

Earth System responses to highly ambitious mitigation scenarios - Contributions from forcing and model uncertainties

Dissertation

in fulfilment of the requirements for the degree of Dr. rer. nat
of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences
at Kiel University

submitted by

Estela de Almeida Monteiro

Kiel, June 2025

First examiner: Dr. rer. nat. Nadine Mengis

Second examiner: Prof. Dr. rer. nat. Andreas Oschlies

Date of oral examination: 04/09/2025

“For the Spirit God gave us does not make us timid, but gives us power, love and self-discipline.”

2 Timothy 1:7

Abstract

Over the past century, human activities have caused strong alterations to the climate system. The leading reason behind it is the emission of carbon dioxide, mostly associated with the burning of fossil fuels, as well as changes in land use. In association with the emission of different greenhouse gases and particles, it has led to an increase in global surface air temperature, and linked impacts such as an increase in sea surface temperature, decrease in sea ice cover, rise in sea level and changes in land ecosystem distribution ranges, among many others. Such changes have been confidently attributed to human activities, and international political efforts have attempted to avoid further impacts by limiting global warming levels. Since the relation between carbon emissions and temperature is clearly established, known to be quasi-linear and described through the concept of Transient Climate Response to cumulative CO₂ Emissions (TCRE), the only possible way to impose a limit to the planet's warming is to mitigate and reach a net-zero in CO₂ emissions. In this sense, highly ambitious emissions mitigation scenarios are a desirable future to be aimed for, with a current need for a rapid political and societal move towards such. Following the concept of remaining carbon budgets, i.e. allowable carbon to be emitted until reaching a defined temperature target, not many emissions years are left if humankind attempts to keep warming to 1.5 °C, a widely known and agreed upon warming limit. Despite a clear benefit, and necessity, of reaching highly ambitious mitigation future scenarios, uncertainty remains regarding potential system responses as the importance of carbon forcing decreases. Even if these uncertainties should not halt decision-making towards such kinds of future scenarios, a better understanding of the expected responses will allow society to properly assess needed and possible outcomes from our current, and past, decisions.

The scientific community relies strongly on the use of Earth system models, integrated assessment models as well as carbon metrics to evaluate potential future developments and responses to different scenarios. These tools, nevertheless, require simplifications and assumptions to be made. One example pertains to atmospheric aerosols, which played an important role in cooling the atmosphere throughout the historical period, but are expected to have a decreasing importance in the future, due to reduced emissions. This component is typically included in simple climate models and carbon metrics without consideration for interactions between physical and biogeochemical processes, and/or disregarding potential non-linearities between forcing and carbon cycle responses, for example. By varying aerosols spatial implementation in an intermediate complexity model, we found here a considerable surface temperature variability, as well as variability in individual components', such as land carbon uptake and ocean heat uptake, contributions to the warming or cooling of the system. We identified that different processes, as soil respiration or changing sea ice and ventilation depth, play a role in controlling the air temperature development, proving that triggered feedbacks due to aerosols implementations can have a crucial impact in assessing highly ambitious mitigation scenarios, and that they should be accounted for by the tools used to study such scenarios.

In fact, due to the prevalence of carbon forcing in determining climate development over the past century, many of the climate assessment tools and frameworks are ill-equipped to provide a comprehensive understanding of highly ambitious mitigation scenarios. With carbon's forcing stabilising in such scenarios, for example as moving towards a net-zero in CO₂ emissions, the

variability in surface air temperature is not anymore controlled by carbon emissions, but rather by the system's natural variability. By the use of a new framework (FROT: Framework for Radiative cOntributions to Temperature responses), we comprehensively assessed the temperature variability simulated by distinct models for different ambitious mitigation future scenarios, and accounted for individual contribution from different climate components. Our findings corroborate the need for including forcings and transient responses when assessing climate development, and show that different sets of climate contributions allow for temperature stabilisation. We found that aerosols and the variability in ocean heat uptake will play a large role in the timing and potential of surface air temperature stabilisation, even in the presence of small positive fossil fuel emissions, a conclusion that has clear impacts for the scientific community and beyond.

Nevertheless, as previously stated, current mitigation efforts are limited, and with a rapidly closing emissions gap, an increasing interest has been given to techniques with the potential to remove carbon dioxide from the atmosphere, which could support efforts to reach net-zero carbon emissions, and, in theory, even allow for net-negative emissions. Questions remain, however, in terms of the Earth system responses to decreasing levels of atmospheric CO₂, as some system variables respond slowly, a behavior expected to be especially the case in the ocean. In our analysis, we found that, in fact, for centennial timescales dissolved ocean oxygen, in terms of its total global content, is unable to return to pre-industrial levels. This response, however, is highly dependent on the region and depth considered. The upper 1300 m of the ocean can return to, and even overshoot in several regions, the initial oxygen levels, while the deep ocean below 1000 m shows little signs of recovery even after 200 years of simulated carbon dioxide removal. While oxygen solubility appears to play a role in controlling the responses in the upper ocean, our findings indicate that apparent oxygen use dominates the simulated oxygen development. Additionally, changes in circulation and ventilation processes corroborate the upper ocean oxygen recovery development and lead the deoxygenation simulated for the deep ocean.

