

Klimafolgen bei 1,5°C und 2°C

Ergebnisse des
HAPPI-DE
Konsortiums

November 2018

Autoren

Carl-Friedrich Schleußner
Fahad Saeed
Alexander Nauels
Tim Trautmann

Kevin Sieck
Juliane Petersen
Stephanie Legutke
Ludwig Lierhammer

Diese Publikation wurde im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekts “HAPPI-DE: Klima- und Klimafolgenprojektionen bei 1.5°C gegenüber 2°C Erwärmung im Rahmen der HAPPI Initiative” (Förderkennzeichen: 01LS1613A-D) erstellt.

Diese Publikation ist unter Angabe der Quelle zur Vervielfältigung zu Bildungszwecken sowie zur nichtkommerziellen Nutzung freigegeben. Einer kommerziellen Nutzung ohne schriftlicher Einwilligung der Autoren wird widersprochen.

Zitierhinweis:

Schleussner et al., Klimafolgen bei 1,5°C und 2°C - Ergebnisse des HAPPI-DE Konsortiums (2018)

Erscheinungsdatum: 27. November 2018

Dieser Report ist auch online erhältlich unter:
www.climateanalytics.org/publications

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	2
2	EINFÜHRUNG	3
2.1	DAS TEMPERATURZIELKONZEPT	3
2.2	DIE INITIATIVE „HALF A DEGREE ADDITIONAL WARMING, PROGNOSIS AND PROJECTED IMPACTS (HAPPI)“	5
3	ERGEBNISSE	6
3.1	REGIONALE KLIMAÄNDERUNGEN	8
3.1.1	REGIONALE SIMULATIONEN	8
3.1.2	DYNAMISCHE VERÄNDERUNGEN	10
3.2	SEKTORALE KLIMAFOLGEN	11
3.2.1	ERGEBNISSE DER BIASKORREKTUR	11
3.2.2	DER WASSERSEKTOR	12
3.2.3	DER LANDWIRTSCHAFTSSEKTOR	13
3.3	SENSITIVITÄTSSTUDIEN ZUM EXPERIMENTPROTOKOLL	14
4	HAPPI-DE IM KONTEXT DES 1,5°C SONDERBERICHT	16
4.1	ERGEBNISSE VON HAPPI-DE UND DIE GRÜNDE ZUR BESORGNIS	16
5	AUSBLICK	18
	REFERENZEN	19
	ANHANG	21

1 Zusammenfassung

Der im Herbst 2018 erschienene Sonderbericht des Weltklimarates (IPCC) über 1,5°C globale Erwärmung hat die Dringlichkeit von Klimaschutz, die Klimafolgen bei 1,5°C Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Niveau, sowie die Unterschiede zu 2°C deutlich betont.

Die Bereitstellung von regionalen und sektorspezifischen Analysen von differenziellen Klimafolgen bei 1,5°C und 2°C war dabei eine der zentralen Herausforderungen für den Sonderbericht. Hierzu hat die internationale Forschungsinitiative „Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts“ (HAPPI) und darin das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungskonsortium HAPPI-DE einen wesentlichen Beitrag geleistet.

Mit einem auf 1,5°C und 2°C globale Erwärmung zugeschnittenen Modellierungsansatz, der darüber hinaus die Analyse von Änderungen in Extremereignissen erlaubt, konnten eine Reihe von klimafolgenrelevanten Fragestellungen bearbeitet werden. Insbesondere der regionale und sektorale Fokus erlaubte Studien zu Veränderungen der Regenzeitcharakteristika in den Tropen ebenso wie zu regionalen Klimafolgen in Europa, zu globalen hydrologischen Veränderungen sowie zu Klimafolgen für den Agrarsektor. Die Ergebnisse des HAPPI-DE Forschungskonsortiums haben zu relevanten Erkenntnissen hinsichtlich der Differenzierung von Klimafolgen, und damit speziell zu politikrelevanten Syntheseprodukten des IPCC beigetragen.

Im Rahmen dieser Studien wurde die Bedeutung der Unterschiede in Klimafolgen zwischen 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung insbesondere auf regionaler Ebene herausgearbeitet. Diese Unterschiede unterstreichen das Potential, wesentliche Klimafolgen durch die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5°C zu vermeiden.

2 Einführung

Die Formulierung von Klimaschutzziele mit Hilfe der globalen mittleren Oberflächentemperatur hat sich als Leitkonzept globaler Klimaschutzbemühungen etabliert. Mit der Formulierung des Temperaturziels im Pariser Abkommen, das die Temperaturniveaus von 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung gegenüber vorindustriellem Niveau beinhaltet, sind diese nun auch in einem völkerrechtlich verbindlichen Abkommen festgeschrieben. Die Entwicklung von Temperaturzielen ist dabei als Operationalisierung der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) zu verstehen. Diese hat das Ziel formuliert, „gefährliche menschengemachte Beeinflussung des Klimasystems zu verhindern“ (UNFCCC 1992). Die Bewertung, wann diese gefährliche Beeinflussung erreicht ist, ist dabei abhängig von Betroffenheit und Wertevorstellungen der handelnden Akteure. Es ist damit nicht verwunderlich, dass verschiedene Länder oder gesellschaftliche Gruppen zu unterschiedlichen Interpretationen kommen.

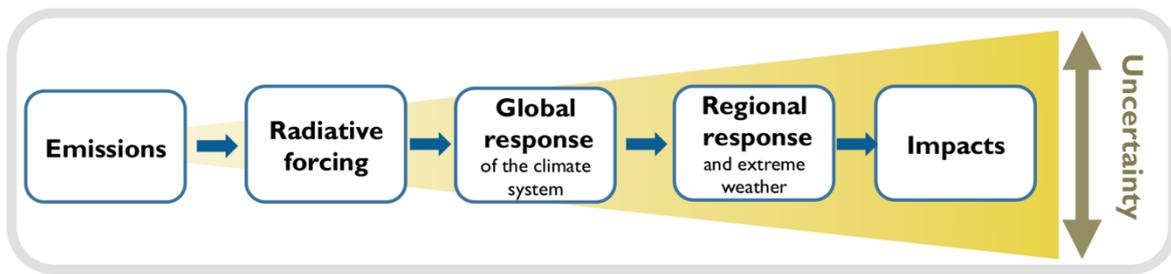
2.1 Das Temperaturzielkonzept

Die Stärke des Temperaturzielkonzepts ist die Möglichkeit, Klimafolgen sowie Klimavermeidungsanstrengungen miteinander zu verbinden (IPCC 2014). Es ist eine sehr gut gesicherte Erkenntnis der Klimaforschung, dass die globale Mitteltemperatur quasi-linear mit den kumulativen CO₂-Emissionen steigt. Dies impliziert die direkte Schlussfolgerung, dass die globalen netto-CO₂-Emissionen langfristig null erreichen müssen, um das Klimasystem zu stabilisieren. Gleichzeitig erlaubt es die Formulierung eines CO₂ Budgets, also einer begrenzten Menge von CO₂, die bis zum Erreichen des Ziels noch ausgestoßen werden darf. Auch wenn die exakte Höhe des Budgets mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist (IPCC 2018), ermöglicht dieser grundlegende Zusammenhang die Formulierung von Emissionsreduktionszielen.

Gleichzeitig können wesentliche Folgen des Klimawandels abhängig von der globalen Mitteltemperatur dargestellt werden (Steinacher et al. 2013). Dies ermöglicht die Verbindung von Emissionen und Klimafolgenabschätzungen. Die Frage, für welche Klimafolgen dieses Verhältnis mit welchen Einschränkungen gilt, ist dabei von großer wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung und wird auch hier im Folgenden weiter beleuchtet.

Die Geschichte dieser Temperaturziele reicht dabei bereits mehr als 20 Jahre zurück und ist eng verknüpft mit der Entwicklung der Erkenntnisse der Klimaforschung und insbesondere der Berichte des Weltklimarates (IPCC). Bereits 1996 hat das Environment Council der Europäischen Union das Ziel vorgegeben, die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur auf „unter 2°C“ zu beschränken, damals basierend auf dem zweiten Sachstandsbericht des IPCC (Hare et al. 2011). Der europäische Rat hat sich dieser Position 2005 angeschlossen (basierend auf dem dritten Sachstandsbericht) und dieses Ziel wurde dann auch 2009 von der Gruppe der G8 (vierter Sachstandsbericht) unmittelbar vor der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen übernommen (Hare et al. 2011).

The emissions scenario approach



The HAPPI approach

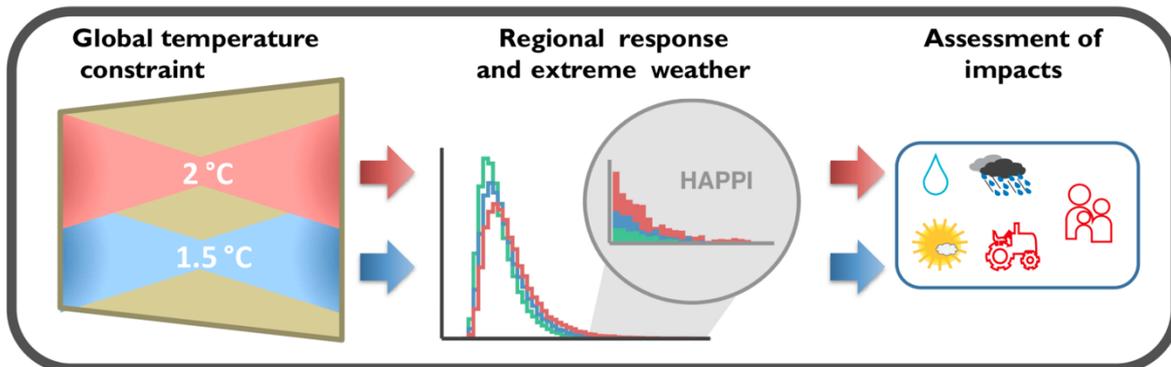


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Modellierungsfokus der HAPPI initiative. Ein klassischer emissions- oder konzentrationsgetriebener Szenarioansatz ist im oberen Bereich dargestellt. Aufgrund der Unsicherheiten in jedem Schritt ist ein solcher Ansatz nur bedingt zur Untersuchung spezifischer Fragestellungen bezüglich temperaturbezogener Klimafolgen geeignet. Das HAPPI Experimentprotokoll ist daher spezifisch auf 1,5°C und 2°C Erwärmung ausgelegt, in dem die atmosphärischen Konditionen sowie auch Meeresoberflächentemperaturen entsprechend fixiert werden.

Auch das „unter 1,5°C“ Temperaturziel hat eine längere Geschichte. Mit dem Aufkommen des „unter 2°C“ Ziels der Industriestaaten formulierten auch die besonders von der Klimaerwärmung gefährdeten Länder des globalen Südens, allen voran die kleinen Inselstaaten und die am wenigsten entwickelten Länder, ihre Interessen. Unter dem Eindruck der bereits klar spürbaren Folgen des Klimawandels bei deutlich unter 1°C Erwärmung, forderten daher bereits im Vorfeld der Kopenhagener Konferenz um die 100 Länder ein stärkeres Ziel, nämlich die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen (UNFCCC 2009a; Hare et al. 2011).

