

Dissertation. ETH No. 27467

# On the Biogeophysical Consequences of Forestation

A thesis submitted to attain the degree of  
**Doctor of Sciences of ETH Zurich**  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Ronny Andreas Meier**

Master degree in Environmental Sciences, ETH Zurich  
born on 30.10.1991  
citizen of  
Seuzach ZH

supervised and revised by

**Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne**  
**Dr. Edouard L. Davin**  
**Dr. Sebastiaan Luysaert**

2021

# Abstract

Humans currently utilize 69-76 % of the ice-free land surface. The associated Land Use and Land Cover Change (LULCC) affects the local, regional, and global climate. The climate impact of LULCC comprises the release or sequestration of greenhouse gases, the biogeochemical effects, and the alteration of the local energy and water redistribution at the land surface, the biogeophysical effects. Observations and models often disagree on the size and even the sign of biogeophysical effects from LULCC, even though they indicate that those effects are relevant for the local and regional climate. Most scenarios that confine global warming levels to below 2 °C incorporate substantial alterations of human land use, often to sequester greenhouse gases. It is therefore crucial to obtain a thorough understanding of the biogeophysical effects of LULCC and reconcile them in models with observations.

Clearing of natural forests for agricultural food production has been a widespread LULCC in the past. This trend is now reverted in some of the developed countries. In addition, re- or afforestation is frequently proposed as a tool to mitigate anthropogenic greenhouse gas emissions. This thesis therefore investigates the biogeophysical effects of re- or afforesting grassland and cropland, which is subsequently called forestation. To this aim, I employ both climate model simulations and analysis of observational data. In particular, I evaluate and undertake targeted improvements to reconcile the local biogeophysical effect of forestation in the Community Land Model (CLM) with observations. Further, I investigate whether forestation might affect precipitation in Europe employing observational data sets.

In Chapter 2, I confront the local biogeophysical sensitivity of CLM to forestation with various observational constraints. It appears that CLM agrees reasonably with observations regarding the sensitivity of albedo, daily mean Land Surface Temperature (LST), and daily maximum LST. Nonetheless, the albedo decrease following forestation is more pronounced in CLM compared to remote sensing observations. The daily maximum LST is distinctly lower in forests than over grassland/cropland both in observations and in CLM with the exception of winters at higher latitudes. However, CLM exhibits a slight positive bias in the daily maximum LST difference of forest minus grassland/cropland. The latter bias appears to be linked to a pronounced underestimation of the increase in EvapoTranspiration (ET) following forestation compared to various observational constraints, which do however exhibit a substantial spread themselves. Subsequently, I propose various modifications of the model to improve its ET sensitivity to forestation, which also reduce the positive bias in the effect of forestation on daily maximum LST. The simulated daily minimum LST difference between forest and grassland/cropland by and large resembles the sensitivity of daily maximum LST, although somewhat weaker, while remote sensing observations indicate that the daily minimum LST of forests is often higher than the one of grassland/cropland. Overall, this study indicates that CLM can represent some aspects of the local biogeophysical sensitivity to forestation well, while further model development is required for other aspects to reconcile CLM with observations.

In the next chapter, I investigate whether the lack of Biomass Heat Storage (BHS) in CLM is responsible for the identified biases in the sensitivity of daily maximum and minimum LST to forestation. The cooling of daily maximum temperatures is marginal, as most of the energy uptake by the vegetation biomass is compensated by a reduction of the turbulent heat fluxes. On the other hand, this process results in a pronounced warming of nighttime temperatures in forests, because the stable structure of the surface layer at night inhibits the compensation of the energy release from the vegetation by the sensible heat flux. The resultant nighttime warming frequently exceeds  $2^{\circ}\text{C}$  in forests, while BHS appears negligible for grassland and cropland, due their comparably small amount of biomass. Given this diurnal asymmetry, BHS warms daily mean temperatures in forested regions. CLM overestimates the diurnal temperature range in forests compared to remote sensing observations, which is improved substantially after including BHS in the model. Finally, I show that the inclusion of BHS alleviates the apparent deficiency of CLM related to the impact of forestation on the daily minimum LST, which emerged in Chapter 2. In summary, BHS strongly modulates nighttime temperatures in forests and is also relevant for the daily mean temperature, while its impact on daytime temperatures is only marginal.

