

Der Einfluss von ausgewählten sozialen und Umweltfaktoren auf das Potential der CO₂ Speicherung durch Aufforstung in der borealen Zone

Lena Beber, Cyril Heim, Anja Kaufmann, Paloma Porfido, Noelle Siegenthaler, Fiona Schwaller

Zusammenfassung

Die Böden borealer Wälder machen global 11% der Böden aus und sind Speicher von 16% des weltweiten Boden-Kohlenstoffes (C) ¹. Die C-Speicherung in Biomasse und Boden in Waldökosystemen wird unter anderem von Baumartenzusammensetzung und waldbaulichen Eingriffen beeinflusst ^{2,3,4,5}. Ihre genauen Einflüsse sind für boreale Standorte jedoch schwer abschätzbar und andere Faktoren, wie beispielsweise die Bodenfruchtbarkeit, scheinen hier eine grössere Auswirkung auf die C-Speicherung zu haben ^{2,4}. Der für die Bodenfruchtbarkeit wichtige Stickstoff limitiert die Zersetzung von organischer Substanz im Boden. Ericoid- und Ektomykorrhiza dominierte Ökosysteme haben deshalb in Bezug auf die C-Speicherung einen Vorteil gegenüber von arbuskulären Mykorrhiza dominierten Böden. Da erstere eine bessere Stickstoffverfügbarkeit haben, können sie nämlich 1.7 mal mehr C pro Einheit Bodenstickstoff speichern ⁶.

Es ergibt Sinn hemiboreale Wälder mit in Betracht zu ziehen, da sie im Zuge des Klimawandels weiter in den Norden wandern und C effektiver speichern als boreale Wälder ⁵. Hemiboreale Wälder könnten auch ein Vorteil für den Wasserhaushalt sein. Wasser ist in borealen Wäldern nämlich ein limitierender Faktor und die zunehmenden Trockenperioden und Waldbrände als Folgen des Klimawandels erhöhen die Kohlenstoffdioxidemissionen der Wälder ⁷. Laubbäume könnten eher helfen die Bodenfeuchte zu erhöhen als Nadelbäume ⁸.

Neben den für Aufforstungsprojekte zu betrachtenden Umweltfaktoren, bedeuten Aufforstungen auch Veränderungen für die lokale Bevölkerung sowie die Regierung. Aufforstungen können beispielsweise ein wichtiges Instrument sein, die Treibhausgasemissionen zu minimieren, um so Klimaziele zu erreichen. Die finanzielle Attraktivität solcher Projekte berechnet sich aus den erwarteten Erlösen der Holzproduktion und von Holz als Brennstoff und dem CO₂-Preis abzüglich der Opportunitätskosten ⁹. Bei grossflächiger Aufforstung steigen die Nahrungsmittelpreise und das Hungerrisiko könnte zunehmen. Doch wegen des geringen Landdrucks in borealen Zonen bleibt dieser Effekt klein ¹⁰. Zudem muss mit Trade-offs zwischen Holzgewinnung (Einkommensgenerierung), Ökosystemdiversität und CO₂-Speicherung gerechnet werden ¹¹. Die Wahl ökonomischer Baumarten kann einerseits Einkommen generieren ¹², andererseits die Komplexität des Ökosystems verkleinern. ¹¹

Um abschliessend das Potential der CO₂-Speicherung durch Aufforstungen zu beurteilen, müssen die grundlegenden Umweltfaktoren, der Klimawandel, die sozialen Trade-offs sowie die finanzielle Attraktivität berücksichtigt werden.

