

Andreas Krause, Phillip Papastefanou und Anja Rammig

Wie werden häufigere Störungsereignisse die Kohlenstoffspeicherung in bayerischen Wäldern beeinflussen?

Eine Abschätzung mit einem dynamischen Vegetationsmodell

Terrestrische Ökosysteme, insbesondere Wälder, stellen einen wichtigen Kohlenstoffspeicher dar, welcher der Atmosphäre einen Teil unserer fossilen Kohlendioxid-Emissionen entzieht. Durch geeignetes Management von Wäldern könnte dieser Anteil noch weiter erhöht werden. Andererseits sind unsere Wälder aber auch durch den Klimawandel und einer damit wohl verbundenen Häufung von Störungsereignissen wie Windwurf und Insektenbefall gefährdet.

Dynamische Vegetationsmodelle simulieren das Wachstum und Absterben von Pflanzen unter sich ändernden Umweltbedingungen, basierend auf unserem Verständnis der zu Grunde liegenden Prozesse und deren mathematischer Beschreibung. Sie können daher benutzt werden, um die Wechselwirkungen zwischen Landnutzungsänderungen, Klimawandel und Störungsereignissen abzuschätzen. In der vorliegenden Studie simulieren wir verschiedene Landnutzungsszenarien in Bayern für ein mittleres Emissionszenario (RCP4.5). Es zeigt sich, dass bayerische Ökosysteme im Klimawandel unter Beibehaltung der heutigen Landnutzung und ausgehend von heutigen Störungshäufigkeiten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts etwa 15 Mt C (Megatonnen Kohlenstoff) aufnehmen könnten. Häufigere Störungsereignisse könnten die Kohlenstoffaufnahme jedoch um etwa 47 Mt C verringern und so den Wald von einer Kohlenstoffsenke zu einer Kohlenstoffquelle machen. Eine veränderte Landnutzung könnte der Atmosphäre wiederum Kohlenstoff entziehen: 512/512 Mt C (konstante Störungen/häufigere Störungen) durch eine Wiederaufforstung von Ackerflächen, 220/209 Mt C durch eine Wiederaufforstung von Grünland, 7/39 Mt C durch eine Umwandlung von Nadelwäldern in Mischwäldern und 68/58 Mt C durch eine Stickstoffdüngung von Wäldern. Eine Einstellung der Holzentnahme hingegen ist klimaschutztechnisch nicht erstrebenswert (-96 Mt C für beide Szenarien), da durch die so verloren gegangenen Substitutionseffekte (etwa die Verbrennung fossiler Brennstoffe anstelle von Holz) die Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Atmosphäre trotz einer höheren Waldbiomasse sogar steigen würde.

Schlagwörter: **Klimawandel, Waldbewirtschaftung, Waldumbau, landbasierter Klimaschutz, Kohlenstoffkreislauf, Aufforstung, Waldsterben**

Wälder bieten eine beachtliche Klimaschutzfunktion, indem sie große Mengen an Kohlenstoff speichern. Der vorliegende Artikel soll einen Überblick darüber geben, wie die zukünftige Klimaschutzwirkung bayerischer Wälder mit Hilfe eines dynamischen Vegetationsmodells abgeschätzt werden kann, insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Häufung an zukünftigen Störungsereignissen. Dazu wird zunächst eine kurze Einführung darüber gegeben, wie sich das Klima in Zukunft ändern könnte, wie Wälder vom Klimawandel beeinflusst werden und wie Wälder zum Klimaschutz beitragen. Anschließend wird die grundlegende Funktionsweise von dynamischen Vegetationsmodellen erläutert. Der letzte Teil beruht auf Simulationen mit einem Vegetationsmodell und gibt eine Abschätzung darüber, wie sich der Klimawandel und häufigere Störungen negativ auf die Kohlenstoffbilanz bayerischer Wälder auswirken und wie man diese Effekte durch Umstellungen in der Landnutzung und im Waldmanagement abschwächen könnte.

1 Wie wird sich das Klima in Zukunft verändern?

In den letzten 150 Jahren hat sich die globale Durchschnittstemperatur um etwa 1,0°C erhöht (IPCC, 2018). Diese starke Erwärmung steht im Gegensatz zum relativ stabilen Klima der letzten ca. 10.000 Jahre. Als Hauptgrund haben Wissenschaftler die steigende Konzentration atmosphärischer Treibhausgase (insbesondere Kohlenstoffdioxid – CO₂) identifiziert, welche bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt werden.

