel für alle Jahre des Zeitintervalls Daten vorliegen und in die Berechnung einbezogen worden. Für die grauen Bereiche der Kurve lagen nicht für jedes Jahr des Intervalls Daten vor.

Die jährlichen Jahresdurchschnittstemperaturen schwanken, wie man in der Abbildung sehen kann, zwischen 25.2 und 27.7°C. Für die laufenden Mittel nehmen diese Schwankungen ab, so dass das laufende 20-jährige Mittel Werte zwischen 25.9 und 26.8°C, und das laufende 40-jährige Mittel Werte zwischen 26.2 und 26.8°C annimmt. Man sieht, dass es bei den durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen keinen Verlauf mit relativ gleichmäßigen Schwankungen um einen Mittelwert gibt, sondern ein über circa 15 Jahre ausgedehntes Temperaturminimum in den 50er und 60er Jahren, welches aus den interannuellen Schwankungen heraussticht. Dieser Verlauf ist nicht nur im gemittelten Fall, sondern auch in den Jahresdaten gut zu erkennen. Dieser Abfall der Temperaturen fällt in die Phase globaler

Abkühlung (ca. zwischen 1940 und 1975) (vgl. z.B. Trenberth et al. 2007, 242). Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur zwischen 1961 und 2000, die als Vergleichswert der zu erstellenden Klimaprojektion dienen wird, beträgt 26.43°C. Damit ist sie noch stark von den niedrigen Jahresdurchschnittstemperaturen zum Beginn der 60Jahre beeinflußt. Zudem kann sie aufgrund von Datenlücken nur als Mittel von 30 Jahresdurchschnittstemperaturen in diesem Zeitraum berechnet werden. Das arithmetische Mittel der Jahresdurchschnittstempertaturen des gesamten Datensatzes im Zeitraum 1891-2007 liegt bei 26.55°C. Die Standardabweichung der Jahresdurchschnittstemperatur im Zeitraum 1961 bis 2000 beträgt 0,50K und unterscheidet sich nur wenig von der Standardabweichung für den gesamten Zeitraum, die bei 0.51K liegt. Die Regressionsgerade des Zeitintervalls 1900-1999, also für das 20. Jahrhundert, beträgt -0.003°C/Jahr und drückt somit keinen bedeutenden Trend aus.

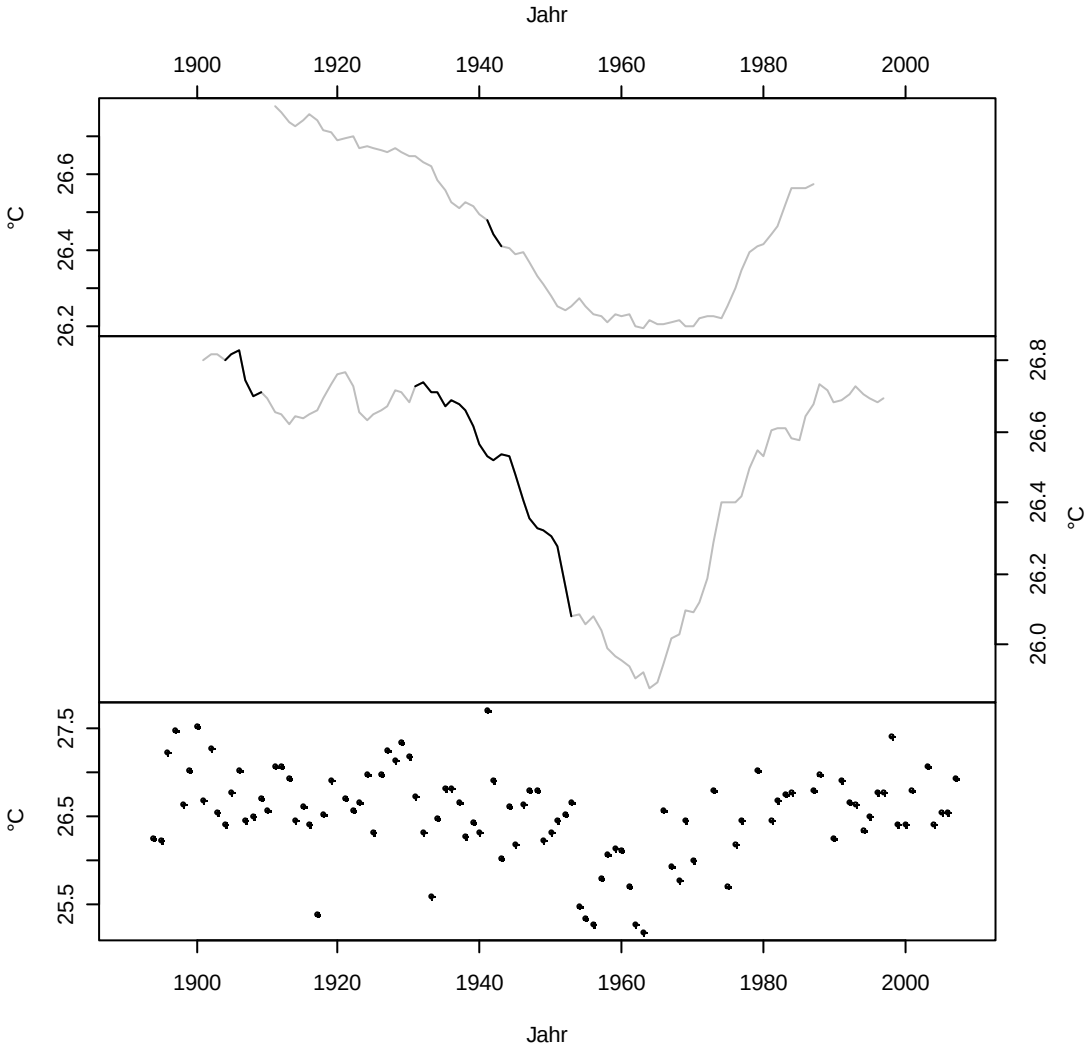

Abb. 3.3.2: Jahresdurchschnittstemperaturen Hyderabads pro Jahr (unterer Teil), im 20-jährigen laufenden Mittel (mittlerer Teil) und im 40-jährigen laufenden Mittel (oberer Teil), Begumpet, Hyderabad, Indien (1891-2007), (grauer Kurvenverlauf bedeutet, dass zur Berechnung des Mittels nicht alle Jahresdaten des Zeitintervalls zur Verfügung standen) (Datenquelle: xDat).

Im Hinblick auf die Anzahl von Hitzewellen kann mit Verweis auf die dafür in Kapitel 3.1 ausgearbeitete Definition festgehalten werden, dass die normale Tagesmaximaltemperatur in Hyderabad bei 39.7°C liegt. Diese leitet sich, wie beschrieben, zum einen von der Temperatur für den durchschnittlich heißesten Kalender*tag* ab, der für Hyderabad im Zeitraum 1997-2007 mit dem 10. Mai und einer Temperatur von 40.2°C angegeben ist (xDat). Zum anderen ist die durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur des heißesten Kalender*monats* ausschlaggebend; dieser ist in Hyderabad mit 39.2°C der Mai (xDat). Unter Einbezug des in Kapitel 3.1 festgelegten Toleranzbereichs von 3.5K ergibt sich dann ein Hitzewellen-Schwellwert von 43.2°C. Im Durchschnitt wird dieser Schwellwert an 1,18 Tagen im Jahr überschritten.

Tabelle 3.3.1 zeigt die über die 0.5 x0.5°-Fläche durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen des CRU TS 2.1-Datensatzes für die Jahre 1961-1990. Im Mittel ergibt sich aus ihnen für die gesamte Region eine Durchschnittstemperatur von 27.2°C, die damit deutlich höher ist als die Temperatur in Hyderabad. Die hellgrau hinterlegten Bereiche kennzeichnen dabei die Fläche Hyderabads, was sich auch daran zeigt, dass diese Werte näher an den Stationsdaten Begumpets liegen, als die anderen Werte des Datensatzes. Aus dem CRU TEM3-Tagesdatensatz wurde die Standardabweichung eines Flächendatensatzes (75-80°Ost und 15-20°Nord) für die Jahresdurchschnittstemperaturen in den Jahren 1961-2000 bestimmt, die 0.49K beträgt. Diese und auch die regionale Durchschnittstemperatur von 27.2°C werden in Kapitel 4.2 für die Gewichtung verwendet.

Tabelle 3.3.1: Jahresdurchschnittstemperaturen in °C für die Jahre 1961-1990; das räumliche Mittel beträgt 27,2°C, (hellgrau hinterlegte Bereiche kennzeichnen das Gebiet Hyderabads) (CRU TS 2.1-Datensatz).

nördliche Breite	***östliche Länge***						
	76.75	***77.25***	***77.75***	***78.25***	***78.75***	***79.25***	***79.75***
18.75	26.69	27.22	27.53	27.24	27.34	27.85	28.05
18.25	26.8	26.96	27.24	26.9	27.01	27.78	27.98
17.75	26.93	26.55	26.47	26.43	26.49	27.56	27.9
17.25	27.39	27.19	26.77	26.59	26.56	27.82	27.98
16.75	27.41	27.37	27.19	26.85	27.12	28.08	28.45
16.25	27.38	27.46	27.73	27.48	26.79	27.47	28.14
15.75	27.38	27.42	27.82	28.0	27.47	27.9	28.49

Im weiteren Vorgehen wird von dem, das Regionalklima darstellenden, CRU-Datensatz die räumlich gemittelte Jahresdurchschnittstemperatur (27.2°C) für die Berechnung der Klimaprojektionen verwendet.

b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse

In Abbildung 3.3.3 werden die Jahresgesamtniederschläge für den Zeitraum 1891 bis 2007 und zur besseren Vergleichbarkeit mit zwei verschiedenen arithmetischen Mitteln über einer

Zeitachse dargestellt, wie dies auch in Abbildung 3.3.2 für Jahresdurchschnittstemperaturen gemacht wurde. Im untersten Teil der Abbildung sind die Jahresniederschlagssummen abgebildet. Jahre, in denen Monatsniederschlagssummen in der Datenbasis fehlen sind wieder nicht dargestellt. Neben einigen anderen Jahren gibt es eine auffällige Lücke in der Zeitreihe zwischen 1985 und 1991. Im mittleren Teil der Abbildung 3.3.3 ist das 20-jährige laufende Mittel der Zeitreihe, und im oberen Teil der Graphik das 40-jährige laufende Mittel dargestellt. Hierbei wird der jeweilige Mittelwert der Mitte des Zeitintervalls zugeordnet. Wie im vorherigen Absatz zu den Temperaturen bedeuten die schwarzen Abschnitte der Kurve, dass für die Berechnung des Mittels Daten für alle Jahre des Zeitintervalls vorhanden sind, und graue Bereiche, dass das laufende Mittel aus weniger Jahresdaten berechnet ist.

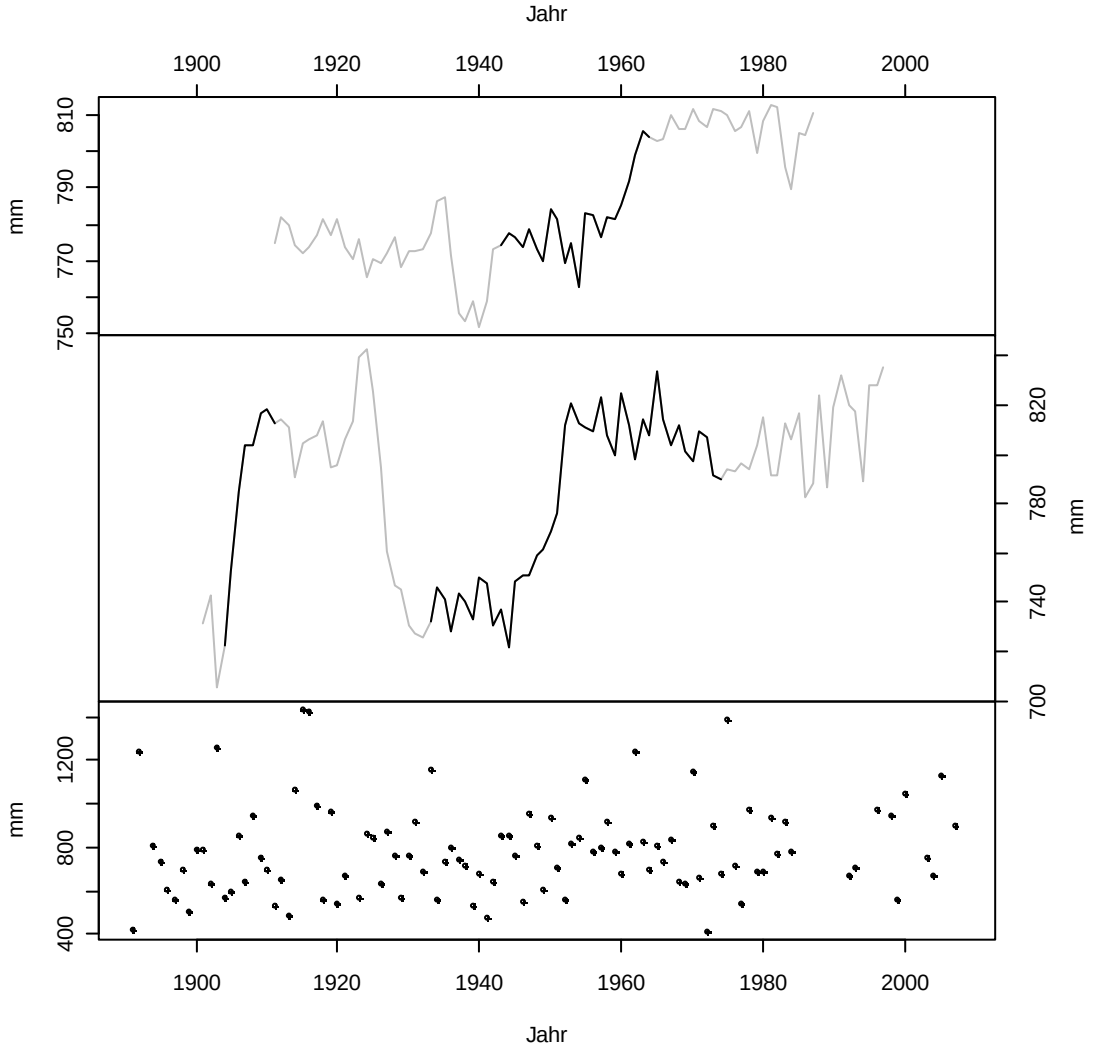

Abb. 3.3.3: Jahresgesamtniederschläge Hyderabads pro Jahr (unterer Teil), im 20-jährigen laufenden Mittel (mittlerer Teil) und im 40-jährigen laufenden Mittel (oberer Teil), Begumpet, Hyderabad, Indien (1891-2007) (grauer Kurvenverlauf bedeutet, dass zur Berechnung des Mittels nicht alle Jahresdaten des Zeitintervalls zur Verfügung standen) (Datenquelle: xDat).

Bei der Betrachtung der Abbildung fällt auf, dass die Jahresniederschlagssummen erheblichen Schwankungen unterliegen. Die jährlichen Niederschlagssummen schwanken circa zwischen 400 und 1400mm. Diese Schwankungen werden, ähnlich wie bei den Jahresdurch-

schnittstemperaturen, im 20-jährigen Mittel nur mäßig herausgemittelt, denn selbst dieses Mittel schwankt in dem 117-jährigen Zeitraum (1891-2007) noch zwischen 705 und 843 mm/Jahr. Im 40-jährigen Mittel nimmt die Schwankung weiter ab, bleibt aber mit Werten zwischen 752 und 812 mm/Jahr weiterhin relativ hoch. Ähnlich wie bei den Jahresdurchschnittstemperaturen zeigt sich, dass es sowohl im 40-jährigen, als auch im 20-jährigen Mittel der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme zwei verschiedene „Zustände" gibt, um die sie dann im jeweiligen Zeitintervall mit geringerer Varianz schwankt. Dabei ist der Sprung zwischen diesen beiden „Zuständen" (von ca. 730mm auf ca. 810mm im 20-jährigen Mittel) aber im Vergleich zur Standartabweichung der Niederschläge von 211mm nicht sehr groß. Wie auch bei der Betrachtung der Temperaturen soll es an dieser Stelle aber bei einem Hinweis auf dieses Phänomen bleiben, da eine genauere Untersuchung nicht im Rahmen dieser Arbeit liegt. Für das 40-jährige Mittel ergibt sich im Zeitraum 1961-2000 (in dem nur Daten für 30 Jahresgesamtniederschläge vorliegen) ein Wert von 809mm im Jahr; dieser wird im Rahmen der zu erstellenden Klimaprojektion als Vergleichswert herangezogen werden. Für den gesamten Zeitraum von 1981-2007 beträgt der Mittelwert 785mm/Jahr. Dieser Wert wird in Kapitel 4.2 für die Gewichtung herangezogen. Die Regressionsgerade für den Zeitraum 1900-1999 der Jahresniederschlagssummen zeigt mit einer Steigung von 0.12mm/Jahr einen positiven Trend, wie auch in Abbildung 3.3.3 im beim laufenden 40-jährigen Mittel zu sehen ist.Zusammenfassend kann man zur durchschnittlichen Jahresniederschlagssumme sagen, dass diese im 20. Jahrhundert ca. in einem Bereich von 730 bis 820mm schwankt. Ihre Standardabweichung im Zeitraum 1891-2007 beträgt 211mm.

Für eine Charakterisierung der Starkregenereignisse ist in Abbildung 3.3.4 die Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsmengen von 1900 bis 2008 abgebildet. In dieser Verteilung ist zu erkennen, dass es durchschnittlich 276,15 Tage im Jahr trocken ist und an 89,14 Tagen regnet. Niederschläge, die zu kurzzeitigen städtischen Überflutungen führen, in den meisten Fällen aber keine langfristigen Folgen haben, haben Niederschlagsmengen zwischen 40 und 80mm; sie treten circa 3-4 mal im Jahr auf. Niederschläge mit mehr als 80mm fallen durchschnittlich an 0,49 Tagen im Jahr und damit im Mittel ungefähr jedes zweite Jahr. Diese Niederschläge haben in vielen Fällen längerfristige Folgen, wie zum Beispiel die Beschädigung von Wohnbebauung und Infrastruktur (vgl. auch Kapitel 3.1).

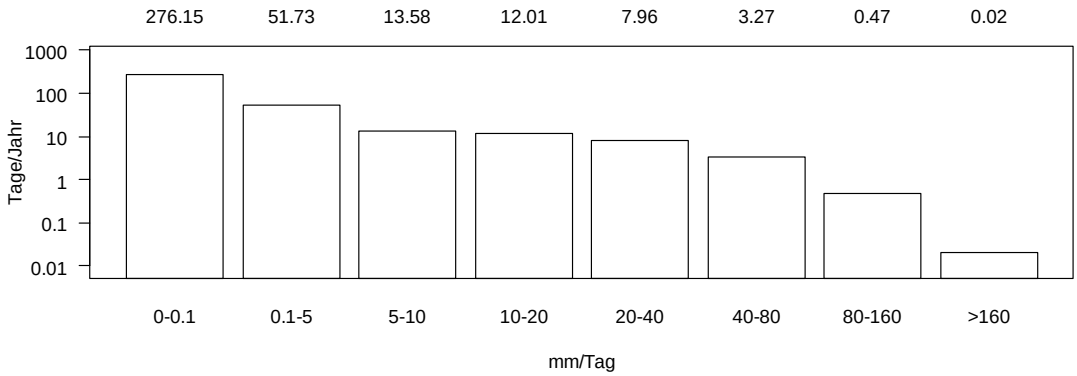

Abb. 3.3.4: Histogramm der Tagesniederschlagssummen im Zeitraum 1900-2007, mit fehlenden Werten zwischen 1970 bis 1997, Begumpet, Hyderabad, Indien (Datenquelle: xDat; KNMI).

In Tabelle 3.3.2 sind abschließend noch die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen der Region um Hyderabad mit den Flächendaten des CRU TS 2.1 Datensatzes angegeben. Der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag auf der Fläche liegt bei 872mm was ebenfalls erheblich höher ist als an der Station Begumpet. Die hellgrau hinterlegten Bereiche kennzeichnen dabei wieder die Fläche Hyderabads. Der durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag im Gebiet 16-19°N und 76-79°O in den Jahren 1950 bis 2007 des IMD-Datensatzes hingegen liegt bei 779mm und 777mm im Zeitraum 1961 bis 1990. Die Standardabweichung der Jahresniederschlagssumme in diesem Datensatz liegt bei 212mm in den Jahren 1950-2007 und bei 246 in den Jahren 1961-1990.

Tabelle 3.3.2: Jahresgesamtniederschläge in mm für die Jahre 1961-1990; das räumliche Mittel beträgt 872 mm (hellgrau hinterlegte Bereiche kennzeichnen das Gebiet Hyderabads) (CRU TS 2.1-Datensatz).

nördliche Breite	***östliche Länge***						
	76.75	***77.25***	***77.75***	***78.25***	***78.75***	***79.25***	***79.75***
18.75	899	948	1031	1060	1005	985	1023
18.25	882	949	1035	1069	985	951	985
17.75	843	886	941	944	871	891	955
17.25	814	866	891	840	777	822	916
16.75	752	812	871	829	766	787	879
16.25	673	736	781	763	706	746	824
15.75	602	611	654	682	683	746	826

In den folgenden Kapiteln wird die durchschnittliche Niederschlagssumme des CRU TS 2.1-Datensatzes (872mm) für die Berechnung der Klimaprojektionen verwendet. Der IMD-Datensatz wird noch einmal zur Erstellung eines Qualitätsmaßes hinsichtlich der Starkregenereignisse verwendet.

3.4 Emissionsszenarien

Wie schon in der Einleitung angedeutet besteht ein Problem bei der Vorhersage von Klimaveränderungen darin, dass eine maßgebliche Größe dabei die zukünftigen Treibhausgasemissionen sind und diese wiederum von der zukünftigen sozioökonomischen und technischen Entwicklung abhängen. Die Entwicklungen sind jedoch nur schwer vorhersagbar. Im Rahmen des AR3 des IPCC wurden daher verschiedene Szenarien entwickelt, die im Special Report on Emission Scenarios (SRES) (Nakićenović & Swart 2000) vorstellt wurden. Dabei wird der Raum zukünftiger globaler Entwicklungspfade in vier so genannte SRES-Szenario-Familien unterteilt. Die möglichen Entwicklungspfade gelten dabei alle als gleichermaßen wahrscheinlich. Tabelle 3.4.1 ist eine schematische Darstellung dieser Szenario-Familien.

Die erste Dimension, die in der Nomenklatur der Szenario-Familie den Buchstaben festlegt, macht eine Aussage darüber ob der Entwicklungspfad eher ökonomisch oder ökolo-

gisch ausgerichtet ist. Dabei werden der mehr auf Wirtschaftswachstum ausgelegte Entwicklungspfad mit einem A, und der eher auf ökologische Nachhaltigkeit orientierte Pfad mit B bezeichnet. Die zweite Dimension, anhand derer eine Einordnung stattfindet, wird durch eine Zahl gekennzeichnet. Hier erhalten die Familien bei denen sich die verschiedenen Weltregionen sozial, kulturell und ökonomisch in Richtung größerer Homogenität bewegen eine 1 und jene Familien, die eher regional differenzierte Entwicklungspfade beschreiben eine 2. Anhand dieser Unterteilung werden 4 Familien von Szenarien benannt, A1, A2, B1 und B2, wobei es für A1 weitere Unterteilungen gibt, die mit T, B und FI bezeichnet sind und den technologischen Entwicklungspfad charakterisieren.

Tabelle 3.4.1: Schematischer Überblick der SRES-Szenario-Familien und der mit ihnen assoziierte Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen bis 2100, grau hinterlegt sind die für die Arbeit verwendeten Szenarien (eigene Darstellung nach IPCC 2007, 13).

SRES-Szenario-Familien des IPCC AR4 und der mit ihnen assoziierte Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen bis 2100		
	ökonomischer Fokus	ökologischer Fokus
Globalisierung (homogenes Weltbild)	**A1** **sehr starkes Wirtschaftswachstum** **1.4 - 6.4 °C**	**B1** **global einheitliche ausgerichtete Nachhaltigkeitsstrukturen** **1.1 – 2.9°C**
Regionalisierung (heterogenes Weltbild)	**A2** **regional ausgerichtetes Wirtschaftswachstum** **2.0 – 5.4°C**	**B2** **lokal ausgerichtete Nachhaltigkeitsstrukturen** **1.4 -3.8°C**

Für die in dieser Arbeit zu erstellende Klimaprojektion für Hyderabad werden das A2- und das B1-Szenario als eine Grundlage der Klimamodellierung herangezogen. Im Folgenden sollen daher die beiden zugehörigen Szenario-Familien kurz näher erläutert werden.

Die A2-Szenarien-Familie beschreibt eine Welt mit starken regionalen Disparitäten und rapidem Bevölkerungswachstum. Einzelne, staatliche Souveränitäten und die Erhaltung regionaler Identitäten spielen eine wichtige Rolle. Die regionale Orientierung der Ökonomie führt zu einem geringeren und fragmentierteren technologischen Fortschritt, wodurch die Treibhausgasemissionen in diesem Szenario sehr hoch sind. Der mit dieser Szenario-Familie verbundene Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100 gehört mit durchschnittlich 3.6°C (2.0 - 5.4°C) zu den höchsten im AR4 projizierten Werten. Im Gegensatz dazu ist die B1-Szenarien-Familie durch einen schnellen Wandel zu einer auf internationaler Ebene arbeitenden und weniger materialintensiven Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft charakterisiert. Ein geringes Bevölkerungswachstum und die globale Einführung von sauberen und ressourcenschonenden Technologien führen zu den geringsten Treibhausgasemissionen

von allen Szenarien-Familien und damit auch zu dem niedrigsten erwarteten Temperaturanstieg von durchschnittlich 1.8°C (1.1-2.9°C).

Für die Szenario-Familien wurden so genannte Marker-Szenarien mit quantifizierten Parametern wie weltweites BIP, Bevölkerungswachstum und dem jährlichen Energieverbrauch der Welt erstellt, anhand derer dann die Treibhausgasemissionen modelliert wurden. Aus den sozioökonomischen Szenarien werden zusammen mit den Technologieszenarien so die Emissionsszenarien abgeleitet, die dann wiederum Grundlage der globalen Klimamodelle sind. Abbildung 3.4.1 zeigt den Mittelwert verschiedener globaler Klimamodelle und deren Schwankungsbreite für den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100 in Abhängigkeit vom jeweiligen Emissionsszenario.