Rechercheaspekt A: Einfluss von Waldmanagement auf C-Speicher

Fiona Schwaller

Kurzzusammenfassung

Es ist unklar, wie effizient unterschiedliche Baumarten Kohlenstoff (C) im Waldökosystem (in Boden und Biomasse) speichern. Studien, die speziell für die Forschung bewirtschaftete Waldstandorte untersuchen, kommen zum Schluss, dass Föhrenbestände (*Pinus ssp.*) mehr C speichern als Fichtenbestände (*Picea ssp.*).^{2 3} Im Vergleich dazu sagen Studien über normal bewirtschaftete Wälder aus, dass Fichtenbestände mehr C speichern.¹³ Allerdings können Nebeneffekte wie Bodenfruchtbarkeit nicht ausgeschlossen werden. Fichten-Föhren-Mischbestände scheinen nicht signifikant mehr C zu speichern als Monokulturen beider dieser Arten.² Auch andere waldbauliche Variablen wie verschiedene Erntemethoden⁴ oder den Abstand zwischen den Bäumen bei der Pflanzung³ haben einen Einfluss auf die Menge an gespeichertem C in Waldökosystemen. In der Zukunft könnten auch hemiboreale (zwischen borealen und temperierten) Wälder weiter in den Norden wandern und somit momentan boreale Standorte einnehmen. Dies hat einen Einfluss auf die Menge an gespeichertem C im Waldökosystem, da hemiboreale Wälder effektiver C speichern als boreale Wälder.⁵

Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? ¹³

Review Paper, Zusammenfassung des aktuellen Wissensstands bezüglich des Effekts von Baumarten auf gespeicherten Bodenkohlenstoff in temperierten und borealen Böden; Untersuchte Studien aus Nordamerika und Europa ähnliche Schlussfolgerungen → grösster organischer Boden C (SOC)-Speicher bei *Picea*, gefolgt von *Pinus* und am schlechtesten schneiden Laubbäume wie *Betula* und *Populus* ab. Bei *Larix* ist man sich uneinig. Unterschiede kleiner bei mineralischem Boden C (MC). Unterschied zwischen MC und SOC sind nicht vernachlässigbar. Bodentyp stärkeren Einfluss auf C-Speicher als Baumarten. Ob Mix aus Baumarten besser als Monokultur, bleibt unklar. Eine Art kann SOC 200-500% erhöhen und MC 40-50%, beide Effekte aber nicht zwingend additiv. MC stabiler als SOC, da stärker von Bodentyp beeinflusst.

Modeling the impacts of intensifying forest management on carbon budget across a long latitudinal gradient in Europe ⁴

Simulation von Effekt auf C und Stickstoff (N) Kreislauf durch verändertes Klima und Waldmanagement in borealen und temperierten Regionen. 10 Standorte auf N-S-Gradient (Nordfinland bis mitte Ukraine). Untersuchte Arten: *Pinus sylvestris* & *Picea abies*. Vergleich von zwei Modellen. C-Speicher in Biomasse wurde grösser mit dem Klimawandelszenario. Managementunterschiede: C-Speicher in Biomasse ist grösser bei WTH (whole tree harvesting) als bei SOH (stem only harvesting) wegen grösserer Nährstoffextraktion (damit stärkeres Wachstum von Nachwuchs). Dass WTH positiv ist aber unwahrscheinlich und braucht weitere Untersuchungen. Streu- und Boden-C ist 5-15% (in dieser Studie 7-13%) kleiner bei WTH als SOH. Kompletter C-Speicher (über und unter Boden): 5-27% grösser bei WTH. WTH mit verkürzter Wachstumsperiode aber deutlich schlechter als SOH. Management hat kurzfristig grösseren Einfluss als Klimawandel.

Carbon exchange in a hemiboreal mixed forest in relation to tree species composition ⁵

Wanderung der hemiborealen Wälder in den Norden → hemiboreale Zone nicht ausreichend erforscht.

Schätzung der C-Speicherkapazität von hemiborealen Mischwäldern und die Haupt C-Flüsse im Ökosystem-C-Budget. Standort im südöstlichen Estland. Zwei "study plots" (einer 45% *Picea abies* & 40% *Betula pendula*, anderer 80% *Picea abies* & 15% *Betula pendula*). Nadelbaum-Standort hatte grösseren C, N und organische Materialien Anteil in der obersten Erdschicht als Mischstandort.

Nettoökosystemproduktivität: Nadelholzstandort 5.19 t C / (ha*yr), gemischter Standort (mit besserer Bodenfruchtbarkeit) 7.48 t C / (ha*yr), Durchschnitt: 6.33 t ha⁻¹ yr⁻¹. C hauptsächlich in Biomasse aufgenommen. Nettoökosystemeffektivität aufgrund von C-Speicherung ist grösser im hemiborealen Wald als im borealen Wald.