In Chapter 4, I estimate alterations of precipitation from foresting agricultural land in Europe, a biogeophysical effect that has been largely disregarded in observational studies previously. This is done in two (almost independent) approaches: Firstly, I identify suitable site pairs in two rain gauge data collections that differ by at least 20 % in the agricultural land and forest fractions. Secondly, I model the climatology of a state-of-the-art spatially-continuous precipitation data set with Generalized Additive Models (GAMs) to link precipitation to land cover. In both approaches, forestation is estimated to increase precipitation locally, in particular during the winter months. The structure of the GAMs further allows to estimate precipitation changes downwind of the forestation locations. During winter, downwind precipitation increases in the southern and western parts of Europe, while the signal is near-neutral to negative in central and northern Europe. During summer, I find a downwind increase in precipitation due to forestation. The combined local and downwind effect from a realistic reforestation scenario are estimated to compensate a substantial fraction of the reduction in summertime precipitation, which is expected under RCP4.5 by the end of this century in an ensemble of regional climate models. While this study implies that forestation results in relevant alterations of precipitation in Europe, I would also like to highlight that this study is novel to the field and therefore more uncertain than the previous ones.

Forestation results in biogeophysical effects that are relevant for both the local and regional climate. Such effects should be considered before utilizing forestation as a tool to mitigate greenhouse gas emissions. Yet, many aspects regarding the biogeophysical effects of LULCC in observations and models are still uncertain or unknown. In this thesis, I demonstrate that BHS is relevant for the local climate in forests and should consequently be included in the next generation of earth system models that are used to assess the climate impact of LULCC. Further, I provide observational evidence of changes in precipitation following forestation in Europe. LULCC induces therefore not only temperature alterations, but also relevant modifications of the hydrological cycle, which need to be considered when assessing the climatic consequences of LULCC.

# Zusammenfassung

Der Mensch nutzt momentan 69-76 % der eisfreien Landoberfläche. Die damit verbundenen Änderungen in der Landnutzung und -bedeckung (engl. LULCC für "Land Use Land Cover Change") wirken sich auf das lokale, regionale und globale Klima aus. Die klimatischen Folgen von LULCC lassen sich in biogeochemische und biogeophysikalische Effekte unterteilen. Während biogeochemische Effekte die Emission und die Sequestrierung von Treibhausgasen betreffen, beziehen sich die biogeophysikalischen Effekte auf die Änderung der lokalen Energie- und Wasserverteilung an der Landoberfläche. Beobachtungen und Modelle widersprechen sich häufig bezüglich der Grösse und sogar des Vorzeichens von biogeophysikalischen Effekten durch LULCC, obwohl beide zeigen, dass diese Effekte relevant für das lokale und regionale Klima sind. Die meisten Klimaszenarien, welche die globale Erwärmung auf 2 °C beschränken, beinhalten beachtliche Änderungen der menschlichen Landnutzung, meist um Treibhausgase zu sequestrieren. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, ein gründliches Verständnis der biogeophysikalischen Auswirkungen von LULCC zu erlangen und diese in Modellen mit Beobachtungen in Einklang zu bringen.