Obwohl die UN-Klimakonferenz in Kopenhagen als ein Tiefpunkt der globalen Klimaschutzbemühungen gewertet werden kann, markiert sie gleichzeitig den Startpunkt für die Aufnahme von Temperaturzielen im Kontext der Klimarahmenkonvention. Im „Copenhagen Accord“ wurde das „unter 2°C Ziel“ formuliert, ebenso wie der Bedarf, dieses Ziel im Lichte der Klimarahmenkonvention regelmäßig und insbesondere mit Bezug auf 1,5°C neu zu bewerten (UNFCCC 2009b).

Das „unter 2°C Ziel“ wurde 2010 in Cancun formal in den Entscheidungstext der Klimarahmenkonvention aufgenommen (UNFCCC 2010), in direkter Verbindung mit einem wissenschaftsgestützten Begutachtungsprozess dieses Ziels. Ungeachtet seiner zentralen Rolle im politischen Prozess, wurde dem darauffolgenden Begutachtungsprozess des globalen Temperaturziels unter der Klimarahmenkonvention, der 2013-2015 stattfand (kurz: 2013-2015 Review), wenig Beachtung innerhalb der Wissenschaftsgemeinschaft zuteil. In diesem Rahmen wurde ein richtungsweisendes Konzept des wissenschaftlich-politischen Austausches implementiert, der „Structured Expert Dialogue“ (SED), bei dem sich mehr als 70 international führende Klimaforscher und IPCC Autoren den Fragen von Regierungsvertretern

stellten. Der fünfte Sachstandsbericht des IPCC stellte dabei die wesentliche wissenschaftliche Basis für diesen Begutachtungsprozess dar. Der Abschlussbericht des SED und die Beschlüsse des 2013-2015 Reviews können als Wegbereiter des Temperaturziels im Pariser Abkommen gewertet werden (Schleussner et al. 2016). Der SED legte dar, dass das 2°C nicht als „sicheres“ Niveau globaler Erwärmung bewerten werden kann und dass eine Begrenzung auf 1,5°C eine Reihe von Vorteilen hätte (UNFCCC 2015). Gleichzeitig wurden aber auch substantielle Wissenslücken und der Bedarf an weiterer Forschung zu 1,5°C globaler Erwärmung betont (UNFCCC 2015): eines der Gründe für die Bitte der Konferenz der Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention an den IPCC einen Sonderbericht über 1,5°C globale Erwärmung zu erstellen.

Der IPCC ist der Bitte nachgekommen und der Sonderbericht über 1,5°C globale Erwärmung (SR1.5)¹ wurde im Oktober 2018 verabschiedet und veröffentlicht (IPCC 2018). Dies ging mit einer besonderen Anstrengung der weltweiten Wissenschaftsgemeinschaft einher. Die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen zu 1,5°C globale Erwärmung im Jahr 2015 war begrenzt (Rogelj et al. 2015; Schleussner et al. 2015), was eine Vielzahl von Anstrengungen zur Untersuchung der 1,5°C – relevanten Forschungsfragen bedurfte.

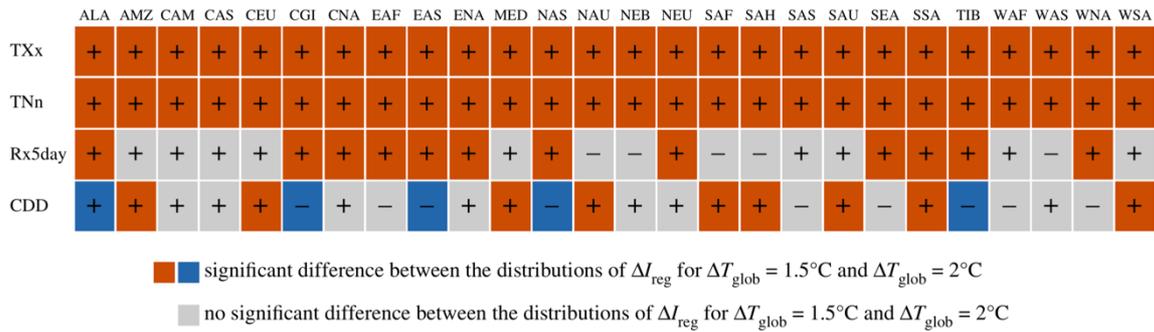
Eine davon ist die internationale Initiative „Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts“ (HAPPI), die sich mit spezifischen Klimamodellierungsexperimenten auf die Unterschiede in den Klimafolgenprojektionen zwischen 1,5°C und 2°C fokussiert hat. Im Rahmen dieser internationalen Initiative wurde auch das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt HAPPI-DE durchgeführt. Im Zuge von HAPPI-DE wurden Daten basierend auf globalen Modellsimulationen für die HAPPI-Initiative bereitgestellt, die Archivierung aller im Rahmen von HAPPI und HAPPI-DE erzeugten Daten vorgenommen, sowie die Analyse von regionalen Klimasimulationen und Klimafolgen basierend auf den globalen HAPPI-Daten vorangetrieben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der HAPPI-DE Studie im Kontext des IPCC Sonderberichtes über 1,5°C globale Erwärmung vorgestellt, und die Sensitivitäten der Ergebnisse im Bezug zum Experimentprotokoll und seiner Durchführung diskutiert.

2.2 Die Initiative „Half a degree Additional warming, Prognosis and Projected Impacts (HAPPI)“

Das Modellvergleichsunterfangen HAPPI wurde 2016 ins Leben gerufen, um wissenschaftliche Informationen zu 1,5°C und 2°C globale Erwärmung für den SR1.5 bereitzustellen. Die Zielstellungen des Projekts sind dabei in besonderem Maße auf 1,5°C und 2°C globale Erwärmung und auf Wetterextreme bezogen. Dazu wurde eine Klimaerwärmung um 1,5°C bzw. 2°C gegenüber vorindustriellen Bedingungen für alle teilnehmenden Modelle durch die Festsetzung der atmosphärischen Konditionen, Meerestemperaturen und Meereisausdehnung kalibriert. Diese Randbedingungen wurden mit Hilfe von gekoppelten Klimasimulationen (des CMIP5-Modellensemble) für eine Dekade zum Ende des 21. Jahrhunderts berechnet. Die Referenzperiode der HAPPI Simulationen ist 2006-2015.

¹ Der volle Titel des Reports lautet: „1,5 °C globale Erwärmung - Der IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Bemühungen zur Beseitigung von Armut.“

CMIP5



HAPPI

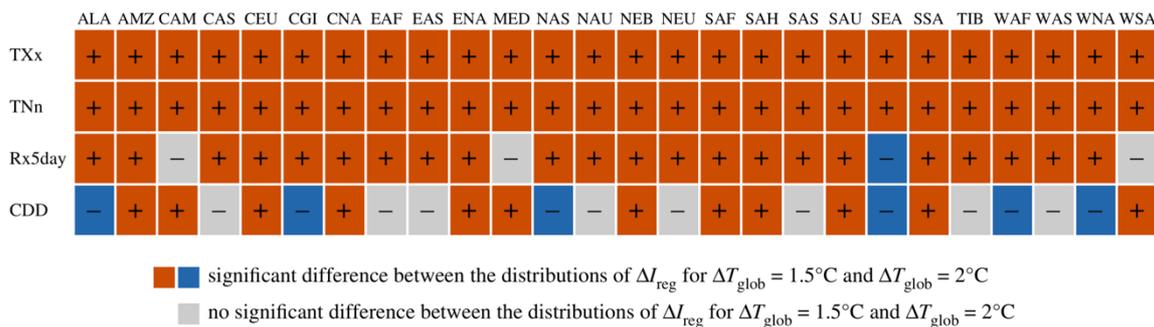


Abbildung 2: Darstellung von robusten Änderungen zwischen 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung über dem vorindustriellen Niveau für verschiedene Extremwetterindikatoren und Weltregionen (von ALA für Alaska bis WSA für Westliches Südamerika. Für eine Karte der Regionen siehe Annex 1). Das obere Panel zeigt die Ergebnisse für ein Ensemble von CMIP5-, das untere für HAPPI- Simulationen. Die Indikatoren repräsentieren Änderungen in Hitzeextremen (TXx, wärmste Tagestemperatur des Jahres), Kälteextremen (TNn, kälteste Nachttemperatur des Jahres), Starkniederschläge (RX5day, höchste Niederschlagsmenge in 5 aufeinanderfolgenden Tagen) und Trockenheit (CDD, längste Periode ohne Niederschlag) dar. Quelle: Seneviratne et al. (2018)

Diese Vorgehensweise erlaubt eine direkte Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Klimamodelle bezüglich der klimatischen Veränderungen bei 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung. Speziell wurden im Rahmen des HAPPI Protokoll große Ensembles (50-100 Modellläufe) mit gleichen Anfangsbedingungen gerechnet, was Analysen von Extremereignissen auf multi-dekadischen Zeitskalen (bis zu ein-in-50-Jahren Ereignissen) erlaubt (Mitchell et al. 2017). Die Simulationen des HAPPI-Experimentprotokolls wurden von sieben Modellierungsgruppen weltweit durchgeführt.

3 Ergebnisse

Eine wichtige Frage zur Einordnung der HAPPI-Simulationen ist, in welchem Maße die Ergebnisse sensitiv gegenüber den Besonderheiten des Simulationsprotokolls sind. Dies gilt insbesondere in Bezug auf das rein atmosphärischen HAPPI-Experimentprotokoll gegenüber den voll-gekoppelten ozeanisch-atmosphärischen Simulationen, wie sie beispielsweise im Rahmen der verschiedenen Phasen des Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP) durchgeführt werden. Um diese Einordnung treffen zu können, wurden eine Reihe von klimatologischen Indikatoren zwischen dem CMIP5 und HAPPI Ensemble für 1,5°C und 2°C globale Erwärmung verglichen (Seneviratne et al. 2018). Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Abbildung 2 für verschiedene Weltregionen dargestellt. Dabei ist evident, dass temperaturbedingte Extreme (TXx: wärmste Tagestemperatur des Jahres; TNn: kälteste Nachttemperatur des Jahres) für alle Weltregionen in beiden Simulationsansätzen zwischen 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung ein robustes Erwärmungssignal zeigen (siehe Abbildung 2).

