

DISS. ETH NO. 27518

# **Globally Consistent Assessment of Climate-related Physical Risk.**

**A Conceptual Framework and its Application in Asset Valuation**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH (Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

SAMUEL EBERENZ

MSc ETH Atmos Clim Sc, ETH ZURICH

born September 26, 1988

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. David N. Bresch

Dr. Oliver Marchand

Dr. Katja Frieler

2021

## Summary

Climate change poses increasing risks to what is valuable to humans around the globe. Changing, often intensifying, weather and climate extremes can increasingly be attributed to anthropogenic climate change, and change is projected to accelerate throughout the 21<sup>st</sup> century. Against this backdrop, risk awareness is growing across sectors and so is the demand for research and tools supporting efforts to mitigate climate change and adapt to its adverse consequences. Over the past decades, more and more global-scale climate impact data and models have become available, including archives of reported disaster impacts, storm track datasets, and global gridded crop models simulating yield responses to climate variables. The risk modeling platform CLIMate ADAPtation (CLIMADA), implemented in the programming language Python, provides a modular open-source and -access platform for the probabilistic, event-based assessment of climate-related impact and risk. The underlying conceptual framework describes risk as a function of hazard, exposure, and vulnerability. Hazard is represented by the intensity and frequency of weather and climate events. Exposures constitute the presence of people, ecosystems, or assets that can be affected by a hazard. Vulnerability, implemented in CLIMADA in the form of ‘impact functions’, relates hazard intensity to the degrees of damage experienced by the respective type of exposure. CLIMADA is a growing modeling platform, and the three studies in this thesis aim to bring it to global consistency. The studies constituting this thesis were conducted within a joint research and development project with an implementing partner in the financial sector applying the results directly for forward-looking asset valuation. The main objective of this collaboration was to develop, evaluate, and implement climate risk modeling configurations with a global scope for the assessment of physical climate impacts and related economic risk. The implementing partner has not only integrated the model components as developed in the present thesis, engagement with academia also helped him to design and implement a more consistent risk assessment framework well beyond the scope of this collaboration. In Chapter One of this thesis, both the applied and scientific context of the project are introduced, providing insight in the conceptual framework and its application.

Chapter Two enables the spatially explicit modeling of direct impacts to economic assets by providing a globally consistent asset value exposure layer. The method proposed and implemented makes use of the spatial correlation of economic activity and asset values in a country with both nightlight intensity and population density. The so-called LitPop (‘[night] Li[gh]t Population’) method combines satellite-based nightlight data and population data to disaggregate country-level asset value estimates to a sub-national high-resolution grid. The disaggregation skill is evaluated both quantitatively and qualitatively, comparing varying weights for nightlight

intensity and population count. A global gridded data set of disaggregated asset values in US dollars for the year 2014 is provided alongside the paper at a resolution of 30 arcsec (approx. 1 km globally).

In Chapter Three, LitPop exposure data is combined with a hazard set based on track data of hundreds of historical tropical cyclones (TCs) that made landfall in 53 countries between 1980 and 2017. The objective of the study is the calibration of the vulnerability component for TC risk modeling. For this purpose, wind speed footprints are modeled for each TC event. This allows the fitting of regional impact functions by comparing simulated with reported damage values for 473 reported events matched to individual TC tracks. Chapter Three is concluded with an explorative case study of TC damage in the Philippines, where the calibration comes with a large spread in fitted impact function parameters.

With Chapter Four, attention is shifted from TC impacts to a sectoral risk perspective, for a global, country-level assessment of historical and twenty-first century risk to crop production. This study is based on global gridded crop yield simulations for maize, rice, soybean, and wheat. It uses an unprecedented ensemble of transient yield simulation output from eight global gridded crop models driven by bias-corrected output from five global climate models, as facilitated by the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP). Applying two complementary risk metrics, crop yield simulations are used to calculate the annual probability of projected crop production falling short of a given threshold, by country. Country-specific 21<sup>st</sup> century crop production risk is assessed by comparing these probabilities for historical and future levels of global warming, considering model agreement as a measure of robustness.