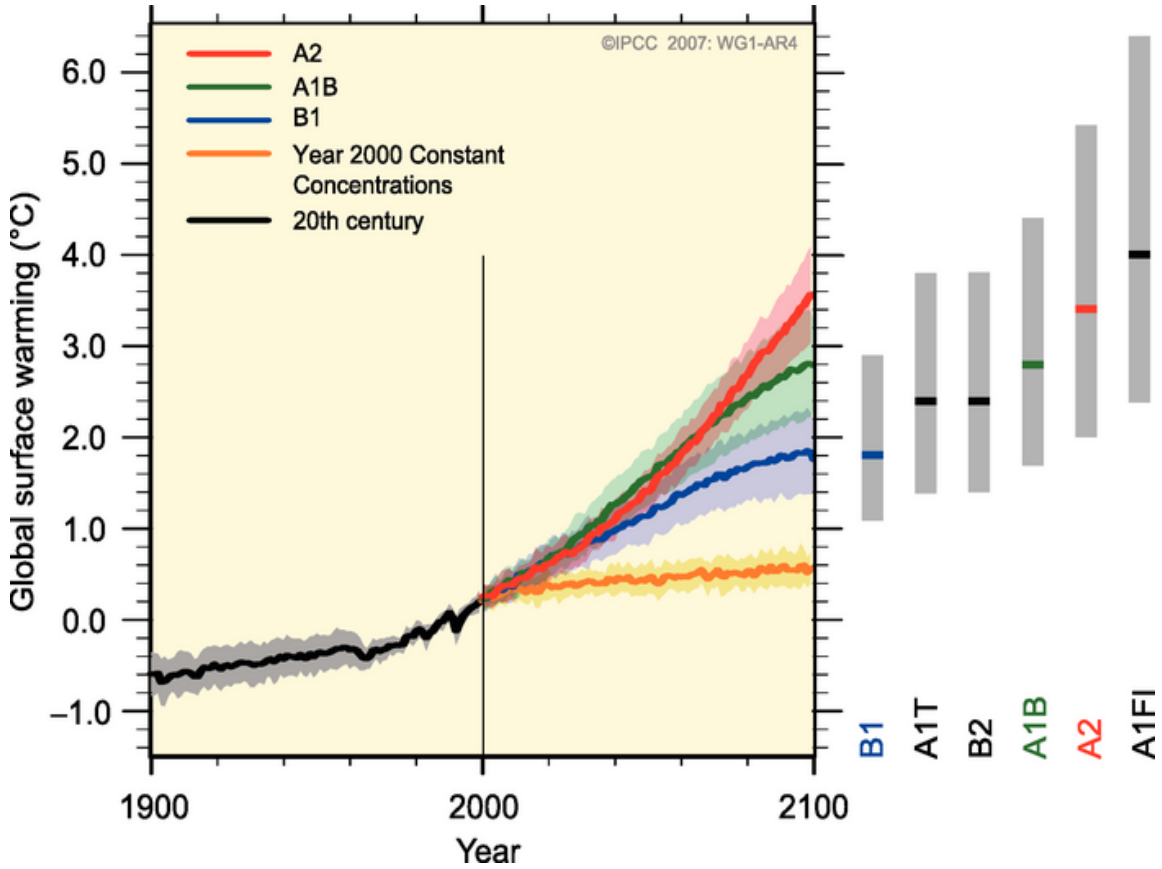

Abb.3.4.1: Mittelwerte und deren Schwankungsbreite (blasser eingefärbte Bereiche um die Graphen) verschiedener globaler Klimamodelle für den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100 in Abhängigkeit vom jeweiligen Emissionsszenario (IPCC 2007, 14).

In Abbildung 3.4.1 deutlich zu erkennen ist, dass die für die Arbeit ausgewählten SRES-Szenario-Familien zum einen zu dem niedrigsten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur führen (B1, blauer Graph), und zum anderen zum zweit-höchsten Temperaturanstieg im globalen Mittel (A2, roter Graph). Der höchste Anstieg ist dem A1FI-Szenario zugeordnet, das eine fast ausschließlich fossile Energieerzeugung annimmt, was aus heutiger Sicht aber als eher unwahrscheinlich gilt.

3.5 Globale Klimamodelle

Die Regionalklimata sind maßgeblich durch das globale Klima bestimmt und vice versa. Doch obwohl sich das regionale und globale Klima gegenseitig beeinflussen, ist es für eine regionale, rekonstruierende oder auch prognostizierende Klimamodellierung sinnvoll, von einem globalen Klimamodell auszugehen. Denn nur über ein globales Modell, dessen Randbedingungen hinreichend plausibel festgelegt werden können, und das es ermöglicht, planetare Impuls-, Wärme- und Feuchte-Flüsse sowie deren Veränderungen zu modellieren, können auch die nötigen Randbedingungen für ein regionales Modell hergeleitet werden. Als Randbedingungen globaler Klimamodelle gelten natürliche Faktoren, wie zum Beispiel Solarkonstante, Erdbahnparameter und Orographie, sowie auch sozio-ökonomische Faktoren, wie Landnutzung und klimawirksame Emissionen (Roeckner 2003).

Der Begriff Klimamodellierung bezeichnet die modelltheoretische Beschreibung des Klimas, wobei Klima als die charakteristische Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte während eines längeren Zeitraums verstanden werden kann (Schneider 1992, 6). Dabei wird in den meisten Fällen aber nicht nur zeitlich sondern auch räumlich gemittelt, so dass man vom Klima einer Stadt, einer Region oder auch eines Landes spricht.

Um das Klima zu modellieren werden Modelle unterschiedlicher Komplexität verwendet. Die Abbildung 3.6 stellt die Hierarchie dieser Klimamodelle dar. Wie in der Grafik zu sehen ist, gibt es zwei Arten eindimensionaler Modelle, zum einen die Energiebilanzmodelle (EBM) die die globalgemittelte Energiebilanz im zeitlichen Verlauf berechnen. Zum anderen gibt es die Strahlungskonvektionsmodelle (R-CM), die zeitlich gemittelte Konvektionsmuster in einer Raumdimension berechnen. Modelle höherer Komplexität sind die zweidimensionalen statistisch-dynamischen-Modelle (SDM), mit denen zum Beispiel die zeitlich gemittelten, höhenabhängigen Zonalwinde modelliert werden können. In der Hierarchie über ihnen stehen die Modelle mittlerer Komplexität. Dabei handelt es sich um vierdimensionale Modelle, die die Erde mit einer dreidimensionalen Matrix abdecken, an deren Gitterpunkten die dynamischen Klimaprozesse im Rahmen ihrer Auflösung möglichst realistisch simuliert werden. In der Hierarchie der Klimamodelle stehen die AOGCMs an höchster Stelle. Sie sind eine Kopplung von allgemeinen Zirkulationsmodellen (General Circulation Models, GCMs) für die Atmosphäre und den Ozean. Zudem werden in den neueren AOGCMs noch die Atmosphärenchemie, der Kohlenstoffkreislauf und die Prozesse der Biosphäre modelliert (vgl. Kiehl 1992, 319ff.). Dies ist unter anderem notwendig um aus Emissionsszenarien die wichtigste Variable im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu bestimmen, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre.

Mit Hilfe dieser mehrdimensionalen Klimamodelle können sowohl paleoklimatische Rechnungen durchgeführt, als auch mit Hilfe der schon beschriebenen SRES-Szenarien Klimaprojektionen für die Zukunft erstellt werden. Paleoklimatische Rechnungen ermöglichen es dabei, die Gültigkeit der Modelle zu testen und somit sicher zu stellen, dass sie nicht nur das heutige Klima darstellen können. Dies ist wichtig, weil sonst keine Aussage über die Tauglichkeit der Klimamodelle bei einer erhöhten CO2-Konzentration gemacht werden könn-

te (Joussaume et al. 1999). Desweiteren kann mit Hilfe paleoklimatischer Klimamodellierung ein vollständigeres Bild vergangener Klimabedingungen gezeichnet werden, welches nur auf der Basis von Proxies (gewonnen z.B. aus Eisbohrkernen oder Sedimenten) nur näherungsweise möglich ist (Jones et al. 1998).

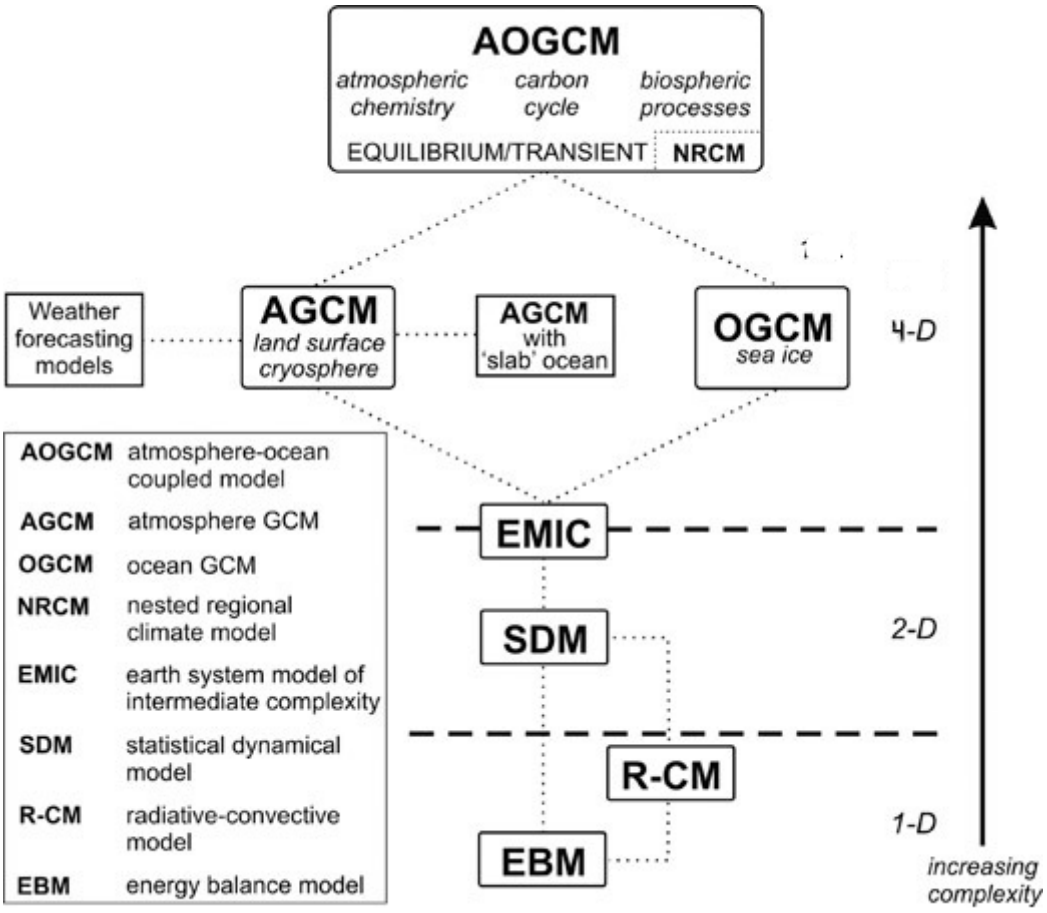

Abb.3.5.1: Hierarchie verschiedener ein- bis mehrdimensionaler Klimamodelle (Kemp 2011).

Bei der Erstellung von Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert werden die an der Spitze der Hierarchie der Klimamodelle stehenden AOGCMs verwendet. Da AOGCMs global rechnen müssen, setzt die gegenwärtige Computerkapazität den numerisch implementierten dynamischen Modellen in der räumlichen und zeitlichen Auflösung enge Grenzen. Die räumliche Auflösung des Atmosphärenmodels in einem AOGCM liegt je nach Modell zwischen 125 und 400km in der Horizontalen (Walkenhorst & Stock 09). Begrenzt durch diese horizontale, aber auch durch die vertikale Auflösung können sub-skalige Phänomene in den Modellierungen nicht im Sinne der primitiven Gleichungen abgebildet werden. Solche Phänomene sind zum Beispiel der turbulente Wärmeaustausch und die Wolkenbildung. Um ihre Wirkungen auf das globale Klima nicht zu vernachlässigen, müssen diese Phänomene daher mit Hilfe von Parametrisierungen in das Modell eingefügt werden. Bei der Parametrisierung werden dabei aus den für die Gitterpunkte verfügbaren Daten diese sub-skaligen Phänomene auf der

Basis statistischer Zusammenhänge abgeleitet (Roeckner 2003, McGuffie & Henderson-Sellers 2005, Meehl et al. 2007).

Eine weitere Folge der geringen Auflösung der AOGCMs ist, dass auch kleinräumige Unterschiede im Klima nicht abgebildet werden, was vor allem in Gebirgen ein Problem darstellt, wenn man die Wirkungen des Klimawandels vorhersagen möchte. Wünschenswert wäre daher, die Auflösung der AOGCMs weiter zu verbessern. Dies ist allerdings nur langsam möglich, da mit steigender Auflösung auch die Anforderung an die Rechenleistung stark zunimmt. Eine Verdopplung der Auflösung von z.B. 250km mal 250km auf 125km mal 125km führt ca. zu einer Verzehnfachung der Rechenzeit (Tebaldi & Knutti 2010).

Weltweit gibt es circa 25 AOGCMs, die teilweise auf einander basieren, teilweise unabhängig voneinander entwickelt wurden. Die verschieden AOGCMs unterscheiden sich in ihrer Auflösung, aber auch in der Art, Ozean und Atmosphäre zu koppeln oder sub-skalige Phänomene zu parametrisieren. Daher liefern verschiedene AOGCMs - auch wenn man sie mit den gleichen Randbedingungen betreibt - unterschiedliche Ergebnisse (Tebaldi & Knutti 2010). Eine Validierung der Ergebnisse kann anhand des Vergleichs von Rechnungen zur Klimaentwicklung in der Vergangenheit mit entsprechenden Beobachtungsdaten geschehen. Gut geeignet sind Vergleichsläufe im 20. Jahrhundert, da es hier die Beobachtungsdatenlage zulässt einige Aspekte der Modellergebnisse zu validieren. Eine solche Validierung gegenüber einer Klimaentwicklung und nicht nur gegenüber dem gegenwärtigen Klima ist deshalb wichtig, weil potentielle Fehler im Modell teilweise durch eine an die heutigen Verhältnisse angepasste Parameterwahl ausgeglichen werden könnten – dieser Fehlerausgleich würde für zukünftige Bedingungen (z.B. stark erhöhte atmosphärische CO2-Konzentrationen) dann nicht mehr funktionieren und zu fehlerhaften Projektionen führen.

Aufgrund der geringen Auflösung und den damit verbundenen Parametrisierungen entstehen Unsicherheiten hinsichtlich der Gültigkeit der modellierten Ergebnisse. Im Folgenden sollen diese und andere Unsicherheiten in der globalen Klimamodellierung näher erläutert werden.

Die erste Art von grundlegender Unsicherheit besteht in den treibenden Größen der AOGCMs, das heißt in den schon erwähnten Szenarien der zukünftigen Entwicklung von Treibhausgasemissionen und anderen Größen, wie zum Beispiel den zukünftigen Landnutzungsänderungen. Dabei ist es zwar nicht möglich zu sagen, ein Szenario sei wahrscheinlicher als ein anderes, aber diese Methodik erlaubt es, den Einfluss möglicher zukünftiger Entwicklungen zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass auch Aerosol-Emissionen und deren räumliche Verteilung in der Atmosphäre eine wichtige Rolle spielen, da es sich hierbei um einen wichtigen Faktor beim Strahlungsantrieb handelt.

Eine zweite Art von Unsicherheit folgt aus der Tatsache, dass wir keine vollständige Kenntnis des aktuellen Zustands des Klimasystems besitzen. Diese Unsicherheit im Bezug auf den jetzigen Zustand spielt bei der Initialisierung der AOGCM-Läufe eine wichtige Rolle, da die Modellergebnisse sensitiv gegenüber den Anfangswerten sind. Eine weitere, nicht so häufig diskutierte Konsequenz der unvollständigen Kenntnis des aktuellen Zustands des Kli-

masystems ist, dass wir die Vergleichsläufe unserer AOGCMs für das 20. Jahrhundert nur mit einem groben Modell der Wirklichkeit validieren können.

Weitere Unsicherheiten bei der Modellierung des Klimas resultieren aus den Modellen selbst. Dabei unterscheidet man zwischen strukturellen Modellierungsunsicherheiten, die aus der grundlegenden Modellstruktur hervorgehen, Unsicherheiten aufgrund von Parametrisierungen von Prozessen, die unterhalb der Größenordnung der Rasterung liegen, und stochastische Unsicherheit beruhend auf der Kopplung von nicht aufgelösten klein-skaligen Variabilitäten und den aufgelösten Flüssen zwischen den Gitterzellen (Palmer 2000, van der Linden & Mitchell 2009).

Aufgrund dieser Unsicherheiten wurden im 4. Sachstandsbericht des IPCC (AR4) 23 verschiedene AOGCMs und 6 verschiedene Szenarien verwendet, die dabei teilweise aufeinander basieren, teilweise aber auch unabhängig voneinander entwickelt worden sind. Dabei kann nicht eindeutig entschieden werden, ob und wenn ja welches Modell besser ist als ein anderes, da z.B. die Fähigkeiten, das aktuelle Klima zu modellieren, in verschiedenen Teilen der Welt oft unterschiedlich gut ausgeprägt sind. Zudem ist es nicht zwingend, dass ein Modell, welches das heutige Klima gut nachbilden kann, auch die besten Vorhersagen für die Zukunft macht. Im IPCC AR4 wurden daher bei der Erstellung der Klimaprojektionen keine Gewichtung der verschiedenen AOGCMs vorgenommen, sondern die Resultate aller AOGCMS gleich gewichtet in die Analyse einbezogen. Es wurde angenommen, dass die beste Vorhersage von einem Ensemble aller AOGCMs im Sinne einer Mittelwertbildung getroffen wird, wobei der Grad der Abweichung der Modelle untereinander als Maß für die Sicherheit der Resultate verwendet wurde.

Ähnlich dem Vorgehen im AR4 sollen auch in dieser Arbeit die Klimaprojektionen nicht nur auf einem AOGCM sondern auf möglichst vielen beruhen. Denn nur so ist eine Abschätzung der Unsicherheiten hinsichtlich der klimatischen Entwicklung, besonders in der 2ten Hälfte des 21. Jahrhunderts, möglich. Die Daten der Klimaprojektionen, die für den IPCC AR4 erstellt wurden, können auf der Seite des World Climate Research Program (WCRP) Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) herunter geladen werden (WCMIP3). Für die Erstellung der Klimaprojektionen der vier Klimavariablen sind Daten der Tagesniederschläge, der Tagesdurchschnittstemperaturen und der Tagesmaximaltemperaturen nötig. Daher wurde versucht für jedes AOGCM Daten dieser 3 Variablen für die beiden ausgewählten Szenarien (A2 und B1) zu erhalten. Für jede dieser Variablen wurden, sofern vorhanden, von einem AOGCM also 5 Dateien im ncdf-Format heruntergeladen. Dabei handelt es sich zum einen um die Modellierung für das Zeitfenster 1961-2000, welche im weiteren Verlauf der Arbeit als Vergleichslauf oder 20c3m-Lauf bezeichnet werden wird. Zum anderen wurden für jedes der zwei verwendeten SRES-Szenarien zwei Zeitschritte ihrer Klimaprojektionen heruntergeladen. Diese beiden Zeitschritte decken die Jahre 2046-2065, auf den sich in der Arbeit als ersten Zeitschritt bezogen werden wird, und 2081-2100, der als zweiter Zeitschritt behandelt wird, ab. In Tabelle 3.5.1 sind die für die Arbeit verwendeten AOGCMs auf-

geführt. Zudem zeigt die Tabelle in den hellgrau hinterlegten Felder für welche Szenarien und Klimavariablen jeweils Berechnungen durchgeführt wurden.

Tabelle 3.5.1: Übersicht der für die Arbeit verwendeten AOGCMs mit Angabe der SRES-Szenarien und Klimavariablen, für die Berechnungen durchgeführt wurden (Datenquelle: WCMIP3).

AOGCM	Szenario	Jahresdurch-schnitts-temperatur	Hitzewellen-tage	Jahres-niederschlags-summe	Starkregen-ereignisse
BCCR-BCM2.0	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
CGCM3.1(T47)	A2	x	x		x
	B1	x	x		x
CGCM3.1(T63)	A2				
	B1	x	x	x	x
CSIRO-MK3.0	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
CSIRO-MK3.5	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
ECHAM5/MPI-OM	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
ECHO-G	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
FGOALS-g1.0	A2				
	B1	x	x	x	x
GFDL-CM2.0	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
GFDL-CM2.1	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
GISS-AOM	A2				
	B1	x	x	x	x
GISS-ER	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
INGV_ECHAM4	A2	x	x	x	x
	B1				
INM-CM3.0	A2			x	x
	B1			x	x
IPSL-CM4	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x
MIROC3.2(M)	A2		x	x	x
	B1		x	x	x
MRI-CGCM2.3.2	A2	x	x	x	x
	B1	x	x	x	x

4 Methodik

Nachdem im vorigen Kapitel die Grundlagen der Arbeit besprochen wurden, wird in diesem Kapitel erarbeitet, wie ausgehend von diesen die regionalen Klimaprojektionen für die Stadt Hyderabad abgeleitet wurden. Dabei geht es im ersten Teil des Kapitels um eine Regionalisierung der AOGCM-Modellergebnisse mit besonderem Augenmerk auf den vier impaktrelevanten Klimavariablen. Im Zweiten Teil des Kapitels geht es darum Gütemaße zu entwickeln, die eine Aussage darüber ermöglichen wie gut ein AOGCM das heutige Klima von Hyderabad modelliert. Im dritten und letzten Teil soll es dann darum gehen, Auswertungsmethoden zu entwickeln, die es erlauben aus der Verteilung der AOGCM-Projektionen möglichst viel Information zu schöpfen.

4.1 Regionalisierung von globalen Klimamodelldaten

Zur besseren Vorhersage von regionalen Klimaveränderungen und deren Wirkungen müssen die Ergebnisse der AOGCMs regionalisiert werden. Dieses Verfahren nennt man auch Downscaling und dabei werden regionale Klimamodelle (RCM) in die AOGCMs eingebettet (Tebaldi & Knutti 2010, 10). Das bedeutet, dass die RCMs von den Ergebnissen der AOGCMs angetrieben werden und ihre Ergebnisse somit wesentlich vom treibenden AOGCM abhängen (Mearns et al 2003, van der Linden & Mitchell 2009).

Es gibt zwei verschiedene Arten von regionalen Klimamodellen, zum einen dynamische und zum anderen statistische. Dynamische RCMs rechnen mit den gleichen auf physikalischen Zusammenhängen basierenden Gleichungen wie AOGCMs, dabei werden sie aber auf einem feineren räumlichen Raster betrieben und können dadurch z.B. Niederschlagsextreme besser auflösen (vgl. Mearns et al. 2003, 8, McGuffie & Henderson-Sellers 2005, 237ff.). Im Gegensatz dazu nutzt ein statistisches RCM statistische Verfahren um zum Beispiel den Zusammenhang zwischen dem groß-skaligen Klima und regionalen Variabilitäten zu bestimmen. Dieser Zusammenhang wird aus historischen Daten ermittelt. Abschnitt 4.1.1 wird diese beiden unterschiedlichen Verfahren der Regionalisierung kurz vorstellen, bevor im Abschnitt 4.1.2 dann detaillierter auf das Verfahren eingegangen wird, das für die AOGCM-Daten von Hyderabad angewendet wurde.

4.1.1 Kurzdarstellung möglicher Regionalisierungsverfahren

Zunächst zur Beschreibung der dynamische RCMs. Ihr Verfahren zur Modellierung des Klimas basiert wie bei den AOGCMs auf den primitiven Gleichungen. Sie sind aber weit höher aufgelöst (ca. 25km), da sie nicht für die Fläche des gesamten Globus gerechnet werden müssen sondern nur für kleinere Teilgebiete. Die RCMs sind bei ihren Rechnungen in ein AOGCM eingebettet, um die sich ständig ändernden Randbedingungen zu berücksichtigen (Mearns et al. 2003, 7).

Der Vorteil eines dynamischen Regionalisierungsverfahrens besteht darin, dass unabhängig von historischen Messungen für sehr verschiedene Randbedingungen eine Projektion

für die Zukunft berechnet werden kann. Desweiteren kann es im Unterschied zu den treibenden AOGCMs einige klein-skalige Wetterphänomene modellieren und diese müssen somit nicht parametrisiert werden. Daher lässt sich im Idealfall aus RCMs besser ableiten, wie häufig z.B. Starkregenereignisse eintreffen und wie diese ablaufen. Zudem ist es möglich, die Orographie besser aufzulösen und so die dadurch bedingten regionalen Variabilitäten im Klima besser zu modellieren (Mearns et al 2003,8). Da dynamische RCMs vom Prinzip den gleichen Aufbau besitzen wie AOGCMs entstehen bei ihren Rechnungen auch die gleichen Unsicherheiten (siehe Kapitel 3.4), die sich nun auf einer klein-räumlicheren und einer kurzfristigeren Zeitskala manifestieren (van der Linden & Mitchell 2009, 11, Walkenhorst & Stock 2009,6). Ein Nachteil des dynamischen Regionalisierungsverfahrens ist, dass es sehr rechenaufwendig ist. Daher wird ein dynamisches RCM meist nur in ein einziges (oder wenige) AOGCM eingebettet. Da die Klimaprojektionen der RCMs stark von dem sie antreiben AOGCM abhängen ist die Auswahl der bzw. des AOGCMs ausschlaggebend für die Aussagekraft des RCMs (z.B. Tebaldi & Knutti 2010, 35).

Statistische RCMs verwenden dagegen keine dynamischen Verfahren, sondern basieren auf statistischen Zusammenhängen zwischen großflächigen Wetterdaten und deren lokalen Ausprägungen. Ihr Vorteil besteht darin, dass man im Falle von ausreichend guten Messdaten für das heutige Klima sehr gute räumlich aufgelöste Klimaprojetionen für die Zukunft erhält, sofern sich der statistische Zusammenhang zwischen dem sogenannten Predictor, zum Beispiel einer überregionalen Wetterlage, und dem Predictant, der lokalen Ausprägung dieser Wetterlage, unter neuen klimatischen Bedingungen nicht ändert (Mearns et al. 2003, 8). Die Wahrscheinlichkeit, dass die Stationarität des statistischen Zusammenhanges anzunehmen ist, nimmt aber mit der Stärke der Klimaveränderung immer weiter ab (van der Linden & Mitchell 2009, 68). Das bedeutet, dass statistische Verfahren besonders gut für kurzfristigere Klimaprojektionen, etwa bis 2050, geeignet sind. Neben der Möglichkeit mit diesem Verfahren besonders räumlich gut aufgelöste Projektionen zu erstellen, liegt ein weiterer Vorteil darin, dass es weniger rechenintensiv ist als das dynamische Verfahren. Das bietet die Möglichkeit, sie mit einer Reihe verschiedener AOGCMs anzutreiben und so die Unsicherheiten bezüglich der groß-skaligen Klimaveränderung besser abzubilden.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der beiden Methoden gibt es spezifische Vor- und Nachteile, die unter anderem auch von der zu untersuchenden Region abhängen. So gibt es zum Beispiel für Europa sehr dichte klima-historische Zeitreihen, die es ermöglichen aufwendige statistische Verfahren anzuwenden. Dies ist nicht für alle Regionen der Erde gegeben, da die Messdaten vielfach fehlerbehaftet sind und sowohl zeitlich, als auch räumlich teilweise große Datenlücken aufweisen. Für diese Regionen spricht dann vieles für ein dynamisches Verfahren. Dieses sollte dann aber ebenso wie das statistische in viele AOGCMs eingebettet sein, was jedoch, wie bereits erwähnt, einen um ein Vielfaches erhöhten Rechenaufwand bedeutet (vgl. Tebaldi & Knutti 2010). Neben der zu betrachtenden Region ist es aber auch von Bedeutung, ob man nur die nahe Zukunft oder das gesamte 21. Jahrhundert modellieren möchte. Das PRDUENCE-Projekt (Christensen &Christensen 2007, Christen-

sen et al. 2007), das sich mit der Bereitstellung von hochaufgelösten Klimaprojektionen aus in verschiedenen AOGCMs implementierten dynamischen RCMs beschäftigt hat, kam zu dem Ergebnis, dass zumindest zum Ende des 21. Jahrhunderts für gemittelte, groß-skalige saisonale Veränderungen die Unsicherheit durch die Wahl des AOGCMs größer ist als durch die Wahl des dynamischen RCMs (Christensen et al. 2007, 2; van der Linden & Mitchell 2009, 62). Kendon et al. (2009) empfehlen, mehr Wert auf die Verwendung von verschiedenen AOGCMs zu legen, wenn das Hauptaugenmerk auf Temperatur und Niederschlagsveränderungen in der 2. Hälfte des Jahrhunderts liegt. Für die erste Hälfte des Jahrhunderts äußern Déqué et al. (2007) dagegen, dass es wichtig sei, verschiedene RCM-Interpretationen eines AOGCMs zu betrachten.