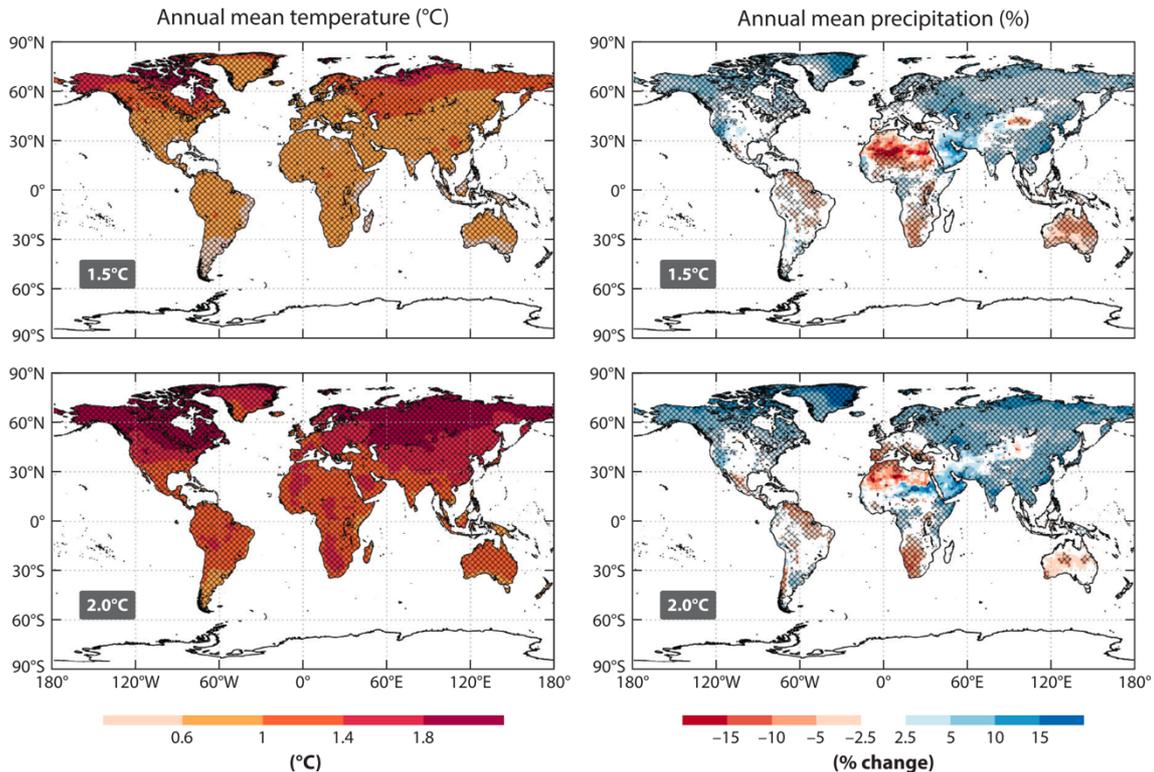


Abbildung 3: Änderungen in der jährlichen Mitteltemperatur (links) und Niederschlag (rechts) in HAPPI Simulationen für 1,5°C und 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Die Änderungen sind relativ zur HAPPI-Referenzperiode 2006-2015 angegeben (ca. 0,9°C über dem vorindustriellen Niveau). Quelle: Schleussner et al. (2018)

Für Niederschlagsextreme ist das Bild etwas differenzierter, sowohl in Bezug auf Vorzeichen als auch auf Signifikanz innerhalb eines Datensatzes, und Unterschiede zwischen den Datensätzen treten deutlicher zu Tage. Für Starkregen (Rx5day) werden in HAPPI Simulationen robuste Unterschiede für die Mehrzahl der Weltregionen gefunden, während für CMIP5 sind Änderungen in einer Vielzahl insbesondere tropischer Regionen nicht sind. Eine mögliche Erklärung dafür liegt in der unterschiedlichen Zusammensetzung der menschlichen Emissionen besonders im Anteil von Aerosolen. Bei den CMIP5-Läufen handelt es sich um transiente Simulationen. Für die Analysen wurden modellspezifische 20-Jahres-Fenster, in der Regel vor 2050, herangezogen, in denen 1,5°C bzw. 2°C wärmere Bedingungen herrschen als im vorindustriellen Klima. In diesen Zeitfenstern sind noch substantielle Aerosolemissionen zu verzeichnen. Die HAPPI-Simulationen hingegen sind auf das Ende des 21. Jahrhunderts angelegt, in denen Aerosolemissionen, wie auch die Emissionen anderer Treibhausgase weitestgehend zurückgefahren sind. Besonders in Regionen mit hohen Aerosolemissionen ist deren Effekt auf Änderungen in Extremniederschlägen sehr stark ausgeprägt (Samset et al. 2018).

Auch bezüglich von Trockenheit (CDD, Anzahl der aufeinanderfolgenden Tage mit einem Niederschlag <1mm) gibt es regionale Unterschiede. Eine robuste Zunahme von Trockenheit zeigt sich aber für beide Experimentprotokolle für die subtropischen Regionen wie den Mittelmeerraum (MED), Südafrika (SAF) und Südastralien (SAU).

Diese Änderungen sind weitestgehend konsistent mit den Änderungen der Jahresmittel von Temperatur und Niederschlag wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind. Diese spiegeln bekannte Muster wieder: Die polaren Regionen erwärmen sich stärker als der Durchschnitt und sehen, als Resultat dieser Erwärmung, ebenfalls eine robuste Zunahme in Niederschlagsmengen. Gleichzeitig nehmen die Niederschläge in den subtropischen Regionen ab (Knutti and Sedláček 2012).

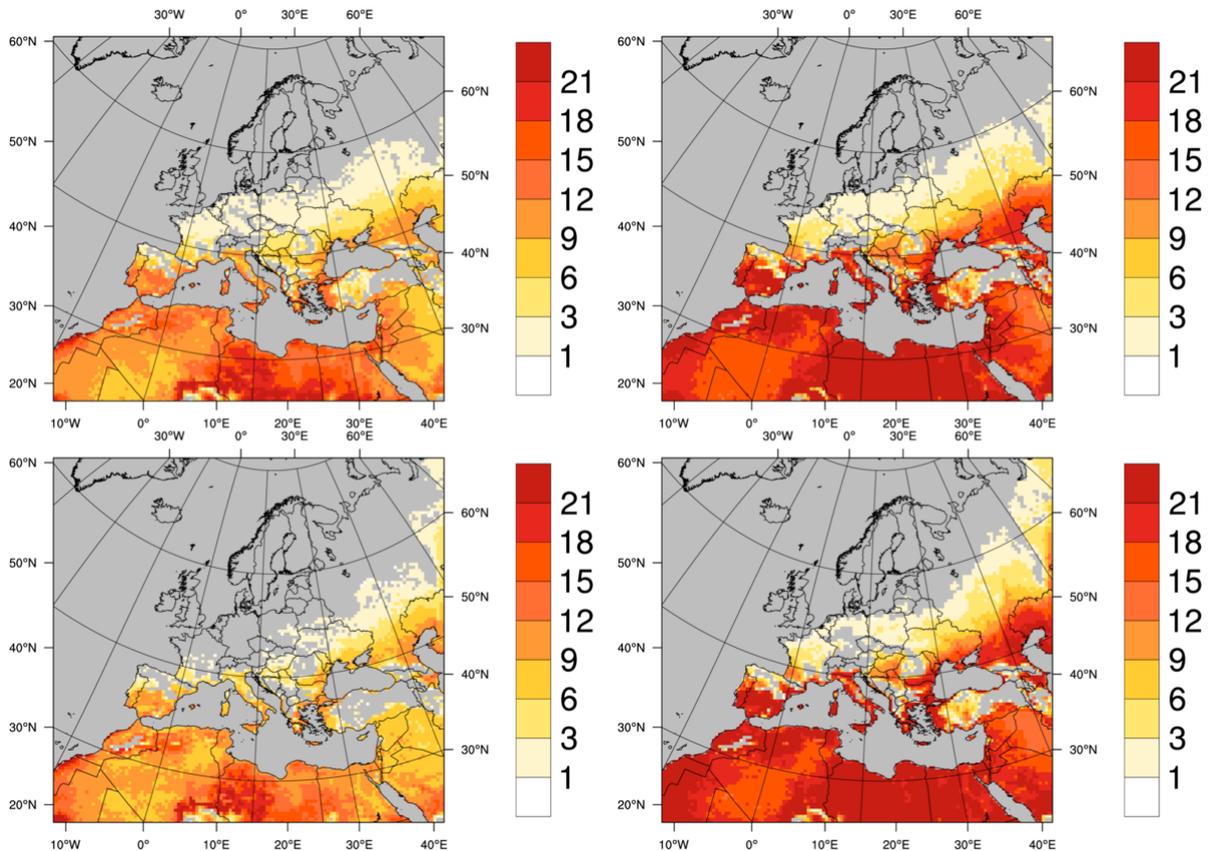


Abbildung 4: Änderung der Zahl der Tage pro Jahr mit einer gefühlten Temperatur über 28°C (nach Davies et al., 2016). Oben: auf ECHAM6-Daten basierende Regionalisierungen mit REMO. Unten: wie oben, aber basierend auf Nor-ESM-Daten. Die linke Spalte zeigt die Änderungen unter 1,5°C globaler Erwärmung; die rechte Spalte zeigt Änderungen unter 2°C Erwärmung (jeweils gegenüber dem vorindustriellen Niveau). Die Änderungen sind relativ zur der HAPPI-Referenzperiode 2006-2015 angegeben (ca. 0,9°C über dem vorindustriellen Niveau). Regionen mit weniger als 20 Tagen über dem Schwellenwert von 28°C und Meere sind in grau ausmaskiert.

Zusammenfassend lässt sich dennoch feststellen, dass wesentliche auch regionalen Veränderungen in den HAPPI Simulationen mit anderen Multimodellprojektionen wie CMIP5 übereinstimmen. Diese Konsistenz erlaubt es, mit Hilfe der HAPPI Ergebnisse allgemeinere Aussagen über klimatische Veränderungen für 1,5°C und 2°C globale Erwärmung zu treffen. Diese werden im Folgenden Abschnitt am Beispiel der spezifischen Ergebnisse des HAPPI-DE Konsortiums vorgestellt. Diese beziehen sich insbesondere auf regionale Simulationen und Analysen, sowie sektorale Klimafolgen. Aus dem Experimentprotokoll resultierende Einschränkungen werden gesondert im Abschnitt 3.3 diskutiert.

3.1 Regionale Klimaänderungen

3.1.1 Regionale Simulationen

Um eine detailliertere Betrachtung der Klimaänderungen für Europa zu ermöglichen, wurden im Rahmen von HAPPI-DE regionalisierte Klimasimulationen für Europa erstellt. Für die Regionalisierung wurde das regionale Klimamodell REMO (Jacob et al. 2012) verwendet. Als Antriebsdaten (Randbedingungen) wurden Ergebnisse zweier globaler Modelle ECHAM6 und Nor-ESM mit unterschiedlichen Ensemblegrößen benutzt. Der aus der Regionalisierung entstandene Datensatz ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Klimaänderung bei 1,5°C und 2,0°C globaler Erwärmung für Sub-Regionen in Europa.