Impacts of tree species identity and species mixing on ecosystem carbon and nitrogen stocks in a boreal forest ²

Produktivitätsunterschiede zwischen *Pinus sylvestris* und *Picea abies* und deren Mischungen bezüglich Ökosystem C- und N-Speicher untersucht. Standort aus Langzeitstudie (vor 60 Jahren gestartet) im zentralen Schweden. 5 Plots, pro Plot 3 Felder: 1x *P. abies* Monokultur, 1x *P. sylvestris* Monokultur, 1x Mix. Mix- und *Pinus*bestand mehr gewachsen als *Picea*bestand. Mittlere Boden-C-Speicher 45% resp. 35% grösser in *Pinus*- resp. Mischbestand als in *Picea*bestand. Im Boden 10-20cm unter Oberfläche haben Mischbestände 176% resp. 48% mehr SOC als *Picea* resp. *Pinus* --> "positive mixing effect". 0-20cm tiefe --> keine Unterschiede. Totale Ökosystem-C-Senke in *Pinus*monokultur 46% grösser als in *Picea*monokultur. Anderes Resultat als andere Papers (evtl. weil Fichte eher an fruchtbaren Standorten gepflanzt wird...?). Mischbestand gleich gut wie *Pinus*monokultur?

Long-term tree-ring derived carbon dynamics of an experimental plantation in relation to species and density in Northwestern Ontario, Canada ³

C-Flüsse und -Speicher in einer experimentellen Plantage untersucht. Standort Nordwest Ontario, Kanada. 3 Arten: *Pinus resinosa* (red pine), *Picea glauca* (white spruce), *Picea mariana* (black spruce) in drei verschiedenen Dichten gepflanzt: 1.8 m Abstand, 2.7 m Abstand & 3.6 m Abstand. Alle Arten und Dichten kombiniert. 1950 gepflanzt. Holzvolumen: red pine > white spruce > black spruce. Beide spruce: Volumen nach Pflanzabstand 1.8 > 2.7 > 3.6; red pine 1.8 = 2.6 > 3.6 [m]. Nettoökosystemproduktion red pine > white spruce > black spruce. Biomasse C-Speicher gleich.

Rechercheaspekt B: Wie beeinflussen Mykorrhiza Pilze die Effektivität der Kohlenstoffspeicherung im Boden in der borealen Waldzone?

Paloma Porfido

Kurzzusammenfassung

Boreale Waldböden enthalten 16% des weltweit im Boden gespeicherten Kohlenstoffs.¹ Pflanzenwurzeln und wurzellosoziierte Mikroorganismen, einschliesslich Mykorrhiza Pilze, tragen bis zu 70% des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs bei.¹⁴ In der borealen Zone sind Pilze die hauptsächlich Destruenten der organischen Bodensubstanz.¹⁵ Doch die Zersetzung ist limitiert durch die mikrobielle Stickstoffverfügbarkeit. Durch einen besseren Stickstoffzugang können Ektomykorrhiza und Ericoid Mykorrhiza dominierte Ökosysteme 1.7-mal mehr Kohlenstoff pro Einheit Bodenstickstoff speichern als arbuskuläre Pilz dominierte Ökosysteme.⁶ Aber auch zwischen Ericoid und Ektomykorrhiza wurden Unterschiede gefunden. Erstere dominieren in späteren Sukzessionsstadien und verhelfen zum langfristigen Humusaufbau. Zweitere dominieren in frühen Stadien der Sukzession und tragen zu einer tieferen Kohlenstoffbindungsrate bei.¹⁶

Ersichtlich ist, dass Mykorrhiza wichtige Regulatoren der Kohlenstoffdynamik in Ökosystemen sind.¹

Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal forest ¹

Mykorrhiza und C-Dynamik, 50-70% des gespeicherten C kommt von Wurzeln und MO's an den Wurzeln, Mykorrhiza sind wichtige Regulatoren der C-Dynamik in Ökosystemen, borealer Wald enthält 16% des C's in Böden