Für Indien gibt es bisher weder verschiedene RCM-Interpretationen eines AOGCMs, noch verschiedene Läufe eines RCMs, welches in verschiedene AOGCMs eingebettet ist. Es gibt eine Modellierung des dynamischen Regionalmodells Precis, welches aber nur in das AOGCM des Hadleycenters eingebettet ist (vgl. Rupa Kumar et al. 2006).

In dieser Arbeit wird, wie schon im Kapitel 3.4 dargelegt, das Hauptaugenmerk auf die Verwendung möglichst vieler verschiedener AOGCM-Projektionen gelegt, also kommt im gegebenen Rahmen nur ein statistisches Regionalisierungsverfahren in Frage. Dabei konnte für die betrachtete Region auf eine Vielzahl von Datensätzen zurückgegriffen werden. Allerdings sind die Datensätze teilweise fehlerhaft und/oder weisen große zeitliche Lücken auf (vgl. Kapitel 3.2, zur kritischen Betrachtung dieses Umstands vgl. auch Kapitel 6). Bei der Erarbeitung der Regionalisierungs-Algorithmen musste mit der lückenhaften Datenlage umgegangen werden, was durch die Verwendung relativ einfacher statistischer Zusammenhänge erfolgte. Die verwendeten Regionalisierungs-Algorithmen sind im folgenden Kapitel dargestellt.

4.1.2 Darstellung der verwendeten Regionalisierungsalgorithmen

Im Folgenden werden die Verfahren bzw. die Algorithmen zur Erstellung der regionalen Klimaprojektion für die vier impaktrelevanten Klimavariablen Hyderabads dargestellt. Dabei werden unter anderem auch Methoden zum Ausgleichen systematischer Abweichungen der einzelnen AOGCMs benutzt. Dafür wird angenommen, dass die AOGCM-Ergebnisse die gemittelten Klimavariablen einer größeren Region, mindestens der Größenordnung eines AOGCM-Gitterelements(im Mittel ca. 200km), repräsentieren. Aus dem Vergleich der Modellergebnisse für die Reproduktion des heutigen Klimas (20c3m-Lauf) mit auf Messungen beruhenden Flächendaten (CRU-Datensatz) ergibt sich dann die Möglichkeit, eine Korrektur der systematischen Abweichung zu bestimmen, die auch auf die Projektionen des Modells angewendet werden kann. Bild 4.1.2.1 zeigt die geographische Ausdehnung der betrachteten AOGCM-Gitterzellen, die das Stadtgebiet von Hyderabad beinhalten. Beim Regionalisieren der Ergebnisse der AOGCM-Läufe wird die Annahme zugrunde gelegt, dass der statistische Zusammenhang, der zum heutigen Zeitpunkt zwischen den Punktdaten der

Station Begumpet und regionalen Flächendaten besteht, auch auf die zu projizierenden Klimavariablen angewendet werden kann.

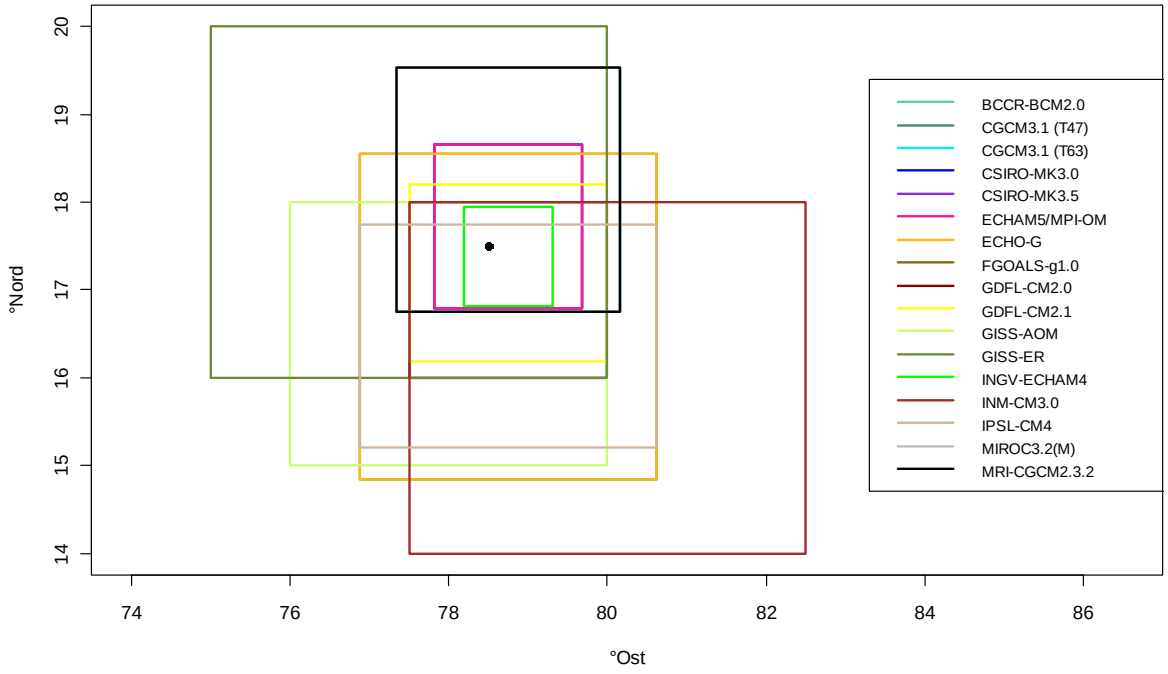

Abb. 4.1.2.1: Geographische Ausdehnung der AOGCM-Gitterzellen, die das Stadtgebiet Hyderabads (schwarzer Punkt) beinhalten (eigene Darstellung).

Da sich der Algorithmus zur Berechnung der Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert für die 17 einzelnen AOGCMs und auch für die beiden SRES-Szenarien nicht unterscheidet wird in den folgenden Unterkapiteln immer nur im Singular von einem Modell und einer Projektion gesprochen, wenngleich der Algorithmus auf jedes der 17 AOGCMs und die beiden SRES-Szenario angewandt wird.

a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur

Für die Erstellung der Projektion der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur in Hyderabad sind neben den von dem AOGCM modellierten Tagesdurchschnittstemperaturen für die drei verschiedenen Zeitschritte, die da wären 1961-2000 (T_t^{A2000}), 2046-2065 (T_t^{A2050}) und 2081-2100 (T_t^{A2100}), auch Stationsdaten der Station Begumpet in der Stadt Hyderabad (T_t^S) und regional gemittelte Flächendaten der größeren Region um Hyderabad(T_t^F ,CRU-Datensatz) relevant. Wie schon erwähnt hat die Region dabei ungefähr die Ausdehnung einer AOGCM-Gitterzelle. Der Index t stellt die Zeitabhängigkeit der Klimavariable in Tagesauflösung dar.

Zunächst werden aus den lokalen und regionalen Zeitreihen die durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen bestimmt. Die durchschnittliche lokale Jahresdurchschnittstemperatur der Station Begumpet in der Stadt Hyderabad beträgt im Zeitraum 1961 bis 2000 $T^S = 26{,}43°C$ und die durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur der Region, die aus den CRU-Daten im Zeitfenster 1961 bis 1990 bestimmt wird, beträgt $T^F = 27{,}2°C$ (vgl. auch Kapitel 3.2). Die durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen für das AOGCM werden mit T^{A2000} ,T^{A2050} und T^{A2100} bezeichnet.

Anhand der Modellierung des AOGCMs für das 20. Jahrhundert wird nun zunächst ein modellabhängiger Korrekturfaktor c_K^A eingeführt, der die systematischen Abweichungen des Modells in der Region ausgleichen soll. Dazu wird die gemittelte Jahresdurchschnittstemperatur des 20c3m-AOGCM-Laufs mit der flächengemittelten mittleren Jahresdurchschnittstemperatur des regionalen CRU-Datensatzes verglichen:

$$\frac{T^F}{T^{A2000}} = c_K^A \tag{1}$$

Im nächsten Schritt wird dann der statistische Zusammenhang zwischen den gemessenen Regionaldaten T^F und den gemessenen Stationsdaten (Begumpet) T^S bestimmt, und ein modellunabhängiger Downscalingfaktor c_D definiert:

$$\frac{T^S}{T^F} = c_D \tag{2}$$

Wenn man sowohl den Korrekturfaktor als auch den Downscalingfaktor auf die durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur des 20c3m-AOGCM-Laufs anwendet, dann erhält man folglich die durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur der Station:

$$T^S = c_D \cdot c_K^A \cdot T^{A2000} \tag{3}$$

In der Diskussion der Modellqualität in Kapitel 4.2 wird deutlich werden, warum die Aufspaltung des Korrekturfaktors in diese beiden Komponenten von Bedeutung ist, obwohl sie hier mathematisch redundant erscheint. Für das Ziel der Arbeit, eine Klimaprojektion für Hyderabad zu erstellen, werden diese beiden Faktoren dann auf die durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen der AOGCM-Modellierung für das 21. Jahrhundert angewandt. Damit entsteht eine von systematischen Abweichungen befreite Projektion der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur für die Stadt Hyderabad.

Durchschnittliche Anzahl von Hitzewellen im Jahr

Für die Erstellung der Projektion der durchschnittlichen Anzahl an Hitzewellentagen im Jahr wird die in Kapitel 3.1 beschriebene Definition eines Hitzewellentages verwendet. Diese basiert auf zwei Werten: zum einen auf der mittleren Maximaltemperatur des durchschnittlich heißesten Kalendertages

$$^{Max}T^{K} = \max_{t\in[1,\ldots,365]}\left(\frac{1}{N}\sum_{J}^{N} {}^{Max}T_{t,J}\right) \tag{4}$$

wobei der Index J für das Jahr und der Index t hier für den Kalendertag steht. Der hochgestellte Index *Max* vor dem T zeigt an, dass es sich nicht um Tagesdurchschnittstemperaturen sondern um die Tagesmaximaltemperaturen handelt. Zum anderen basiert die Definition auf der mittleren Tagesmaximaltemperatur des Monats mit den im Mittel höchsten Tagesmaximaltemperaturen

$$^{Max}T^{M} = \max_{t\in[1,\ldots,365]}\left(\frac{1}{N}\sum_{J}^{N}\frac{1}{n}\sum_{t}^{n} {}^{Max}T_{t,m,J}\right) \tag{5}$$

wobei der Index J für das Jahr, m für den Monat und t diesmal für den Tag des Monats steht. Nachdem $^{Max}T^{K}$ und $^{Max}T^{M}$ definiert sind, kann die Definition für einen Hitzewellentag demnach wie folgt formuliert werden:

$$^{Max}T_t \geq {}^{Max}S = \frac{\left({}^{Max}T^{K} + {}^{Max}T^{M}\right)}{2} + 3{,}5K \tag{6}$$

Der Index t zählt in diesem Fall die Tage des jeweiligen Datensatzes und die Variable ^{Max}S stellt den Schwellwert dar, ab dem ein Tag für diesen Datensatz ein Hitzewellentag ist.

Um die Klimaprojektionen für die Klimavariable der Anzahl der Hitzewellentage für das 21 Jahrhundert zu erstellen, wird folgende Datengrundlage verwendet: die von dem AOGCM modellierten Tagesmaximaltemperaturen für die drei verschiedenen Zeitschritte, die da wären 1961-2000 ($^{Max}T_t^{M\,2000}$), 2046-2065 ($^{Max}T_t^{M\,2050}$) und 2081-2100 ($^{Max}T_t^{M\,2100}$) und die Tagesmaximaltemperaturen der Station Begumpet in der Stadt Hyderabad ($^{Max}T_t^{S}$). Der Index t stellt im Stationsdatensatz (Begumpet) die Tage vom 1.1.1997 bis 31.12.2007 dar. Die durchschnittliche Anzahl an Hitzewellentagen pro Jahr ergibt sich aus diesen Daten wie folgt:

$$H^{S} = \frac{1}{N}\left|\left\{T_t^{S} \,\middle|\, {}^{Max}S^{S} \leq {}^{Max}T_t^{S}\right\}\right| \qquad mit \qquad {}^{Max}S^{S} = \frac{\left({}^{Max}T^{K,S} + {}^{Max}T^{M,S}\right)}{2} + 3{,}5K \tag{7}$$

$$\begin{aligned} H^{A2000} &= \frac{1}{N}\left|\left\{T_t^{A2000} \,\middle|\, {}^{Max}S^{A2000} \leq {}^{Max}T_t^{A2000}\right\}\right| \\ mit \qquad {}^{Max}S^{A2000} &= \frac{\left({}^{Max}T^{K,A2000} + {}^{Max}T^{M,A2000}\right)}{2} + 3{,}5K \end{aligned} \tag{8}$$

$$H^{A2050} = \frac{1}{N} \left| \left\{ T_t^{A2050} \middle| {}^{Max}S^{A2000} \leq {}^{Max}T_t^{A2050} \right\} \right| \tag{9}$$

$$H^{A2100} = \frac{1}{N} \left| \left\{ T_t^{A2100} \middle| {}^{Max}S^{A2000} \leq {}^{Max}T_t^{A2100} \right\} \right| \tag{10}$$

Nach der Bestimmung der durchschnittlichen Anzahl an Hitzewellentagen im Jahr findet kein Korrektur der Ergebnisse statt, da die prozentualen Veränderungen einiger AOGCM-Projektionen zu stark sind. So gibt es zum Beispiel Modelle, die von 0,4 Hitzewellentagen im Jahr auf 80 Tage ansteigen. Wenn jetzt noch mit einem Korrekturfaktor gearbeitet wird, dann kommt man auf über 160 Hitzewellentage im Jahr, welches keine realistischer Werte mehr ist. Der Mittelwert der Modelle für den 20c3m-Lauf liegt mit 2 Tagen im Jahr zwar doppelt so hoch wie der Wert der Station; angesichts der zu erwartenden Veränderungen liegt er allerdings vergleichsweise sehr nah am Stationswert. Ein weiterer zu erwähnender Punkt bei der Berechnung der Hitzewellentage liegt darin, dass der Hitzewellen-Schwellenwert, ab dem ein Tag im 20c3m-Lauf ein Hitzewellentag ist, für die Projektionen konstant gehalten wird. Dies bedeutet, dass keine Anpassung an die erhöhten Temperaturen in den zukünftigen Zeitschritten in die Hitzewellendefinition für diese Zeitschritte einberechnet ist, sondern auch 2100 der Schwellwert noch auf dem Klima des 20. Jahrhunderts beruht. Gerechtfertigt ist dies dadurch, das die Klimawirkung auf Basis der heutigen Gebäude-Struktur und Ausstattung der Stadt gemessen wurde, und das Ergebnis Aussagen darüber machen soll, wie sich die Situation in der Stadt ohne Anpassung entwickeln wird.

b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag

Für die Erstellung der Projektion der durchschnittlichen Jahresniederschlagssumme wird ähnlich vorgegangen wie bei der Modellierung der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur. Datengrundlage sind hier die von dem AOGCM modellierten Tagesniederschläge für die drei verschiedenen Zeitschritte 1961-2000 (N_t^{A2000}), 2046-2065 (N_t^{A2050}),2081-2100 (N_t^{A2100}), die Niederschlagsdaten der Station Begumpet in der Stadt Hyderabad (N_t^S), sowie die regional gemittelten Flächendaten (N_t^F , CRU-Datensatz). Die Region hat dabei wieder die ungefähre die Ausdehnung einer AOGCM-Gitterzelle. Der Index t stellt wieder die Zeitabhängigkeit der Klimavariable in Tagesauflösung dar.

Zunächst werden aus allen Zeitreihen die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen bestimmt. Die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme der Station Begumpet beträgt im Zeitraum 1961 bis 2000 $N^S = 809 mm / Jahr$ und die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme des regionalen CRU-Datensatzes beträgt $N^F = 872 mm / Jahr$ (vgl. auch

Kapitel 3.2). Die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen für das AOGCM werden mit N^{A2000}, N^{A2050} und N^{A2100} bezeichnet.

Wie auch für die Jahresdurchschnittstemperaturen wird zunächst anhand des AOGCM-Vergleichslaufs für das 20. Jahrhundert ein modellabhängiger Korrekturfaktor c_K^A eingeführt, der die systematischen Abweichungen des Modells in der Region ausgleichen soll. Dazu wird die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme des 20c3m-AOGCM-Laufs mit der flächengemittelten mittleren Jahresniederschlagssummen des regionalen CRU-Datensatzes verglichen:

$$\frac{N^F}{N^{A2000}} = c_K^A \tag{11}$$

Im nächsten Schritt wird dann der statistische Zusammenhang zwischen den gemessenen Regionalendaten N^F und den gemessenen Stationsdaten (Begumpet) N^S bestimmt, und ein modellunabhängiger Downscalingfaktor c_D definiert:

$$\frac{N^S}{N^F} = c_D \tag{12}$$

Wenn man sowohl den Korrekturfaktor als auch den Downscalingfaktor auf die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme des 20c3m-AOGCM-Laufs anwendet, dann erhält man folglich die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme der Station:

$$N^S = c_D \cdot c_K^A \cdot T^{A2000} \tag{13}$$

Für die Klimaprojektion für Hyderabad werden, wie dies auch für die Jahresdurchschnittstemperatur gemacht wurde, diese beiden Faktoren dann auf die durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen der AOGCM-Modellierung für das 21. Jahrhundert angewandt. Damit entsteht dann auch für die Klimavariable des durchschnittlichen Jahresgesamtniederschlags eine von systematischen Abweichungen befreite Projektion für die Stadt Hyderabad.

Durchschnittliche Anzahl von Starkregenereignissen

Für die Erstellung der Projektion der durchschnittlichen Anzahl an Starkregenereignissen im Jahr wird die in Kapitel 3.1 beschriebene Definition dieser Ereignisse verwendet. Das heißt, dass ein Tag, an dem der Niederschlag den Wert von 80mm annimmt bzw. übersteigt ein Starkregenereignis darstellt. Desweiteren fließen folgende Daten in die Projektion ein: die von dem AOGCM modellierten Tagesniederschläge für die drei verschiedenen Zeitschritte 1961-2000 (N_t^{A2000}), 2046-2065 (N_t^{A2050}) und 2081-2100 (N_t^{A2100}) und die Daten der Station Begumpet in der Stadt Hyderabad (N_t^S).

Das im Folgenden verwendete Verfahren zur Untersuchung der zukünftigen Entwicklung der Starkregenereignisse ist an die Untersuchungen von Tebaldi et al. (2006) angelehnt,

in denen die Entwicklung der 95% Perzentile und weitere Extremwertindizes global untersucht wurden. Der erste Schritt zur Erstellung der Projektionen der Anzahl an Starkregenereignissen besteht darin, den Unterschreitungsanteil p zu bestimmen. Dieser gibt den Anteil der Niederschläge pro Jahr an, die im Stationsdatensatz mit weniger als 80mm verzeichnet sind. Der Schwellenwert 80mm stellt somit das p-Quantil des Stationsdatensatzes dar. Daraufhin wird dann das p-Quantil des 20c3m-Laufs der AOGCMs berechnet. Die Berechnung des p-Quantils erfolgt, indem der folgende Algorithmus angewendet wird. Dafür wird zunächst der Datensatz x der Größe nach sortiert. Anschließend wird die Länge N des Datensatzes bestimmt. Dann wird aus dem gewünschten Unterschreitungsanteil p mittels folgender Gleichung eine Variable h bestimmt, dabei gibt es verschiedene Arten diese Variable h zu berechnen. In dieser Arbeit wird die folgende verwendet, weil für sie der Median nahezu unverzerrt ist (Hyndman & Fan 1996):

$$h = (`N + \frac{1}{3}) \cdot p + \frac{1}{3} \tag{14}$$

Diese Variable h wird im nächsten Schritt bis auf die nächste ganze Zahl h_f abgerundet. Zum Schluss wird mit folgender Gleichung linear interpoliert:

$$q = x(h_f) + (h - h_f) \cdot (x(h_{f+1}) - x(h_f)) \tag{15}$$

Die Variable q ist dann der gesuchte Wert (p-Quantil), für die vorliegende Arbeit also der Niederschlagswert, der dann für das AOGCM als Starkregenereignis gilt.

Nachdem dieser Wert bestimmt ist wird in allen 4 Datensätzen die Anzahl an Tagen mit Starkregenereignissen pro Jahr (E) bestimmt:

$$E^S = \left| \left\{ N_t^S \middle| 80mm \leq N_t^S \right\} \right| \tag{16}$$

$$E^{A2000} = \left| \left\{ N_t^{A2000} \middle| q \leq N_t^{A2000} \right\} \right| \tag{17}$$

$$E^{A2050} = \left| \left\{ N_t^{A2050} \middle| q \leq N_t^{A2050} \right\} \right| \tag{18}$$

$$E^{A2100} = \left| \left\{ N_t^{A2100} \middle| q \leq N_t^{A2100} \right\} \right| \tag{19}$$

Dabei ist aufgrund des Verfahrens die Anzahl an Starkregenereignissen im 20c3m-Lauf die gleiche wie im Stationsdatensatz.

Nachdem nun alle Algorithmen zur Berechnung der Projektionen der vier impactrelevanten Klimavariablen beschrieben wurden folgt im nächsten Teil eine Beschreibung der Algorithmen zur Erstellung der Gütemaße.

4.2 Gewichtungen als Gütemaße

Da die verschiedenen AOGCMs das heutige Klima unterschiedlich modellieren, kann es unter Umständen nützlich sein, eine Gewichtung der AOGCMs vorzunehmen, um jenen Modellen mehr Aussagekraft zuzuschreiben, die die Klimaprozesse Vergleichslauf für das 20. Jahrhundert (20c3m-Lauf) am besten modellieren (Knutti 2010, Smith & Chandler 2010). Die Gewichtung sollte dabei nicht nur von einer einzigen Metrik abhängen, da es sich gezeigt hat, dass die Güte des Vergleichslaufes für das 20. Jahrhundert eines AOGCMs von der betrachteten Variable abhängig ist (van der Linden & Mitchell 2009, 50). Aus diesem Grund werden für jedes AOGCM vier verschiedene Gütekriterien verwendet, die jeweils eine besondere Aussagekraft hinsichtlich einer der vier impactrelevanten Klimavariablen haben. Aus dem spezifischen Abschneiden der AOGCMS wird dann ein relatives Maß entwickelt, welches für die Gewichtung im AOGCM-Ensemble verwendet werden kann.

Im folgenden Teil werden die Gütekriterien und die daraus abgeleiteten Gütemaße für die vier verschiedenen Klimavariablen vorgestellt. Zudem wird erläutert, wie die Gütemaße erstellt wurden. Da in Kapitel 5.1 dieser Arbeit abgeschätzt werden soll, ob und wie eine gewichtete Dichteverteilung von der verwendeten Metrik (hier verstanden als Kombination eines bestimmten Maßes und eines bestimmten Gütekriteriums) abhängt, werden für die Klimavariable Temperatur noch drei weitere Varianten von Gütemaßen vorgestellt, an denen diesen Abhängigkeit dann exemplarisch untersucht werden soll. Der Vergleichs- bzw. 20c3m-Lauf im Folgenden durch den Index *M* (Modell) dargestellt.

a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur

Für die durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur wurden zwei Gütekriterien untersucht:

i) Der Betrag der Differenz der Standartabweichungen der Jahresdurchschnittstemperaturen des 20c3m-Laufs ($T_J{}^M$)und des Regionaldatensatzes ($T_J{}^F$):

$$\Delta_2^M = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_J^N (T_J{}^M - T^M)^2} - \sqrt{\frac{1}{n}\sum_J^n (T_J{}^F - T^F)^2} \qquad (20)$$

Wobei N die Anzahl an Jahren im 20c3m-Lauf und n die Anzahl an Jahren im Regionaldatensatz ist.

ii) Der Betrag der Differenz der modellierten durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur des 20c3m-Laufs (T^M)und der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur des Regionaldatensatzes (T^F):

$$\Delta_1^M = \left| T^M - T^F \right| \tag{21}$$

Diese beiden Differenzen können so aber noch nicht für die Gewichtung der AOGCM-Projektionen genutzt werden. Darum muss für sie ein Maß entwickelt werden um aus ihnen eine Gewichtung zu erstellt. Bei der Erstellung dieses Maßes sind mannigfaltige Formen möglich, von denen einige hier genannt werden. (Gleckler et al. 2008, Knutti 2010, 5f.)

i) Eine Normierung der Differenzen auf 0 und 1 und die Umkehrung der Reihenfolge, so dass das Modell mit dem größten Fehler das Gewicht 0 bekommt, das beste Modell das Gewicht 1 und die Gewichte der verbleibenden Modelle dazwischen liegen.

$$G_1(\Delta^M) = 1 - \frac{\Delta^M - \Delta_{Min}}{\Delta_{Max} - \Delta_{Min}} \tag{22}$$

Wobei Δ_{Min} die kleinste Differenz im Ensemble ist und Δ_{Max} die größte.

ii) Eine Normierung der Differenz auf den Maximalen Fehler 1 und Umkehrung der Reihenfolge:

$$G_2(\Delta^{M\prime}) = \frac{\Delta_{Min}}{\Delta^M} \tag{23}$$

iii) Das Vorgehen wie unter i) und nachfolgende Potenzierung der Maße, um die Unterschiede zwischen besseren und schlechteren Modellen zu vergrößern und somit den Einfluss der Gewichtung auf die Ergebnisse zu erhöhen:

$$G_3(\Delta^M, n) = G_1(\Delta^M)^n \tag{24}$$

In diesem Fall ist n ein beliebiger Exponent. Je größer dieser gewählt wird, umso stärker wird der Einfluss der Gewichtung auf die Dichtefunktion

iv) Die Zuordnung von 1 und 0 je nachdem ob die Differenz oberhalb oder unterhalb eines zugelassenen Höchstfehlers S liegt:

$$G_4(\Delta^M, S) = \begin{cases} 1, \Delta^M \leq S \\ 0, \Delta^M > S \end{cases} \tag{25}$$

Nachdem hier beispielhaft für die Temperatur einige Arten der Gewichtung vorgestellt worden sind, soll im Folgenden für die anderen Variablen G_1 benutzt werden.

