

DISS. ETH NO. 23453

Identifying and quantifying large-scale drivers of European climate change

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Nico Robert Kröner

MSc ETH, ETH Zurich

born January 6, 1985

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christoph Schär, examiner

Dr. Sven Kotlarski, co-examiner

Dr. Daniel Lüthi, co-examiner

Dr. Erich Fischer, co-examiner

Prof. Dr. Roy Rasmussen, co-examiner

2016

Abstract

Climate change will affect regional climates around the world. While regional climate change is driven by large-scale changes in the overall thermodynamic structure and general circulation of the atmosphere, particular regions are affected by characteristic regional feedbacks. The complex interactions between the large-scale drivers and the regional feedback processes make it difficult to understand and quantify the involved mechanisms. In this thesis a method is developed to disentangle the role of the large-scale drivers to contribute to (1) improving our understanding of specific drivers, (2) quantifying their respective contribution to the regional climate change and (3) assess the robustness of the projected changes in dependence of the drivers uncertainties.

The developed method is applied to the European climate change, by studying regional climate simulations that cover historical (1971-2000) and future periods (2070-2099).

The main objective of this thesis is to shed light on the driving processes/mechanisms of European temperature and precipitation changes, and thereby to contribute to more robust and reliable climate projections and climate impact scenarios. To this end, the influence of three large-scale drivers of European climate change, namely thermodynamic, lapse-rate and circulation changes are elucidated and quantified by applying and extending the so-called surrogate (or pseudo warming) methodology.

In Chapter 3, the surrogate approach is extended and applied to the European summer climate. The basic idea of this approach is to use a regional climate model and apply a large-scale warming to the lateral boundary conditions of a present-day reference simulation, while maintaining the relative humidity (and thus implicitly increasing the specific moisture content). In comparison to the basic approach, two important extensions are applied: (1) a twin design is used, where the large-scale warming is not only added to the present day simulation, but also a corresponding cooling is subtracted from the future scenario simulation; (2) the temperature change is applied independent and dependent of height in order to quantify the effect of large-scale lapse-rate changes. The influence of lapse-rate changes on regional climate change was not studied before.

It is shown that the mean warming projected for the European summer climate is caused by the large-scale thermodynamic effect, which also increases precipitation over the whole continent. But the peculiar amplification of the Mediterranean warming and drying, as projected by climate models, is not reproduced by the thermodynamic effect alone. Rather results show that lapse-rate changes explain some fraction of this amplification. Over the Iberian Peninsula they explain about half of the amplified warming projected in the full climate change scenario. The large-scale circulation effect, which also includes effects due to changes in land-sea contrast, is inherited from the driving global climate model (GCM) and is shown to further amplify the north-south temperature contrast.

Together this shows that the peculiar Mediterranean amplification is caused by large-scale circulation and lapse-rate changes.

In Chapter 4 the extended surrogate approach is used to analyse changes in precipitation statistics for the winter and summer season over Europe. Beside mean precipitation, four commonly used indices are investigated: Precipitation intensity and frequency, and indices that assess heavy precipitation events (maximum day-long precipitation amount) and dry-spell length (mean consecutive dry days), respectively. For winter, it is shown that the thermodynamic effect is dominating changes in mean precipitation and heavy events. Only over the Mediterranean the more uncertain circulation effect is dominating precipitation changes. In summer also the lapse-rate effect is important over this region, becoming as strong as the circulation effect. The strong influence of the lapse-rate effect in summer over southern European (here quantified for the first time) is confirmed by an additional analysis of the multi-model ensemble EURO-CORDEX.

In terms of the underlying mechanism it is found that the thermodynamic effect is dominating changes in precipitation intensity whereas the lapse-rate and the circulation effect are dominating changes in precipitation frequency and are also the main drivers for changes in dry-spell length. For summer and winter the dominating driver for changes in heavy precipitation, which are are epically important for impact modelling, is the thermodynamic effect. Overall changes in circulation are considered more uncertain than changes in lapse-rate and thermodynamics, thereby providing some indications regarding the reliability of the projected changes in different regions and indices.