The three main chapters are followed by a summary of key findings: quantitative estimates of exposure value distribution, TC vulnerability, and crop production risk per country. This is followed by discussions of the cascading uncertainties intrinsic to complex risk modeling chains, and practical implications of the thesis within the context of the joint research and development project as well as beyond. To make the resulting data and tools available for research and application – also beyond the scope of this project – the work in this thesis pays special attention to using scientific data and tools licensed for both academic and commercial use. At the same time, methods developed here are published open-source and -access, both as part of the CLIMADA repository and as peer-reviewed research papers. As for an outlook, future research is proposed with the potential to mitigate some of the entailed uncertainties, expand TC risk modeling from historical to future risk, and build on the findings presented here, further integrating output from climate and impact models in the probabilistic risk modeling framework of CLIMADA for globally consistent multi-hazard climate risk modeling.

## Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt eine zunehmende weltweite Bedrohung für Umwelt und Mensch dar. Veränderungen der Intensität und Häufigkeit von Wetter- und Klimaextreme können bereits heute vermehrt auf den anthropogenen Klimawandel zurückgeführt werden und es wird prognostiziert, dass sich der Wandel im Laufe des 21. Jahrhunderts weiter beschleunigen wird. Vor diesem Hintergrund wächst auch das Bewusstsein für die Risiken des Klimawandels in Wissenschaft, Politik und Wirtschaft. Mit der zunehmenden Dringlichkeit und dem Ruf nach effektivem Klimaschutz sowie Anpassung an die negativen Folgen des Klimawandels steigt auch der Bedarf nach angewandter Forschung und Entwicklung in dem Gebiet. In den letzten Jahrzehnten sind mehr und mehr Daten und computergestützte Modelle zur Quantifizierung von Klimafolgen auf globaler Ebene verfügbar geworden, darunter etwa Archive mit gemeldeten Schäden durch Naturkatastrophen, Daten zu Verlauf und Intensität tropischer Stürme, und global gerasterte landwirtschaftliche Ertragsmodelle, welche die Auswirkungen von Klimavariablen auf den Anbau von Getreide und Sojabohnen simulieren. Die Risikomodellierungsplattform CLIMADA (CLIMate ADaptation), implementiert in der Programmiersprache Python, bietet eine modulare open-source und -access Plattform für die probabilistische, ereignisbasierte Bewertung von wetter- und klimabedingten Auswirkungen und Risiken. Der zugrundeliegende konzeptionelle Rahmen beschreibt Risiko als eine Funktion von Gefährdung (hazard), Exposition (exposure) und Verwundbarkeit (vulnerability). Die Gefährdung wird dabei durch die Intensität und Häufigkeit von Wetter- und Klimaereignissen repräsentiert. Die Exposition stellt das Vorhandensein von Bevölkerung, Ökosystemen oder Vermögenswerten dar, die von einer Gefahr betroffen sein können. Die Vulnerabilität, die in CLIMADA in Form von Schadensfunktionen (impact functions) implementiert ist, setzt die Intensität der Gefährdung mit dem Grad des Schadens in Beziehung, welchen die jeweilige Art der Exposition erfährt, wenn sie von einer Naturkatastrophe betroffen ist. Die drei hier vorgestellten wissenschaftlichen Studien leisten einen Beitrag dazu, relevante klimabezogene Naturgefahren in CLIMADA globale konsistent abzubilden und Risiken zu quantifizieren. Die Studien wurden im Rahmen eines Innovationsprojekts gemeinsam mit einem Implementierungspartner aus dem Finanzsektor durchgeführt, der die Ergebnisse direkt in seiner Finanzmodellierung anwendet. Das Hauptziel dieser Zusammenarbeit ist die Entwicklung, Evaluierung und Implementierung von Klimarisikomodellen für die Bewertung weltweiter physischer Klimaauswirkungen und dem damit verbundenen wirtschaftlichen Risiko. Im ersten Kapitel dieser Arbeit stelle ich sowohl den angewandten als auch den wissenschaftlichen Kontext der Doktorarbeit vor und gebe einen Einblick in den

konzeptionellen Rahmen, die verwendeten Daten und Modelle, sowie deren Anwendung.