In Kapitel 5.1 wird zunächst die Abhängigkeit der gewichteten Dichteverteilungen von den verschiedenen hier aufgeführten Maßen untersucht. Im zweiten Teil des Kapitels 5.1 und bei der Bestimmung der gemittelten Gewichtung wird die Metrik $G_1(\Delta_2^M)$ verwendet.

Durchschnittliche Anzahl von Hitzewellentagen im Jahr

Das Maß für die Güte der Modellierung der Hitzewellentage wird aus der Differenz der Anzahl an Hitzewellentagen für den 20c3m-Lauf des Modells (H^M) und den Stationsdatensatz von Hyderabad (H^S) berechnet:

$$\Delta^M = \left| H^M - H^S \right| \tag{26}$$

Aus dieser Differenz wird dann Folgendes Maß erstellt:

$$G(\Delta^M) = 1 - \frac{\Delta^M - \Delta_{Min}}{\Delta_{Max} - \Delta_{Min}} \tag{27}$$

Dies entspricht der ersten Form des Maßes bei der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur.

b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag

Zur Bestimmung des Gütemaßes wird zunächst wieder die Differenz der durchschnittlichen Jahresniederschlagssumme des 20c3m-Laufs (N^M) und des Regionaldatensatzes (N^F) bestimmt:

$$\Delta^M = \left| N^M - N^F \right| \tag{28}$$

Anschließend wird dann der Gewichtungsfaktor daraus wie folgt berechnet:

$$G(\Delta^M) = 1 - \frac{\Delta^M - \Delta_{Min}}{\Delta_{Max} - \Delta_{Min}}. \tag{29}$$

Durchschnittliche Anzahl von Starkregenereignissen

Um die Güte der AOGCMs hinsichtlich ihrer Fähigkeiten die Starkregenereignisse im Jahr zu modellieren beurteilen zu können wurden die Häufigkeitsverteilungen der Tagesniederschläge des 20c3m-AOGCM-Laufs und der flächengemittelten (3x3°, 1950-2007) Tagesniederschlagsdatensatzes vom Indian Meteorological Department (IMD) verglichen. Dabei wurden zunächst mit der Quantile-Funktion die Tausendstel bestimmt und anschließend der Maximalabstand der dadurch generierten Häufigkeitsverteilungen berechnet. Dabei wurde nicht der Abstand der Häufigkeit zwischen zwei gleichen Niederschlagswerten, ähnlich ei-

nem Kolmogorov-Smirnov-Test (Shorak & Wellner 1986) bestimmt, sondern, wie in den beiden Beispielgraphen (Abb. 4.2.1) dargestellt, der maximale Minimalabstand. Das heißt, dass für jeden Punkt der roten Kurve der Abstand zu jedem Punkt auf der schwarzen Kurve berechnet wurde, um dann den minimalen Abstand, also den Abstand zum nächstliegenden schwarzen Punkt dem roten Punkt zuzuordnen. Anschließend wurde das Maximum dieser Minimalabstände gesucht, und als Differenz (Δ^M) zur Bestimmung des Gütemaßes verwendet:

$$G(\Delta^M) = 1 - \frac{\Delta^M - \Delta_{Min}}{\Delta_{Max} - \Delta_{Min}} \tag{30}$$

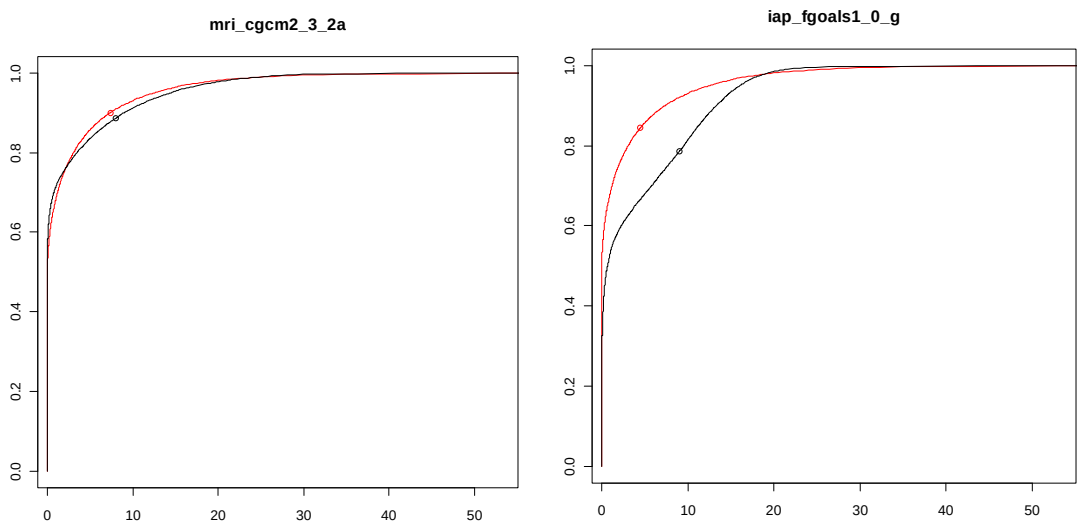

Abb. 4.2.1: Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschläge bis 50mm. Verteilungen der 20c3m-AOGCM-Läufe (mri_cgcm2_3_2a links, Iap_fgoals1_0_g rechts)(schwarz), Verteilung der flächengemittelten IMD-Daten (rot), Punkte kennzeichnen den maximalen Minimalabstand (y-Achse: Quantile; x-Achse: Tagesniederschlag in mm).

Nachdem nun auf Grundlage der vier Gütekriterien vier Gütemaße für die jeweilige Klimavariable erstellt wurden, wird nun noch ein Maß für die Güte hinsichtlich aller Klimavariablen definiert. Hier wird als einfachste, gleichgewichtete und lineare Form das arithmetische Mittel der vier Gütekriterien gebildet und dem jeweiligen AOGCM zugeordnet (Smith & Chandler 2010, 382). Da, wie in Kapitel 3.4 dargestellt nicht alle 17 verwendeten AOGCMs beide Szenarien modellieren, entstehen unterschiedliche Gütemaße für die beiden Szenarien, wenn die AOGCMs, die die maximale oder minimale Differenz besitzen, ein Szenario nicht modellieren.

4.3 Methoden der Auswertung

Da eine Auswertung eines Ensembles allein über den Mittelwert nur sehr wenige Informationen des Ensembles nutzt, werden im Folgenden zwei verschiedene Methoden vorgestellt, eine Verteilung zu interpretieren. Zum einen ist dies die Erstellung einer (gewichteten) Dichtefunktion mittels eines Kerndichteschätzers (Kapitel 4.3.1) und zum anderen die für diese Arbeit entwickelte Darstellung der Projektionen in zwei Scatterplots (Kapitel 4.3.2).

4.3.1 Kerndichteschätzer

Zur Auswertung der Verteilung der einzelnen AOGCM-Projektionen und im speziellen zur Untersuchung der Auswirkung der Gewichtungen werden mittels eines Kerndichteschätzers Dichtefunktionen der Verteilung erstellt. Ein Kerndichteschätzer ist ein Verfahren zur Erstellung von stetigen Dichten (vgl. van der Linden & Mitchell 2010). In der Arbeit wird der Kerndichteschätzer an Anlehnung an Lavine (2007, 106), Kolanoski (2008) und Wang & Wang (2007, 1) mit einem Gaußkern verwendet, so dass sich die Dichtefunktion $\hat{p}(x)$ als Summe der mit G_i gewichteten Gaußkerne ergibt. Dabei steht der Index i für das AOGCM, x_i stellt die durch das AOGCM projizierte Klimavariable dar, deren Anzahl mit N bezeichnet ist:

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{N \cdot h \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^{N} G_i \exp(-\frac{1}{2}(\frac{x - x_i}{h})^2) \tag{30}$$

Die Bandweite h wird dabei per Hand so angepasst, dass die resultierende Dichtefunktion monomodal ist (Déqué 2009, 8).

4.3.2 Vergleichsdiagramme

In diesem Teil der Arbeit geht es darum aufzuzeigen, wie die Darstellungen des Zeitschritt- und Szenarien-Vergleichs, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, zu interpretieren sind und welche Vorteile eine solche Darstellung der Ergebnisse bietet.

Abbildung 4.3.2 zeigt ein Beispiel für den Zeitschritt- (links) und Szenarien-Vergleich (rechts). Im Zeitschrittvergleich werden die AOGCM-Ergebnisse für das A2- und B1-Szenario hinsichtlich des ersten und zweiten Zeitschritts miteinander verglichen, während beim Szenarien-Vergleich die AOGCM-Ergebnisse für die beiden Zeitschritte hinsichtlich des A2- und B1-Szenarios miteinander verglichen werden. Die AOGCM-Ergebnisse, sprich die Temperatur- bzw. die Niederschlagsentwicklungen, sowie der aus Kapitel 3.2 übernommene Vergleichswert, werden entsprechend der Achsenskalierung eingetragen. Für den Zeitschrittvergleich steht die x-Achse dabei für die Klimavariablenveränderung des ersten, und die y-Achse für die Klimavariablenveränderung des zweiten Zeitschritts. Beim Szenarien-Vergleich entspricht die x-Achse der Klimavariablenveränderung des B1-Szenarios, und die y-Achse dem des A2-Szenarios. Für eine bessere Beschreibung des Graphen wird dieser unterteilt. Dabei dient der eingetragene Vergleichswert als Bezugspunkt; er wird als Schnittpunkt der

den Graphen unterteilenden Geraden gesetzt. Das heißt, dass der Graph in insgesamt vier Quadranten unterteilt wird, die, beginnend oben rechts, gegen den Uhrzeigersinn mit 1-4 numeriert werden (vgl. Abb. 4.3.2). Zusätzlich wird noch die Diagonale eingezeichnet, die die Bereiche unterschiedlicher Größenverhältnisse zwischen x-Achsenwert und y-Achsen wert trennt.

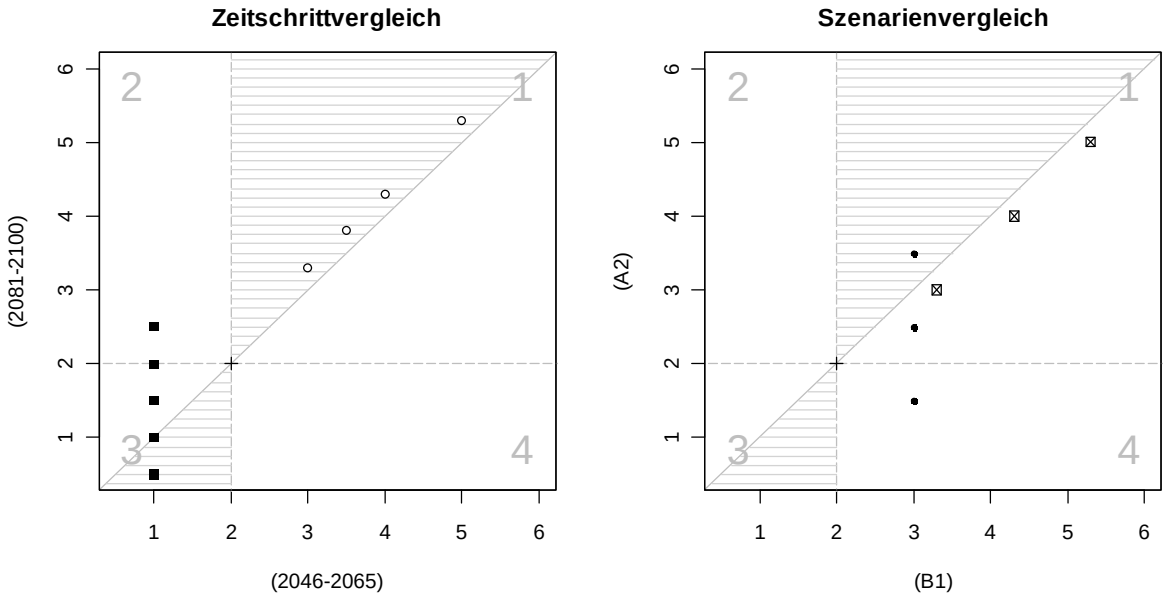

Abb. 4.3.2.1: Beispieldarstellungen von Zeitschritt- und Szenarium-Vergleich (eigene Darstellung).

Exemplarisch soll im Folgenden der linke Teil der Beispieldarstellung (Abb. 4.3.2.1), der Zeitschnitt-Vergleich besprochen werden. Jeder „Punkt“ in den Diagrammen stellt die Projektion eines AOGCMs für einen Zeitschritt dar. Die Vollquader stehen dabei für die A2-Projektion und die leeren Kreispunkte für die B1-Projektion. Der Vergleichswert, um den die vier Quadranten angeordnet sind, ist für das Beispiel bei 2 gesetzt und entsprechend eingetragen. Im ersten Quadranten sind die modellierten Werte eines Modells in beiden Zeitschritten größer als der Vergleichswert. Der zweite Quadrant stellt den Bereich dar, in dem für den ersten Zeitschritt eine Abnahme des Wertes, und für den zweiten Zeitschritt eine Zunahme modelliert wird. Für den dritten Bereich handelt es sich um eine Abnahme der Werte in beiden Zeitschritten und schließlich sind Werte, die zunächst einen größeren und anschließend einen kleineren Wert annehmen als der Vergleichswert im vierten Quadranten. Anhand der Quadranten also angegeben werden, in welcher Relation die modellierten Werte zum Vergleichswert stehen. Die Diagonale im Graphen ermöglicht es, schnell zu sehen ob der Wert im zweiten Zeitschritt größer ist als im zweiten oder umgekehrt. Liegt der Wert eines Modells auf der Geraden, aber nicht im Kreuz, so ändert er sich nach einer Veränderung zum ersten Zeitschritt hin nicht weiter. Im Beispiel modelliert dies ein Modell (A2) für einen auf 1 abnehmenden Wert, der im Folgenden aber stabil bleibt. Die Projektionen aller Modelle für das B1-Szenario liegen im ersten Quadranten und oberhalb der Diagonalen. Dies bedeutet, dass die Entwicklung der Werte monoton verläuft. Um die Bereiche monotoner Veränderung

in dem Beispielgraphen hervorzuheben sind sie gestreift dargestellt. Es gibt also auch ein Modell welches ein monotones Absinken im A2-Szenario modelliert.

Neben der *Lage* eines Punktes im Diagramm kann mithilfe der Darstellung auch die *Verteilung* der Modelle analysiert werden. Wie schon erwähnt liegen die Projektionen des B1-Szenarios alle im Bereich eines monotonen Anstiegs. Auffällig ist ihr paralleler Verlauf zur Diagonalen. Dieser bedeutet, dass die Modelle zwar unterschiedliche Anstiege im ersten Zeitintervall modellieren, die Veränderung danach aber bei allen Modellen gleich ist, nämlich ein weiterer Anstieg um 0,3. Würden die Modelle lineare Anstiege modellieren, müsste sich die Punktewolke von der Diagonale nach oben hin entfernen.

Aus der Verteilung der Modelle des B1-Szenarios lässt sich zudem eine *Funktion (Regression)* erstellen. Das heißt, dass es möglich ist, aus der Veränderung der Werte im ersten Zeitschritt die Werte im zweiten Zeitschritt abzuleiten. Für das A2-Szenario ist dies nicht möglich. Hier werden einem Wert des ersten Zeitschritts fünf Werte des zweiten Zeitschritts zugeordnet. Anders ausgedrückt, anhand des ersten Zeitschritts kann, anders als beim B1-Szenario, keine Aussage über die Entwicklung der Werte im zweiten Zeitschritt gemacht werden. Nach dem ersten Zeitschritt im A2-Szenario kann der Wert sowohl weiter abnehmen, als auch gleichbleiben oder auch bis auf den heutigen Wert oder sogar darüber hinaus zunehmen. Die Darstellung ist also besonders gut dazu geeignet, Strukturen in den Ensembles von Projektionen zu erkennen, die in einer Betrachtung der Mediane, Mittelwerte und Standardabweichungen nicht zu erkennen sind.

Anhand dieser Darstellungsform lässt sich also sehr schnell erkennen, ob Strukturen in den Verteilungen vorliegen und ob ein Trend im Mittelwert auch ein Trend in den einzelnen AOGCMs ist.

Nachdem in diesem Kapitel die Methodik der Arbeit vorgestellt wurde, wird es im folgenden Kapitel darum gehen, die mit dieser Methodik erzielten Ergebnisse darzustellen. Dabei werden zunächst die gewichteten Ergebnisse analysiert. Bevor es im zweiten Teil des Auswertungskapitels dann um die ungewichteten Ergebnisse geht, wird die Aussagekraft der AOGCM-Gewichtungen kritisch beleuchtet.

5 Auswertung der Ergebnisse

Nachdem im vorigen Kapitel die Werkzeuge zur Erstellung einer regionalen Klimaprojektion für Hyderabad beschrieben wurden, sollen in diesem Kapitel die Ergebnisse ausgewertet werden. Dabei geht es im ersten Teil darum, zu untersuchen welchen Einfluss verschiedene Gewichtungen auf die Ensemble-Projektion nehmen. Im zweiten Teil werden dann die Ensemble-Projektionen hinsichtlich ihrer Aussagen über die zukünftige Klimaentwicklung Hyderabads und deren Unsicherheit ausgewertet. Die der Auswertung zugrunde liegenden Rohdaten der AOGCMs finden sich im Appendix der Arbeit.

5.1 Gewichtete Dichteverteilungen der vier Klimavariablen

Wie im Methodenteil beschrieben, dient die Gewichtung dazu, jedes AOGCM entsprechend seiner Qualität in die Ensemble-Klimaprojektion einfließen zu lassen. Dazu muss mithilfe einer Metrik jedem AOGCM ein Gewicht zugeordnet werden. Der Grundgedanke hinter der Konstruktion dieses Maßes ist, dass es ein Modell, welches in der Gegenwart das Klima besonders gut modelliert, auch in Zukunft das Klima gut modellieren wird. Es herrschen aber in der Zukunft mit einer erhöhten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre andere Randbedingungen als heute und somit ist nicht gesagt, dass auch bei diesen veränderten Bedingungen das jeweilige Modell noch die besten Ergebnisse liefert. Ein Modell, welches besonders gut das Klima des 20. Jahrhunderts modelliert, erreicht dies möglicherweise durch eine übermäßige „Trimmung“ auf dieses Klima und wird somit unter veränderten Bedingungen weniger realistisch sein als ein weniger extrem auf den Beobachtungszeitraum getrimmtes Modell. Dennoch ist die Qualität in der Modellierung historischer Zeitläufe die einzige Möglichkeit, empirisch über die Güte eines Modells zu urteilen. Unter der Annahme, dass die in diesem Sinne guten Modelle auch in Zukunft besser sein werden, erhält man durch eine Gewichtung die Möglichkeit, schlechtere Modelle nicht so stark in die Vorhersage einfließen zu lassen und damit eine bessere Klimaprojektion zu erreichen.

Woran man eine bessere Klimaprojektion erkennt, ist allerdings nicht trivial. Aus dem Anspruch, die Zukunft möglichst genau vorherzusagen, wird oft eine schmale Dichteverteilung mit einem ausgeprägten Maximum, gegenüber einer sehr breiten Verteilung bevorzugt (Knutti 2010, 7). Mit eine schmalere Verteilung auf Basis einer Gewichtung kann aber nicht immer eine Aussage über die Klimaentwicklung gemacht werden, da bei einer ungeeigneten Gewichtung auch viel Information verloren gehen kann, die für die Klimaprojektionen wichtig ist wäre (Weigel et al. 2010, 4188f.). Ein Grund für solch einen Informationsverlust kann zum Beispiel sein, dass aufgrund von unterbewerteten internen Variabilitäten Unterschiede in den Modellläufen des heutigen Klimas überbewertet werden, und so Modelle, die diese Variabilität gut abbilden unterhalb ihrer Qualifikation gewichtet werden.

Um einen Überblick über die Auswirkungen der Auswahl unterschiedlicher Gewichtungen zu erhalten (und darzustellen, welche Folgen subjektive Entscheidungen hinsichtlich der Auswahl einer Metrik haben), sind in Abbildung 5.1.1 die verschiedenen Gewichte, die die 14 AOGCMs unter dem B1-Szenario auf Basis unterschiedlicher Gewichtungen erhalten haben

dargestellt. Dabei sind den verschiedenen Metriken/Gewichtungen aus Kapitel 4.2 folgende Farben zugeordnet: schwarz, $G_1(\Delta_1^M)$; orange, $G_3(\Delta_1^M,4)$; grün, $G_1(\Delta_2^M)$; blau, $G_2(\Delta_2^M)$ und grau, $G_4(\Delta_2^M,0{,}49)$, wobei der Schwellwert der grauen Kurve (0,49K) die Standardabweichung der interannuellen Schwankungen in den Jahren 1961-2000 im regionalen Datensatz von CRUTEM3 ist (vgl. Kapitel 3.3).Die schwarzen und orangen Gewichte ergeben sich also zu einem Gütekriterium, dass auf der Standardabweichung der interannuellen Schwankungen der Jahresdurchschnittstemperatur basiert und die grauen, blauen und grünen Gewichte basieren auf einem Gütekriterium welches die durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur verwendet. Gut zu erkennen ist in dieser Abbildung, dass es Modelle gibt die bei einigen Gewichtungen gut abschneiden und bei anderen eher schlecht. Beispielhaft wäre da der Unterschied zwischen der orangen und blauen Gewichtung des AOGCMs ECHO-G hervorzuheben.

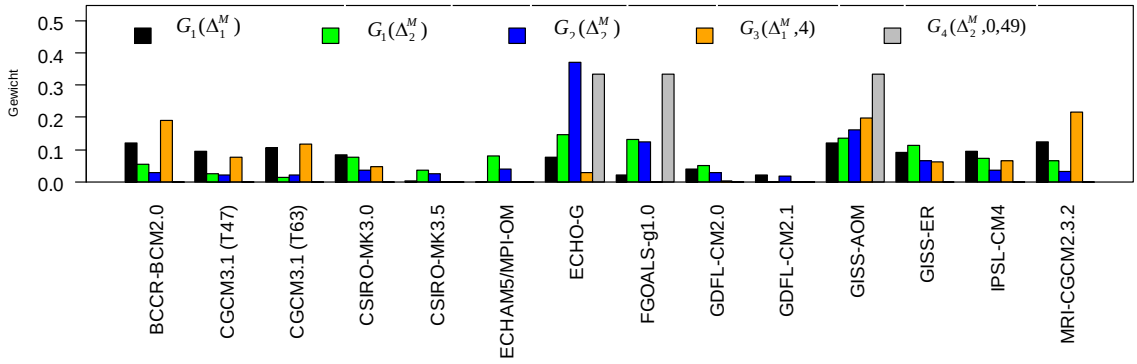

Abb. 5.1.1: Darstellung unterschiedlicher Gewichte auf Basis verschiedener Metriken (Farbe) für jedes AOGCM unter dem B1-Szenario.

In Abbildung 5.1.2 sind die verschiedenen Metriken erneut mit den 5 Farben gekennzeichnet. Im linken Graphen der Abbildung wird deutlich, wie stark sich die verschiedenen Maße zur Erstellung einer Metrik aus einem Gütekriterium unterscheiden. Dafür wurden die AOGCMs zunächst ihrer Rangfolge nach, betreffend der jeweiligen Metrik, geordnet; die x-Achse gibt also den Rang bezüglich einer Gewichtung an. Die y-Achse zeigt für den jeweiligen Rang an, welches Gewicht dieser Rang bei der jeweiligen Gewichtung bekommen hat. Zu erkennen ist in dieser Grafik zum Beispiel, dass im Fall der grauen Gewichtung nur die ersten drei Ränge eine Gewichtung größer null erhalten haben. Im Vergleich dazu ist der Verlauf der schwarzen Gewichtung annähernd eine Gerade. In der mittleren Abbildung der zweiten Zeile sind die gewichteten Dichtefunktionen der Ensemble-Projektionen für die durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur des ersten Zeitschritts (2046-2065) des B1-Szenarios dargestellt. In dem rechten Graphen der zweiten Zeile die Ensemble-Projektionen des zweiten Zeitschritts (2081-2100).

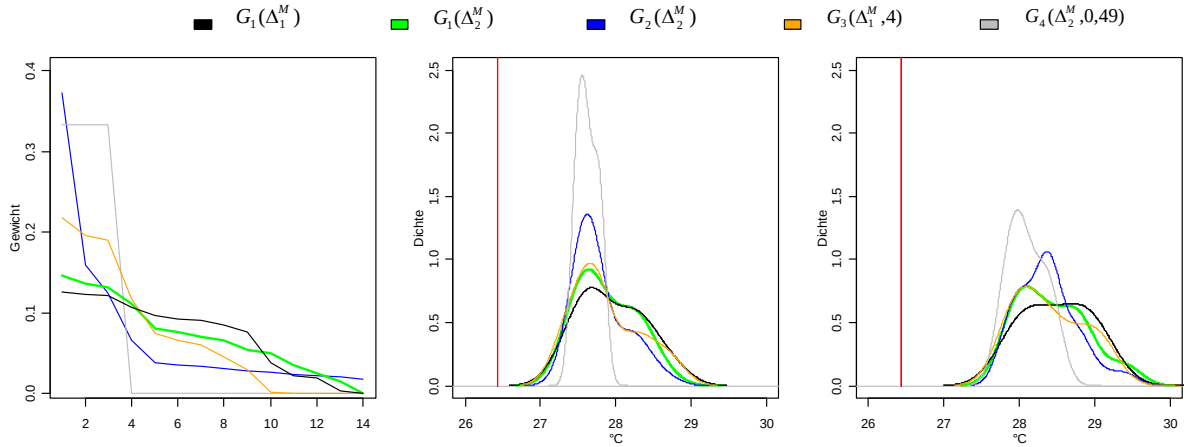

Abb. 5.1.2: Darstellung der Auswirkung verschiedener Metriken auf die Erstellung von gewichteten Dichtefunktionen, (von links): Verlauf der Gewichte für die verschienden Metriken bei den, dem Abschneiden nach für jede Gewichtung sortierten AOGCMs; gewichtete Dichtefunktionen der B1-Projektionen der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur im ersten Zeitschritt (Mitte); im zweiten Zeitschritt (rechts).