Die zukünftige Erwärmung kann unter anderem mit Klimamodellen abgeschätzt werden. Eine wichtige Annahme, die dabei getroffen werden muss, ist, wie sich die Treibhausgaskonzentrationen in der Zukunft verändern werden. Die möglichen Szenarien reichen dabei von massivem Klimaschutz und einer Stabilisierung der CO₂ Konzentration auf etwa heutigem

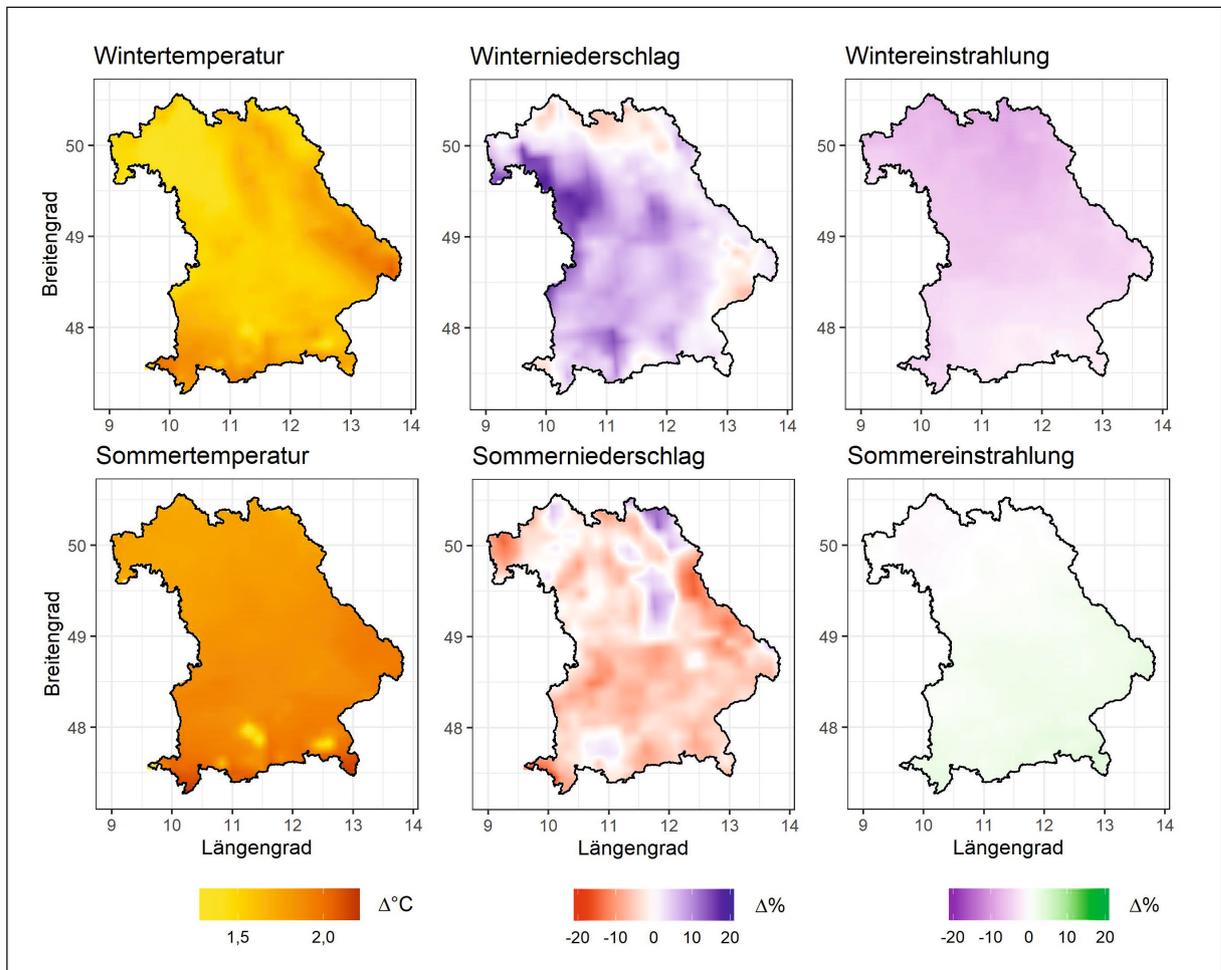


Abb. 1: Vom MPI-ESM-REMO2009 Klimamodell simulierte mittlere Klimaänderungen (Δ) am Ende des Jahrhunderts (2071–2100 gegenüber 1971–2000) in Bayern für ein mittleres Treibhausgasszenario (RCP4.5). Die entsprechenden Klimavariablen sind auf täglicher Auflösung verfügbar (<https://esgf-data.dkrz.de>) und werden als Eingangsdaten für das dynamische Vegetationsmodell LPJ-GUESS verwendet.

Level (~415 ppm) bis hin zu ungebremster Nutzung fossiler Brennstoffe (>900 ppm zum Ende des 21. Jahrhunderts). Die errechnete Temperaturerhöhung, die den Unterschied zwischen vorindustrieller Zeit und Ende des Jahrhunderts angibt, reicht dabei von unter +2°C bis hin zu über +5°C. Allerdings ist dies nicht nur abhängig vom angenommenen Treibhausgasszenario, sondern auch vom verwendeten Klimamodell. Das in Hamburg entwickelte Klimamodell MPI-ESM-REMO2009 etwa geht für ein mittleres Emissionsszenario („RCP4.5“, 538 ppm im Jahr 2100) von einer mittleren Temperaturerhöhung von ca. 1,5 °C für den Zeitraum 2071–2100 im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000 in Bayern aus. Die Erwärmung ist dabei in den meisten Regionen im Sommer (Juni-August) ausgeprägter als im Winter (Dezember-Februar) (Abbildung 1). Während die Winterniederschläge um durchschnittlich 5% steigen, sinken die Sommerniederschläge um etwa 4%. Durch

veränderte Wolkenbedeckung geht die Sonneneinstrahlung im Winter um etwa 5% zurück und erhöht sich im Sommer leicht um etwa 1%.