Im zweiten Kapitel wird die räumlich explizite Berechnung eines global konsistenten, hochauflösten Expositionsdatensatzes beschrieben. Die sogenannte LitPop-Methode nutzt die räumliche Korrelation von wirtschaftlichen Aktivitäten und Vermögenswerten in einem Land mit der von Satelliten aufgezeichneten Helligkeit nächtlicher Beleuchtung und der Bevölkerungsdichte. Die Methode kombiniert satellitengestützte Nachtlicht- und Bevölkerungsdaten, um Vermögenswertschätzungen auf Länderebene auf ein subnationales hochauflösendes Raster zu disaggregieren. Die Qualität der Disaggregation wird sowohl quantitativ als auch qualitativ evaluiert, indem unterschiedliche Gewichtungen für die Nachtlichtintensität und die Bevölkerungsdichte verglichen werden. Neben der Methode wird ein globaler gerasterter Datensatz mit disaggregierten Vermögenswerten in US-Dollar für das Jahr 2014 mit einer Auflösung von 30 Bogensekunden (ca. 1 km global) öffentlich zur Verfügung gestellt.

In Kapitel Drei werden die LitPop-Expositionsdaten mit einem Gefährungsdatensatz kombiniert, der auf Sturmdaten von Hunderten tropischen Wirbelstürme (TCs) basiert, die zwischen 1980 und 2017 in 53 Ländern auf Land getroffen sind und Schaden angerichtet haben. Das Ziel der Studie ist die Kalibrierung der Vulnerabilitätskomponente für die ereignisbasierte TC-Risikomodellierung mit CLIMADA. Zu diesem Zweck wurden Fussabdrücke der maximalen Windgeschwindigkeit für jeden Sturm modelliert. Dies ermöglicht das Anpassen regionaler Schadensfunktionen im Vergleich simulierter zu gemeldeten Schadenswerten für 473 Ereignisse, die einzelnen Stürmen zugeordnet sind. Das Kapitel wird mit einer explorativen Fallstudie zu Taifun-Schäden auf den Philippinen abgerundet, anhand derer die grosse Streuung der kalibrierten Schadensfunktionen diskutiert wird.

Im vierten Kapitel verlagert sich der Fokus weg von den Folgen tropischer Stürme hin zu einer sektoralen Risikoperspektive. Ziel der Studie ist eine globale Bewertung der Risiken für die landwirtschaftliche Produktion auf Länderebene im 21. Jahrhundert. Diese Studie basiert auf globalen gittergestützten Ertragssimulationen für Mais, Reis, Soja und Weizen. Sie verwendet ein neues Ensemble von acht globalen gitterbasierten Erntemodellen, die mit Klimadaten von fünf globalen Klimamodellen angetrieben werden. Dieses Ensemble entstand im Rahmen des Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Projects, Runde 3b (ISIMIP3b). Das länderspezifische Ernterisiko im 21. Jahrhundert wird durch den Vergleich der Wahrscheinlichkeit von Ernteaussfällen für historische und zukünftige Niveaus der globalen Durchschnittstemperatur evaluiert, wobei die Übereinstimmung zwischen den

einzelnen landwirtschaftlichen Modellen als Mass für die Robustheit der Ergebnisse herangezogen wird.

Auf die drei Hauptkapitel folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse, gefolgt von Diskussion von Unsicherheiten und Limitierungen, sowie praktischer Implikationen der Doktorarbeit im Rahmen des angewandten Forschungs- und Entwicklungsprojekts – und darüber hinaus. Um die resultierenden Daten und auch über den Rahmen dieses Projekts hinaus verfügbar zu machen, liegt ein besonderer Fokus dieser Arbeit darauf, dass vorrangig wissenschaftliche Daten und Methoden verwendet werden, die sowohl für die akademische als auch für die kommerzielle Nutzung lizenziert sind. Ausserdem werden die hier entwickelten Methoden open-source und -access veröffentlicht, sowohl in wissenschaftlichen Publikationen als auch online als Teil des CLIMADA-Repository.