Die stärksten Unterschiede in den einzelnen AOGCMs zugewiesenen Gewichten erzeugt dabei die blaue, graue und rote Gewichtung. Die grüne und die schwarze Gewichtung erzeugen dagegen einen eher moderaten Unterschied bei den Gewichten der Modelle. Bei den beiden letztgenannten wird dabei derselbe Algorithmus zur Erstellung der Metrik aus dem Gütekriterium verwendet. Die daraus resultierenden Dichtefunktionen unterscheiden sich aufgrund der weniger intensiven Gewichtung auch verhältnismäßig wenig in Verlauf und Breite. Im zweiten Zeitschritt verändert sich Lage und Art des Maximums der Dichtefunktion der beiden Gewichtungen aber deutlich. Während die schwarze Gewichtung ein ausgedehntes Maximum und für ein größeres Temperaturintervall nahezu konstante Dichten erzeugt, ist im Falle der grünen Gewichtung ein klares Maximum bei circa 28°C zu erkennen. Die Gewichtungen, bei denen mit anderen Algorithmen eine Metrik aus dem jeweiligen Gütekriterium erzeugt wurde, zeigen deutlichere Maxima in der Dichtefunktion. Dabei ist im Graphen links unten zu erkennen, nach welchem Kriterium im Fall der grauen Kurve die Metrik bestimmt wurde: liegt die Güte eines AOGCMs oberhalb eines gewissen Schwellwertes, bekommt es die volle Gewichtung, liegt die Güte unterhalb des Schwellwertes erhält es die Gewichtung Null und hat somit keinen Einfluss auf die Dichtefunktion. Besonders stark ist im Fall der grauen Gewichtung auch der Einfluss auf die Breite der Verteilung, die den Unsicherheitsbereich der Klimaprojektion darstellt.

Anhand dieser Beispiele erkennt man recht gut, wie stark die Ergebnisse einer gewichteten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung von subjektiven Entscheidungen abhängen. Dennoch sollen die im Methodenteil vorgestellten Gewichte verwendet werden, um zu untersuchen, welche Unterschiede daraus in den Dichtefunktionen entstehen, und wo die eher gut und eher schlecht gewichteten AOGCMs im Ensemble liegen. Für die Temperatur wird dabei das schwarze Gewicht ($G_1(\Delta_1^M)$) der Abbildung 5.1.1 verwendet.

Die Untersuchung der Gewichtungen findet dabei für jede Klimavariable einzeln statt. Dazu wird in den Abbildungen 5.1.2 bis 5.1.5 in Anlehnung an van der Linden & Mitchell (2009, 64)

die Auswirkung auf die Dichtefunktion gezeigt und in den ersten drei Spalten der dazugehörigen Abbildungen die Projektionen der verschiedenen AOGCMs als schwarze Balken eingetragen, die mit einer ihrer Gewichtung entsprechenden Länge versehen sind. Die in den Abbildungen verwendeten Werte sind in der Tabelle 5.1.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1.1: Überblick der einzelnen und kumulierten Gewichtungen für die Klimavariablen für die verwendeten AOGCM-Läufe, unterteilt nach dem jeweiligen Szenario.

AOGCM	Szenario	Jahresdurch-schnitts-temperatur	Hitzewellen	Jahres-gesamt-niederschlag	Starkregen-ereignisse	Gemittelte Gewichtung
BCCR-BCM2.0	A2	1,0	0.8	0.8	1.0	0.9
	B1	1,0	0.8	0.8	1.0	0.9
CGCM3.1(T47)	A2	0,8	1.0		1.0	0.9
	B1	0.8	1.0		1.0	0.9
CGCM3.1(T63)	A2					
	B1	0.9	0.9	0.3	1.0	0.8
CSIRO-MK3.0	A2	0.7	0.4	0.6	1.0	0.7
	B1	0.7	0.4	0.6	1.0	0.7
CSIRO-MK3.5	A2	0.0	0.1	0.8	1.0	0.5
	B1	0.0	0.0	0.8	1.0	0.5
ECHAM5/MPI-OM	A2	0.0	0.6	0.6	0.9	0.5
	B1	0.0	0.6	0.7	0.9	0.5
ECHO-G	A2	0.6	0.9	0.9	1.0	0.8
	B1	0.6	0.9	0.9	1.0	0.9
FGOALS-g1.0	A2					
	B1	0.2	0.9	0.0	0.2	0.3
GFDL-CM2.0	A2	0.3	0.9	0.9	1.0	0.8
	B1	0.3	0.9	0.9	1.0	0.8
GFDL-CM2.1	A2	0.2	0.6	0.1	0.7	0.4
	B1	0.2	0.5	0.2	0.7	0.4
GISS-AOM	A2					
	B1	1.0	0.8	0.9	1.0	0.9
GISS-ER	A2	0.7	0.5	0.8	0.0	0.5
	B1	0.7	0.5	0.8	0.0	0.5
INGV-ECHAM4	A2	1.0	0.0	0.6	0.8	0.6
	B1					
INM-CM3.0	A2			0.4	0.6	0.5
	B1			0.4	0.6	0.5
IPSL-CM4	A2	0.7	0.9	0.0	0.6	0.5
	B1	0.7	0.9	0.1	0.6	0.6
MIROC3.2(M)	A2		0.8	0.2	0.8	0.6
	B1		0.7	0.2	0.8	0.6
MRI-CGCM2.3.2	A2	1.0	0.8	1.0	1.0	0.9
	B1	1.0	0.7	1.0	1.0	0.9

In den folgenden Abbildungen entspricht die erste Zeile dem gleichgewichteten Fall. In der zweiten Zeile wird das Gewicht verwendet, welches zur Kennzeichnung der Qualität der Modellierung des 20c3m-Laufs hinsichtlich der jeweiligen Variable verwendet wurde. Im Fall der

Temperatur also zum Beispiel die Standardabweichung der interannuellen Schwankungen der Jahresdurchschnittstemperatur (die schwarzen Kurve in Abb. 5.1.1). In der dritten Zeile wird dann mit dem Mittelwert aus allen für das jeweilige Modell vorhandenen Einzelgewichten gewichtet um ein Bild von der Gesamtqualität des Modells zu besitzen, da Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Klimavariablen bestehen. Mithilfe der Balken lässt sich dann feststellen, ob die schlechter gewichteten Modelle eher am Rand der Verteilungen liegen oder ob sich andere Strukturen erkennen lassen. In der vierten Zeile sind dann die Dichtefunktionen noch einmal zusammenfassend dargestellt um Unterschiede in der Lage der Maxima oder auch der Breite besser erkennen zu können.

a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur

In Abbildung 5.1.2 zur durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur lässt sich zunächst anhand der Balken erkennen, dass die weniger stark gewichteten Modelle keine Ausreißer darstellen. Es fällt aber auf, dass im ersten Zeitintervall sowohl im B1- als auch im A2-Szenario eine Häufung von nicht sehr stark gewichteten Modellen um eine Temperatur auftritt. Würden wir also die Gewichtung umkehren, gute Modelle also schwach gewichten und schlechte Modelle stärker, so hätten wir einen sehr schmalen Peak bei 28.2°C (B1, 2050) und 28.7°C (A2, 2050) und würden die Unsicherheiten stark unterschätzen. Im zweiten Zeitschritt ist diese Häufung im B1- Szenario noch zu erkennen, aber insgesamt bei beiden Szenarien nicht mehr so stark ausgeprägt.

Diese Eigenschaft lässt sich auch in der vierten Spalte, in der alle drei Dichtefunktionen in einem Graphen zum Vergleich dargestellt werden, erkennen. Hier wird in zwei Fällen (B1, zweiter Zeitschritt und A2, erster Zeitschritt) das Maximum bei beiden Gewichtungen relativiert. Im Fall des ersten Zeitschritts im B1-Szenario entsteht dagegen ein anderes Maximum der Dichtefunktion für den Fall der Gewichtung in der 2. Zeile. Im Fall des zweiten Zeitschritts des A2-Szenarios ähneln sich alle 3 DFs sehr, wobei im Falle der Gewichtung in der 2. Zeile auffällt, dass diese merklich schmaler ist. Dies resultiert daraus, dass hier das Modell mit dem stärksten Temperaturanstieg mit 0 gewichtet wird.

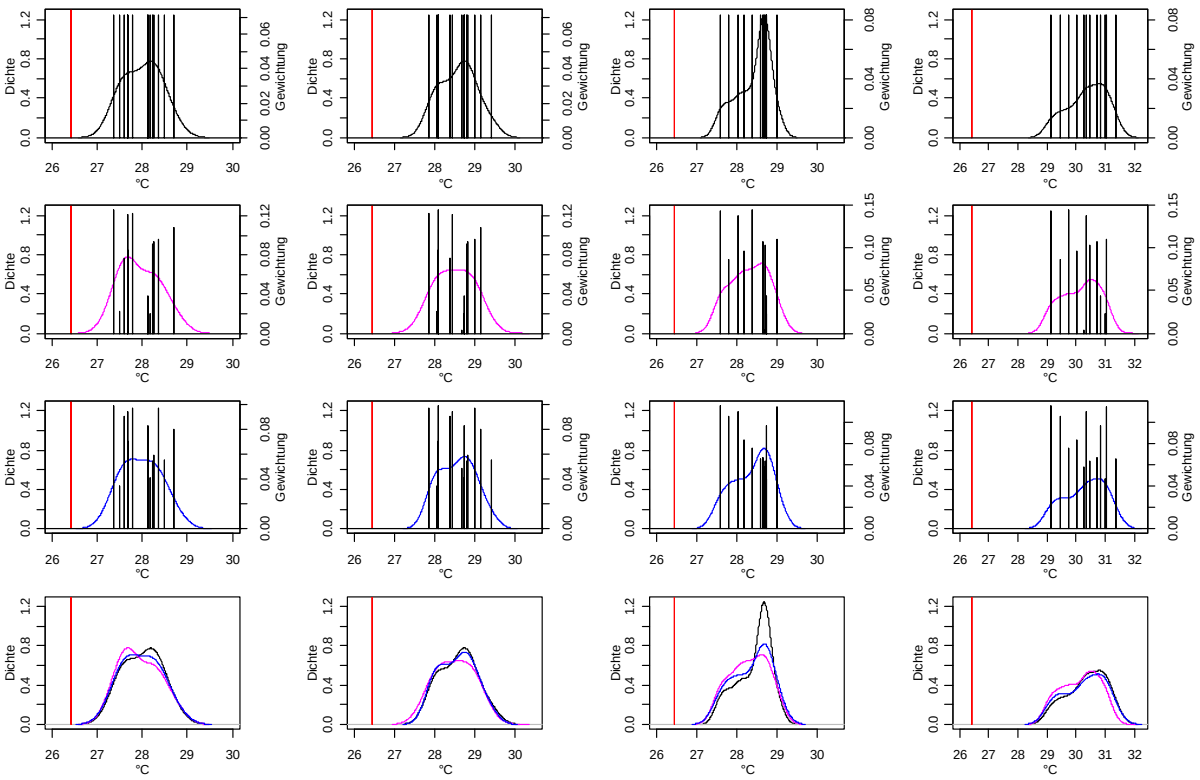

Abb. 5.1.3: Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: Gewichtung mit Metrik $G_1(\Delta_1^M)$, 3. Zeile: Gewichtung mit der gemittelten Metrik, 4. Zeile: Dichtefunktionen in einem Graphen dargestellt. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts: B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr

Da auch im Fall von Hitzewellen (Abb. 5.1.3) mit Dichtefunktionen gearbeitet wird, die mit Hilfe eines Kerndichteschätzers mit Gaußkern erstellt wurden (vgl. Kapitel 4.3.1), kommt es zu nicht verschwindenden Dichten für eine negative Anzahl von Tagen mit Temperaturen über dem Schwellwert. Diese Dichten sind physikalisch nicht stimmig und zeigen in diesem Fall eine Schwäche der Untersuchungsmethode auf. Dennoch wird die Dichtefunktion nicht künstlich auf null gesetzt, da eine zusätzliche Bearbeitung der Funktionen die Interpretation der Ergebnisse erschweren würde. Auffällig ist, dass im B1-Szenario nahezu keine Verschiebung des Maximums der Dichtefunktion durch die Gewichtungen entsteht, während im A2-Szenario die maximale Dichte der gewichteten Dichtefunktion deutlich zu einer geringeren Anzahl an Hitzewellen Tagen verschoben ist. An der Breite der Verteilungen ändert sich hingegen in beiden Fällen wenig. Für den Fall der Gewichtung in der 3. Zeile zeigt sich, dass Modelle mit einer geringeren Anzahl an Hitzewellentagen höher gewichtet werden als jene, mit einer hohen Anzahl. Dies führt besonders im B1-Szenario zu einem ausgeprägten Peak bei wenigen Tagen und einem schnellen Abfall hin zu vielen Tagen. Bei der Betrachtung des ers-

ten Zeitschritts des A2-Szenarios für Hitzewellen fällt auf, dass es einen Ausreißer gibt. Bei dem spezifischen Gütekriterium für Hitzewellen schneidet das Modell (bccr_bcm2_0) aber sehr gut ab und ist damit nicht vernachlässigbar.

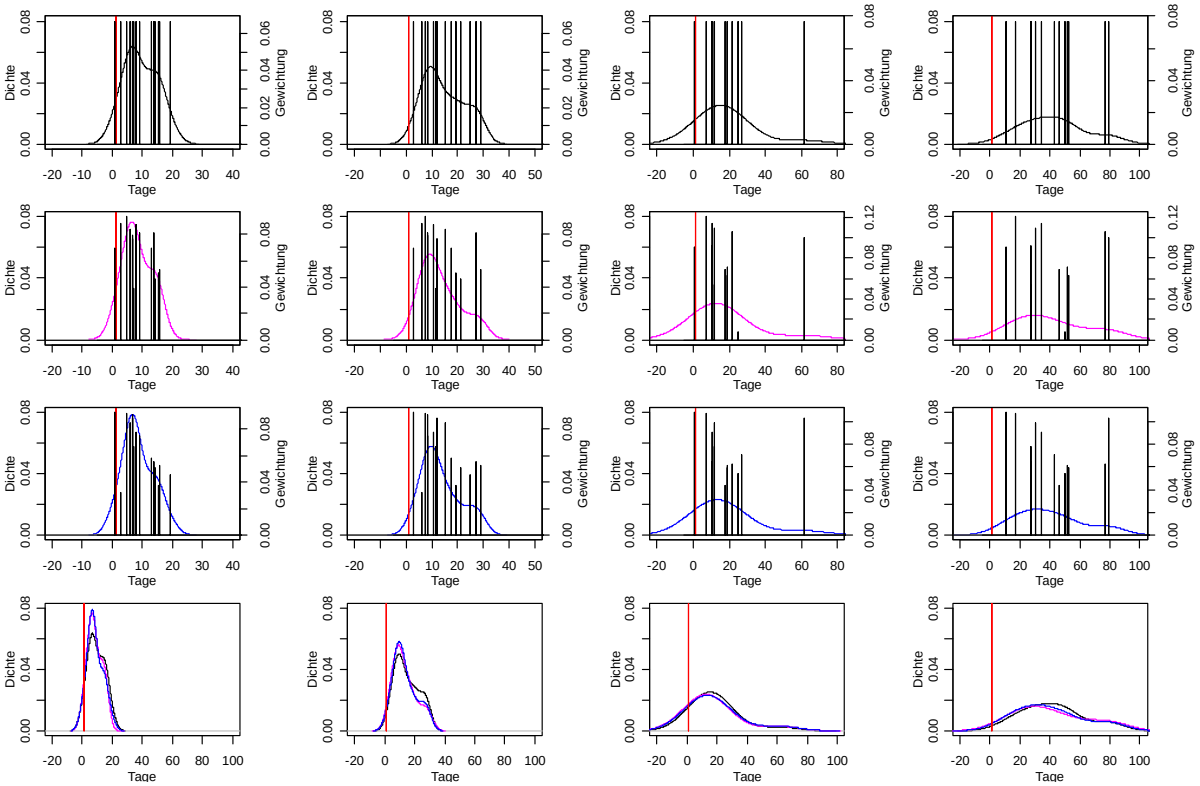

Abb. 5.1.4: Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen für die Anzahl an Hitzewellentagen. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: Gewichtung mit der Metrik für die Anzahl an Hitzewellen, 3. Zeile: mit der gemittelten Metrik, 4. Zeile: Dichtefunktionen in einem Graphen dargestellt. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts : B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.

a) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag

Die Projektion der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme ist, wie man in Abbildung 5.1.4 sehen kann, mit einer großen Unsicherheit hinsichtlich der Tendenz belegt. Hier sagen einige Modelle eine Zunahme, andere eine Abnahme voraus. Im Bezug auf die Unsicherheit und die Breite der Dichteverteilungen ändern die beiden angewendeten Gewichtungen wenig. Dies ist damit zu erklären, dass die schwach gewichteten Modelle keine Außenseiter sind. In allen vier Spalten können wir beobachten, dass die höchsten Maxima der Dichte im ungewichteten Fall auftreten. Die niedrigsten Maxima treten im Fall der Gewichtung in der 2. Zeile auf, wobei hier die Gewichtung aus der Differenz der durchschnittlichen Jahresniederschlagssumme zwischen dem Regionaldatensatz (CRU) und dem jeweiligen AOGCM im Vergleichszeitraum berechnet wurde. Diese Unterschiede in der maximalen Dichte hängen zum Teil mit den verwendeten Bandbreiten im Kerndichteschätzer zusammen. Die

Bandbreiten im Fall der Gewichtung in der 2. Zeile sind immer die größten, und die des ungewichteten Falls immer gleich groß oder kleiner, als die der Gewichtung in der 3. Zeile. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Bestimmung der Bandbreite nach dem Kriterium erfolgte, dass sie so klein wie möglich ist, aber die erzeugte Dichtefunktion nur ein Maximum besitzt, also monomodal ist (Déqué 2009). Wenn wir annehmen, dass wir durch dieses Vorgehen die optimale Dichteverteilung erhalten, so können wir das Ergebnis in der Hinsicht interpretieren, dass dieser Unterschied in der maximalen Höhe der Dichtefunktion zeigt, dass im Fall der jährlichen Niederschlagssumme eine Gewichtung eher zu einer gleicher verteilten Projektion der Entwicklung der Klimavariable tendiert.

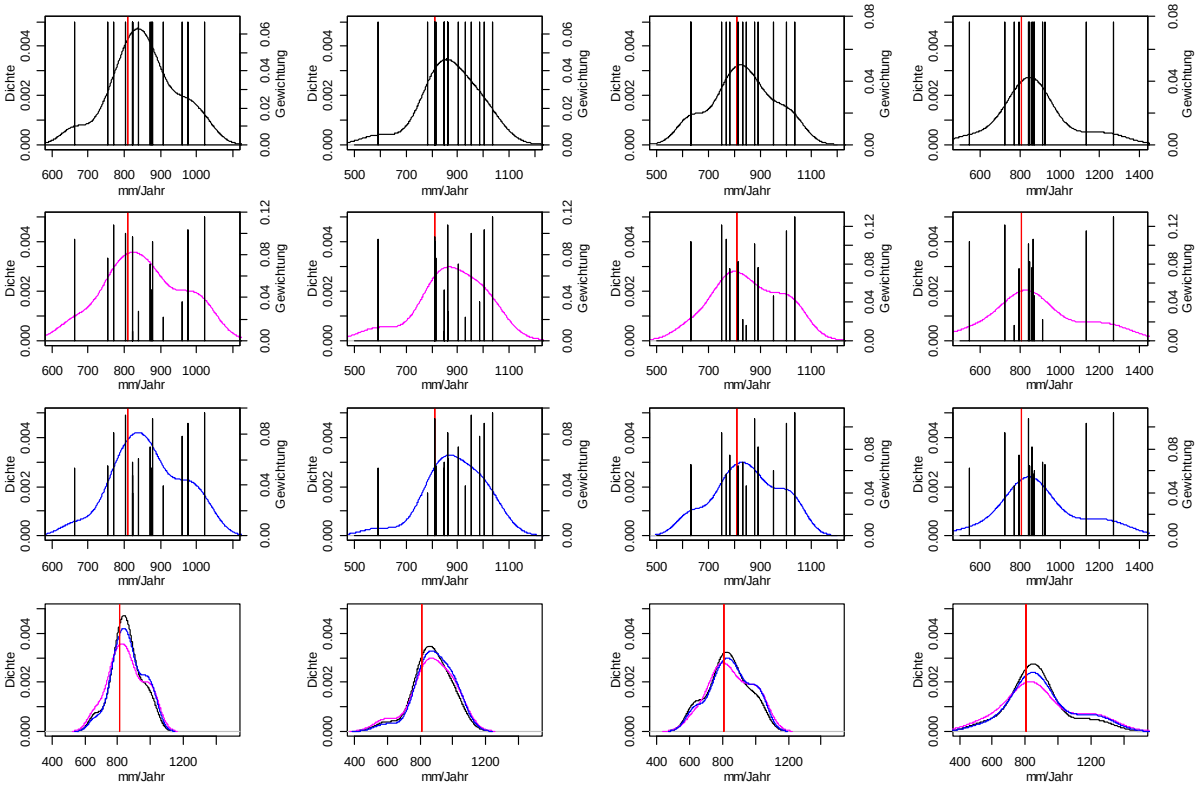

Abb. 5.1.5: Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen der durchschnittlichen Jahressniederschlagssumme. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: mit der Metrik für den Jahresgesamtniederschlag, 3. Zeile: mit der gemittelten Metrik, 4. Zeile: alle Dichtefunktionen in einem Graphen dargestellt. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts: B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.

Durchschnittliche Anzahl von Starkregenereignissen

Bei der Untersuchung der Auswirkungen der 2 verschiedenen Gewichtungen auf den prozentualen Anstieg von Starkregenereignissen (>80mm/Tag) im Jahr (Abb. 5.1.5), stellt man fest, dass im Fall der Gewichtung in der 2. Zeile eine schmalere Dichtefunkton auftritt, als im ungewichteten, und mit der Gewichtung der 3. Zeile gewichteten Fall. Der Grund hierfür ist, dass das Modell, welches als einziges für jede Szenario-Zeitintervall Kombination eine starke

Abnahme an Starkregenereignissen vorhersagt (GISS-ER), in der Gewichtung der 2. Zeile mit null gewichtet wird. In diesem Fall wurde also ein Außreißer nicht mit in die Dichtefunktion eingerechnet.

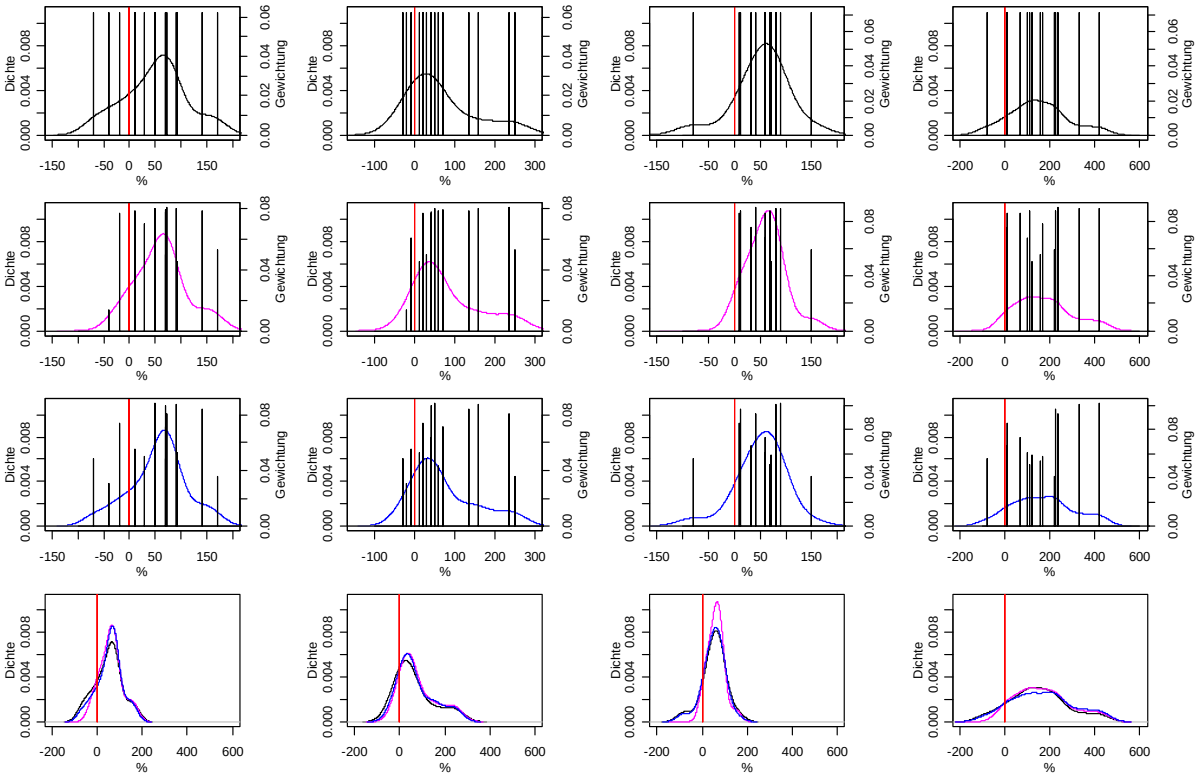

Abb. 5.1.6: Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen der Veränderung der Häufigkeit von Starkregenereignissen. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: mit der Metrik für die Anzahl an Starkregenereignissen, 3. Zeile: gemittelte Metrik, 4. Zeile: alle Dichtefunktionen in einem Graphen. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts: B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.

An dieser Stelle zeigt sich dann der Effekt einer Gewichtung: dank der Gewichtung wird die Verteilung deutlich schmaler. Besonders im A2-Szenario, in dem kein anderes Modell eine Abnahme der Häufigkeit von Starkregenereignissen vorhersagt vereinfacht sich die Situation mit dem Wegfall der Ergebnisse von GISS-ER. Dennoch bleibt zu bedenken, dass dies nur für die Gewichtung in der 2. Zeile der Fall ist. Für die Gewichtung in der 3. Zeile erhält man eine ähnliche Situation wie für den ungewichteten Fall.

Zum Abschluss dieses Kapitels werden nun die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst. Eine Gewichtung ist, wie anhand der verschiedenen Gütekriterien für eine Klimavariable gezeigt werden konnte, stark von subjektiven Entscheidungen abhängig, da das Kriterium, dass eine gute Wahl der Gewichtung zu geringeren Unsicherheitsmargen in den Projektionen führt, nicht zwangsläufig gültig sein muss. Im zweiten Teil des Kapitels wurde untersucht, wie zwei verschiedene Gewichtungen (eine variablen- und modellspezifische und eine modell-

spezifische) die projizierten Dichtefunktionen beeinflussen. Dabei konnte festgestellt werden, dass in den meisten Fällen nur geringe Änderungen in der Dichtefunktion auftraten und sich die qualitativen Verläufe nicht änderten. Dies bestätigt die Resultate von Santer (2009). Eine merklich schmalere Dichtefunktion konnte nur im Fall der Starkregenniederschläge im Fall variablenspezifischer Gewichtung erreicht werden. Diese beiden Ergebnisse, also sowohl die starke Auswirkung der subjektiven Entscheidung hinsichtlich der Art zu gewichten, als auch die geringe Wirkung auf die Dichtefunktion im Falle von mäßig intensiven Gewichtungen (im Vergleich zu einer an/aus Gewichtung wie im Fall der grauen Gewichtung in Abbildung 5.1.1) begründen, dass im folgenden Teil, bei der Auswertung der Klimaprojektionen für Hyderabad, die Gleichgewichtung verwendet wird.