In summary, this thesis introduces and validates an extended surrogate climate change approach. By disentangling the large-scale drivers of European climate change, valuable insight into the underlying processes was gained. In particular, the thesis revealed for the first time the strong influence of lapse-rate changes on European climate change.

Zusammenfassung

Ausgelöst durch den globalen Klimawandel werden spezifische Veränderungen für die unterschiedlichen Regionen der Erde vorhergesagt. Diese Veränderungen werden einen direkten Einfluss auf die Gesellschaft, Wirtschaft und Ökosysteme der betroffenen Regionen haben. Es ist deshalb von grossem Interesse die Prozesse, welche diese Veränderungen antreiben, besser zu verstehen und die mit ihnen verbundenen Unsicherheiten abzuschätzen.

Die regionalen Änderungen werden zwar durch die grossskaligen Änderungen in der thermodynamischen Struktur der Atmosphäre und den Zirkulationsänderungen bestimmt, aber in jeder Region sind zusätzlich regionale Rückkopplungen aktiv. Das komplexe Zusammenspiel zwischen den grossskaligen Änderungen und den regionalen Rückkopplungsprozessen erschwert das Verständniss und die Quantifizierung der involvierten Prozesse.

In der vorliegenden Doktorarbeit wird deshalb eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht, die verschiedenen grossskaligen Einflüsse aufzutrennen. Durch diese Auftrennung kann dazu beigetragen werden, (1) das Verständnis der spezifischen Treiber zu verbessern, (2) ihren jeweiligen Einfluss auf regionale Klimaänderungen zu quantifizieren und (3) die Verlässlichkeit der Vorhersagen an Hand der mit dem jeweiligen Treiber verbundenen Unsicherheit zu bewerten.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, die Prozesse/Mechanismen, welche die Änderungen in Temperatur und Niederschlag über Europa antreiben, besser zu verstehen und damit zu verlässlicheren Vorhersagen für Klimaänderungen und deren Auswirkungen beizutragen. Um dies zu erreichen, wird der Einfluss von drei grossskaligen Treibern, nämlich Änderungen in der Thermodynamik, in der atmosphärischen Stabilität und der Zirkulation, auf den europäischen Klimawandel unter Verwendung einer erweiterten, sogenannten Surrogate Methode aufgeklärt und quantifiziert; Dazu werden regionale Klimamodelle verwendet, die sowohl eine historische (1971-2000) als auch eine zukünftige (2070-2099) Zeitspanne abdecken.

In Kapitel 3 wird die erweiterte Surrogate-Methode vorgestellt und auf das europäische Sommerklima angewandt. Das grundsätzliche Konzept dieser Methode beruht auf der Verwendung eines regionalen Klimamodells. Für eine „surrogate“ Simulation wird die Temperatur in den Randdaten einer gegenwärtigen Klimasimulation soweit geändert, dass in der neuen surrogate Simulation die für die Zukunft prognostizierte Klimaerwärmung realisiert wird. Zusätzlich wird in diesen Simulationen die relative Feuchte konstant gehalten (dies ist gleichbedeutend mit einer Zunahme der spezifischen Feuchte). Im Unterschied zur regulären Methode werden in dieser Arbeit zwei entscheidende Erweiterungen verwendet: (1) die Erwärmung wird nicht nur auf eine Simulation des gegenwärtigen Klimas angewandt, sondern auch eine entsprechende Abkühlung auf die dazugehörige Simulation des zukünftigen Klimas; (2) Die Temperaturänderung wird jeweils einmal unabhängig und

abhängig von der Höhe angewandt. Dieses Vorgehen ermöglicht die Quantifizierung einer grossskaligen Stabilitätsänderung. Der Einfluss einer solchen Änderung auf den regionalen Klimawandel wurde bis heute noch nicht erforscht.