Eine Evaluierung der Ergebnisse aus der Referenzperiode zeigt, dass das Klima in Europa durch die Regionalisierung zufriedenstellend wiedergegeben werden kann. Es treten jedoch

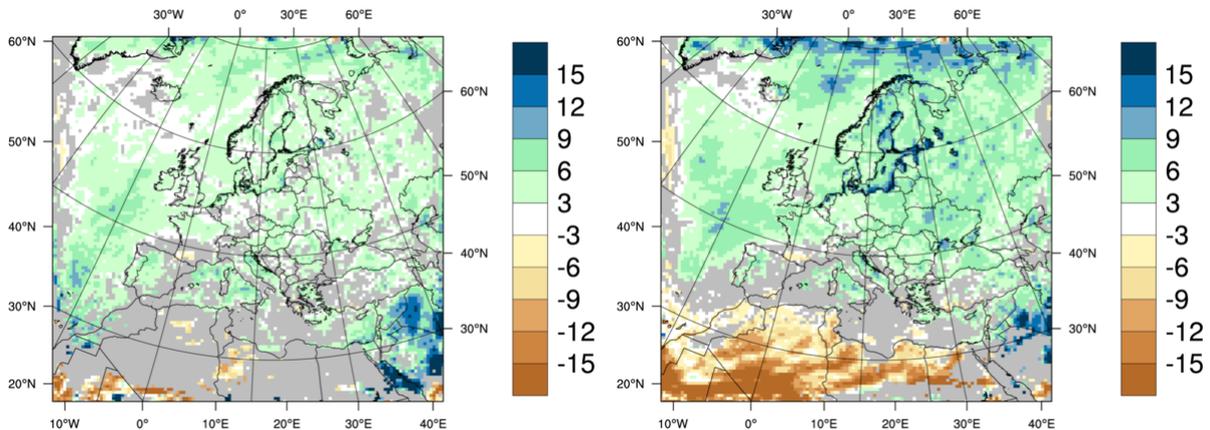


Abbildung 5: Änderungen der höchsten Niederschlagsmenge an 5 aufeinanderfolgenden Tagen (RX5day, in %) in den Regionalisierungen basierend auf ECHAM6-Daten. Grau schattiert dargestellt sind Regionen ohne signifikante Änderungen.

regionale Unterschiede auf. Während die Simulationen für Mitteleuropa recht gute Ergebnisse im Jahresgang der 2m-Temperatur liefern, kommt es im Mittelmeerraum generell zu einer Überschätzung, die besonders stark in den Sommermonaten ausgeprägt ist. Abhängig von der Anwendung der Daten kann in diesen Fällen eine Biaskorrektur notwendig werden (Vgl. Kapitel 3.2.1).

Bei der Betrachtung von abgeleiteten Klimaindizes wie der gefühlten Temperatur lässt sich gut erkennen, dass es deutliche Unterschiede zwischen der Zunahme der Tage mit einer gefühlten Temperatur oberhalb eines gesundheitlich kritischem Wertes ($>28^{\circ}\text{C}$, Davis et al. (2016)) zwischen $1,5^{\circ}\text{C}$ und $2,0^{\circ}\text{C}$ globaler Erwärmung gibt (vergleiche Abbildung 4). Besonders der Mittelmeerraum wäre von einer Verdoppelung in der Zunahme betroffen mit negativen Folgen für die Lebensqualität in diesen Regionen.

Auch für Indizes basierend auf dem Niederschlag lassen sich robuste Änderungen aus den regionalisierten HAPPI Simulationen ableiten. Für die größte Niederschlagsmenge an 5 aufeinanderfolgenden Tagen pro Jahr (RX5day) ergeben sich relative Zunahmen besonders für Nord-, Mittel- und Osteuropa von durchschnittlich 3-9% und stellenweise bis zu 15% bei 2°C Erwärmung (vergleiche Abbildung 5). Änderungen unter $1,5^{\circ}\text{C}$ globaler Erwärmung liegen teils deutlich darunter. Daraus ergeben sich Konsequenzen wie z.B. stärkere Überflutungen durch intensivere Regenfälle.

Neben den hier gezeigten Analysen erlauben diese regionalen Simulationen weitere tiefer gehende Studien zu den Klimafolgen in Europa bei $1,5^{\circ}\text{C}$ und 2°C globaler Erwärmung, wobei analog zu den globalen Simulationen die gleichen Einschränkungen gelten. Diese Einschränkungen werden in Abschnitt 4.1 diskutiert. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in HAPPI-DE ein Datensatz regionalisierter Klimasimulationen entstanden ist, der differentielle Aussagen über robuste Änderungen von heute gegenüber einer $1,5^{\circ}\text{C}$ oder 2°C wärmeren Welt auf regionaler Ebene in Europa ermöglicht.

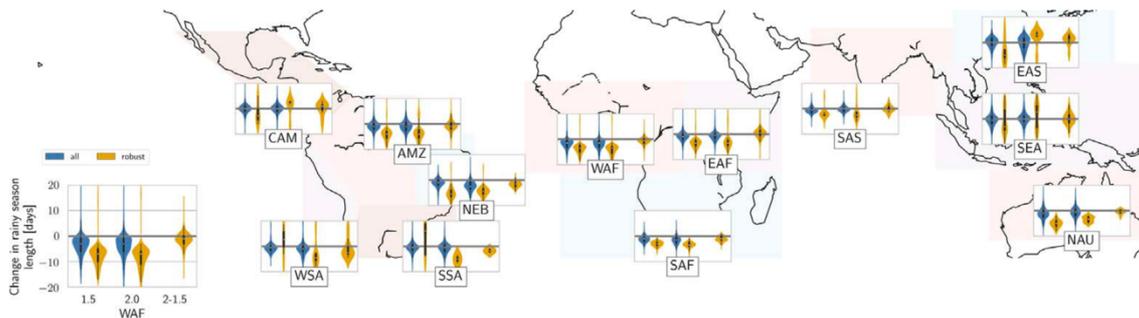


Abbildung 6: Änderungen in der jährlichen Länge der Regenzeit über den tropischen Regionen für 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung. Die mittleren Änderungen über die gesamte Landfläche der Regionen ist dabei in blau dargestellt, die Änderungen über Bereiche mit robusten Änderungen auf lokaler Ebene gelb. Die herausgehobene Abbildung unten links zeigt die Änderungen für West Afrika. Quelle: Saeed et al. (2018)

3.1.2 Dynamische Veränderungen

Neben thermodynamischen Veränderungen des Klimasystems sind dynamische Veränderungen wie die Verschiebung von Zirkulationsmustern ebenfalls von großer Relevanz für regionale Klimafolgen. Dies bezieht sich auch auf Veränderungen im Ablauf der Jahreszeiten. Diese werden im Kontext von Änderungen in den gemäßigten Breiten bereits untersucht (Cassou and Cattiaux 2016), allerdings gibt es nur wenige Analysen zu Änderungen in tropischen Regionen. Dabei sind die in den Tropen vorherrschenden Muster von ausgeprägten Trocken- und Regenzeiten von besonderer Bedeutung für sektorale Klimafolgen, speziell in der Landwirtschaft. Eine Herausforderung in der Untersuchung solcher Veränderungen ist dabei unter anderem das substantielle statistische Rauschen in der Analyse von saisonalen Verschiebungen. Mit den HAPPI multi-ensemble Simulationen, die hunderte von Jahren bei quasi-stationären Klimabedingungen bereitstellen, lassen sich Studien zur Veränderung in der Saisonalität verlässlich durchführen.

Im Rahmen von HAPPI-DE wurden Veränderungen in der Saisonalität in tropischen Regionen untersucht (Saeed et al. 2018a). Dazu wurde eine etablierte Methode zur Bestimmung von Saisonalität über den Beobachtungszeitraum für Projektionen angepasst (Liebmann et al. 2008), verifiziert und dann für 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung angewandt. Die Ergebnisse deuten auf eine deutliche Verkürzung der Regenzeit in Teilen der Tropen, insbesondere in Nordostbrasilien und Westafrika hin (siehe Abbildung 4). Für ungefähr ein Viertel der westafrikanischen Landmasse wird dabei eine Verkürzung der Regenzeit um ca. 7 Tage unter 1,5°C Szenarien projiziert. Für 2°C ist eine Verstärkung und Verfestigung der Trends bei 1,5°C zu verzeichnen.

Diese Änderungen gehen in den meisten Regionen nicht mit einer Abnahme des jährlichen Niederschlages einher. Diese kürzere aber stärkere Regenzeit hat direkte Klimafolgenrelevanz für die Landwirtschaft und den regionalen Wasserhaushalt. Dass solche Veränderungen, wie in der Literatur meist üblich, durch Analysen der Niederschlagsmengen allein nicht detektiert werden können, unterstreicht die Relevanz der Analysen in Saeed et al. (2018).

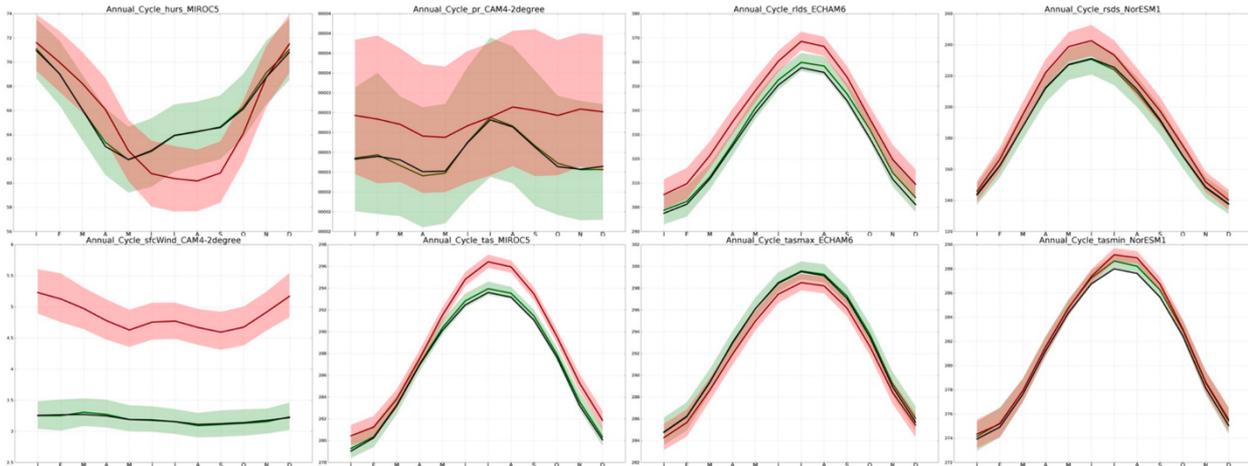


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Effekte der Bias Korrektur für 4 Klimamodelle (MIROC5, CAM4, ECHAM6, NorESM1) und eine Auswahl der korrigierten Variablen (globales Landmittel). Schwarz zeigt den Jahresgang im EWEMBI Reanalysedatensatz (2001-2010), gegen den die Bias Korrektur durchgeführt wurde. Die Modellprojektionen über die 2006-2015 Periode werden für das unkorrigierte 20-Simulationen Ensemble in rot dargestellt (Schattierung zeigt die Ensemblestreuung, die Kernlinie den Median), in grün für die Bias-korrigierte Version. Quelle: Saeed et al. (2018b)

3.2 Sektorale Klimafolgen

Ein Fokus des HAPPI-DE Projektes lag auf dem Studium der sektoralen Klimafolgen, insbesondere im Wasser- und Landwirtschaftssektor. Um die Anschlussfähigkeit und Vergleichbarkeit zu maximieren, wurden die Daten dafür gemäß des Protokolls des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Projects (ISIMIP) aufbereitet (Lange 2017). Das erlaubt eine direkte Nutzbarkeit der Daten für andere Forschungsgruppen und Sektoren. Diese Daten haben damit bereits Eingang in regionale Studien von sektoralen Folgen gefunden (Faye et al. 2018) und Analysen in Arbeit beinhalten unter anderem die globale Biosphärenfolgen, sowie spezifische Ökosystemstudien. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Datenaufbereitung und Biaskorrektur sowie die sektoralen unter HAPPI-DE durchgeführten Studien vorgestellt werden.