5.2 Klimaprojektionen für Hyderabad - Gleichgewichtete Auswertung der vier Klimavariablen

In diesem Abschnitt geht es nun um die Auswertung der Klimaprognosen für die vier impaktrelevanten Klimavariablen. Zur Auswertung werden dabei die ungewichteten Ensemble-Projektionen verwendet. Zu jeder Variable gibt es eine mit einem Kerndichteschätzer mit Gaußkern erstellte Häufigkeitsdichtefunktion (DF) und einen Boxplot, wobei der untere Whisker das 2,5%-Quantil der DF, und der obere Whisker das 97,5%-Quantil der DF kennzeichnet. Zudem ist das arithmetische Mittel durch einen Stern dargestellt. Die Box wird durch das 25%- und 75%-Quantil der DF begrenzt. Die DF und der dazugehörige Boxplot werden dabei immer als Kombination dargestellt. Zusätzlich werden die Projektionen mit Hilfe der in 4.3.2 erläuterten Zeitschritt- und Szenarien-Darstellungen verglichen.

a) Jahresdurchschnittstemperatur und Hitzewellen

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur

Die Jahresdurchschnittstemperatur Hyderabads im Laufe des 20. Jahrhundert wurde in Kapitel 3.2 genauer diskutiert. In Abbildung 5.2.1 ist dazu noch ein Boxplot des laufenden 20-jährigen Mittels der Jahre 1891 bis 2007 dargestellt, um die Unterschiede in den Modellsimulationen der einzelnen AOGCMs mit den Schwankungen der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur der nahen Vergangenheit zu vergleichen.

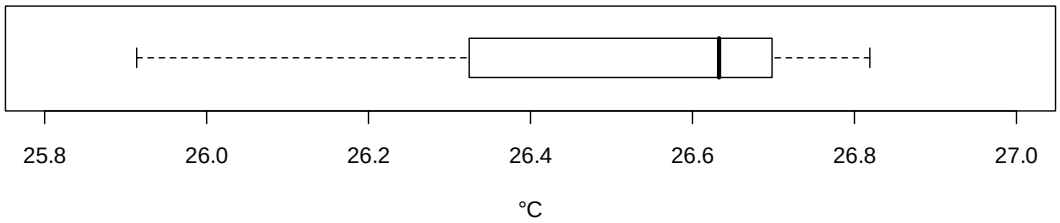

Abb.5.2.1: Boxplot des laufenden 20-jährigen Mittels der Jahresdurchschnittstemperatur in Hyderabad (Begumpet) (1891-2007) (Datenquelle: xDat).

Abbildung 5.2.2 ist eine kombinierte Darstellung der Häufigkeitssdichte und der entsprechenden Boxplots für die Klimavariable Jahresdurchschnittstemperatur für das A2- und B1-Szenario in beiden AOGCM-Zeitschritten. Es fällt auf, dass die qualitativen Ergebnisse der Modelle den Erwartungen entsprechen. Für beide Szenarien ergibt sich ein Temperaturanstieg bis 2050, wobei sich bis zu diesem Zeitpunkt die Szenarien nicht sehr stark voneinander unterscheiden. Im zweiten Zeitschritt (2081-2100) setzt sich der Temperaturanstieg im A2-Szenario aber mit verstärkter Intensität fort. Der Median des Ensembles steigt im A2-Szenario auf 28.6°C im Zeitintervall 2046-2065 und dann weiter auf 30.4°C im Zeitintervall 2081-2100. Im Gegensatz dazu findet im B1-Szenario nur ein geringer weiterer Anstieg des Medians von 28.1°C im ersten Zeitschritt auf 28.7°C im zweiten Zeitschritt statt.

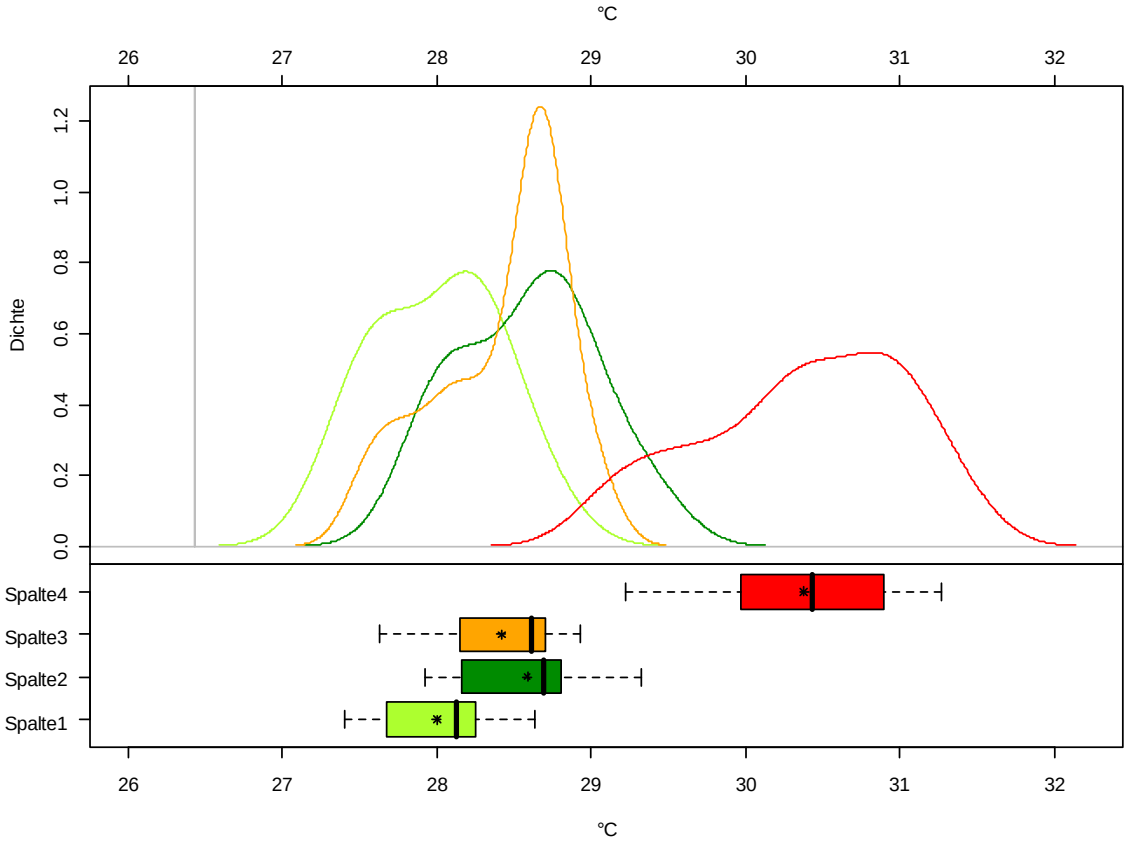

Abb.5.2.2: Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für die Jahresdurchschnittstemperatur für beide AOGCM-Zeitschritte unter dem A2- und B1-Szenario.

Das Vertrauensintervall, in dem 95% der Werte liegen, ist bei allen Verteilungen abgesehen von der A2 Verteilung des zweiten Zeitschritts ungefähr gleich groß, und liegt in der Größenordnung des Vertrauensintervalls des in Abbildung 5.2.1 dargestellten Beobachtungsdatensatzes. Das Intervall für das A2 Szenario ist dagegen im zweiten Zeitschritt deutlich breiter. Dies ist damit zu erklären, dass das Klima 2081-2100 im A2-Szenario weiter von unserem heutigen Klima entfernt ist als die anderen drei betrachteten Klimata. Auffällig ist auch, dass der Median, der im Boxplot mit einem senkrechten Strich die Verteilung in zwei Teile teilt, immer rechts der Boxmitte der liegt und man somit von einer linksschiefen Verteilung spre-

chen kann. Die Mediane liegen auch, wie man erkennen kann, näher an den Maxima der Häufigkeitsdichtefunktionen. Die mit Sternchen gekennzeichneten arithmetischen Mittel der Ensembles liegen dagegen in allen Fällen annähernd in der Mitte der Box.

Sowohl die Häufigkeitsdichteverteilungen, als auch die Boxen der Boxplots überlagern sich für den ersten Zeitschritt zu großen Teilen, sodass sich anhand dieser nicht mit Sicherheit sagen lässt, ob die Temperatur im Falle des A2-Szenarios höher sein wird als im Falle des B1-Szenarios, während sich für den zweiten Zeitschritt die Box des A2-Szenarios stark von den anderen Boxen absetzt, liegt im B1-Szenario eine Überlagerung der Boxen der beiden Zeitschritte vor. Mit dieser Auswertungsmethode erhält man keine Aussage darüber, ob die Temperaturen im B1-Szenario im zweiten Zeitschritt in einzelnen AOGCMs nicht vielleicht wieder sinken. Aus diesem Grund werden in Abbildung 5.2.3 die Projektionen der einzelnen AOGCMS für die verschiedene Szenarien und Zeitschritte mithilfe der in 4.3.2 erläuterten Darstellung gegenübergestellt und verglichen, wobei ein „Punkt“ im Diagramm immer ein AOGCM repräsentiert.

Beide Punktwolken im Zeitschrittvergleich liegen im ersten Quadranten des Graphen, d.h. dass es, wie auch bereits Abbildung 5.2.2 zeigte, in beiden Zeitschritten für alle AOGCMs zu einer Zunahme der Jahresdurchschnittstemperaturen kommt. Zudem wird deutlich, dass das A2-Szenario um zweiten Zeitschritt zu einem stärkeren Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur führt als das B1-Szenario.

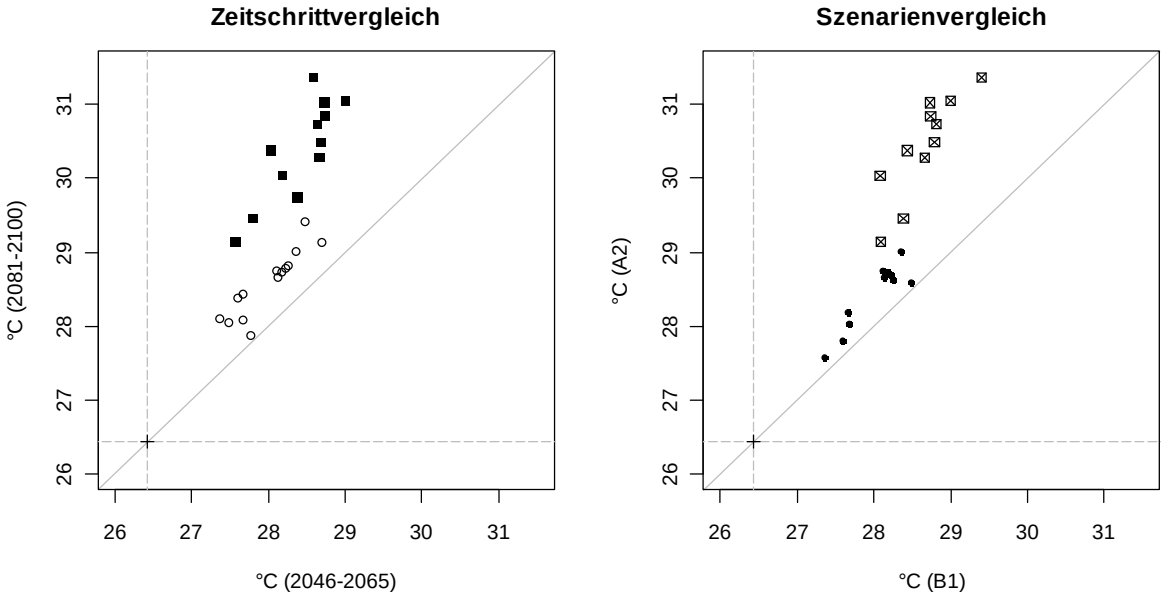

Abb. 5.2.3: Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Jahresdurchschnittstemperatur für alle untersuchten AOGCMs.

Zusätzlich zu diesen Aussagen, die auch mit Hilfe der kombinierten DF-Boxplot-Darstellung gemacht werden können, lässt sich im Zeitschrittvergleich Folgendes ablesen:

- Die Temperaturentwicklung ist bei allen Modellen für beide Szenarien monoton.
- Die Punktewolke des A2-Szenarios (Vollquader)liegt weit oberhalb der Diagonalen und hat eine längliche Ausdehnung entlang dieser. Es besteht also ein näherungsweise funktionsartiger Zusammenhang zwischen dem ersten und zweiten Zeitschritt.
- Die Kreispunkt-Wolke des B1-Szenarios besitzt eine längliche Ausdehnung parallel zur Diagonalen. Diese Parallelität heißt, dass in allen Modellen im zweiten Zeitschritt ein weiterer Anstieg der Temperaturen zu erwarten ist und somit auch die Modelle, die eine starke Klimasensitivität im ersten Zeitschritt gezeigt haben, nur einen geringen weiteren Anstieg der Temperaturen im zweiten Zeitschritt modellieren..

Auch beim Szenarien-Vergleich liegen beide Punktwolken im ersten Quadranten des Graphen, was wiederum heißt, dass mit beiden Szenarien ein Anstieg der Jahresdurchschnittstemperaturen modelliert wird. Zusätzlich lässt sich im Graphen des Szenarien-Vergleichs Folgendes erkennen:

- Für beide Zeitschritte sagen alle Modelle einen höheren Anstieg der Temperatur für das A2-Szenario, als für das B1-Szenario vorher.

- Beide Punktwolken haben eine längliche Struktur entlang der Diagonalen. Damit wäre eine ungefähre Zuordnung von einem B1-Modellwert zu einem A2-Modellwert möglich und umgekehrt.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann man also davon ausgehen, dass die Temperaturen in Hyderabad proportional zur globalen CO_2-Konzentration ansteigen und der gemittelte zeitliche Temperaturverlauf relativ monoton sein wird.

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr

Bei der Auswertung der Anzahl an Hitzewellentagen im Jahr ist die Methode des Kerndichteschätzers verbesserungswürdig, da sie teilweise, wenn auch in geringem Maße, physikalisch nicht stimmige Resultate (endliche Wahrscheinlichkeiten für negative Werte) liefert. Ein weiteres, damit zusammenhängendes Problem besteht darin, dass das Integral der Häufigkeitsdichte im positiven Bereich nicht mehr 1 wird. Dies hat zwar Auswirkungen auf die Dichte, die aber als geringfügig und damit als vernachlässigbar betrachtet werden können.

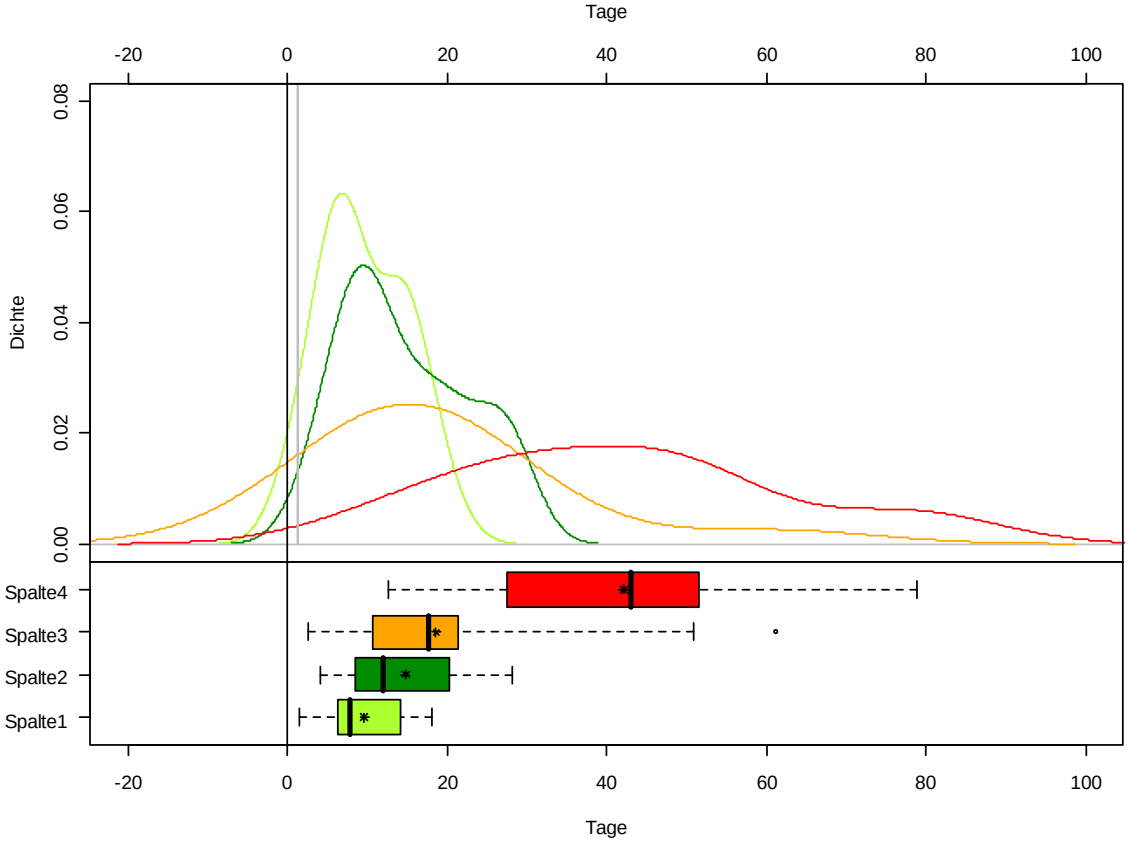

Abb. 5.2.4: Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für die Anzahl von Hitzewellentagen für beide AOGCM-Zeitschritt unter dem A2- und B1-Szenario. Die Punkte außerhalb der Whisker stellen Ausreißer dar, die nicht mehr im Vertrauensintervall der Verteilung liegen.

Für die Anzahl an Hitzewellentagen im Jahr, also Tagen mit mehr als 43.2°C Tagesmaximaltemperatur, die heute bei 1,2 Tagen liegt (vgl. Kapitel 3.2), entsprechen die qualitativen Ergebnisse der Modelle, wie schon im Fall der Jahresdurchschnittstemperatur den Erwartungen. Wie in Abbildung 5.2.4 zu sehen ist, nimmt die Anzahl an Hitzewellentagen bis 2050 für beide Szenarien zu und, abgesehen von einem Ausreißer, der auch sehr deutlich in der Abbildung 5.2.5 zum Szenarien-Vergleich zu erkennen ist, unterscheiden sich die Szenarien in diesem ersten Zeitintervall nur wenig. Im weiteren Verlauf nehmen dann die Unterschiede in der Anzahl an Hitzewellentagen zu; das A2-Szenario erreicht mit Abstand die höchsten Werte. Die Mediane liegen auch in diesem Fall wieder nahe bei den Maxima der Häufigkeitsdichterverteilungen. Im B1-Szenario nimmt der Median für den ersten Zeitschritt den Wert von 7,9 Tagen an und steigt dann im zweiten Zeitschritt auf 12,0 Tage an. Im Falle des A2-Szenarios ist der Median im ersten Zeitintervall 17,6 Tage und im zweiten Zeitintervall 43,1 Tage. Das Vertrauensintervall wird bei beiden Szenarien im zweiten Zeitschritt größer, wobei die Unterschiede in der Projektion des A2-Szenarios größer sind, da hier gleich zwei Modelle sehr hohe Anzahlen von Hitzetagen errechnet haben. Diese sind auch gut in Abbildung 5.2.6 im Zeitschrittvergleich zu erkennen. Daneben fällt in der Betrachtung der Darstellung zum Zeitschrittvergleich Folgendes auf:

- Fast alle Modellverläufe sind monoton und somit ist die Anzahl an Hitzewellentagen im zweiten Zeitschritt fast immer höher ist als im ersten Zeitschritt.
- Die Modelle im B1-Szenario (Kreispunkte) ordnen sich entlang der Diagonalen an und somit lässt sich, wie im Fall der Jahresdurchschnittstemperatur, aus dem Modellergebnis des ersten Zeitschritts das Modellergebnis des zweiten Zeitschritts abschätzen.
- Die Punktewolken verlaufen zwar nicht ganz parallel zur Diagonalen, man kann dennoch sagen, dass Modelle, die in beiden Szenarien einen starken Anstieg an Hitzewellentagen bereits für den ersten Zeitschritt modelliert haben, auch im zweiten Zeitschritt einen höheren Anstieg modellieren werden. Dies gilt gleichermaßen und entsprechend für Modelle, die im ersten Zeitschritt einen geringen Anstieg modelliert haben.

Für den Szenarien-Vergleich bleibt festzuhalten:

- Abgesehen von zwei Modellen ist im ersten Zeitschritt (Kreise) die Anzahl an Hitzewellentagen im A2-Szenario immer höher als im B1-Szenario.
- Es gibt nur einen geringen Unterschied zwischen den Projektionen für das A2- und das B1-Szenario im ersten Zeitschritt, wenn von dem Ausreißer im A2-Szenario abgesehen wird. Dies kann man aufgrund des Algorithmus zur Bestimmung der DF in der Abbildung 5.2.4 nicht sehen, denn die Bandweite im A2-Szenario musste wegen des Ausreißers sehr groß gewählt werden, so das sich die DFs und damit auch die Boxplots stark unterscheiden.

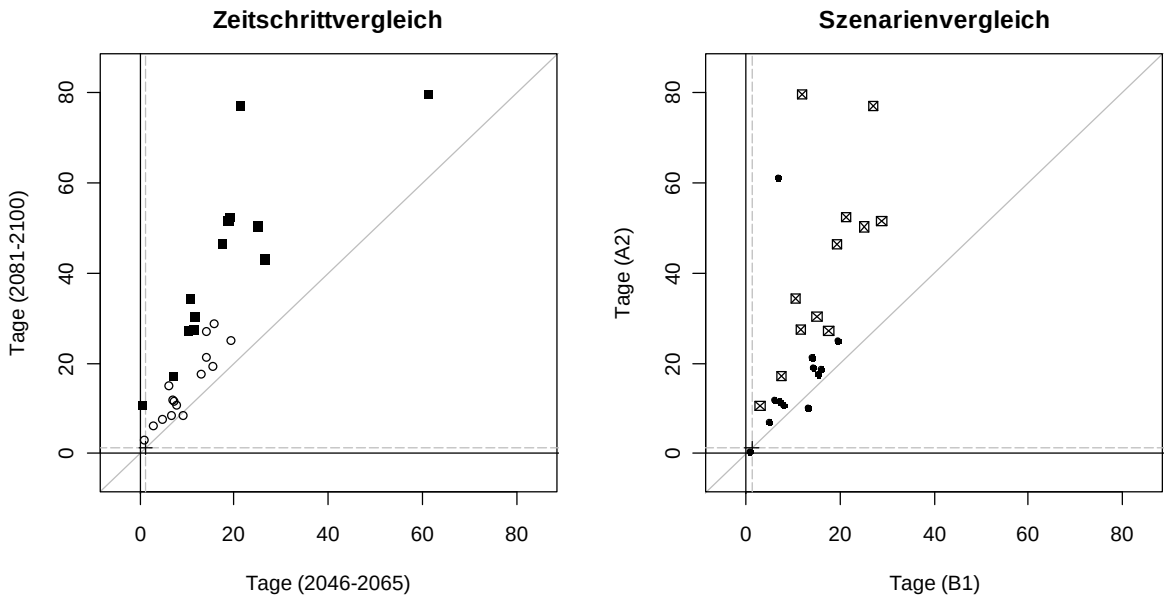

Abb. 5.2.5: Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Hitzewellen für alle untersuchten AOGCMs (mit durchgezogener 0-Tage-Linie).

Schlussfolgernd kann man von einer Starken Zunahme an Hitzewellentagen in beiden Szenarien sprechen, wobei im Fall des A2-Szenarios Temperaturen über 39.8°C zur Normalität werden.

b) Jahresgesamtniederschlag und Starkregenereignisse

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag

Wie im Fall der Jahresdurchschnittstemperatur wird auch für die Jahresniederschlagssumme Hyderabads in Abbildung 5.2.6 noch ein Boxplot des laufenden 20-jährigen Mittels der Jahre 1891 bis 2007 dargestellt. Die Verteilung ist deutlich linksschief und der Median liegt bei 798mm/Jahr. Dies dient wieder dazu, die Unterschiede in den Modellsimulationen der einzelnen AOGCMS mit den Schwankungen des gemittelten Jahresdurchschnittsniederschlages in der Vergangenheit zu vergleichen.

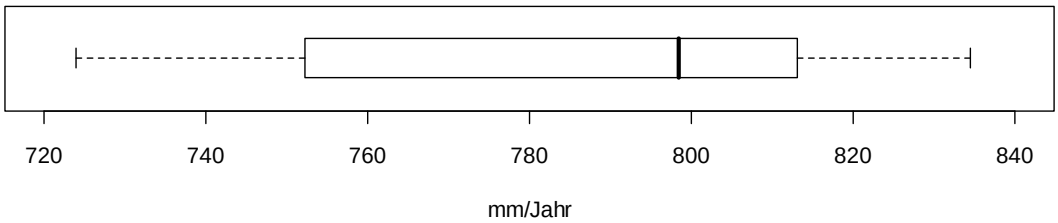

Abb. 5.2.6: Boxplot des laufenden 20-jährigen Mittels der Jahresgesamtniederschläge in Hyderabad (Begumpet) (1891-2007) (Datenquelle: xDat).

Für die Variable des Jahresgesamtniederschlags ergibt sich ein weitaus unschärferes Bild der Tendenz der Veränderung, als das bei der jährlichen Durchschnittstemperatur der Fall war. Der Vergleichswert liegt mit dem Mittelwert der Jahre 1961-2000 bei 809 mm/Jahr. In Abbildung 5.2.7 liegt in allen vier Boxplots der Median geringfügig (d.h. mit weniger als 60mm/Jahr in der Differenz) oberhalb der heutigen Niederschlagsmenge. Ebenso liegen die Mittelwerte geringfügig (d.h. weniger als 70mm/Jahr in der Differenz) oberhalb des heutigen Jahresgesamtniederschlags. Dennoch ist aber auch klar zu erkennen, dass in allen Boxen auch eine negative Entwicklung des Jahresgesamtniederschlages als möglich gelten kann. Alle Vertrauensintervalle (die 95% der Werte beinhalten) schließen sowohl stark positive als auch stark negativer Entwicklungen im Jahresgesamtniederschlag nicht aus. Die breiteste Verteilung nimmt, wie auch bei der Jahresdurchschnittstemperatur, das A2-Szenario im zweiten Zeitschritt mit einem Vertrauensintervall von 501mm/Jahr bis zu 1316mm/Jahr an. Im Unterschied zu den Verläufen der Häufigkeitsdichtefunktionen bei der Jahresdurchschnittstemperatur entstehen die breiten Verteilungen aber nicht aus einer mehr oder minder homogenen Verteilung über den Bereich des Vertrauensintervalls sondern es gibt, wie in den Häufigkeitsdichtefunktionen zu sehen ist, eine starke Häufung in den Bereichen um den Median. Nur einige AOGCMs projizieren extremere Verläufe der zukünftigen Entwicklung des Jahresgesamtniederschlages und erzeugen so die relativ langen Whisker der Boxplots.