The reported findings widen the understanding of the range of expected responses and components development under highly ambitious emissions mitigation scenarios, either by reducing or by clarifying different uncertainties expected in the assessment, analysis and potential real-world outcomes of these scenarios. The conclusions here can provide meaningful information to not only improve science understanding, but also inform political and societal decision-making processes. Even if other uncertainties remain, these conclusions corroborate that the current knowledge levels agree with the need for moving towards highly ambitious emissions mitigation futures to avoid further deleterious impacts from anthropogenic interventions to both societies and natural ecosystems.

Zusammenfassung

Im Laufe des vergangenen Jahrhunderts haben menschliche Aktivitäten zu erheblichen Veränderungen des Klimasystems geführt. Der Hauptgrund dafür ist die Emission von Kohlenstoffdioxid, vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie durch Veränderungen in der Landnutzung. In Verbindung mit der Freisetzung verschiedener Treibhausgase und Partikel hat dies zu einem Anstieg der globalen oberflächennahen Lufttemperatur geführt sowie zu damit verbundenen Auswirkungen. Diese Auswirkungen beinhalten unter anderem den Anstieg der Meeresoberflächentemperatur, die Abnahme der Meereisbedeckung, den Anstieg des Meeresspiegels und Verschiebungen der Verbreitungsgebiete von Landökosystemen. Solche Veränderungen können mit hoher Sicherheit menschlichen Aktivitäten zugeschrieben werden und internationale politische Bemühungen zielen darauf ab, weitere Auswirkungen zu minimieren und die globale Erderwärmung zu begrenzen. Da der Zusammenhang zwischen Kohlenstoffemissionen und Temperatur wohlbekannt ist – das Verhältnis ist quasi-linear und wird durch das Konzept der „Transient Climate Response to cumulative CO₂ Emissions“ (TCRE) beschrieben –, besteht die einzige Möglichkeit, die Erwärmung des Planeten zu begrenzen, darin, die CO₂-Emissionen zu mindern und Netto-Null zu erreichen. In diesem Sinne stellen hochambitionierte Emissionsminderungs-Szenarien ein erstrebenswertes Zukunftsziel dar, das eine rasche politische und gesellschaftliche Wende erfordert. Im Rahmen des Konzepts der verbleibenden Kohlenstoffbudgets – also der noch erlaubten Emissionen bis zum Erreichen eines festgelegten Temperaturziels – bleiben nicht mehr viele Emissionsjahre, wenn die Menschheit die Erderwärmung auf 1,5 °C begrenzen will – eine weithin bekannte Grenze und international anerkanntes Ziel. Trotz des klaren Nutzens und der Notwendigkeit solche ambitionierten Minderungs-Zukunftsszenarien zu erreichen, bestehen weiterhin Unsicherheiten hinsichtlich möglicher Systemreaktionen, wenn der Einfluss des Kohlenstoffantriebs abnimmt. Auch wenn diese Unsicherheiten politische Entscheidungen in Richtung solcher Zukunftsszenarien nicht aufhalten sollten, wird ein besseres Verständnis der zu erwartenden Erdsystem-Reaktionen der Gesellschaft ermöglichen, notwendige und mögliche Folgen unserer gegenwärtigen und vergangenen Entscheidungen angemessen einzuschätzen.

Die wissenschaftliche Gemeinschaft stützt sich in hohem Maße auf die Verwendung von Erdsystemmodellen, integrierten Bewertungsmodellen (eine Kombination von Faktoren aus Gesellschaft, Wirtschaft und dem Klimasystem) sowie Kohlenstoff-Metriken um mögliche zukünftige Entwicklungen und Reaktionen auf verschiedene Szenarien zu bewerten. Diese Werkzeuge erfordern jedoch Vereinfachungen und Annahmen. Ein Beispiel betrifft atmosphärische Aerosole, die während der Vergangenheit eine wichtige Rolle für die Abkühlung der Atmosphäre gespielt haben, deren Bedeutung jedoch in Zukunft voraussichtlich aufgrund von zurückgehenden Emissionen abnehmen wird. In einfachen Klimamodellen und Kohlenstoff-Metriken wird diese Komponente typischerweise berücksichtigt ohne die Wechselwirkungen zwischen physikalischen und biogeochemischen Prozessen einzubeziehen und/oder potenzielle Nichtlinearitäten zwischen Antrieb und Reaktionen des Kohlenstoffkreislaufs zu berücksichtigen. Durch das räumliche Variieren der Aerosolverteilung in einem Modell mittlerer Komplexität haben wir hier eine erhebliche Variabilität der Oberflächentemperatur festgestellt, ebenso wie Unterschiede in den Beiträgen einzelner Komponenten – wie der Kohlenstoffaufnahme an Land

und der Wärmeaufnahme durch die Ozeane – zur Erwärmung oder Abkühlung des Systems. Wir konnten feststellen, dass unterschiedliche Prozesse, wie die Bodenbelüftung oder Veränderungen des Meereises und der Ventilationstiefe, eine Rolle bei der Entwicklung der Lufttemperatur spielen. Dies beweist, dass durch Aerosole ausgelöste Rückkopplungen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung hochambitionierter Minderungs-Szenarien haben können und daher von den zur Untersuchung solcher Szenarien eingesetzten Modellen berücksichtigt werden sollten.