3.2.1 Ergebnisse der Biaskorrektur

Obwohl Klimamodelle in ihrer Gesamtheit beobachtete Klimaveränderungen gut widerspiegeln, gibt es dennoch Abweichungen in den absoluten Werten gegenüber den Beobachtungen für regionale und variablenspezifische Simulationen. Für Analysen der Klimaveränderungen (in der Regel gegenüber einer Referenzperiode nach 1950) fallen solche absoluten Abweichungen nicht ins Gewicht, für die Modellierung von sektoralen Klimafolgen aber durchaus. Für die Anwendung von Klimamodellprojektionen ist daher eine Korrektur solcher systematischen Abweichungen (Englisch: Bias) nötig.

Für HAPPI-DE wurde dabei die trenderhaltende ISIMIP Biaskorrektur eingesetzt, eine etablierte Methode für die Datenaufbereitung von Klimafolgen (Lange 2017). Neben Niederschlag und Temperaturdatensätzen wurden dabei außerdem klimafolgenrelevante Indikatoren wie Windgeschwindigkeiten und Lang- und Kurzwellenstrahlung korrigiert (Saeed et al. 2018b). Die Ergebnisse dieser Korrektur sind exemplarisch in Abbildung 7 dargestellt.

Neben der Minimierung systematischer Abweichungen lag der Fokus dieser Korrektur auf der Frage, ob die stochastische Natur des Modellensembles auch nach der Korrektur erhalten bleibt. Im Rahmen von HAPPI-DE wurde diese Methode erstmals auf Modellensembles mit multiplen Realisierungen (N=20) angewandt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die stochastische Variabilität des Modellensembles durch die Biaskorrektur nicht beeinträchtigt

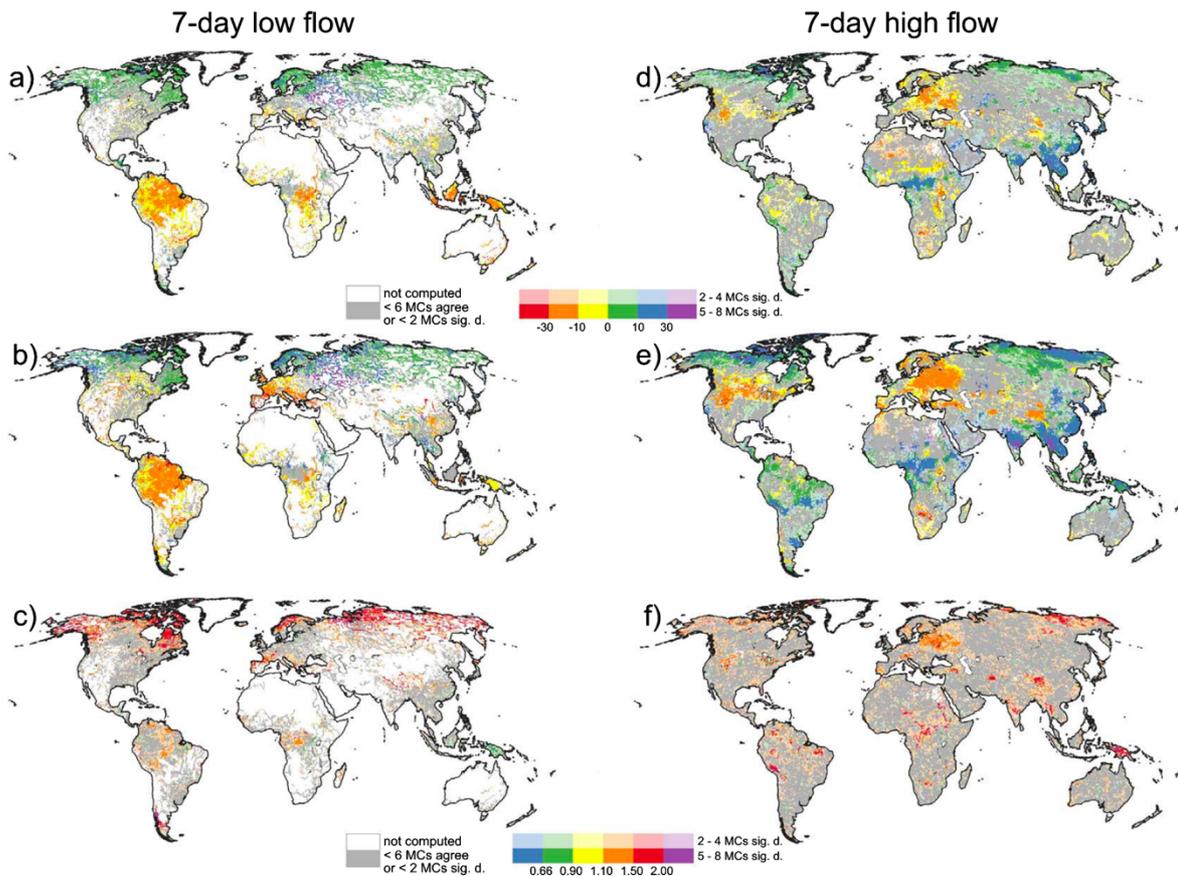


Abbildung 8: Prozentuale Änderungen von jährlichen Niedrigwasser- (7-Tages-Minimum, links) und Hochwasserdurchflüssen (jährliches 7-Tages-Maximum, rechts) für 1,5°C (oben), 2°C (Mitte) relativ zur 2006-2015 Referenzperiode. Das untere Panel zeigt Regionen mit robuster Verstärkung des Signals zwischen 1,5°C und 2°C. Volltonfarben markieren dabei Regionen, in denen mindestens fünf Modellkombinationen aus Klima und hydrologischen Modellen (4 Klimamodelle, 2 hydrologische Modelle) mit dem Vorzeichen der Änderung übereinstimmen und jeweils einzeln statistisch signifikante Änderungen zeigen. Abgeschwächte Farben zeigen die Änderungen lediglich für 2-4 Kombinationen statistisch signifikant sind. In grauen Regionen gibt es unzureichende Übereinstimmungen im Modellensemble und in weißen Regionen wurde der jeweilige Indikator nicht berechnet. Quelle: Döll et al. (2018)

wird (vergleiche Abbildung 7 insbesondere für den jährlichen Niederschlag). Dadurch kann die Ensemblevariabilität auch in den Klimafolgensimulationen analysiert werden.

3.2.2 Der Wassersektor

Basierend auf den bias-korrigierten Simulationen für vier Klimamodelle mit jeweils 20 Simulationenläufen (also 200 Modelljahre für 2006-2015, 1,5°C und 2°C pro Modell) wurde eine Analyse für Änderungen des globalen Wassersektors mit den Modellen WaterGAP (im Rahmen von HAPPI-DE) und LPJmL (in Kollaboration) durchgeführt (Döll et al. 2018). Dabei wurden Indikatoren analysiert, die sowohl Änderungen im jährlichen Mittel als auch für Extremereignisse, Bodenfeuchte in der Wachstumsperiode sowie der Schneespeicher repräsentieren. Während für die hohen nördlichen Breiten sowie die süd(ost)asiatischen Regionen generell eine Zunahme von Wasserverfügbarkeit unter 1,5°C globaler Erwärmung und eine weiter Zunahme unter 2°C projiziert wird, zeigt das Signal eine Abnahme der Wasserverfügbarkeit in anderen, speziell subtropischen Regionen wie der Mittelmeerraum, Zentral- und nördliches Südamerika, Südafrika und südliches Australien. Diese Verteilungen zeigen sich auch in den Durchflussextremen, wie exemplarisch in Abbildung 8 für jährliche Niedrig- und Hochwasserdurchflüsse dargestellt.

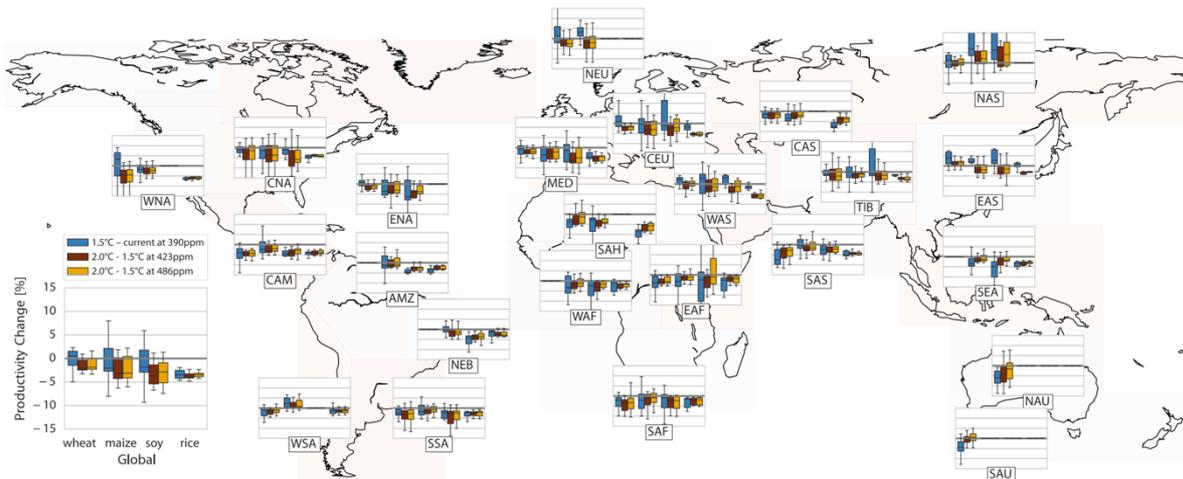


Abbildung 9: Der Effekt von 0.5°C Erwärmung auf die Produktivität von Weizen, Mais, Soja und Reis. Die Projektionen sind dabei auf heutige Flächen und Anbaupraktiken beschränkt. Regionen ohne wesentliche Produktion bestimmter Erzeugnisse werden daher nicht aufgeführt. Quelle: Schleussner et al. (2018b)

Änderungen sind besonders ausgeprägt für Länder mit niedrigen bzw. niedrig-bis-mittlerem Einkommen in tropischen Regionen. Dies gilt für die Zunahme von Hochwasserdurchflüssen in Süd(ost)asien gleichermaßen wie für zunehmende Trockenheit in subtropischen Regionen. Neben der Verstärkung des Signals nimmt bei Vergleich zwischen den Änderungen bei 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung auch insgesamt die Fläche zu, auf der signifikante Änderung der Durchflussexremen zu erwarten sind. So wurde eine signifikante Zunahme von Hochwasserdurchflüssen auf 11% der Landoberfläche bei 1,5°C und 21% bei 2°C globale Erwärmung simuliert. Ebenso ist die Fläche auf der das Bodenfeuchteminimum in der Wachstumsperiode abnimmt, ein wichtiger Indikator für nichtbewässerte Landwirtschaft, bei 2°C globale Erwärmung deutlich größer als bei 1,5°C (17% bzw. 12% der globalen Landfläche).