Die Abholzung von Wäldern zur Nutzung als Landwirtschaftsflächen war in der Vergangenheit eine weitverbreitete LULCC. Dieser Trend wendet sich jetzt in einigen Industriestaaten. Ausserdem steht Aufforstung als Massnahme zur Sequestrierung von Treibhausgasen zur Debatte. Diese Arbeit untersucht daher die biogeophysikalischen Effekte durch Aufforstung von Gras- und Kulturflächen, was im Folgenden als Aufforstung bezeichnet wird. Hierfür habe ich sowohl Simulationen mit Klimamodellen als auch Beobachtungsdaten benutzt. Insbesondere habe ich die biogeophysikalischen Effekte von Aufforstung im Landoberflächenmodell "Community Land Model" (CLM) evaluiert und gezielte Verbesserungen am Modell vorgenommen, um diese Effekte mit Beobachtungen in Übereinstimmung zu bringen. Des Weiteren habe ich mit Hilfe von Beobachtungsdaten analysiert, wie sich Aufforstung auf den Niederschlag in Europa auswirkt.

In Kapitel 2 wird die lokale Sensitivität von CLM gegenüber Aufforstung mit mehreren beobachtungsbasierten Datensätzen verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Sensitivität der Albedo, des Tagesdurchschnitts der Temperatur an der Landoberfläche (engl. LST für "Land Surface Temperature") und des Tagesmaximums der LST (im nachfolgenden Tagesmaximum-Temperatur genannt) in CLM mit den Beobachtungsdaten hinreichend übereinstimmt. Allerdings ist die Verringerung der Albedo aufgrund von Aufforstung in CLM stärker ausgeprägt als in den Satellitendaten. Sowohl in den Beobachtungen als auch in CLM ist die Tagesmaximum-Temperatur in Wäldern geringer als auf Gras-/Kulturflächen, abgesehen von den höheren Breitengraden im Winter. Diese Temperaturdifferenz zwischen Wald und Gras-/Kulturland ist in CLM verglichen mit Beobachtungsdaten zu positiv, was sich auf eine starke Unterschätzung der Erhöhung von EvapoTranspiration (ET) durch Aufforstung zurückführen lässt. Die verschiedenen Beobachtungsdaten, die ich für diesen Vergleich hinzugezogen habe, weisen jedoch selbst eine grosse Spannweite auf. Darauf folgend schlage ich mehrere Modellmodifikationen vor, um die Sensitivität von ET gegenüber Aufforstung zu verbessern, was gleichzeitig

den positiven Fehler des Effekts von Aufforstung auf die Tagesmaximum-Temperatur verringert. Für das Tagesminimum der LST gleicht die modellierte Differenz zwischen Wäldern und Gras-/Kulturfleichen im Grossen und Ganzen jener des Tagesmaximums, ist aber etwas schwächer ausgeprägt. Dies steht im klaren Widerspruch zu den Beobachtungsdaten, in denen das Tagesminimum der LST von Wäldern häufig höher ist als dasjenige von Gras-/Kulturfleichen. Insgesamt weist diese Studie darauf hin, dass CLM einige Aspekte der lokalen biogeophysikalischen Sensitivität gegenüber Aufforstung gut wiedergeben kann, während für andere Aspekte weitere Modellentwicklungen von Nöten sind, um CLM mit Beobachtungsdaten in Übereinstimmung zu bringen.

Im nächsten Kapitel untersuche ich, ob sich die oben beschriebenen Defizite der Sensitivität des Tagesmaximums und des Tagesminimums der LST auf das Fehlen von Wärmespeicherung in der Biomasse (engl. BHS für "Biomass Heat Storage") in CLM zurückführen lassen. Der Kühlungseffekt von BHS auf die Tagesmaximum-Temperaturen ist marginal, da der Grossteil der Energieaufnahme der Biomasse durch eine Reduktion der turbulenten Wärmeflüsse kompensiert wird. Dagegen führt BHS zu einer deutlichen Erwärmung von Wäldern in der Nacht, weil die stabile Struktur der atmosphärischen Oberflächenschicht verhindert, dass die von der Biomasse freigegebene Energie durch Änderungen des sensiblen Wärmeflusses kompensiert wird. Die resultierende nächtliche Erwärmung übersteigt in Wäldern häufig  $2^{\circ}\text{C}$ , wohingegen BHS für Gras- und Kulturfleichen aufgrund derer vergleichsweise kleinen Biomasse vernachlässigbar zu sein scheint. Wegen der beschriebenen tageszeitlichen Asymmetrie wärmt BHS auch die Durchschnittstemperatur in Wäldern. CLM überschätzt den Tagesgang der LST in Wäldern verglichen mit Satellitendaten deutlich, was durch die Implementation von BHS im Modell merklich vermindert wird. Daneben wird auch die Abweichung des Effekts von Aufforstung auf das Tagesminimum der LST behoben, die ich in Kapitel 2 gefunden habe. Alles in allem verändert BHS den Tagesgang von Temperaturen in Wäldern stark und ist auch relevant für das Tagesmittel der Temperatur, während die Auswirkung auf Tagesmaximum-Temperaturen nur gering ist.