Fungal carbon sequestration ¹⁴

Mykorrhiza und C-Bindung, Mykorrhiza können C im Boden binden, Mykorrhizischer Kohlenstoff für Kohlenstoffbindung im Boden, Teil des C's welches Pflanzen Pilzen gibt wird für Hyphenbildung gebraucht, Wenn Hyphen sterben werden sie entweder zersetzt oder bleiben im Boden für Jahrzehnte -> Beitrag zur C-Bindung, bis 70% des Boden-C kommt von Wurzeln (mit denen Mykorrhiza in Verbindung sind), stabile Isotopkennzeichen der org. Bodensubstanz ähnelt am meisten der der Pilze, langfristiges Boden-C kommt von Pilzen und anderen Mikroben nicht von den Pflanzen, weil sie Verbindungen eingehen, welche schlecht zu CO₂ verändert werden können

Bodenlandschaften kühl-humider Zonen (Boreale Wälder) ¹⁵

Böden der borealen Zone, Pilze in nördl. Gebiete vorwiegende Destruenten

Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage ⁶

Funktionelle Eigenschaften von Mykorrhiza auf C-Speicherung, Zersetzung der organischen Bodensubstanz limitiert durch Stickstoffverfügbarkeit für Mikroben, Effekte von versch. Mykorrhizatypen auf Boden-C wichtiger als Effekte von Primärproduktion/Temp/Niederschlag etc., EEM dominierte Ökosysteme haben grösserer C-Speicher als AM dominierte, da EEM besserer Zugang zu Stickstoff haben

Carbon sequestration is related to mycorrhizal fungal community shifts during long-term succession in boreal forests ¹⁶

oberirdische und unterirdische C-Inputs tragen zum C-Speicher bei, in früher Sukzessionsstadien der Wälder gibt es mehr Ectomycorrhiza Pilze welche tiefe C-Bindung hervorrufen, In späten Sukzessionsstadien mehr ericoid Pilze(Ascomyceten) dominieren und verhelfen zum langfristigen Humusaufbau, verringerte Zersetzung von org. Substanz kommt von Mykorrhiza, Fadenförmige brauchen am meisten C und haben Enzyme für effiziente Biomassezersetzung, Mycelien mit viel Chitin und Stickstoff tragen zur Zersetzung bei, Mycelien mit "melanized" Zellwänden (wie Ascomyceten) sind resistenter gegen Zersetzung -> langfristiger Humus

Rechercheaspekt C: Bedeutung der klimawandelinduzierten

Veränderungen im Wasserhaushalt borealer Wälder für

Aufforstungsprojekte

Lena Beber

Kurzzusammenfassung

Der Klimawandel äussert sich in borealen Wäldern durch Trockenheit hervorgerufen durch höhere Temperaturen, stärkere Niederschläge im Winter und schwächere im Sommer.¹⁷ Die Wassernutzungseffizienz steigt bei Trockenheit, doch gerade an diverseren Standorten hat diese intensivere Nutzung einen austrocknenden Effekt auf die Bodenfeuchte.¹⁸ Wegen der Trockenheit steigt auch die Frequenz von Feuern im Sommer und jegliche Jungwälder sind zunächst Kohlenstoffdioxidquellen.⁷ Mit zunehmendem Alter werden die Wälder zwar Kohlenstoffdioxidensenken, doch höhere Temperaturen steigern wiederum die Kohlenstoffdioxidemissionen.¹⁹ Laubbäume erlauben

tendenziell mehr Kronendurchlass als Nadelbäume, dies resultiert in höherer Bodenfeuchte, weshalb erstere für zukünftige Aufforstungsprojekte attraktiver sein könnten.⁸

Klimawandel im Norden ¹⁷

Abschätzung Klimawandelfolgen in borealer Zone;

Zusammenhang: höhere Temperaturen, stärkere Niederschläge im Winter, schwächere im Sommer und Wachstum/Ausbreitung Nadelwälder

Does drought influence the relationship between biodiversity and ecosystem functioning in boreal forests? ¹⁸

Unterschiede der Wassernutzungseffizienz in der borealen Zone: trockenere vs. feuchtes Jahr und Monokulturen vs. diversere Standorte (wegen dem Klimawandel → Tendenz zu trockenen Sommern)

Comparison of carbon dynamics and water use efficiency following fire and harvesting in Canadian boreal forests ⁷

Wie verändern Feuer und Abholzung die Wassernutzungseffizienz und Kohlenstoffdynamik in borealen Wäldern. Schaden nach Abholzung höher; doch Jungwälder nach beidem = Kohlenstoffquellen.