Es wird gezeigt, dass die mittlere vorhergesagte Erwärmung des europäischen Sommerklimas durch thermodynamische Änderungen, von jetzt an als thermodynamischer Effekt bezeichnet, verursacht wird. Dieser Effekt bewirkt ausserdem eine Zunahme des Niederschlages über ganz Europa. Die ungewöhnlich starke Erwärmung und Austrocknung des Mittelmeerraums, welche von vielen Klimamodellen vorhersagt wird, kann vom thermodynamischen Effekt alleine nicht reproduziert werden. Vielmehr zeigen die Ergebnisse, dass Änderungen in der Stabilität einen Teil dieser verstärkten Erwärmung erklären können. Für die Iberische Halbinsel beispielsweise erklärt dieser Effekt ungefähr die Hälfte der projizierten Erwärmung. Der Effekt von Änderungen in der grossskaligen Zirkulation wird vom antreibendem globalem Klimamodel bestimmt und verstärkt den Nord-Süd Gradienten in der Temperatur und dessen Änderungssignal zusätzlich. Zusammenfassend zeigt sich, dass insbesondere Stabilitäts- und Zirkulationsänderungen für die besonderen Veränderungen im Klima des Mittelmeerraum verantwortlich sind.

In Kapitel 4 wird die erweiterte Surrogate-Methode verwendet um Änderungen in Niederschlagscharakter für das europäische Winter- und Sommerklima zu untersuchen. Neben Änderungen im mittleren Niederschlag werden vier häufig verwendete Niederschlagsindizes analysiert: Niederschlagsintensität, Niederschlagsfrequenz, der grösster täglicher Niederschlag (Starkniederschlagsereignisse) und die mittlere Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage (Trockenperioden). Es wird gezeigt, dass im Winter der thermodynamische Effekt die Änderungen im mittleren Niederschlag und den Starkniederschlägen dominiert. Eine Ausnahme bilden die Änderungen im Mittelmeerraum, welche zu dieser Jahreszeit von der mit einer grösseren Unsicherheit behafteten Zirkulationsänderung dominiert werden. Im Sommer ist über dieser Region der Effekt der Stabilitätsänderungen genauso stark wie der Effekt der Zirkulationsänderungen. Eine zusätzliche Analyse eines aus mehreren Klimamodellen bestehendem Ensembles bestätigt den starken Einfluss von Stabilitätsänderungen auf den Niederschlag im Mittelmeerraum, welcher in dieser Arbeit zum ersten Mal quantifiziert wird.

Im Bezug auf die zugrunde liegenden Mechanismen kann gezeigt werden, dass der thermodynamische Effekt hauptsächlich Änderungen in der Niederschlagsintensität verursacht, während die Effekte der Stabilitäts- und Zirkulationsänderungen hauptsächlich die Niederschlagsfrequenz betreffen und somit auch die Änderungen in Trockenperioden. Sowohl im Winter als auch im Sommer dominiert der thermodynamische Effekt die Änderung in den Starkniederschlägen. Dieser Zusammenhang ist besonders für die Auswirkungen des Klimawandels von Bedeutung. Änderungen in der Zirkulation sind generell mit grösseren Unsicherheiten behaftet als Änderungen in der Stabilität oder der Thermodynamik der Atmosphäre. Dies lässt Rückschlüsse auf die Verlässlichkeit der vorhergesagten Änderungen für die unterschiedlichen Regionen und Indizes zu.

In der hier vorliegenden Doktorarbeit wurde eine erweiterte Surrogate-Methode eingeführt und validiert. Durch diese Methode konnten die grossskaligen Phänomene, welche den europäischen Klimawandel antreiben, voneinander separiert werden. Diese Separierung wiederum erlaubte es, wertvolle Einsichten in die dem regionalen Klimawandel zugrunde liegenden Prozesse zu gewinnen. Als erste Studie überhaupt zeigen die vorliegenden Resultate den direkten Einfluss von Stabilitätsänderungen auf den Klimawandel in Europa.