3.2.3 Der Landwirtschaftssektor

Ebenso wie für die Modellierung der hydrologischen Folgen konnte durch den Ansatz der ISIMIP-kompatiblen Datenaufbereitung eine direkte Anschlussfähigkeit an Landwirtschaftsmodelle hergestellt werden. Insbesondere konnte hierbei die Partizipation von sieben Modellierungsgruppen des globalen Landwirtschaftsmodellierungsprojektes (GGCMI, Müller et al 2017) gewonnen werden. Die Datenbasis für die Analysen der Klimafolgen bei 1,5°C und 2°C ist dabei außergewöhnlich robust.

Darüber hinaus konnte in der, im Rahmen von HAPPI-DE, durchgeführten Analyse der Effekt von Erwärmung und Anstieg der CO₂ Konzentration separat untersucht werden. Diese Erweiterung des Simulationsprotokolls lieferte wichtige Erkenntnisse bezüglich der Bedeutung der klimatischen- und konzentrationsbedingten Veränderungen. Die Effekte von 0.5°C Erwärmung auf die landwirtschaftliche Produktion sind in Abbildung 9 für unterschiedliche CO₂ Konzentrationen dargestellt (Schleussner et al. 2018). Eine Erwärmung um 0.5°C geht dabei mit einer robusten Abnahme für Mais, Soja und Reis im globalen Maßstab einher. Die Abnahme in tropischen Regionen ist besonders ausgeprägt.

Basierend auf Feldexperimenten projizieren die meisten Landwirtschaftsmodelle eine Zunahme der landwirtschaftlichen Produktivität mit erhöhten atmosphärischen CO₂ Konzentrationen. Die Stärke des CO₂ Düngungseffekt ist unsicher und variiert stark zwischen den Modellen, ist aber generell stärker ausgeprägt bei Nutzpflanzen des C3-typs (Weizen, Reis und Soja). Die projizierten positiven Effekte der mit einer Erwärmung von 0.5°C einhergehenden CO₂ Konzentrationsänderungen können dabei die Erwärmungseffekte im globalen Maßstab teilweise aufheben oder sogar übertreffen. Da aufgrund geophysikalischer

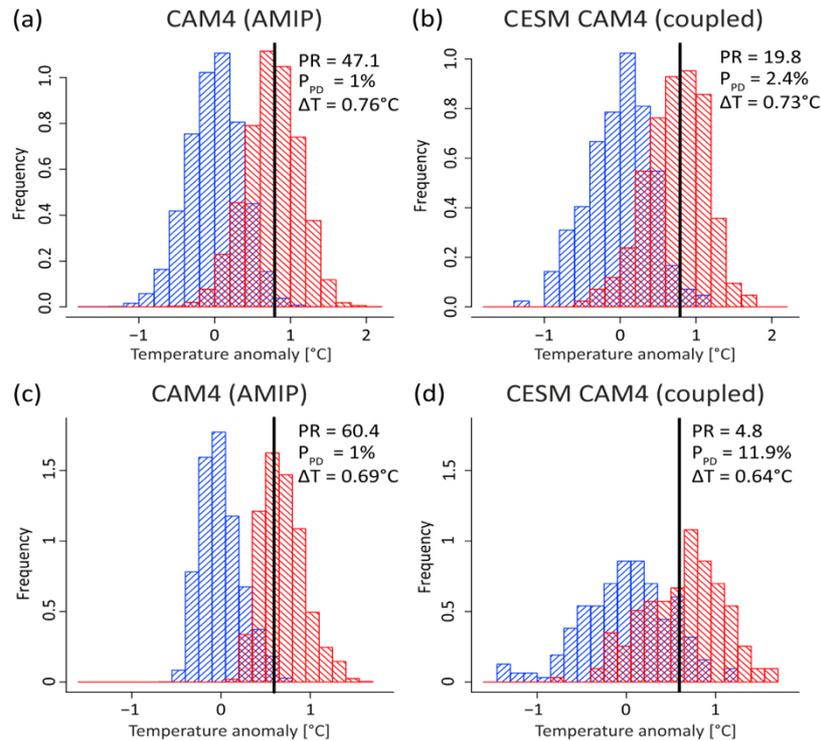


Abbildung 10: Wahrscheinlichkeitsraten (Probability ratios, PR) für jährliche Mitteltemperaturen über Europa (a, b, 30–75°N, 10°W to 40°E) und Ostafrika (c,d, 22–52°E, 12°S to 18°N) für die 2006-2015 Periode (blau) und 1,5°C (rot). Dabei werden reine Atmosphärensimulationen gemäß des HAPPI Protokolls (a,c, AMIP, 500 x 10 Jahre) mit vollgekoppelten Ozean-Atmosphärensimulationen (b,d, 21 x 10 Jahre) verglichen. Die atmosphärische Komponente ist dabei in beiden Modellen gleich (CAM4: Community Atmosphere Model version 4), das gekoppelte Modell ist CESM = Community Earth System Model. Quelle: Fischer et al. (2018)

Unsicherheiten und Unterschieden in Klimatreibern die CO₂ Konzentrationen für Erwärmungsniveaus nicht deutlich eingegrenzt sind, können die Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft mit einem Erwärmungsniveau allein nicht ausreichend beschrieben werden (Schleussner et al. 2018). Dies gilt speziell, wenn die Klimaantwort des Systems gegenüber einem CO₂ Konzentrationsanstieg hoch ist (also eine starke Erwärmung) und die Folgen für den Landwirtschaftssektor besonders ausgeprägt sind.

3.3 Sensitivitätsstudien zum Experimentprotokoll

Die für den Landwirtschaftssektor gefundene Abhängigkeit der differenziellen Klimafolgen bei 0.5°C zusätzlicher Erwärmung von anderen Faktoren (wie z.B. der CO₂ Konzentration) zeigt neben den vielen Vorteilen der globalen Mitteltemperatur als Klimaziel auch die Grenzen dieses Konzeptes auf. Neben der Herausarbeitung solcher fundamentaler Klimasystemeigenschaften gilt es unter anderem, die Abhängigkeit der Ergebnisse von den jeweiligen Simulationsprotokollen kritisch zu überprüfen.

Im Rahmen von HAPPI wurden entsprechende Analysen für die Rahmenbedingungen der 10-Jahres Ozeanoberflächentemperaturen (2006-2015) durchgeführt, die beispielsweise auch kein starkes El Niño Ereignis beinhalten. Das Auftreten multidekadischer natürlicher Variabilität (Medhaug et al. 2017) ist auf diesen Zeitskalen hingegen substantiell (Henley and King 2017), und die Bedeutung für bestimmte Analysemethoden muss untersucht werden. In einer Sensitivitätsstudie zum HAPPI Protokoll wurde mit dem CESM-CAM4 Modell ein. Es erlaubt einen Vergleich der Ergebnisse hergeleitet aus einem Ensemble gekoppelter Simulationen mit denen hergeleitet aus HAPPI-Simulationen. Abbildung 10 zeigt z.B. die Änderungen in der jährlichen Mitteltemperatur der beiden Ensembles für die Referenzperiode und 1,5°C globale Erwärmung für Europa und Ostafrika (als gemäßigte Breiten und Tropenreferenz mit geringem und hohem Einfluss des El Niño Phänomens). Während die

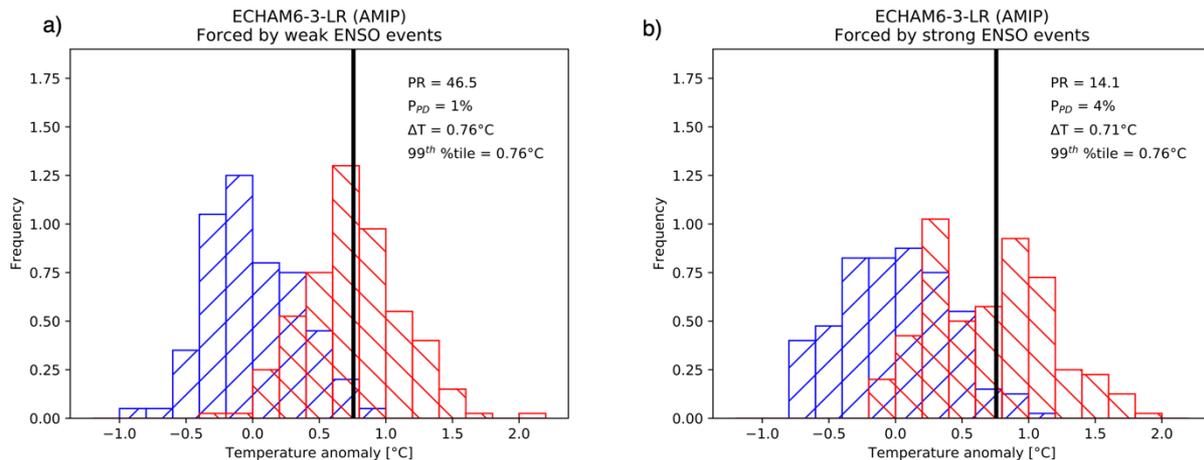


Abbildung 11: Verteilung der jährlichen Mitteltemperatur über Ostafrika wie in Abbildung 10, aber für das Atmosphärenmodell ECHAM6.3-LR für die Referenzperiode 2006-2015 (blau) und 1,5°C globale Erwärmung (rot). a) Die Verteilung für ein Experiment mit schwacher ENSO Aktivität. b) Die Verteilung für ein Experiment mit starker ENSO Aktivität. Die schwarze Linie markiert die 1-in-100 Jahresperzentile des schwachen Experimentes, das auch die Basis für die berechnete Änderung der Wahrscheinlichkeitsraten (PR) bildet.

mittleren Änderungen gut vergleichbar sind, ist die Streuungsbreite insbesondere für Ostafrika für HAPPI wesentlich kleiner als im gekoppelten Fall (vergleiche Abbildung 8c) und d)). Dies gilt sowohl für die Referenzperiode als auch für 1,5°C Projektionen. Diese nur eingeschränkte Abbildung der natürlichen Variabilität hat direkte Konsequenzen für bestimmte Anwendungen, wie beispielsweise die Ereignisattribution (Otto et al. 2016). Folglich werden die Wahrscheinlichkeitsraten (Probability ratios, PR) für bestimmte Ereignisse in HAPPI systematisch zu hoch abgebildet.

Beispielhaft kann dies an einem mit HAPPI definierten 1-in-100 Jahresereignis in der Referenzperiode 2006-2015 dargestellt werden (markiert durch die schwarze Linie in Abbildung 10). Dieses Ereignis ist bereits im vollgekoppelten ostafrikanischen Fall (vergleiche e.g. Abbildung 8c) und d)) nur ungefähr ein 1-in-10 Jahre Ereignis. Die PR für 1,5°C globale Erwärmung ist 60% für das HAPPI Experiment (also 60% aller Jahre unter 1,5°C Konditionen wären wärmer als das Referenzjahr), jedoch nur 5% im vollgekoppelten Fall.

