
Response of the European Hydrological Cycle and Soil Moisture to Rising Atmospheric CO₂

Dissertation

in fulfillment of the requirements for the degree "Dr. rer. nat."
of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences at
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

by

Médéric St-Pierre

Kiel, 2024

Main Supervisor and

First Examiner:

Prof. Dr. Mojib Latif

GEOMAR - Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel

Christian-Albrechts-University of Kiel, Faculty of Mathematics and Natural Sciences

Research Division: Ocean Circulation and Climate Dynamics

Research Unit: Marine Meteorology

Second Examiner:

Prof. Dr. Joakim Kjellsson

GEOMAR - Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel

Research Division: Ocean Circulation and Climate Dynamics

Research Unit: Marine Meteorology

Date of Oral Examination: 28 October 2024 at 14h00

Abstract

Anthropogenic activities, primarily greenhouse gas emissions, have significantly altered the climate since the pre-industrial period, resulting in an approximate 1.3°C increase in global near-surface temperatures. These temperature changes cause, among other things, a response of the hydrological cycle (i.e., precipitation, evaporation, and runoff), impacting soil moisture, an important metric for monitoring and mitigating drought and heatwaves, as well as regulating water availability for vegetation and crops. Understanding the magnitude and timing of these hydrological cycle and soil moisture changes is essential for implementing effective adaptation and mitigation strategies to address floods, droughts, heatwaves, and wildfires in vulnerable regions. The hydrological cycle across Europe is already undergoing significant changes, with the Mediterranean region identified as a climate “hot spot” due to the projected drying of the region under warming conditions. This thesis presents a comprehensive analysis of the European hydrological cycle and associated soil moisture changes due to anthropogenic CO₂ emissions. For a robustness analysis of the climate change-driven changes in the hydrological cycle and soil moisture, we employed a Single-Model Initial-condition Large Ensemble of 100 members with the Kiel Climate Model, where the atmospheric CO₂ concentration increases by 1% per year for 140 years.

The first study of this thesis compares the first 30 years of the simulations (the reference period) to the last 30 years, during which atmospheric CO₂ concentrations are quadrupled (4xCO₂ period). A significant reduction in soil moisture, reaching up to 31% less relative to its reference state, is projected across most of Central Europe and the Mediterranean in the 4xCO₂ period, with all of the ensemble members agreeing on the sign of this change. This significant loss in soil moisture is most severe during the summer and fall seasons and, during these seasons, is primarily driven by a reduction in precipitation and, to a lesser degree, an increase in evaporation. The results indicate that changes in summer precipitation pattern over Central Europe and the Mediterranean are in part associated with a northward shift in the summer storm track, leading to a reduction in storm frequency and associated large-scale precipitation in the region.

The second study investigates the Time of Emergence (ToE), defined as the time at which the climate change signal becomes detectable from the natural variability of a pre-industrial climate state, for summer trends in European near-surface temperature, soil moisture, and the hydrological cycle. To perform this study, the 100 simulations with increasing atmospheric CO₂ concentration from the Kiel Climate Model are compared to a 5000-year pre-industrial control simulation with no climate forcing. Applying the signal-to-noise ratio (2 σ) method for the ToE at each grid cell, the ToEs reveal an early emergence of near-surface summer temperature trends within 20 to 40 years across all of Europe. In contrast, summer precipitation trends remain undetectable across Europe over the entire 140-year simulation period. Summer soil moisture trends, on the other hand, become detectable after approximately 30 years in parts of the Mediterranean, while in Western and Central Europe, they only emerge after CO₂ concentrations have doubled (i.e., 70 years of climate change). A comparison of the ToEs for global and European means reveals that global trends are emerging faster compared to European trends for all studied summer variables. Although trends in precipitation

and runoff were not detectable in the three European regions using the ToE, a comparison of 5000 pre-industrial and 3000 4xCO₂ summers still reveals statistically significant differences (95% confidence level) in the distribution of these variables during summer. Additionally, extremely dry summers (99th percentile) in terms of soil moisture are projected to become more extreme, relative to their mean climate, in a 4xCO₂ climate compared to a pre-industrial climate.

Overall, this thesis provides insights into projected changes in the European hydrological cycle and soil moisture under a warming climate. The analyses identify vulnerable regions for hydrological changes and the underlying mechanisms driving these changes. The use of a Single-Model Initial-condition Large Ensemble is an innovative approach that allows us to investigate the robustness of our results with respect to climate change outcomes against natural climate variability. Changes in the hydrological cycle could have far-reaching impacts on extreme weather and climate events such as droughts or heatwaves in Europe, with important implications for climate adaptation and mitigation strategies.