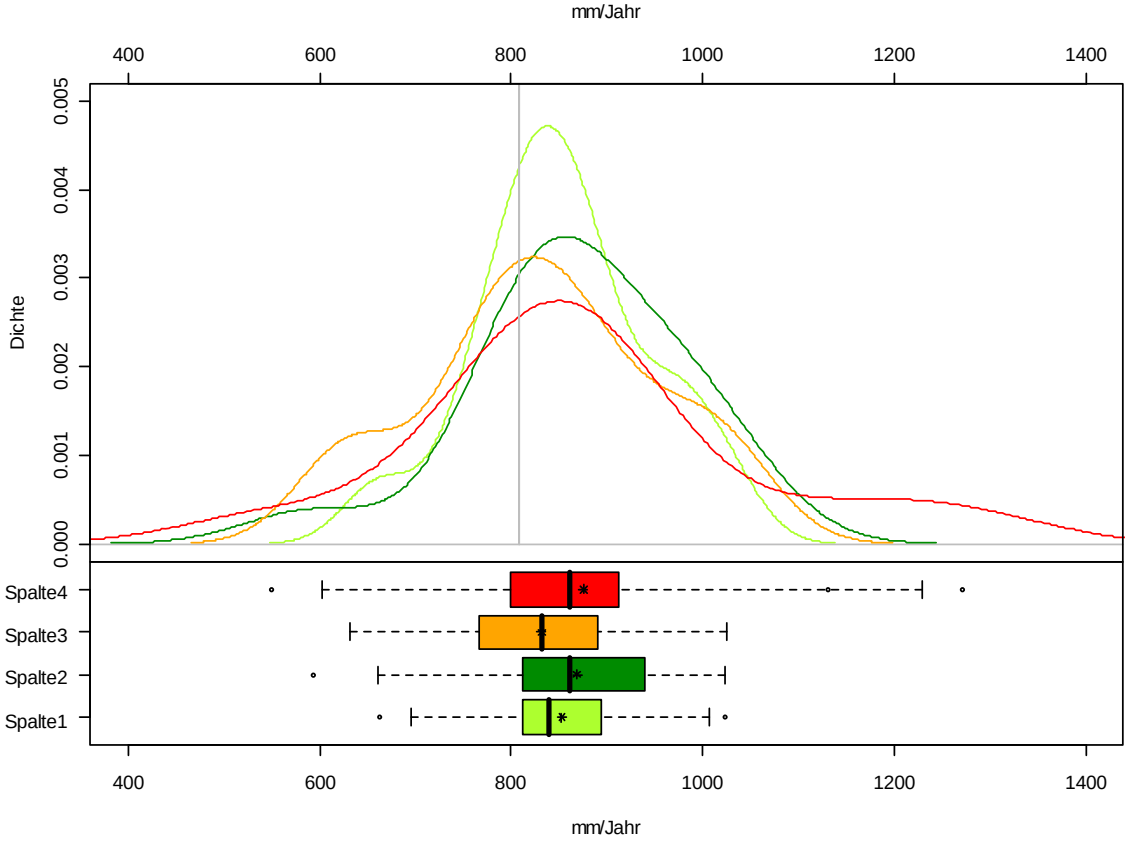

Abb. 5.2.7: Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für den Jahresgesamtniederschlag für beide AOGCM-Zeitschritte unter dem A2- und B1-Szenario. Die Punkte außerhalb der Whisker stellen Ausreißer dar, die nicht mehr im Vertrauensintervall der Verteilung liegen.

Da anhand der Boxplots und der DFs in diesem Fall besonders unklar ist, ob die Veränderungen in den Modellen monoton verlaufen, wird auch für die Jahresgesamtniederschläge zusätzlich die Zeitschritt- und Szenarien-Vergleichs-Darstellung herangezogen (Abb. 5.2.8).

Abb. 5.2.8: Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Jahresgesamtniederschlag für alle untersuchten AOGCMs.

Für den Zeitschritt-Vergleich ist dabei festzuhalten:

- Ein Großteil der Modelle liegt bei beiden Szenarien in einem Intervall von 720 bis 960 mm/Jahr, wobei die Schwankungen der Modell Projektionen nach unten im Bereich des Vertrauensintervalls des 20-jährigen Mittels im Beobachtungsdatensatz liegen.
- Es gibt im A2-Szenario nur vier Modelle die einen monotonen Anstieg des Niederschlags vorhersagen.
- Im B1-Szenario steigt der Jahresgesamtniederschlag in 10 von 14 Modellen vom ersten zum zweiten Zeitschritt. Dabei zeigen 7 Modelle einen monotonen Anstieg.
- Abgesehen von einem Modell liegen alle Modelle, die eine starke Veränderung der Niederschlagssumme modellieren, im Bereich monotoner Entwicklung.
- Das nicht-monotone Modell hebt sich damit von den Anderen ab, denn es modelliert weder nur geringe Veränderungen die als Schwankungen gewertet werden können, noch zeigt es eine klare Wirkung des Klimawandels an, indem es erst stark abnehmende Niederschläge berechnet, die dann wieder über das aktuelle Niveau ansteigen.

Für den Szenarien-Vergleich ergeben sich folgende Auffälligkeiten:

- Nur ein Modell im ersten Zeitschritt (ausgefüllte Punkte) modelliert einen größeren Unterschied zwischen den beiden Szenarien und auch im zweiten Zeitschritt (Quadrate mit Kreuz) zeigen die meisten Modelle nur geringe Unterschiede zwischen den Szenarien auf.
- Außer einem Modell liegen alle Modelle, die eine größere Veränderung des Jahresgesamtniederschlages modellieren, außerhalb des 720-960mm Fensters, im Bereich monotoner Response auf die Erhöhung der CO_2-Konzentration. Dies heißt, dass sich die Wirkung des Klimawandels auf den durchschnittlichen Jahresgesamtniederschlag im A2 Szenario verstärkt und nicht abschwächt, umkehrt oder aufhebt.

Schlussfolgernd kann man sagen, dass sich mit relativ großer Wahrscheinlichkeit der zukünftige durchschnittliche Jahresgesamtniederschlag im Fall beider Szenarien im Bereich von 720 bis 960mm befinden wird, die Festlegung auf diesen im Vergleich zum Vertrauensintervall gewählten Bereich ist insofern begründet, als auch die Häufigkeitsdichten außerhalb dieses Bereiches deutlich abfallen. Sofern der Klimawandel aber doch eine stärkere Veränderung des Niederschlages verursacht, so legen die Modelle (abgesehen von einem) nahe, das die Veränderung relativ monoton verläuft, d.h. dass sich die Veränderungen ankündigen.

Durchschnittliche Anzahl von Starkregenereignissen

Starkregenereignisse, also Tage an denen mehr als 80mm Niederschlag fallen, kommen heute an 0,49 Tagen im Jahr vor (vgl. Kapitel 3.2). In diesem Kapitel werden die prozentualen Veränderungen dieser Häufigkeit betrachtet und ausgewertet. Abbildung 5.2.9 ist dabei wieder eine kombinierte DF-Boxplot-Darstellung.

Bei der Betrachtung der Häufigkeitsdichtefunktionen ergibt sich, wie auch im Fall des Jahresgesamtniederschlags, kein einheitliches Bild hinsichtlich der Tendenz der Veränderungen. So projiziert zwar der Großteil der Modelle für beide Szenarien und Zeitintervalle eine Zunahme, aber es gibt auch immer eine nicht zu vernachlässigende Wahrscheinlichkeit für eine Abnahme der Häufigkeit von Starkregenereignissen. Die Mediane und Mittelwerte liegen aber alle im Bereich eines Anstiegs von Starkregenereignissen. Dabei ist auffällig, dass der Median im zweiten Zeitschritt des B1-Szenarios (40%) kleiner ist als im ersten Zeitschritt (60%). Im Gegensatz dazu nimmt der Mittelwert zu, von 50% im ersten Zeitschritt auf 66% im zweiten Zeitschritt. Dies liegt daran, dass der Median robuster gegenüber Ausreißern ist. Im A2-Szenario nimmt sowohl der Median (von 60% auf 142%), als auch der Mittelwert (von 53% auf 150%) zum zweiten Zeitschritt hin zu. Wie im Fall aller anderen Klimavariablen nimmt auch in diesem Fall die Breite des Vertrauensintervalls für beide Szenarien vom ersten zum zweiten Zeitschritt hin zu. Dabei ist die Häufigkeitsdichtefunktion für das Zeitintervall des zweiten Zeitschritts, 2081-2100, für das A2-Szenario besonders flach und breit.

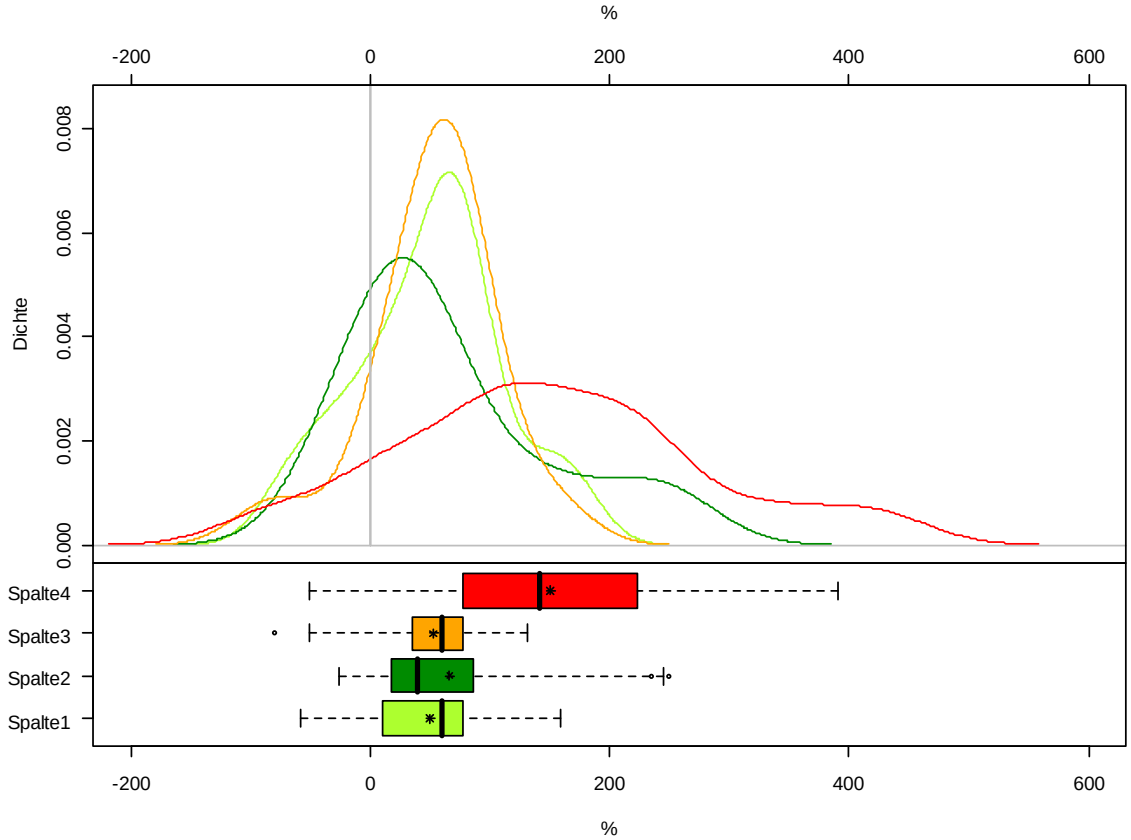

Abb. 5.2.9: Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für beide AOGCM-Zeitschritte unter dem A2- und B1-Szenario. Die Punkte außerhalb der Whisker stellen Ausreißer dar, die nicht mehr im Vertrauensintervall der Verteilung liegen.

Wie für die vorhergehenden Klimavariablen wird auch für die Häufigkeit von Starkregenereignissen wieder ein Zeitschritt- und Szenarien-Vergleich vorgenommen (Abb. 5.2.10).

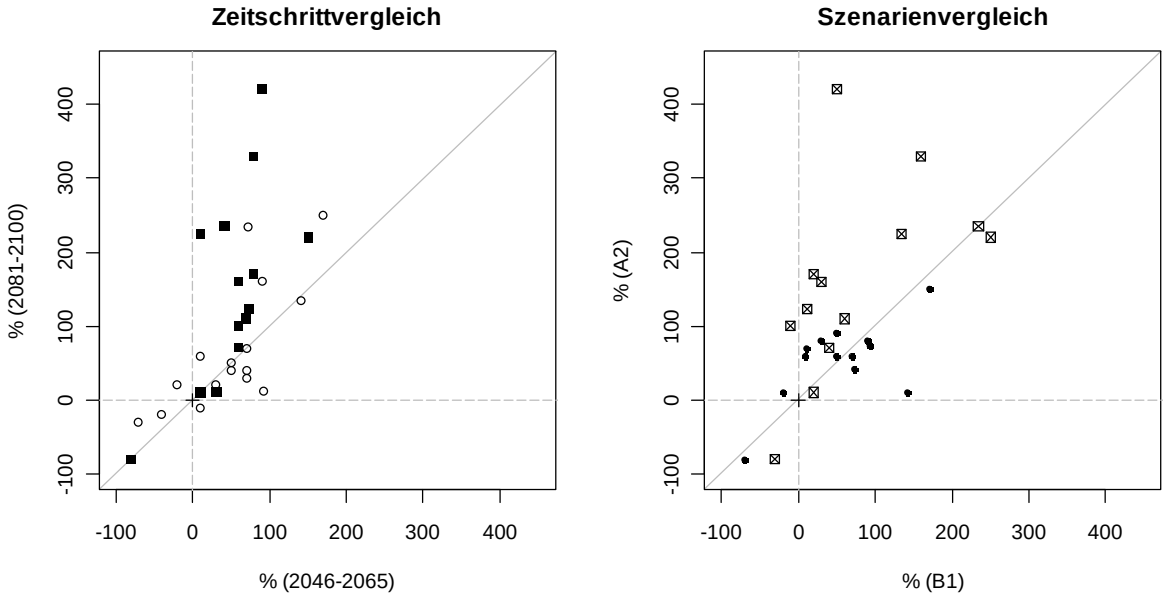

Abb. 5.2.10: Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Starkregenereignisse für alle untersuchten AOGCMs.

Dabei kann man anhand der Gegenüberstellung der Ergebnisse eines AOGCMs für beide Zeitschritte Folgendes erkennen:

- Fast alle Modelle sagen eine Zunahme der Starkregenereignisse voraus; was auch bereits in der kombinierten DF-Boxplot-Darstellung deutlich wurde.
- Der Verlauf der Veränderung im A2-Szenario ist bei fast allen Modellen monoton.
- Aus dem Anstieg der Anzahl an Starkregentagen im ersten Zeitschritt können nur bedingt Aussagen über einen weiteren Anstieg im zweiten Zeitschritt gemacht werden.
- Im B1-Szenario gibt es einige Modelle die nicht monoton verlaufen, und die nach einem Anstieg der Anzahl von Starkregenereignissen im ersten Zeitschritt eine Entspannung der Situation im zweiten Zeitschritt vorhersagen.

Anhand der Gegenüberstellung der Ergebnisse für beide Szenarien kann man Folgendes feststellen:

- Im ersten Zeitschritt weisen die meisten Modelle keine großen Unterschiede in der Modellierung der beiden Szenarien auf.
- Es kann nur bedingt eine Aussage darüber getroffen werden, wie ein Modell das A2-Szenario modelliert, wenn die Modellierung des B1-Szenarios bekannt ist und umgekehrt.

6 Ergebniszusammenfassung und Fazit

Diese Arbeit hatte zum Ziel, mögliche klimatische Veränderungen für die Stadt Hyderabad im Verlauf des 21. Jahrhunderts zu abzuschätzen. Dabei lag das Hauptaugenmerk mit der Jahresdurchschnittstemperatur, dem Jahresgesamtniederschlag, Hitzewellen und Starkregenereignissen auf vier Klimavariablen. Grundlage für die erstellten Klimaprojektionen waren lokale und regionale Beobachtungsdaten, zwei verschiedene SRES-Markerszenarien, sowie 17 verschiedene AOGCMs. Der Untersuchung lag der Anspruch zugrunde, keine ausschließenden Annahmen hinsichtlich der zukünftigen Klimaentwicklungen zu treffen, die unbegründet deren Möglichkeitsraum einengen würden. Um möglichst keine Einschränkung hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen vorzunehmen, wurden hinsichtlich der zukünftigen Treibhausgasemissionen die beiden SRES-Markerszenarien gewählt, die zum einen den zweithöchsten und zum anderen den niedrigsten Projektionen rechnen. Zudem wurden alle verfügbaren AOGCM-Projektionen zu diesen beiden Szenarien verwendet, um die Unsicherheiten der globalen Klimamodellierung in die Abschätzung der klimatischen Entwicklung einzubeziehen. Dies hat sich im Rahmen der Arbeit als gewinnbringend herausgestellt, da die verschiedenen Modelle nicht nur die Unsicherheiten aufspannen, sondern im Falle von übereinstimmenden Vorhersagen auch eine Quelle von Sicherheit bezüglich dieser Vorhersagen sind. Um Aussagen über den Verlauf der vier Klimavariablen für das Stadtgebiet machen zu können, wurden die auf größere Flächen bezogenen AOGCM-Projektionen unter Verwendung statistischer Zusammenhänge regionalisiert und zu den lokalen Punkt- und regionalen (um 40.000km^2) Daten in Beziehung gesetzt. Auf Basis der AOGCM-Modellierung des Zeitraumes 1961-2000 und dem Vergleich mit Beobachtungsdaten sollte eine begründete Gewichtung jedes AOGCMs vorgenommen werden. Damit sollten die unwahrscheinlichsten Entwicklungstendenzen der von den AOGCMs projizierten Entwicklungen ausgeschlossen werden.

Beim Konstruieren und Auswerten dieser Gewichtungen hat sich in der Arbeit zweierlei gezeigt: auf der Basis der unterschiedlichen Qualitäten der AOGCMs hinsichtlich der Modellierung des Vergleichszeitraums ist es nicht möglich die Projektionen, die extremere Verläufe der Klimaentwicklung vorhersagen und damit die Ensembleprojektion unsicherer machen, auszuschließen. Stattdessen kann man aus der Gewichtung schließen, dass auch die Modelle, die stärkere/schwächere Veränderungen des Klimas modellieren als nicht vernachlässigbar zu betrachten sind. Das zweite Ergebnis der Arbeit hinsichtlich Gewichtung ist, dass eine objektive Gewichtung der Modelle nicht möglich ist, da der Auswahl der Gütekriterien und ihrer Umsetzung in eine Metrik subjektive Entscheidungen zugrunde liegen. Daher gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, Gütekriterien festzulegen, jedoch wenige a priori-Kriterien zu ihrer Auswahl. Da sich der potentielle Gewinn der Gewichtungen für die Aussagekraft der Klimaprojektionen für Hyderabad angesichts der relativen Willkür bei der Auswahl der Gütekriterien als gering herausgestellt hat, wurden im Rahmen der Arbeit die Projektionen der Modelle gleichgewichtet ausgewertet.

Zur Auswertung der gleichgewichteten Ensemble-Projektionen wurden zwei verschiedene Darstellungen verwendet, die die Analyse aller relevanten Eigenschaften der Projektionsrechnungen ermöglichen und damit einen Standart vorschlagen, hinter den die Darstellung von Punkt-Projektionen nicht zurückfallen sollte. Dies ist zum einen ein kombinierter Graph aus Häufigkeitsdichtefunktion und Boxplots, zum anderen zwei spezielle Scatterplots. Die Darstellung der Häufigkeitsdichtefunktion mit ihren Boxplots dienen dabei insbesondere der Darstellung und Untersuchung der Klimaveränderung mit statistischen Maßen. Der Zugewinn durch die beiden Scatterplots liegt darin, dass mit ihnen Strukturen in den Modellierungen der AOGCMs bezüglich beider Szenarien Zeitschritte herausgearbeitet und interpretiert werden können. So lässt sich zum Beispiel erkennen, ob die unterschiedlichen Projektionsergebnisse und damit die Breite der Häufigkeitsdichtefunktion hinsichtlich eines Zeitschritts und einer Klimavariable eher auf einer Abbildung der natürlichen Schwankungen des 20 Jährigen Mittels, welches in Hyderabad im 20. Jahrhundert im Falle des Niederschlags zum Beispiel zwischen 730 und 830 mm schwankte, beruht, oder auf unterschiedlich starken Sensitivitäten der Modelle gegenüber CO_2-Erhöhungen. Diese würde gänzlich ohne Schwankungen zu einer strikten Beibehaltung der Reihenfolge (Aneinanderreihung in den beiden Scatterplots) bezüglich der Stärke der Veränderung, sowohl zwischen den Zeitschritten, als auch zwischen den Szenarien führen.

Bei der Auswertung der Graphen fiel bei der Betrachtung der Entwicklung der über 20 Jahre gemittelten Jahresdurchschnittstemperatur im Verlauf des 21. Jahrhunderts auf, dass es für Hyderabad, um die Kategorien des IPCC zu bemühen, praktisch sicher ist, dass es zu einem monotonen Anstieg kommt, der von der Stärke der Treibhausgasemissionen abhängt. So müssen wir bis 2050 mit einem Anstieg der Temperatur von 26.4 auf 27.5-29°C rechnen und bis zum Ende des Jahrhunderts mit einem Anstieg zwischen 28 und 31.2°C. Die Berechnungen der AOGCMs stimmen darin überein, dass im Fall der Vorhersage eines starken Temperaturanstiegs bis 2050 die Temperaturen auch weiterhin stark ansteigen und im Falle eines geringen Temperaturanstiegs die Temperaturen auch weiterhin nur moderat, in Abhängigkeit von den Treibhausgasemissionen, zunehmen.

Mit diesem Anstieg der Durchschnittstemperaturen geht wahrscheinlich auch ein monotoner Anstieg der durchschnittlichen Anzahl an Hitzewellentagen (Tage mit mehr als 43.2°C Tagesmaximaltemperatur) bis zum Jahre 2100 einher. Derzeit kommt es nur an durchschnittlich einem Tag im Jahr zu solch extremen Temperaturen. Im Jahre 2100 könnte es aber im Durchschnitt zu bis zu 80 Hitzewellentagen im Jahr kommen. Wie im Fall des Temperaturanstiegs hängt dabei auch in diesem Fall die Entwicklung linear mit der Stärke der Treibhausgasemissionen zusammen. So ist es sehr wahrscheinlich, dass im Falle geringer Treibhausgasemissionen im Jahre 2050 an nicht mehr als durchschnittlich 20 Tagen im Jahr die Tagesmaximaltemperaturen 43.2°C übersteigen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass sich zu Beginn des Jahrhunderts aus dem Trend abschätzen lässt, mit welchen Veränderungen in Abhängigkeit von den Treibhausgasemissionen zu rechnen ist.

Im Fall der Entwicklung der Niederschläge zeigt sich kein klarer Trend in der Richtung der Veränderung. Ein Großteil der Modelle schwankt unabhängig von den Treibhausgasemissionen und damit auch unabhängig vom Zeitschritt zwischen 720mm und 960mm für den durchschnittlichen Jahresgesamtniederschlag. Der Mittelwert dieser Schwankung mit 840mm liegt geringfügig über den heutigen Niederschlägen von 809mm in Hyderabad und steht im Einklang mit der Richtung des Trends der Niederschlagsentwicklung um Hyderabad im 20. Jahrhundert. Sowohl im Fall hoher, als auch im Fall moderater Treibhausgasemissionen ist es aber nicht auszuschließen, dass sowohl stärkere Abnahmen, aber auch deutliche Zunahmen des Niederschlags im Verlauf des 21.Jahrhunderts stattfinden können. Für beide Varianten gilt aber, dass sie wenn dann wahrscheinlich im Mittel monoton und in linearer Abhängigkeit von den Treibhausgasemissionen verlaufen.

Eine weitere wichtige Klimavariable für die Bevölkerung der Stadt Hyderabad ist die durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen im Jahr. Ein Starkregenereignis in Hyderabad kann als ein Tag definiert worden, an dem mehr als 80mm Niederschlag fallen. Aktuell treten diese Ereignisse an durchschnittlich 0,5 Tagen im Jahr auf. In Zukunft kann mit einer Zunahme dieser Häufigkeit gerechnet werden, wobei bei der Auswertung der Projektionen keine einfache lineare Abhängigkeit von den Treibhausgasemissionen zu erkennen war. Ähnlich wie bei der Entwicklung des Jahresgesamtniederschlags gibt es Modelle, die in beiden Zeitschritten um einen relativ leicht erhöhten Wert, ca. 0,9 Tagen pro Jahr, schwanken. Andere Modelle modellieren einen relativ starken monotonen Anstieg mit bis zu 2,5 Starkregenereignissen im Jahr. Die Stärke dieses Anstiegs ist dabei wahrscheinlich von den Treibhausgasemissionen abhängig. Die Modelle lassen aber im Fall der Starkregenereignisse keine Abschätzung der Häufigkeit von Starkregenereignissen für das Jahr 2100 auf Basis der Veränderungen für das Jahr 2050 zu.

Hinsichtlich der verwendeten SRES-Markerszenarien zeigte sich, dass die für das A2-Szenario modellierten Entwicklungen für den Jahresgesamtniederschlag und die Veränderung der Anzahl an Starkregenereignissen die für das B1-Szenario einbetten, d.h. dass die Wirksamkeit einer Emissionsreduktion trotz der bestehenden Unsicherheiten nicht in Frage steht.

Zusammenfassend kann für Hyderabad festgehalten werden, dass eine Zunahme aller vier Klimavariablen wahrscheinlich ist. Dabei fällt die Zunahme der Jahresgesamtniederschlagssumme vergleichsweise gering aus, während die Jahresdurchschnittstemperatur und die Anzahl an Hitzewellen und Starkregenereignissen in vielen Modell-Projektionen sehr stark ansteigen. Unter Einbezug der aktuellen naturräumlichen und sozio-ökonomischen Herausforderungen der Stadt Hyderabad ist zu erwarten, dass sich aufgrund der Entwicklung dieser vier Klimavariablen die Gesamtsituation der Metropolregion, zumindest bei Nicht-Ergreifung adäquater Adaptationsmaßnamen, weiter verschärfen wird. Einzig der möglicherweise zu erwartende leichte Anstieg des durchschnittlichen Jahresgesamtniederschlags könnte positive Effekte für die Region haben.

Abgesehen von der in dieser Arbeit erstellten Projektion von vier Klimavariablen, könnte eine Vorhersage auch für andere bzw. anders definierte Klimavariablen nützlich sein. Da zum Beispiel die Temperatur, sowohl im jährlichen Mittel als auch saisonal aufgeschlüsselt, zu den am besten vorhersagbaren Klimavariablen gehört und im Hinblick darauf, dass sich in Interviews mit der Stadtbevölkerung herausstellte, dass insbesondere auch der Winter als eine problematische Jahreszeit empfunden wird, würde es sich anbieten, diese saisonalen Temperaturentwicklungen näher unter dem Aspekt der Anpassung zu untersuchen.