Das weist auf eine wesentliche Einschränkung in den Interpretationsmöglichkeiten der HAPPI Simulationen bezüglich bestimmter Extremereignisse insbesondere für tropische Regionen mit starkem Einfluss der El Niño Oszillation (ENSO) hin. Da gemäß des Simulationsprotokolls nur die natürliche Variabilität von 10 Jahren abgebildet wird, können nicht ohne Weiteres allgemeinere Aussagen daraus abgeleitet werden. Die HAPPI Simulationen bei 1,5°C und 2°C globaler Erwärmung bilden nicht die volle Variabilität zukünftiger Welten ab, sondern die Konditionen der letzten Dekade in einer 1,5°C oder 2°C Welt. Dies ist kein „Fehler“ des Protokolls, sondern eine wichtige Kategorisierung für die Interpretation von Simulationen mit vorgeschriebenen ozeanischen Randbedingungen wie HAPPI. Dies gilt besonders, wenn die Änderungen von beobachteten Extremwetterereignissen unter zukünftigen klimatischen Konditionen erfasst werden sollen.

Diese Unterscheidung ist speziell für tropische Regionen von Bedeutung, wo ozeanische Variabilität zB. in Verbindung mit dem ENSO Phänomen von besonderer Bedeutung ist. Für Europa (Abbildung 10 a), b)) sind die Unterschiede weniger stark ausgeprägt. Gleichzeitig stellt sich die Frage, wie die Bedeutung von natürlicher Variabilität in zukünftigen Modellsimulationen im HAPPI Stil besser abgebildet werden kann. Dazu wurden im Rahmen von HAPPI-DE Simulationen mit dem ECHAM6 Atmosphärenmodell und unterschiedlichen El Niño Ozeanbedingungen durchgeführt, die darüber Aufschluss geben können.

In diesen Simulationen basieren die Randbedingungen an der Ozeanoberfläche nicht auf den AMIP-Daten und den Ergebnissen des CMIP5-Modellensembles, sondern ausschließlich auf

den Daten, die von MPI-ESM-LR, dessen Atmosphärenkomponente ECHAM6 ist, im CMIP5-Experiment RCP2.6 erzeugt wurden. Dazu wurde eine 10-Jahres-Zeitspanne ausgewählt, in denen eine Realisation jeweils besonders starke und eine andere besonders schwache ENSO-Aktivität simuliert hat, in der das Klima weitgehend stabil ist und einer Erwärmung von ungefähr 1,5°C gegenüber dem vor-industriellen Klima entspricht. Zusätzlich wurden 2 Kontrollexperimente definiert, deren Meereisbedeckung und Meerestemperaturen die Anomalien der zuvor erwähnten zwei Realisationen haben. Für jedes dieser Experimentpaare sind gegenwärtig je 20 Simulationen durchgeführt, mit denen sich die Auswirkung der in den AMIP-Daten von 2006-2015 schlecht abgebildeten ENSO-Aktivität untersuchen lässt.

Abbildung 11 stellt die Ergebnisse der Simulationen mit starker und schwacher ENSO Aktivität gegenüber. Die Simulationen mit schwacher ENSO Aktivität sind dabei ähnlich den HAPPI Experimenten, die ebenfalls eine schwache ENSO Aktivität vorweisen. Die Experimente mit starker ENSO Aktivität zeigen eine deutlich verbreiterte natürliche Variabilität über der Referenz- wie auch der 1,5°C-Periode gegenüber den Experimenten mit schwacher Aktivität und dementsprechend auch einen geringeren Anstieg der Wahrscheinlichkeitsraten. Auch wenn damit noch nicht die volle Variabilität der gekoppelten Atmosphären-Ozeansimulationen abgedeckt ist (Vergleiche Abbildung 10), so können mit einer Erweiterung dieser Art dennoch bereits deutliche Fortschritte in der Repräsentation der natürlichen Variabilität in HAPPI-artigen Experimenten erzielt werden.

4 HAPPI-DE im Kontext des 1,5°C Sonderbericht

Ein Fokus des IPCC Sonderberichts über 1,5°C globaler Erwärmung liegt auf den Klimafolgen bei 1,5°C globaler Erwärmung, sowie den Unterschieden, die sich aus weiteren 0,5°C zwischen 1,5°C und 2°C ergeben. Die im Rahmen des internationalen HAPPI Projektes entstandenen Publikationen haben im besonderen Maße zur wissenschaftlichen Literaturlbasis für diesen Bericht beigetragen.

Insbesondere hat der SR1.5 Aussagen mit hoher Sicherheit zu Änderungen in Extremereignissen sowie regionalen Klimaveränderungen getroffen, zu deren Konsolidierung die HAPPI Ergebnisse entscheidend beigetragen haben.

4.1 Ergebnisse von HAPPI-DE und die Gründe zur Besorgnis

Ein zentrales Syntheseprodukt des IPCC sind die sogenannten „Gründe zur Besorgnis“ (Reasons for Concern, RFCs), die seit dem 3. Sachstandsbericht Teil der IPCC Aussagen sind. Das Ziel der RFCs ist es, die Vielzahl an Klimafolgen in Schlüsselkategorien zusammenzufassen, die dann eine informative Basis für die Risikobewertung von Entscheidungsträgern bilden können.

Five Reasons For Concern (RFCs) illustrate the impacts and risks of different levels of global warming for people, economies and ecosystems across sectors and regions.

Impacts and risks associated with the Reasons for Concern (RFCs)

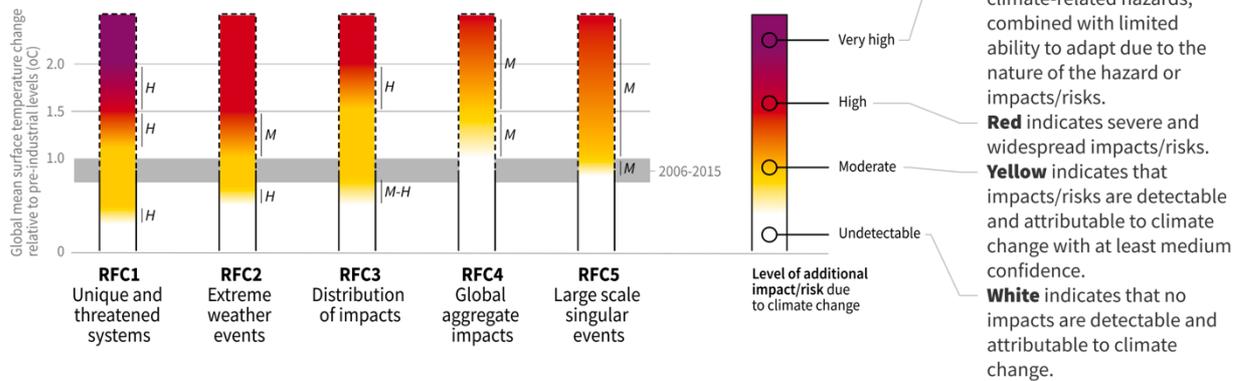


Abbildung 12: Eine Übersichtsdarstellung der Änderungen im Klimafolgen, der sogenannten „Gründe zur Besorgnis“ (Reasons for Concern, RFCs) des IPCC Sonderberichtes zu 1,5°C. Quelle: IPCC (2018)

Die 5 Kategorien der RFCs sind:

- 1. Einzigartige und bedrohte Systeme.** Beinhaltet besonders vulnerable Ökosysteme wie tropische Korallenriffe oder tropische Regenwälder, ebenso wie sozial-ökologische Systeme wie indigene Gruppen (beispielsweise in der Arktis) oder Bewohner von kleinen Inseln.
- 2. Extremwetterereignisse.** Fasst die Risiken von Extremwetterereignissen zusammen.
- 3. Verteilung der Klimafolgen.** Fasst regionale Unterschiede in Klimafolgen, wie z.B. Nahrungsmittelproduktion, Wasserverfügbarkeit, Meeresspiegelanstieg, sowie Extremereignissen zusammen.
- 4. Global aggregierte Klimafolgen.** Schätzt globale Kosten von Klimaschäden, wie auch von Risiken für die globale Biosphäre ab.
- 5. Großskalige Einzelereignisse.** Fasst Risiken für das Erreichen von Kipppunkten des Klimasystems wie das des grönländischen Eisschildes oder der Ozeanzirkulationen zusammen.

Seit ihrer Einführung im dritten Sachstandsbericht des IPCC wurden die Risikoschwellen RFCs mit jeder Aktualisierung auf niedrigere Niveaus korrigiert (Smith et al. 2009; Oppenheimer et al. 2014). Dies ist im Einklang mit der Entwicklung der Erkenntnisse der Klimaforschung, die die Schwere von Klimafolgen bei immer niedrigeren Erwärmungsniveaus betont. Die Analyse der RFCs des 1,5°C Sonderberichtes ist in Abbildung 12 dargestellt. Diese Analyse ist eine Aktualisierung der Analyse des 5. Sachstandsberichts (Oppenheimer et al. 2014), mit einem Fokus auf 1,5°C und 2°C globale Erwärmung. Basierend auf neuen Erkenntnissen sowie einer gezielten Analyse bezüglich dieser Erwärmungsniveaus (und nicht, wie im AR5 für bis zu 4°C globale Erwärmung und mehr) hat zu neuen Bewertungen bezüglich der Klimarisiken zwischen 1,5°C und 2°C geführt. Insbesondere ist die Grenze für „hohe Risiken“ für 4 der 5 RFCs um mindestens 0,5°C gesenkt worden (IPCC 2018). Die Analysen des HAPPI und HAPPI-DE Projektes haben dabei besonders zu der Bewertungsbasis für RFC 2, Extremwetter, und RFC3, regionale Verteilung beigetragen.

Insgesamt wurden HAPPI Simulationen in über 25 Publikationen² für den IPCC Sonderbericht analysiert. Unter Beteiligung von Partnern des HAPPI-DE Projektes wurden insgesamt 11

² Vergleiche: <http://www.happimip.org/publications/>

Tabelle 1: Übersicht der Publikationen mit Beteiligung von HAPPI-DE Konsortiumspartnern.