Klimawandel → Tendenz zu häufigeren Feuern

Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils ¹⁹

Veränderung N₂O -, CH₄ - und CO₂ - Flüsse bei Aufforstung von finnischen borealen agrikulter Böden und Torfböden. Älterer Standort → geringere CO₂ - Emissionen; Wärmere Sommer → höhere

Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: A review ⁸

Zusammenhang Regenwasseranteile und Alter, Stammbeschaffenheit, Immergrünsein eines Stands; Vergleich verschiedener Stände.

Laubbäume: mehr Kronendurchlass → mehr Bodenfeuchte → wegen Klimawandel vielleicht besser für Aufforstung

Rechercheaspekt D: Effizienz des Investments in Aufforstung

Cyril Heim

Kurzzusammenfassung

Um die Klimaziele zu erfüllen verlassen sich viele Länder unter anderem auch Kanada auf Aufforstungsprojekte. Im Westen von Kanada könnte so durch das Aufforsten mit Pappeln Kohlenstoff in den verschiedenen Pools (Stamm, Streu, Äste & Blätter, Wurzeln und Boden) gespeichert werden.²⁰ Auch im Osten von Kanada deuten Forschungen darauf hin, dass bereits nach 8-12 Jahren Kohlenstoff gespeichert werden kann.²¹ Die Attraktivität solcher Aufforstungen ist stark abhängig von der geographischen Lage sowie der Art des Projektes.²² Konkret sind solche Projekte oft abhängig vom Kohlenstoffpreis. Berechnungen aus den USA zeigen, dass bei 50\$/t CO₂ 200 mio. Tonnen Kohlenstoff sequestriert werden könnten. Bei einem doppelt so hohen Preis sogar noch einmal weitere 100 mio. Tonnen.²³ Grundsätzlich berechnet sich der Preis ab wann sich ein Investment in Aufforstungsprojekte lohnt gemäss dieser Überlegung. Die Erlöse aus der Holzproduktion sowie Erlöse von Holz als Brennstoff plus den CO₂-Preis und abzüglich den Opportunitätskosten.⁹

Can boreal afforestation help offset incompressible GHG emissions from Canadian industries? ²¹

Die Aufforstung von sogenannten «open woodlands» in der borealen Region rund um Quebec macht es möglich, dass bereits nach 8-12 Jahren Kohlenstoff gespeichert werden kann. Um dies herauszufinden, wurden unterschiedliche Baumarten und Bewirtschaftungsweisen miteinander verglichen.

Mitigating climate change through afforestation: New cost estimates for the United States ²³

In dieser Studie wurde für jeden Bezirk in den USA berechnet, ob Aufforstung überhaupt möglich und ökonomisch lohnend ist. Dazu wurde ein CO₂-Preis von 50\$/t sowie von 100\$/t angenommen. Beim 50\$/t könnten jährlich zusätzlich 200 Millionen Tonnen Kohlenstoff sequestriert werden. Bei 100\$/t wären es sogar 300 Millionen Tonnen CO₂.

Economics of fossil fuel substitution and wood product sinks when trees are planted to sequester carbon on agricultural lands in western Canada ²⁰

Durch grossflächiges Anpflanzen von Pappeln könnte im Westen von Kanada Kohlenstoff langfristig sequestriert. Zudem könnte das Holz als Substitut für Kohle als Brennstoff dienen und so die CO₂ Emissionen verringern. Die Wirtschaftlichkeit dieser Aufforstung ist wiederum vom CO₂ Preis abhängig.

How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks ²²

Diese Metaanalyse versucht die Kosten für Aufforstungen als Kohlenstoffsénke zu beziffern. Die Kosten für die Sequestrierung von CO₂ variieren von Studie zu Studie sehr stark bezüglich der geographischen Lage oder der Art des Projektes.

Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada ⁹

Wenn man die Erlöse aus der aus Holzprodukten sowie Erlöse von Holz als Brennstoffersatz mit dem CO₂-Preis für gespeicherten Kohlenstoff addiert und davon noch die Opportunitätskosten subtrahiert, erhält man den Preis zu welchem finanziell lohnend aufgeforstet werden kann.

Rechercheaspekt E: Einfluss von Aufforstung auf die Ernährungssicherheit der lokalen Bevölkerung

Anja Kaufmann

Kurzzusammenfassung

Aufforstung hat einen grossen Einfluss auf die Ernährungssicherheit der lokalen Bevölkerung. Wenn in den USA 10% der Emissionen durch Aufforstung gedeckt werden, entspricht dies 48% weniger Nahrungsmittelproduktion.²⁴ Wald kann jedoch auch eine wichtige Nahrungsquelle darstellen und bietet wichtige Ökosystemleistungen, welche für die Landwirtschaft nützlich sind.²⁵ Aufforstung zur Klimawandelbekämpfung könnte einen grossen Einfluss auf die Anzahl Menschen mit Risiko auf Hunger haben. In Regionen, wo die Nahrungsverfügbarkeit ohnehin klein ist, nimmt die Zahl am meisten zu.¹⁰ Nahrungsmittelpreise könnten in einem Szenario mit ungehinderter Aufforstung bis zu einem Vierfachen ansteigen bis 2100.²⁶ Es ist jedoch möglich in inklusiven Policy Paketen Ernährungssicherheit und Klimawandelbekämpfung zu vereinbaren.²⁷

Implications of policies to prevent climate change for food security ²⁴

Untersucht verschiedene Massnahmen, um Klimawandel abzuschwächen und den negativen Einfluss auf die Ernährungssicherheit. Betrachtete Massnahmen: Energieproduktion (in Landwirtschaft, Hydro, Biomasse), Emissionen in Landwirtschaft, Aufforstung, Geoengineering & CO₂-Düngung.

Forests, Land Use, and Challenges to Climate Stability and Food Security ²⁵

Es wird untersucht, wie man Nahrungsmittelproduktion erhöhen kann, wie die Bodendegradation verringert werden kann und wie man degradierte Böden wiederherstellen kann. Für alle Fragen könnte Aufforstung eine Lösung sein.

Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs ¹⁰

Das ökonomische Potenzial von Aufforstung wird mit einem Modell berechnet, um die negativen trade-offs von Aufforstung einzubeziehen. Die Rolle von Aufforstung zur Verminderung des Klimawandels und den Einfluss auf das Nahrungsmittelsystem wird diskutiert.

Afforestation to mitigate climate change: impacts on food prices under consideration of albedo effects ²⁶

Aufforstung ist eine Möglichkeit, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen. Es wird dabei erläutert wie die Nahrungsmittelpreise und der Albedoeffekt darauf reagieren. Es wurden Einflüsse auf globale und regionale Preise modelliert.

Inclusive climate change mitigation and food security policy under 1.5°C climate goal ²⁷

Es werden potenzielle Konsequenzen von einer 1.5°-Policy auf die Ernährungssicherheit untersucht und daraus Informationen gewonnen, wie man Policies formulieren muss, damit das Hungerrisiko nicht zunimmt.

Rechercheaspekt F: Einfluss von Aufforstung auf das Einkommen der lokalen Bevölkerung

Noelle Siegenthaler

Kurzzusammenfassung

Aufgrund erhöhter Opportunitätskosten bei einer Aufforstung eines fruchtbaren Bodens, lohnt sich eine Bewaldung in Grossbritannien meist auf weniger produktivem Land.²⁸ Eine Aufforstung ist eine Langzeitinvestition²⁹ und daher je nach Diskontierung wenig attraktiv.²⁸ Für Bauern kann die Aufforstung zu Einkommenseinbussen führen, aber auch als Puffer in einkommensschwachen Jahren dienen.²⁹ In Uzbekistan hatte die Aufforstung von degradiertem Ackerland mit passenden Baumarten (zB Orangebaum) das Einkommen positiv beeinflusst.¹² Auch mittels staatlicher Subventionen kann die Aufforstung für die Bauern lohnenswert werden, wie etwa in Liping County (China).³⁰ Bei Massnahmen zur Einkommenssteigerung muss mit Trade-offs zwischen Ökosystemdiversität, Einkommen (zB Holzgewinnung) und CO₂-Speicherung gerechnet werden.¹¹