In Kapitel 4 habe ich die Veränderung des Niederschlags durch Aufforstung von Landwirtschaftsflächen untersucht; ein biogeophysikalischer Effekt, der in beobachtungsbasierten Studien bis anhin grösstenteils vernachlässigt wurde. Hierzu habe ich zwei (beinahe vollständig unabhängige) Ansätze verwendet: Erstens habe ich geeignete Paare von Regenmessstationen identifiziert, deren Umgebung sich um mindestens 20 % in den Anteilen an Wäldern und Landwirtschaftsflächen unterscheidet. Zweitens habe ich die Klimatologie eines modernen, räumlich kontinuierlichen Niederschlagsdatensatzes mit verallgemeinerten additiven Modellen (engl. GAMs für "Generalized Additive Models") modelliert, um einen Bezug zwischen der Landbedeckung und dem Niederschlag herzustellen. In beiden Ansätzen scheint Aufforstung den Niederschlag, insbesondere während des Winters, lokal zu erhöhen. Aufgrund der Struktur der GAMs lässt sich ausserdem die Veränderungen im Lee der aufgeforsteten Lokalitäten bestimmen. Im Winter erhöht sich der Niederschlag windabwärts in Süd- und Westeuropa, während der Effekt in Zentraleuropa nahezu neutral und in Nordeuropa negativ ist. Im Sommer erhöht sich der Niederschlag windabwärts von Aufforstung beinahe flächendeckend. Der kombinierte lokale und windabwärts gerichtete Effekt eines realistischen Aufforstungsszenarios kom-

pensiert einen beachtlichen Anteil der sommerlichen Niederschlagsabnahme, welche von einem Ensemble regionaler Klimamodelle gegen Ende dieses Jahrhunderts unter RCP4.5 prognostiziert wird. Während diese Studie darauf hinweist, dass Aufforstung relevante Veränderungen des Niederschlags in Europa hervorruft, muss berücksichtigt werden, dass sie im Forschungsfeld neuartig ist und daher grössere Unsicherheiten aufweist als die beiden vorangehenden Studien.

Zusammengefasst resultiert Aufforstung in biogeophysikalischen Effekten, welche für das lokale und das regionale Klima relevant sind. Solche Effekte sollten beachtet werden, bevor Aufforstung zur Kompensation von Treibhausgasemissionen genutzt wird. Dennoch sind viele Aspekte bezüglich der biogeophysikalischen Effekte durch LULCC in Modellen und Beobachtungen noch unsicher oder gar unbekannt. In dieser Arbeit zeige ich auf, dass BHS für das lokale Klima in Wäldern relevant ist und daher in der nächsten Generation von Erdsystemmodellen aufgenommen werden sollte, welche zur Bestimmung des Einflusses von LULCC auf das Klima herangezogen werden. Ausserdem lege ich mit Beobachtungen dar, dass Aufforstung den Niederschlag in Europa ändern kann. LULCC rufen daher nicht nur Temperaturveränderungen, sondern auch relevante Änderungen des Wasserkreislaufs hervor, welche bei der Abschätzung der klimatischen Folgen von LULCC berücksichtigt werden sollten.