Ein weiterer Aspekt, der hinsichtlich einer Klimaprojektion für Hyderabad näher untersucht werden könnte, ist die zukünftig mögliche Bi-Stabilität des Monsunsystems, die bisher aber von keinem AOGCM modelliert wird. Ergebnisse einer solchen Untersuchung würden einen wichtigen Beitrag zu den Vorhersagen der interanueller Variabilität des Jahresgesamtniederschlages leisten, und damit die Umsetzung effektiver Adaptationsmaßnahmen unterstützen, insbesondere hinsichtlich der Wasserversorgung und, in geringerem Maße, der Nahrungsmittelversorgung der Stadtregion.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb.-Nr.	Abbildungstitel/Abbildungskurztitel	Seite
3.3.1	**Klimadiagramm Hyderabad mit monatlichen Durchschnittstemperaturen und Niederschlagsboxplots (Whisker mit maximum 1,5 IQR), Begumpet, Hyderabad, Indien (1891-2007) (Datenquelle: xDat).**	11
3.3.2	**Jahresdurchschnittstemperaturen Hyderabads pro Jahr (unterer Teil), im 20-jährigen laufenden Mittel (mittlerer Teil) und im 40-jährigen laufenden Mittel (oberer Teil), Begumpet, Hyderabad, Indien (1891-2007), (grauer Kurvenverlauf bedeutet, dass zur Berechnung des Mittels nicht alle Jahresdaten des Zeitintervalls zur Verfügung standen) (Datenquelle: xDat).**	13
3.3.3	**Jahresgesamtniederschläge Hyderabads pro Jahr (unterer Teil), im 20-jährigen laufenden Mittel (mittlerer Teil) und im 40-jährigen laufenden Mittel (oberer Teil), Begumpet, Hyderabad, Indien (1891-2007) (grauer Kurvenverlauf bedeutet, dass zur Berechnung des Mittels nicht alle Jahresdaten des Zeitintervalls zur Verfügung standen) (Datenquelle: xDat).**	15
3.3.4	**Histogramm der Tagesniederschlagssummen im Zeitraum 1900-2007, mit fehlenden Werten zwischen 1970 bis 1997, Begumpet, Hyderabad, Indien (Datenquelle: xDat; KNMI).**	16
3.4.1	**Mittelwerte und deren Schwankungsbreite (blasser eingefärbte Bereiche um die Graphen) verschiedener globaler Klimamodelle für den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100 in Abhängigkeit vom jeweiligen Emissionsszenario (IPCC 2007, 14).**	19
3.5.1	**Hierarchie verschiedener ein- bis mehrdimensionaler Klimamodelle.**	21
4.1.2.1	**Geographische Ausdehnung der AOGCM-Gitterzellen, die das Stadtgebiet Hyderabads (schwarzer Punkt) beinhalten.**	28
4.2.1	**Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschläge bis 50mm. Verteilungen der 20c3m-AOGCM-Läufe (mri_cgcm2_3_2a links, Iap_fgoals1_0_g rechts)(schwarz), Verteilung der flächengemittelten IMD-Daten (rot), Punkte kennzeichnen den maximalen Minimalabstand (y-Achse: Quantile; x-Achse: Tagesniederschlag in mm).**	37
4.3.2.1	**Beispieldarstellungen von Zeitschritt- und Szenarium-Vergleich.**	39
5.1.1	**Darstellung unterschiedlicher Gewichte auf Basis verschiedener Metriken (Farbe) für jedes AOGCM unter dem B1-Szenario.**	42
5.1.2	**Darstellung der Auswirkung verschiedener Metriken auf die Erstellung von gewichteten Dichtefunktionen, (von links): Verlauf der Gewichte für die verschienden Metriken bei den, dem Abschneiden nach für jede Gewichtung sortierten AOGCMs; gewichtete Dichtefunktionen der B1-Projektionen der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperatur im ersten Zeitschritt (Mitte); im zweiten Zeitschritt (rechts).**	43
5.1.3	**Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen der durchschnittlichen Jahresdurchschnittstemperaturen. Erste Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, zweite Zeile: Gewichtung mit Metrik $G_1(\Delta_1^M)$, dritte Zeile: Gewichtung mit der gemittelten Metrik, vierte Zeile: Dichtefunktionen in einem Graphen dargestellt. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts abgebildet: B1-Projektion 2046-2065, B-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.**	46

5.1.4 **Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen für die Anzahl an Hitzewellentagen. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: Gewichtung mit der Metrik für die Anzahl an Hitzewellen, 3. Zeile: mit der gemittelten Metrik, 4. Zeile: Dichtefunktionen in einem Graphen dargestellt. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts : B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.** 47

5.1.5 **Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen der durchschnittlichen Jahressniederschlagssumme. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: mit der Metrik für den Jahresgesamtniederschlag, 3. Zeile: mit der gemittelten Metrik, 4. Zeile: alle Dichtefunktionen in einem Graphen dargestellt. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts: B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.** 48

5.1.6 **Darstellung der Auswirkung von verschiedenen Gewichten auf die Dichtefunktionen der Projektionen der Veränderung der Häufigkeit von Starkregenereignissen. 1. Zeile: alle AOGCMs gleich gewichtet, 2. Zeile: mit der Metrik für die Anzahl an Starkregenereignissen, 3. Zeile: gemittelte Metrik, 4. Zeile: alle Dichtefunktionen in einem Graphen. Die senkrechten Striche in den Graphen kennzeichnen die Projektionen der einzelnen AOGCMs. Ihre Länge entspricht dabei der Gewichtung. In den einzelnen Spalten von links nach rechts: B1-Projektion 2046-2065, B1-Projektion 2081-2100, A2 Projektion 2046-2065, A2-Projektion 2081-2100.** 49

5.2.1 **Boxplot des laufenden 20-jährigen Mittels der Jahresdurchschnittstemperatur in Hyderabad (Begumpet) (1891-2007) (Datenquelle: xDat).** 50

5.2.2 **Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für die Jahresdurchschnittstemperatur für beide AOGCM-Zeitschritte unter dem A2- und B1-Szenario.** 51

5.2.3 **Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Jahresdurchschnittstemperatur für alle untersuchten AOGCMs.** 52

5.2.4 **Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für die Anzahl von Hitzewellentagen für beide AOGCM-Zeitschritt unter dem A2- und B1-Szenario. Die Punkte außerhalb der Whisker stellen Ausreißer dar, die nicht mehr im Vertrauensintervall der Verteilung liegen.** 54

5.2.5 **Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Hitzewellen für alle untersuchten AOGCMs (mit durchgezogener 0-Tage-Linie).** 55

5.2.6 **Boxplot des laufenden 20-jährigen Mittels der Jahresgesamtniederschläge in Hyderabad (Begumpet) (1891-2007) (Datenquelle: xDat).** 56

5.2.7 **Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für den Jahresgesamtniederschlag für beide AOGCM-Zeitschritte unter dem A2- und B1-Szenario. Die Punkte außerhalb der Whisker stellen Ausreißer dar, die nicht mehr im Vertrauensintervall der Verteilung liegen.** 57

5.2.8 **Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Jahresgesamtniederschlag für alle untersuchten AOGCMs.** 57

5.2.9 **Kombinierte DF-Boxplot-Darstellung für Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für beide AOGCM-Zeitschritte unter dem A2- und B1-Szenario. Die Punkte außerhalb der Whisker stellen Ausreißer dar, die nicht mehr im Vertrauensintervall der Verteilung liegen.** 59

5.2.10 **Zeitschnitt- und Szenarien-Vergleich für die Klimavariable Starkregenereignisse für alle untersuchten AOGCMs.** 60

Tabelle Tabellenbezeichnung

3.1.1 **Schematische Zusammenfassung der Klimavariablen mit ihren Auswirkungen auf das städtische Subsystem Hyderabads, sowie möglichen Adaptationsmaßnahmen.** 9

3.3.1 **Jahresdurchschnittstemperaturen in °C für die Jahre 1961-1990; das räumliche Mittel beträgt 27,2°C, (hellgrau hinterlegte Bereiche kennzeichnen das Gebiet Hyderabads) (CRU TS 2.1-Datensatz).** 14

3.3.2 **Jahresgesamtniederschläge in mm für die Jahre 1961-1990; das räumliche Mittel beträgt 872 mm (hellgrau hinterlegte Bereiche kennzeichnen das Gebiet Hyderabads) (CRU TS 2.1-Datensatz).** 17

3.4.1 **Schematischer Überblick der SRES-Szenario-Familien und der mit ihnen assoziierte Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen bis 2100, grau hinterlegt sind die für die Arbeit verwendeten Szenarien (eigene Darstellung nach IPCC 2007, 13).** 18

3.5.1 **Übersicht der für die Arbeit verwendeten AOGCMs mit Angabe der SRES-Szenarien und Klimavariablen, für die Berechnungen durchgeführt wurden (Datenquelle: WCRP CMIP3).** 24

5.1.1 **Überblick der einzelnen und kumulierten Gewichtungen für die Klimavariablen für die verwendeten AOGCM-Läufe, unterteilt nach dem jeweiligen Szenario.** 44

Literaturverzeichnis

Anuradha, Y.V. (2011) Census of India 2011. Provisional Population Totals Andhra Pradesh.

Bates, B., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. (Eds.) (2008) Climate Change and Water. Technical Paperof the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Genf.

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2010) Megastädte – die Welt von morgen nachhaltig gestalten. Broschüre zum Förderschwerpunkt Megastädte von morgen. Bonn, Berlin. <http://www.future-megacities.org/download/Megacities-Shaping_of_a_sustainable_future_10-2010.pdf> (letzter Zugriff: 05.05.2011).

Christensen, J.H., Christensen, O.B. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. Climatic Change, 81, S. 7-30.

Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G. (2007) Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. Climatic Change, 81, S. 1-6.

Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Georgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., Castro, M., van den Hurk, B. (2007) An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. Climatic Change, 81 (Supplement 1), S. 53-70.

Déqué, M. (2009) Temperature and precipitation probality density function in ENSEMBLE regional scenarios. ENSEMBLES technical Report No. 5. <http://ensembles-eu.metoffice.com/tech_reports/ETR_5_vn1.pdf> (letzter Zugriff: 23.04.2011)

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) (2005): Climate and Energy in a complex Transition Process towards Sustainable Hyderabad Mitigation and Adaptation Strategies by changing Institutions,Governance Structures, Lifestyles and Consumption Patterns. <http://www.sustainable-hyderabad.de/> (letzter Zugriff: 30.05.2011).

Frich, A., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank, Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century". Climate Research, 19, S. 193–212. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/docs/Frichetal02.pdf> (letzter Zugriff: 21.02.2010)

Gleckler, P.J., Tayler, K.E., Doutriaux, C. (2008) Performance metrics for climate models. Journal of Geophysical Research, 113, D06104, doi: 10.1029/2007JD008972

Hyndman, R.J., Fan, Y. (1996) Sample quantiles in statistical packages. American Statistician, 50, S. 361–365.

IFRE (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies) (2000) India: Flash Floods in Andhra Pradesh. Information Bulletin No.1. <http://www.ifre.org/docs/appeals/rpts00/india01.pdf> (letzter Zugriff: 03.052011).

IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P., Tett, S.F.B. (1998) High-resolution paleoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. The Holocene, 8, 4, S.455-471.

Joussaume, S., Taylor K.E., Braconnot, P., Mitchell, J.F.B., Kutzbach, J.E., Harrison, S.P., Brentice, I.C., Broccoli, A.J., Abe-Ouchi, A., Bartlein, P.J., Bonfils, C., Dong, B., Guiot, J., Herterich, K., Hewitt, C.D., Jolly, D., Kim, J.W., Kislov, A., Kitoh, A., Louttre, M.F., Masson, V., McAvaney, B., McFarlane, N., de Noblet, N., Peltier, W.R., Peterschmitt, J.Y., Pollard, D., Rind, D., Royer, J.F., Schlesinger, M.E., Syktus, J., Thompson, S., Valdes, P., Vettoretti, G., Webb, R.S., Wyputta, U. (1999) Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). Geophysical Research Letter, 26, 7, S. 859-862.

Kendon, E.J., Jones, R.G., Kjellström, E., Murphy, J.M. (2009) Using and designing GCM-RCM ensembles regional climate projections. Journal of Climate, 23, 24, S. 6485-6503.

Kemp, D. (2011) Climate Models and Uncertainty. Model Types, General circulation models, Evaluation and Reliability, Models of intermediate complexity, energy balance models. <http://www.libraryindex.com/pages/3216/Climate-Models-Uncertainty.html> (letzter Zugriff am 03.02.2011).

Kiehl, J.T. (1992) Atmospheric general circulation modeling. In: Trenberth, K.E. (Ed.), Climate System Modeling, Chapter 10. Cambridge, New York, S. 319-370.

Knutti, R. (2010) The end of model democracy? An editorial comment. Climatic Change, 102, 3-4, S. 395-404.

Kolanoski, H. (2008) Statistische Methoden der Datenanalyse. Vorlesungsskript zur Vorlesung im Sommeremester 2008, Humboldt Universität zu Berlin. http://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/smd_ss02/skripte/inhalt.pdf (letzter Zugriff: 12.11.2010).

Lavine, M. (2007) Introduction to Statistical thought. Free Internet Publication. <http://www.stat.duke.edu/~michael/book.pdf> (letzter Zugriff: 04.01.2011).

McGuffie, K., Henderson-Sellers, A. (2005) A Climate modelling primer Volume I. Chichester.

MCH (Municipal Corporation of Hyderabad) (2005): City Development Plan of Hyderabad.Hyderabad.

McMichael, A.J.; Campbell-Lendrum, D.H.; Corvalan, C.F., Ebi, K.L., Githeko, A.K., Scheraga, J.D., Woodward, A. (eds.) (2003). Climate Change and human Health: Risks and Responses, World Health Organization, Geneva 333 pp.

Meehl, G.A.; Stocker, T.F.; Collins, W.D.; Friedlingstein, P.; Gaye, A.T.; Gregory, J.M.; Kitoh, A.; Knutti, R.; Murphy, J.M.; Noda, A.; Raper, S.C.B.; Watterson, I.G.; Weaver, A.J., Zhao, Z.-C. (2007). Global Climate Projections. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of

the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. S. 743-845.

Nakićenović, N., Swart, R. (eds.) (2000): Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Palmer, T.N. (200) Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate. Reports on Progress in Physics, 63, 2, S. 71-116.

Reckien, D., Hofmann, S., Kit, O. (2009) Qualitative Climate Change Impact Networks for Hyderabad / India. Project Report for: Hyderabad as a Megacity of Tomorrow: Climate and Energy in a Complex Transition towards Sustainable Hyderabad – Mitigation and Adaptation Strategies by Changing Institutions, Governance Structures, Lifestyle and Consumption Patterns. BMBF, Bonn, < http://www.sustainable-hyderabad.de/> (letzter Zugriff: 28.05.2011).

Revi, A. (2007): Climate change risk: an adaptation and mitigation agenda for Indian cities. Paper held at the Global Urban Summit organized by the Rockefeller Foundation in Bellagio, 8-13th July 2007.

Roeckner, E. (2003) Allgemeine Zirkulsationsmodelle, Atmoshäre. pro*met*, 29, 1-4, S.6-14.

Rupa Kumar, K., Sahai, A.K., Krishna Kumar, K., Patwardhan, S.K., Mishra, P.K., Revadekar, J.V., Kamala, K., Pant, G.B. (2006) High-resolution climate change scenarios for India for the 21st century. Current Science, 90, 3, S. 334-345.

Santer, B.D., Tayler, K.E., Gleckler, P.J., Bonfils, C., Barnett, T.P., Pears, D.W., Wighley, T.M., Mears, C., Wentz, F.J., Brüggemann, W., Gillette, M.P., Klein, S.A., Solomon, S., Stott, P.A., Wehner, M.F. (2009) Incorporating model quality information in climate change detection and attribution studies. Proceedings of the National Academy of Science, 106, 35, S. 14778-83.

Satterthwaithe, D., Huq, S., Pelling, M., Reid, H., Lankao, P.R. (2007). Adapting to Climate Change: The possibilities and constraints in low- and middle-income nations. In: Human Settlements Discussion Paper Series: Theme: Climate Change and Cities 1.

Schneider, S.H. (1992) Introduction to Climate Modeling. In: Trenberth, K.E. (Ed.), Climate System Modeling, Chapter 1. Cambridge, New York, S. 3-26.

Shorak, G.R., Wellner, J.A. (1986) Empirical Processes with Applications to Statistics, Wiley. New York, NY, USA.

Smith, I., Chandler, E. (2010) Refining rainfall projections for the Murray Darling Basin of south-east Australia – and the effect of sampling model results based on performance. Climatic Change, 102, S.377-393.

Tebaldi, C., Hayho, K., Arblaster, J.M., Meehl, G.A. (2006) Going to the Extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. Climatic Change, 79, S. 185-211.

Tebaldi, C., Knutti R. (2010) Climate Models and Their Projections of Future Changes. In: Lobell, D., Burke, M. (Eds.) Climate Change and Food Security. Adapting Agriculture to a Warmer World. Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York. S. 31-56.

Trenberth, K.E (Ed.) (1992) Climate System Modeling. Cambridge, New York.

Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden , Zhai, P. 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, Miller H.L. (Eds.) Climate Change 2007: The Physical ScienceBasis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. S. 235-336.

Tukey, J. W. (1977) Exploratory Data Analysis. Addison Wesley, Boston.

van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (Eds.) (2009) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research an results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.

Walkenhorst, O., Stock, M. (2009) Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung. Hannover.

Wang, B., Wang, X. (2007) Bandwidth Selection for Weighted Kernel Density Estimation. Electronic Journal of Statistics, 0, S. 0-21. <http://www.ressources-actuarielles.net/EXT/ISFA/1226.nsf/769998e0a65ea348c1257052003eb94f/ede860a850cc6634c12573bb004a2413/$FILE/Kernel.pdf> (letzter Zugriff. 07.06.2011).

Washington, W. M., R. Knutti, G. A. Meehl, H. Teng, C. Tebaldi, D. Lawrence, L. Buja, Strand, W.G. (2009), How much climate change can be avoided by mitigation? Geophysical Research Letters, 36, L08703.

Weigel, A. P., Knutti, R., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2010) Risks of Model Weighting in Multimodel Climate projections. Journal of Climate, 23, S. 4175-4191.

Verzeichnis verwendeter Datenbanken

CRU (Climate Research Unit) Universityof East Anglia, Norwich.

IMD (India Meteorological Department) National Data Centre, National Climate Centre, Shivajinagar, Pune – 411005, India

KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)-Database, Wilhelminalaan 10, 3732 GK De Bilt, Netherlands

WCMIP3 World Climate Research Program's (WCRP's) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset. I acknowledge the modeling groups for making their model output available for analysis, the Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) for collecting and archiving this data, and the WCRP's Working Group on Coupled Modelling (WGCM) for organizing the model data analysis activity. The WCRP CMIP3 multi-model dataset is supported by the Office of Science, U.S. Department of Energy.

xDat (eXtensible Database Access Tool). Potsdam Institute for Climate Impact Research. <http://www.pik-potsdam.de/institute/organization/scientific-departments/data-computation/sdm/tools/xdat/>

Appendix

Appendix I: Rohdatensatz mit den entsprechenden regionalisierten Datensätze der 17 AOGCMs (Datenquelle: WCMIP3).

AOGCM, Jahr: BCCR-BCM 2.0, 2005
Institut: Bjerknes Centre for Climate Research, Norway

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	25,22	26,41	27,12
A2	25,22	26,75	28,90

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	27,68	28,43
A2	26,43	28,03	30,37

Durchschnittliche Anzahl von Hitzewellen im Jahr [Tage/Jahr]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 39,8° C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,375	6,85	61,25
A2	0,375	11,95	79,5

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1026,6	1115,1	1028,6
A2	1026,6	1115,6	1068,6

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	878,5	810,3
A2	808,8	878,9	841,8

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 50,2 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,55	1,63
A2	0,50	1,21	1,17

AOGCM, Jahr: CGCM3.1 (T47), 2005
Institut: Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	24,65	26,45	27,05
A2	24,65	27,05	28,95

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,36	29,00
A2	26,43	29,00	31,04

Durchschnittliche Anzahl von Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 50,1 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1,175	4,8	7,45
A2	1,175	7,1	17,15

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1002,85	1133,36	1222,62
A2	1002,85	1129,99	1443,55

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	914,1	986,0
A2	808,8	911,3	1164,2

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 89,7mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,95	1,30
A2	0,50	0,90	2,15

AOGCM, Jahr: CGCM3.1 (T63), 2005
Institut: Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	24,45	26,55	26,95
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,70	29,13
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 49,6 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1,775	9,05	8,45
A2			

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1340,07	1591,70	1635,31
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	960,7	987,0
A2			

Durchschnittliche Anzahl von Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 125,3 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,85	0,85
A2			

AOGCM, Jahr: CSIRO-MK3.0, 2001
Institut: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	25,65	26,85	27,25
A2	25,65	27,35	29,15

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	27,67	28,08
A2	26,43	28,18	30,04

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 45,4°C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	3,85	7,15	11,6
A2	3,85	11,55	27,4

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	603,92	651,69	672,74
A2	603,92	665,61	642,64

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	872,8	901,0
A2	808,8	891,4	860,6

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 38,6 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,75	0,70
A2	0,50	0,80	0,85

AOGCM, Jahr: CSIRO-MK3.5, 2010
Institut: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	29,55	31,45	32,05
A2	29,55	32,05	33,85

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,13	28,67
A2	26,43	28,67	30,28

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 48,4°C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	5,725	19,4	25
A2	5,725	25	50,25

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	743,66	758,06	743,64
A2	743,66	705,67	799,24

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	824,5	808,8
A2	808,8	767,5	869,3

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 45,7 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,55	0,80
A2	0,50	0,85	1,05

AOGCM, Jahr: GFDL-CM2.0, 2005
Institut: U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	25,15	26,75	27,35
A2	25,15	27,35	29,35

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,11	28,74
A2	26,43	28,74	30,84

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 44,6 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,9	7,9	10,6
A2	0,9	10,75	34,3

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	934,79	889,85	994,86
A2	934,79	865,53	842,40

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	769,9	860,8
A2	808,8	748,9	728,9

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 74,5 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,40	0,60
A2	0,50	0,55	0,55

AOGCM, Jahr: GFDL-CM2.1, 2005
Institut: U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	24,15	25,75	26,25
A2	24,15	26,25	28,35

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,18	28,73
A2	26,43	28,73	31,03

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 43,2 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	3,25	15,45	19,25
A2	3,25	17,6	46,3

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1421,37	1598,07	1630,65
A2	1421,37	1487,84	1358,57

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	909,3	927,9
A2	808,8	846,6	773,1

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 96,2 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	1,35	1,75
A2	0,50	1,25	1,60

AOGCM, Jahr: GISS-AOM, 2004
Institut: National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	27,55	28,95	29,05
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	27,77	27,87
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 44,6 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,475	6,65	8,5
A2			

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	763,23	757,18	899,33
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	802,4	953,0
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 21,6 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,85	0,70
A2			

AOGCM, Jahr: GISS-ER, 2004
Institut: National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	28,05	29,95	30,55
A2	28,05	30,45	32,35

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,22	28,79
A2	26,43	28,69	30,48

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 42,3 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	3,475	7,1	21,3
A2	3,475	19,1	52,35

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	730,64	599,39	535,35
A2	730,64	571,99	495,95

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	663,5	592,6
A2	808,8	633,2	549,0

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 42,9 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,15	0,35
A2	0,50	0,10	0,10

AOGCM, Jahr: FGOALS-g1.0, 2004
Institut: National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/Institute of Atmospheric Physics, China

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	27,65	28,75	29,35
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	27,48	28,05
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 41,2 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,925	2,85	6,15
A2			

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1538,78	1566,72	1494,19
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	823,5	785,4
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 40,3 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,30	0,40
A2			

AOGCM, Jahr: INGV-ECHAM4, 2006
Institut: National Institute of Geophysics and Vulcanology (INGV), Italy

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2	27,15	29,15	30,55

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2	26,43	28,38	29,74

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 42,2 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2	6,025	26,55	43,1

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2	1144,86	1109,25	1130,69

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2	808,8	783,6	798,8

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 68,6 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2	0,50	0,66	0,56

AOGCM, Jahr: INM-CM3.0, 2004
Institut: Institute for Numerical Mathematics, Russia

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 42,3 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2			

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1279,63	1383,34	1339,21
A2	1279,63	1506,88	1382,53

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	874,3	846,5
A2	808,8	952,4	873,8

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 34,0 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,85	0,65
A2	0,50	0,80	1,30

AOGCM, Jahr: IPSL-CM4, 2005
Institut: Institut Pierre Simon Laplace, France

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	28,85	30,85	31,45
A2	28,85	31,25	33,55

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,26	28,81
A2	26,43	28,63	30,74

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 44,5 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,575	14	27,1
A2	0,575	21,45	77,1

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	252,78	257,04	265,22
A2	252,78	197,22	289,29

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	822,4	848,6
A2	808,8	631,0	925,6

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 20,7 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,96	0,56
A2	0,50	0,86	1,12

AOGCM, Jahr: MIROC3.2(medres), 2004
Institut: Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2			

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1			
A2			

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 44,0 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,025	13	17,55
A2	0,025	10,3	27,25

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1389,78	1443,99	1480,48
A2	1389,78	1430,24	1566,77

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	840,4	861,6
A2	808,8	832,4	911,8

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 62,0 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,55	0,45
A2	0,50	0,80	1,00

AOGCM, Jahr: MIUB/ECHO-G, 2005
Institut: Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korean Meteorological Agency, and Model and Data group, Germany/Korea

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	27,05	28,25	29,05
A2	27,05	28,45	30,15

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	27,60	28,38
A2	26,43	27,80	29,46

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 43,7 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,725	6,1	15,05
A2	0,725	11,8	30,45

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	782,27	944,63	1480,48
A2	782,27	970,42	1566,77

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	976,7	1003,3
A2	808,8	1002,5	1131,6

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 35,0 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,86	1,67
A2	0,50	0,71	1,67

AOGCM, Jahr: ECHAM5-OM, 2005
Institut: Max-Planck-Institute for Meteorology, Germany

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	25,75	27,75	28,65
A2	25,75	27,85	30,55

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	28,48	29,41
A2	26,43	28,59	31,36

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 44,5 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	3,15	15,75	28,8
A2	3,15	18,75	51,55

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	1110,87	1034,97	1118,61
A2	1110,87	1118,52	1168,21

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	753,5	814,4
A2	808,8	814,4	850,6

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 71,8 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,65	0,60
A2	0,50	0,90	1,35

AOGCM, Jahr: MRI-CGCM2.3.2, 2003
Institut: Meteorological Research Institute, Japan

Durchschnittliche Jahresdurchschnittstemperatur [°C]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	25,45	26,35	27,05
A2	25,45	26,55	28,05

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	26,43	27,36	28,09
A2	26,43	27,57	29,13

Durchschnittliche Anzahl an Hitzewellen im Jahr [Tagen]

Tage mit Tagesmaximaltemperaturen über dem Schwellwert 51,6 °C

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0	0,8	2,95
A2	0	0,55	10,7

Durchschnittlicher Jahresgesamtniederschlag [mm]

Ergebnisse des AOGCMs:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	896,67	1134,39	1146,37
A2	896,67	1146,70	1408,73

Regionalisierte Ergebnisse:

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	808,8	1023,2	1034,0
A2	808,8	1034,3	1270,7

Durchschnittliche Anzahl an Starkregenereignissen [Tage/Jahr]

Tage mit Niederschlägen über dem Schwellwert 39,3 mm

	1961-2000	2046-2065	2081-2100
B1	0,50	0,75	0,75
A2	0,50	0,95	2,60

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, die Arbeit selbstständig erstellt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Potsdam, den 14. Juni 2011

Martin Budde