An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change ²⁸

Aufforstung von verlassenem, marginalem Land in Grossbritannien; Kosteneffektivität von Aufforstung; Kosten variieren zwischen Ländern aufgrund Landpreis, Anbaubedingungen, Holzpreis, Kosten Baumpflanzung, Diskontierung; Aufforstung sinnvoller auf weniger produktivem Land

Stochastic Economic Assessment of Afforestation on Marginal Land in Irrigated Farming System ²⁹

Studie in Uzbekistan, mit aridem kontinentalem Klima (Bewässerung nötig) --> tiefe Fruchtbarkeit des Landes + Degradierter Boden; Trade-off Ackerland – Aufforstung; Wald als Puffer in einkommensschwachen Jahren; Langzeitinvestition; CO₂-Gelder erhöhen; Modell beeinflusst Output

Conversion of degraded cropland to tree plantations for ecosystem and livelihood benefits ¹²

Degradierte Ackerfläche in Khorezm → Boden schlecht für Ackerland; Ökosystemdienstleistungen; Wechsel zu Wald → Einkommen positiv beeinflussen; Artenkombination (Brennholz, Blatt, Früchte...) wichtig → stabile Produktionsrate; Anreize, Anfangskapital, Know-how nötig für Umstellung

The costs and benefits of reforestation in Liping County, Guizhou Province, China ³⁰

"Grain for Green" Politik (Aufforstungsprogramm) in Liping County (China); Subventionen (Essen + Geld) nötig (5-8 Jahre) → Grund: kurzfristiger Ertrag zu gering + Anreize nötig; ökonomische Bäume (Frucht-, Nussbaum); Arbeitsproduktivität für Baumpflanzung höher als Landwirtschaft

Managing forest and marginal agricultural land for multiple tradeoffs: Compromising on economic, carbon and structural diversity objectives ¹¹

Trade-off Ökonomie, CO₂ und Diversität; Nordosten British Columbia (boreal); genereller; Einschränkung Baumarten → negativ für Komplexität des Ökosystems/Biodiversität; CO₂-Speicherung → Einbussen im Holzverkauf + negativ für strukturelle Diversität des Ökosystems; Balance finden

Literaturliste

1. Clemmensen, K. E., * A. Bahr, O. Ovaskainen, A. Dahlberg, A. Ekblad, H. W. & J. Stenlid, R. D. Finlay, D. A. Wardle, B. D. L. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science (80-.)*. **339**, 1615–1619 (2013).
2. Blaško, R., Forsmark, B., Gundale, M. J., Lundmark, T. & Nordin, A. Impacts of tree species identity and species mixing on ecosystem carbon and nitrogen stocks in a boreal forest. *For. Ecol. Manage.* **458**, (2020).
3. Metsaranta, J. M. Long-term tree-ring derived carbon dynamics of an experimental plantation in relation to species and density in Northwestern Ontario, Canada. *For. Ecol. Manage.* **441**, 229–241 (2019).
4. Akujärvi, A., Shvidenko, A. & Pietsch, S. A. Modelling the impacts of intensifying forest management on carbon budget across a long latitudinal gradient in Europe. *Environ. Res. Lett.* **14**, (2019).
5. Krasnova, A. *et al.* Carbon exchange in a hemiboreal mixed forest in relation to tree species composition. *Agric. For. Meteorol.* **275**, 11–23 (2019).
6. Averill, C., Turner, B. L. & Finzi, A. C. Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature* **505**, 543–545 (2014).
7. Mkhabela, M. S. *et al.* Comparison of carbon dynamics and water use efficiency following fire and harvesting in Canadian boreal forests. *Agric. For. Meteorol.* **149**, 783–794 (2009).
8. Barbier, S., Balandier, P. & Gosselin, F. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: A review. *Ann. For. Sci.* **66**, 602–602 (2009).
9. McKenney, D. W., Yemshanov, D., Fox, G. & Ramlal, E. Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada. *For. Policy Econ.* **6**, 345–358 (2004).
10. Doelman, J. C. *et al.* Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs. *Glob. Chang. Biol.* (2019) doi:10.1111/gcb.14887.
11. Krcmar, E., Van Kooten, G. C. & Vertinsky, I. Managing forest and marginal agricultural land for multiple tradeoffs: Compromising on economic, carbon and structural diversity objectives. *Ecol. Modell.* **185**, 451–468 (2005).
12. Khamzina, A., Lamers, J. P. A. & Vlek, P. L. G. Conversion of degraded cropland to tree plantations for ecosystem and livelihood benefits. in *Cotton, Water, Salts and Soums: Economic and Ecological Restructuring in Khorezm, Uzbekistan* vol. 9789400719 235–248 (Springer Netherlands,