Vicedo-Cabrera, A. M. et al. Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios. <i>Clim. Change</i> 1–12 (2018). doi:10.1007/s10584-018-2274-3
Fischer, E. M., Beyerle, U., Schleussner, C. F., King, A. D. & Knutti, R. Biased Estimates of Changes in Climate Extremes From Prescribed SST Simulations. <i>Geophys. Res. Lett.</i> 1–10 (2018). doi:10.1029/2018GL079176
Schleussner, C.-F. et al. 1.5°C Hotspots: Climate Hazards, Vulnerabilities, and Impacts. <i>Annu. Rev. Environ. Resour.</i> 43, 135–163 (2018).
Saeed, F. et al. Bias correction of multi-ensemble simulations from the HAPPI model intercomparison project. <i>Geosci. Model Dev. Discuss.</i> 2018, 1–23 (2018).
Saeed, F. et al. Robust changes in tropical rainy season length at 1.5 °C and 2 °C. <i>Environ. Res. Lett.</i> 13, 064024 (2018).
Seneviratne, S. I. et al. The many possible climates from the Paris Agreement’s aim of 1.5 °C warming. <i>Nature</i> 558, 41–49 (2018).
Schleussner, C.-F. et al. Crop productivity changes in 1.5 °C and 2 °C worlds under climate sensitivity uncertainty. <i>Environ. Res. Lett.</i> 13, 064007 (2018).
Döll, P. et al. Risks for the global freshwater system at 1.5 °C and 2 °C global warming. <i>Environ. Res. Lett.</i> 13, 044038 (2018).
Seneviratne, S. I. et al. Climate extremes, land–climate feedbacks and land-use forcing at 1.5°C. <i>Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.</i> 376, 20160450 (2018).
Rosenzweig, C. et al. Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5°C and 2.0°C assessments. <i>Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.</i> 376, 20160455 (2018).
Faye, B. et al. Impacts of 1.5 versus 2.0°C on cereal yields in the West African Sudan Savanna. <i>Environ. Res. Lett.</i> 1–23 (2018). doi:10.1016/j.memsci.2007.03.020

Publikationen erarbeitet (teilweise auch nach dem Stichtag der Literaturannahme für den Sonderbericht). Diese sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

5 Ausblick

Die Vielzahl der HAPPI Studien haben gezeigt, wie differenziert die Klimafolgen auch für 0,5°C globaler Erwärmung zu betrachten sind. Dabei gilt es, sektorale sowie regionale differenzierte Folgen in den Blick zu nehmen. Dieses Forschungsfeld wird sich in der Zukunft noch weiterentwickeln, speziell im Hinblick auf die Analyse von differenziellen Klimafolgen für höhere Erwärmungsniveaus. Die gegenwärtigen weltweiten Klimaschutzmaßnahmen würden zu einer Erwärmung zwischen 3°C und 3,5°C bis 2100 führen (Rogelj et al. 2016). Das Aufzeigen von Unterschieden in Klimafolgen zwischen 3°C, 2,5°C mit Vergleichen zu 1,5°C bzw. 2°C globaler Erwärmung werden daher von besonderer Bedeutung auch für den kommenden sechsten Sachstandsbericht des IPCC sein.

Gleichzeitig konnten relevante Erkenntnisse aus der Art des Multiensemble-Studiendesigns gewonnen werden. Die Nutzung großer Ensembles ist in Analysen der sektoralen Klimafolgen noch wenig etabliert, obwohl sie für anpassungsrelevante Forschungsprojekte in den kommenden Jahrzehnten von großer Bedeutung sein können. Zusätzlich haben sich weitere Forschungsbedarfe bezüglich des Modelldesigns ergeben, zum Beispiel wie in vergleichbaren Studien zukünftig mit multidekadischer natürlicher Variabilität umzugehen ist.

Die Klima(folgen)forschung hat nach dem Pariser Abkommen eine doppelte Herausforderung zu meistern. Zum einen werden präzise Informationen zu bestimmten Niveaus globaler Erwärmung weiter eine wichtige Rolle spielen, um robuste Informationen über die vermiedenen Klimafolgen bei größeren Anstrengungen zur Begrenzung der Klimaerwärmung bereitzustellen. Der Fokus solcher Analysen ist in der Regel regional bis global und auf den Zeitraum ab 2050 ausgerichtet. Zum anderen werden „Climate Services“ unter anderem benötigt, um die Implementierung von Anpassungsstrategien und -maßnahmen zu informieren. Der Fokus solcher Analysen ist naturgemäß lokal bis regional und in der Regel auf die nächsten Jahrzehnte angelegt. Das Experimentdesign der HAPPI Studien ist geeignet, beide Fragestellungen zu adressieren. Somit werden Multiensemble Simulationen auch über den Sonderbericht über 1,5°C globale Erwärmung hinaus eine Rolle spielen.

Referenzen

- Cassou C, Cattiaux J (2016) Disruption of the European climate seasonal clock in a warming world. *Nat Clim Chang* 1–6. doi: 10.1038/nclimate2969
- Davis RE, McGregor GR, Enfield KB (2016) Humidity: A review and primer on atmospheric moisture and human health. *Environ Res* 144:106–116. doi: 10.1016/j.envres.2015.10.014
- Döll P, Trautmann T, Gerten D, et al (2018) Risks for the global freshwater system at 1.5 °C and 2 °C global warming. *Environ Res Lett* 13:044038. doi: 10.1088/1748-9326/aab792
- Faye B, Webber H, Naab JB, et al (2018) Impacts of 1.5 versus 2.0°C on cereal yields in the West African Sudan Savanna. *Environ Res Lett* 1–23. doi: 10.1016/j.memsci.2007.03.020
- Fischer EM, Beyerle U, Schleussner CF, et al (2018) Biased Estimates of Changes in Climate Extremes From Prescribed SST Simulations. *Geophys Res Lett* 1–10. doi: 10.1029/2018GL079176
- Hare WL, Cramer W, Schaeffer M, et al (2011) Climate hotspots: key vulnerable regions, climate change and limits to warming. *Reg Environ Chang* 11:1–13. doi: 10.1007/s10113-010-0195-4
- Henley BJ, King AD (2017) Trajectories toward the 1.5°C Paris target: Modulation by the Interdecadal Pacific Oscillation. *Geophys Res Lett* 44:4256–4262. doi: 10.1002/2017GL073480
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Cambridge Univ. Press
- IPCC (2018) *Global Warming of 1.5 °C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*
- Jacob D, Elizalde A, Haensler A, et al (2012) Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. *Atmosphere (Basel)* 3:181–199
- Knutti R, Sedláček J (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat Clim Chang* 3:369–373. doi: 10.1038/nclimate1716
- Lange S (2017) Bias correction of surface downwelling longwave and shortwave radiation for the EWEMBI dataset. *Earth Syst Dyn Discuss* 2017:1–30. doi: 10.5194/esd-2017-81
- Liebmann B, Bladé I, Bond NA, et al (2008) Characteristics of North American summertime rainfall with emphasis on the monsoon. *J Clim* 21:1277–1294. doi: 10.1175/2007JCLI1762.1
- Medhaug I, Stolpe MB, Fischer EM, Knutti R (2017) Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus.’ *Nature* 545:41–47. doi: 10.1038/nature22315
- Mitchell D, AchutaRao K, Allen M, et al (2017) Half a degree additional warming, prognosis and projected impacts (HAPPI): background and experimental design. *Geosci Model Dev* 10:571–583. doi: 10.5194/gmd-10-571-2017
- Müller C, Elliott J, Chryssanthacopoulos J, et al (2017) Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geosci Model Dev* 10:1403–1422. doi: 10.5194/gmd-10-1403-2017
- Oppenheimer M, Campos M, Warren R, et al (2014) Emergent Risks and Key Vulnerabilities. In: Field C, Barros V, Mach K, et al. (eds) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge
- Otto FEL, Oldenborgh GJ Van, Eden J, et al (2016) The attribution question. *Nat Publ Gr* 6:813–816. doi: 10.1038/nclimate3089
- Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, et al (2016) Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 534:631–639
- Rogelj J, Luderer G, Pietzcker RC, et al (2015) Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nat Clim Chang* 5:519–527. doi: 10.1038/nclimate2572
- Saeed F, Bethke I, Fischer E, et al (2018a) Robust changes in tropical rainy season length at 1.5 °C and 2 °C. *Environ Res Lett* 13:064024. doi: 10.1088/1748-9326/aab797
- Saeed F, Bethke I, Lange S, et al (2018b) Bias correction of multi-ensemble simulations from the HAPPI model intercomparison project. *Geosci Model Dev Discuss* 2018:1–23. doi: 10.5194/gmd-2018-107
- Samset BH, Sand M, Smith CJ, et al (2018) Climate impacts from a removal of anthropogenic aerosol emissions. *Geophys Res Lett* n/a--n/a. doi: 10.1002/2017GL076079
- Schleussner C-F, Deryng D, Müller C, et al (2018) Crop productivity changes in 1.5 °C and 2 °C worlds under climate sensitivity uncertainty. *Environ Res Lett* 13:064007. doi: 10.1088/1748-9326/aab63b

- Schleussner C-F, Lissner TK, Fischer EM, et al (2015) Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth Syst Dyn Discuss* 6:2447–2505. doi: 10.5194/esdd-6-2447-2015
- Schleussner C-F, Rogelj J, Schaeffer M, et al (2016) Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat Clim Chang* 6:827–835. doi: 10.1038/nclimate3096
- Seneviratne SI, Wartenburger R, Guillod BP, et al (2018) Climate extremes, land–climate feedbacks and land-use forcing at 1,5°C. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci* 376:20160450. doi: 10.1098/rsta.2016.0450
- Smith JB, Schneider SH, Oppenheimer M, et al (2009) Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) “Reasons for Concern”. *Proc Natl Acad Sci U S A* 106:4133–7. doi: 10.1073/pnas.0812355106
- Steinacher M, Joos F, Stocker TF (2013) Allowable carbon emissions lowered by multiple climate targets. *Nature* 499:197–201. doi: 10.1038/nature12269
- UNFCCC (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC
- UNFCCC (2009a) Submissions from Parties. FCCC/KP/AWG/2009/MISC.1/Add.1
- UNFCCC (2009b) The Copenhagen Accord,. FCCC/CP/2009/11/Add.1
- UNFCCC (2010) The Cancun Agreements. FCCC/CP/2010/7/Add.1
- UNFCCC (2015) Report on the structured expert dialogue on the 2013 - 2015 Review. FCCC/SB/2015/INF.1

Anhang

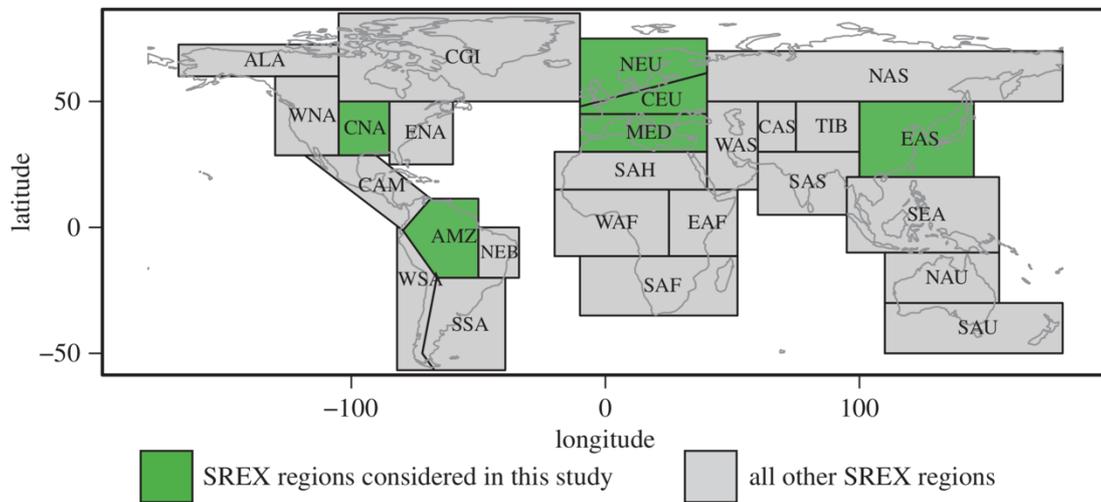


Abbildung A1: Übersicht der IPCC Weltregionen und ihrer Bezeichnungskonvention. Quelle: Seneviratne et al. (2018)