Tatsächlich sind viele der Instrumente und Rahmenwerke zur Klimabewertung aufgrund der dominierenden Rolle des Kohlenstoffantriebs bei der Klimaentwicklung im vergangenen Jahrhundert nur unzureichend dafür geeignet, ein umfassendes Verständnis hochambitionierter Minderungs-Szenarien zu liefern. In solchen Szenarien, in denen sich der Kohlenstoffantrieb stabilisiert – etwa durch das Erreichen von Netto-Null bei CO₂-Emissionen – wird die Variabilität der oberflächennahen Lufttemperatur nicht mehr durch Kohlenstoffemissionen gesteuert, sondern vielmehr durch die natürliche Variabilität des Systems. Mithilfe eines neuen Analyseansatzes (FROT: Framework for Radiative cONtributions to Temperature responses) haben wir die von verschiedenen Modellen simulierte Temperaturvariabilität für unterschiedliche ambitionierte Minderungs-Szenarien umfassend bewertet und die individuellen Beiträge verschiedener Klimakomponenten berücksichtigt. Unsere Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit, Strahlungsantriebe und transiente Reaktionen (Reaktionen eines System auf Änderungen von einem Gleichgewichtszustand) bei der Bewertung der Klimaentwicklung einzubeziehen, und zeigen, dass unterschiedliche Kombinationen klimatischer Beiträge eine Stabilisierung der Temperatur ermöglichen. Wir stellten fest, dass Aerosole und die Variabilität der Wärmeaufnahme durch die Ozeane eine entscheidende Rolle für das Timing und das Potenzial der Stabilisierung der oberflächennahen Lufttemperatur spielen werden – selbst bei geringen, weiterhin vorhandenen Emissionen fossiler Brennstoffe. Diese Schlussfolgerung hat weitreichende Auswirkungen, sowohl für die wissenschaftliche Gemeinschaft als auch darüber hinaus.

Dennoch, wie bereits erwähnt, sind die derzeitigen Minderungsbemühungen begrenzt und angesichts der sich rasch schließenden Emissionslücke richtet sich das zunehmende Interesse auf Technologien mit dem Potenzial, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen. Diese könnten die Anstrengungen zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen unterstützen und theoretisch sogar negative Nettoemissionen ermöglichen. Es bleiben jedoch offene Fragen hinsichtlich der Reaktionen des Erdsystems auf sinkende CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre, da einige Systemvariablen nur langsam reagieren – ein Verhalten, das insbesondere für den Ozean erwartet wird. In unserer Analyse stellten wir tatsächlich fest, dass gelöster Sauerstoff im Ozean auf Jahrhundertzeitskalen – bezogen auf den globalen Gesamtgehalt – nicht zu vorindustriellen Werten zurückkehrt. Diese Reaktion ist jedoch stark abhängig von der betrachteten Region und Tiefe. Die oberen 1300 m des Ozeans können in vielen Regionen wieder das ursprüngliche Sauerstoffniveau erreichen oder es sogar überschreiten, während der tiefe Ozean unterhalb von 1000 m auch nach 200 Jahren simulierten CO₂-Entzugs kaum Anzeichen einer Erholung zeigt. Während die Sauerstofflöslichkeit offenbar eine Rolle bei der Steuerung der Reaktionen in den oberen Schichten des Ozeans spielt, deuten unsere Ergebnisse darauf hin, dass der scheinbare Sauerstoffverbrauch die simulierte

Sauerstoffentwicklung dominiert. Zusätzlich bestätigen Veränderungen in der Zirkulation und Ventilation die beobachtete Erholung des Sauerstoffs im oberen Ozean und erklären die anhaltende Sauerstoffverarmung in der Simulation für die Tiefsee.

Die dargestellten Ergebnisse erweitern das Verständnis über die Bandbreite zu erwartender Reaktionen des Erdsystems und die Entwicklung einzelner Komponenten unter hochambitionierten Emissionsminderungs-Szenarien – sei es durch die Verringerung oder die Klärung verschiedener Unsicherheiten, die bei der Bewertung, Analyse und den potenziellen realen Auswirkungen dieser Szenarien zu erwarten sind. Die hier gezogenen Schlussfolgerungen tragen nicht nur dazu bei, das wissenschaftliche Verständnis zu verbessern, sondern unterstützen auch politische und gesellschaftliche Entscheidungsprozesse. Auch wenn andere Unsicherheiten bestehen bleiben, bestätigen diese Erkenntnisse, dass der aktuelle Wissensstand die Notwendigkeit untermauert, sich in Richtung hochambitionierter Emissionsminderungs-Zukünfte zu bewegen, um weitere schädliche Auswirkungen menschlicher Eingriffe auf Gesellschaften und natürliche Ökosysteme zu vermeiden.

Translated with the support of Linus Gummert