13. Vesterdal, L., Clarke, N., Sigurdsson, B. D. & Gundersen, P. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *For. Ecol. Manage.* **309**, 4–18 (2013).
14. Treseder, K. K. & Holden, S. R. Fungal carbon sequestration. *Science (80-)*. **340**, 1528–1529 (2013).
15. Wiechmann, H. & Blume, H.-P. Bodenlandschaften kühl-humider Zonen (Boreale Wälder). in *Böden als Teile von Landschaften* (2008).
16. Clemmensen, K. E. *et al.* Carbon sequestration is related to mycorrhizal fungal community shifts during long-term succession in boreal forests. *New Phytol.* **205**, 1525–1536 (2015).
17. Franke, A. Klimawandel im Norden. *entgrenzt* (2014).
18. Grossiord, C., Granier, A., Gessler, A., Jucker, T. & Bonal, D. Does drought influence the relationship between biodiversity and ecosystem functioning in boreal forests? *Ecosystems* **17**, 394–404 (2014).
19. Maljanen, M., Hytönen, J. & Martikainen, P. J. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant Soil* **231**, 113–121 (2001).
20. van Kooten, G. C., Krmar-Nozic, E., Stennes, B. & van Gorkom, R. Economics of fossil fuel substitution and wood product sinks when trees are planted to sequester carbon on agricultural lands in western Canada. *Can. J. For. Res.* **29**, 1669–1678 (1999).
21. Boucher, J. F., Tremblay, P., Gaboury, S. & Villeneuve, C. Can boreal afforestation help offset incompressible GHG emissions from Canadian industries? *Process Saf. Environ. Prot.* **90**, 459–466 (2012).
22. van Kooten, G. C., Eagle, A. J., Manley, J. & Smolak, T. How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks. *Environ. Sci. Policy* **7**, 239–251 (2004).
23. Elberg Nielsen, A. S., Plantinga, A. J. & Alig, R. J. Mitigating climate change through afforestation: New cost estimates for the United States. *Resour. Energy Econ.* **36**, 83–98 (2014).
24. Rosenberg, N. J. & Scott, M. J. Implications of policies to prevent climate change for future food security. *Glob. Environ. Chang.* **4**, 49–62 (1994).
25. Sunderland, T. C. H. & Rowland, D. Forests, Land Use, and Challenges to Climate Stability and Food Security. in *Sustainable Food and Agriculture* 95–116 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/b978-0-12-812134-4.00006-6.
26. Humpenöder, F. *et al.* Afforestation to mitigate climate change: impacts on food prices under consideration of albedo effects. *Environ. Res. Lett* **11**, 85001 (2016).
27. Fujimori, S. *et al.* Inclusive climate change mitigation and food security policy under 1.5°C climate goal. *Environ. Res. Lett.* **13**, (2018).
28. Nijnik, M., Pajot, G., Moffat, A. J. & Slee, B. An economic analysis of the establishment of forest plantations in the United Kingdom to mitigate climatic change. *For. Policy Econ.* **26**, 34–42 (2013).
29. Djanibekov, U. & Khamzina, A. Stochastic Economic Assessment of Afforestation on Marginal Land in Irrigated Farming System. *Environ. Resour. Econ.* **63**, 95–117 (2016).
30. Zhou, S. *et al.* The costs and benefits of reforestation in Liping County, Guizhou Province, China. *J. Environ. Manage.* **85**, 722–735 (2007).