

## Abstract

For hundreds of years, humans have engineered the planet to fulfil their need for increasing energy consumption and production. Since the industrial revolution, one consequence are rising global mean temperatures which could change by 2°C to 4.5°C until 2100 if mitigation enforcement of CO<sub>2</sub> emissions fails. To counteract this projected global warming, climate engineering techniques aim at intendedly cooling Earth's climate for example through terrestrial carbon dioxide removal (tCDR) which is commonly perceived as environmentally friendly. Here, tCDR refers to the establishment of large-scale biomass plantations (BPs) in combination with the production of long-lasting carbon products such as bioenergy with carbon capture and storage or biochar.

This thesis examines the potentials and possible consequences of tCDR by analysing land-use scenarios with different spatial and temporal scales of BPs using an advanced biosphere model forced by varying climate projections. These scenario simulations were evaluated with focus on their carbon sequestration potentials, trade-offs with food production and impacts on natural ecosystems and climate itself.

Synthesised, the potential of tCDR to permanently extract CO<sub>2</sub> out of the atmosphere is found to be small, regardless of the emission scenario, the point of onset or the spatial extent. On the contrary, the aforementioned trade-offs and impacts are shown to be unfavourable in most cases. In a high emission scenario with a late onset of BPs (i.e. around 2050), even unlimited area availability for tCDR could not reverse past emissions sufficiently, e.g. BPs covering 25% of all agricultural or natural land could delay 2100's carbon budget by no more than two or three decades (equivalent to  $\approx 550$  or 800 GtC tCDR), respectively. However, simultaneous emission reductions and an earlier establishment of BPs (i.e. around 2035) could result in strong carbon extractions reversing past emissions (e.g. six or eight decades or  $\approx 500$  or 800 GtC, respectively). In both cases, land transformation for tCDR leads to high "costs" for ecosystems (e.g. biodiversity loss) and food production (e.g. reduction of almost 75%). Restricting the available land for BPs by these trade-off constraints leaves very small tCDR potentials (well below 100 GtC) despite a near-future onset (in 2020). Similarly, simulated tCDR potentials on dedicated BP areas defined in a commonly used and published low emissions scenario stay below the aimed values using current management practices. Some potential may lie the reduction of carbon losses from field to end-products, new management options and the restoration of degraded soils with BPs.

This thesis contradicts the assumption that tCDR could be an effective and environmentally friendly way of complementing or substituting strong and rapid mitigation efforts.

## Zusammenfassung (German)

Seit Jahrhunderten formen Menschen die Erde, um sie an ihre Ansprüche nach steigender Produktion und Energieverfügbarkeit anzupassen. Spätestens seit der industriellen Revolution sind eine Folge dessen die steigenden globalen Mitteltemperaturen mit Änderungen von  $2^{\circ}\text{C}$  bis  $4.5^{\circ}\text{C}$  bis 2100 sollten  $\text{CO}_2$  Emissionen nicht oder nur unzureichend gesenkt werden. Klima-Engineering befasst sich deshalb mit der gezielten Abkühlung des Klimas, z.B. durch die als generell umweltfreundlich angesehenen Techniken des terrestrische Kohlendioxidzugs (tCDR). Insbesondere wird der Anbau von großflächigen Biomasseplantagen (BP) in Kombination mit der Erstellung von langlebigen Kohlenstoffprodukten wie Bioenergie oder Biokohle in Betracht gezogen.

Die vorliegende Doktorarbeit untersucht die tCDR Potentiale und möglichen Konsequenzen von BP auf Nahrungsmittelproduktion, Ökosysteme und das Klima selbst mit Hilfe der Analyse von Landnutzungszenarien. Diese Szenarien decken unterschiedliche zeitliche und räumliche Ausdehnungen von BP ab und werden mit einem renommierten Biosphärenmodell unter Einfluss verschiedener Klimaprojektionen simuliert und anschließend ausgewertet.

Insgesamt wird das tCDR Potential von BP als gering befunden, unabhängig vom Emissionsszenario und ab wann oder wie flächendeckend BP angebaut werden. Demgegenüber stehen meist die zuvor genannten, ungewünschten Konsequenzen. Werden in einem Szenario mit hohen  $\text{CO}_2$  Konzentrationen BP erst spät (hier 2050) etabliert, kann selbst unbeschränkte Landverfügbarkeit die bisherigen Emissionen nicht ausgleichen: Werden z.B. BP auf 25% aller Landwirtschafts- oder Naturflächen angebaut, könnte dies die atmosphärische Kohlenstofflast in 2100 um nicht mehr als 20 oder 30 Jahre verzögern (äquivalent zu  $\approx 550$  bzw.  $800 \text{ GtC tCDR}$ ). Anders jedoch, wenn gleichzeitig Emissionen eingespart und BP früher (hier 2035) angebaut werden (60 oder 80 Jahre Verzögerung äquivalent zu  $\approx 500$  oder  $800 \text{ GtC tCDR}$ ). In beiden Fällen führen diese Landumwandlungen jedoch zu sehr hohen "Kosten" für Ökosysteme (z.B. Biodiversitätsverlust) und die Nahrungsmittelproduktion (hier eine Reduzierung um fast 75%). Um deren Schutz zu gewährleisten kann die Landverfügbarkeit für tCDR beschränkt werden, was jedoch die tCDR Potentiale trotz baldiger Etablierung (ab 2020) sehr einschränkt (mit weit weniger als  $100 \text{ GtC}$ ). Auch die Potentiale eines bereits publizierten Mitigationsszenarios bleiben deutlich unter den Anforderungen. Das Potential könnte jedoch durch Erhöhung der Umwandlungseffizienzen von Biomasse, neuen Managementoptionen oder der Aufwertung degradiertter Flächen durch BP erhöht werden.

Diese Doktorarbeit kann abschließend nicht die Annahme unterstützen, dass tCDR eine effektive und umweltfreundliche Methode der Kohlenstoffsequestrierung, und damit eine Ersetzung von strengen Mitigationspfaden, sein könnte.