Zusammenfassung

Menschliche Aktivitäten, vor allem die Emission von Treibhausgasen, haben das Klima seit der vorindustriellen Zeit erheblich verändert und zu einem Anstieg der mittleren globalen Temperatur um etwa 1.3 °C geführt. Diese Klimaveränderungen beeinflussen neben anderen Dingen den Wasserkreislauf (d. h. Niederschlag, Verdunstung und Abfluss), was sich wiederum auf die Bodenfeuchtigkeit auswirkt. Bodenfeuchtigkeit ist eine wichtige Messgröße zur Überwachung und Eindämmung von Dürre und Hitzewellen sowie zur Regulierung der Wassererfüllbarkeit für Vegetation und Nutzpflanzen. Das Verständnis des Ausmaßes und des zeitlichen Ablaufs dieser Veränderungen des Wasserkreislaufs und der Bodenfeuchtigkeit ist von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung wirksamer Anpassungs- und Minderungsstrategien von Überschwemmungen, Dürren, Hitzewellen und Waldbränden in gefährdeten Regionen. Der Wasserkreislauf in ganz Europa erlebt bereits erhebliche Veränderungen, wobei der Mittelmeerraum aufgrund der prognostizierten Austrocknung durch den Klimawandel als „Hot Spot“ gilt. In dieser Arbeit wird eine umfassende Analyse des europäischen Wasserkreislaufs und der damit verbundenen Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit infolge anthropogener CO₂-Emissionen beschrieben. Für die Analyse der Belastbarkeit der durch den Klimawandel bedingten Veränderungen des Wasserkreislaufs und der Bodenfeuchtigkeit wurde ein SMILE (Single-Model Initial-Condition Large Ensemble, d.h. eine Mehrzahl an Simulationen des gleichen Modells mit leicht veränderten Anfangsbedingungen) mit 100 Ensemblemitgliedern des Kieler Klimamodells verwendet, in dem die atmosphärische CO₂ Konzentration über 140 Jahre um 1% pro Jahr steigt.

In der ersten Studie dieser Arbeit vergleichen wir die ersten 30 Jahre der Simulationen (der Referenzzeitraum) mit den letzten 30 Jahren, in denen sich die CO₂ Konzentrationen in der Atmosphäre vervierfacht haben (4xCO₂-Zeitraum). Für den größten Teil Zentraleuropas und des Mittelmeerraums wird im 4xCO₂-Zeitraum ein signifikanter Rückgang der Bodenfeuchte von bis zu 31% gegenüber dem Referenzzustand prognostiziert, wobei alle Ensemblemitglieder das gleiche Vorzeichen für diese Veränderung aufweisen. Der signifikante Verlust an Bodenfeuchtigkeit ist im Sommer und Herbst am stärksten und wird in diesen Jahreszeiten in erster Linie durch einen Rückgang der Niederschläge und in geringerem Maße durch einen Anstieg der Verdunstungsrate verursacht. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Veränderungen des Niederschlagsmusters über Zentraleuropa und dem Mittelmeerraum zum Teil mit einer Verschiebung der sommerlichen Sturmbahnen nach Norden verbunden sind, was zu einer Verringerung der Sturmhäufigkeit und entsprechenden großräumigen Niederschlägen in der Region führt.

Die zweite Studie untersucht die sogenannte „Time of Emergence“ (ToE, definiert als der Zeitpunkt, an dem sich ein Klimawandelsignal aus der natürlichen Variabilität eines vorindustriellen Klimazustands abzeichnet) für Sommertrends der europäischen oberflächennahen Temperatur, der Bodenfeuchtigkeit und des Wasserkreislaufs. In dieser Studie werden 100 Simulationen des Kieler Klimamodells mit steigender atmosphärischer CO₂ Konzentration mit einer 5000-Jahre-Kontrollsimulation ohne anthropogenen Klimaantrieb verglichen. Bei Anwendung eines Signal-Rausch-Verhältnisses von 2 für die ToE-Methode auf einzelne Modell-Rasterzellen finden wir, dass sich für ganz Europa Trends in der oberflächennahen

hen Sommertemperatur innerhalb von 20 bis 40 Jahren abzeichnen. Im Gegensatz dazu sind Trends im Sommerniederschlag über Europa über den gesamten 140-jährigen Simulationszeitraum nicht nachweisbar. Trends bei der sommerlichen Bodenfeuchtigkeit zeichnen sich dagegen in bestimmten Teilen des Mittelmeerraums nach etwa 30 Jahren ab, während sie in West- und Mitteleuropa erst nach einer Verdoppelung der CO₂ Konzentration (d. h. nach 70 Jahren Klimawandel) nachweisbar sind. Ein Vergleich der ToEs für globale und europäische Mittelwerte zeigt, dass sich die globalen Trends im Vergleich zu den europäischen Trends für alle untersuchten Sommervariablen schneller abzeichnen. Obwohl Veränderungen im Niederschlag und Abfluss in den drei europäischen Regionen nicht über ToE nachweisbar sind, zeigt ein Vergleich von 5000 vorindustriellen und 3000 4xCO₂-Sommern dennoch statistisch signifikante Unterschiede (95% Konfidenzniveau) in der Verteilung dieser Variablen im Sommer. Darüber hinaus finden wir in unseren Simulationen, dass extrem trockene Sommer, gemessen an den 99 Perzentilen der Bodenfeuchte, in einem 4xCO₂-Klima im Vergleich zum vorindustriellen Klima extremer werden.

Zusammengefasst bietet diese Arbeit Einblicke in die voraussichtlichen Veränderungen des europäischen Wasserkreislaufs und der Bodenfeuchtigkeit durch eine Klimaerwärmung. Die Analysen identifizieren anfällige Regionen für hydrologische Veränderungen und die zugrunde liegenden Mechanismen, die diese Veränderungen bedingen. Die Verwendung eines SMILEs ist ein innovativer Ansatz, der es uns erlaubt, die Ergebnisse hinsichtlich der Folgen des Klimawandels gegenüber natürlicher Klimavariabilität zu untersuchen. Veränderungen im Wasserkreislauf könnten weitreichende Auswirkungen auf extreme Wetter- und Klimaereignisse wie Dürren oder Hitzewellen in Europa haben, mit wichtigen Folgen für Klimaanpassungs- und -minderungsstrategien.