2 Wie wirken sich Klimaänderungen auf die Vegetation aus?

Pflanzen werden von Klimaänderungen sowohl positiv als auch negativ beeinflusst. Eine Verlängerung der Vegetationsperiode und eine Erhöhung der Temperatur kann in wärmelimitierten Ökosystemen die Produktivität erhöhen. Insbesondere Nadelwälder, welche vor allem im Nordosten Bayerns anzutreffen sind (Abbildung 2) und oftmals außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets angepflanzt wurden (die potentielle natürliche Vegetation in Bayern sind meist Laubwälder), würden jedoch unter einer

weiteren Verstärkung der Hitze- und Dürreextreme leiden. Eine Verringerung der Wasserverfügbarkeit durch weniger Niederschlag und/oder höhere Verdunstung, macht vor allem flachwurzelnenden Arten wie der Fichte zu schaffen. Positive Auswirkungen sind hingegen von einer höheren CO_2 -Konzentration zu erwarten („ CO_2 -Düngeeffekt“). Da Pflanzen zur Photosynthese CO_2 benötigen, erhöht dies direkt die Produktivität. Außerdem müssen Pflanzen bei höheren CO_2 -Konzentrationen ihre Blattöffnungen (Stomata) weniger lange bzw. weit öffnen und verlieren so weniger Wasser, wodurch eine verringerte Wasserverfügbarkeit möglicherweise ausgeglichen werden kann.

Es gibt jedoch noch einen weiteren, weniger direkten Mechanismus wie der Klimawandel den Wald negativ beeinflussen könnte: durch häufigere Störungsereignisse. So sind die Waldschäden durch Stürme, Feuer und Borkenkäferbefall bereits in den letzten Jahrzehnten in ganz Europa kontinuierlich gestiegen (SEIDL et al. 2014). Viele Studien haben dabei einen engen Zusammenhang zwischen Temperatur und Trockenheit und dem Auftreten von Störungsereignissen festgestellt. Daher ist zu erwarten, dass sich die Häufung an Störungsereignissen in einem immer wärmeren Klima auch in Zukunft fortsetzen wird (ANDEREGG et al. 2020; MCDOWELL et al. 2020;

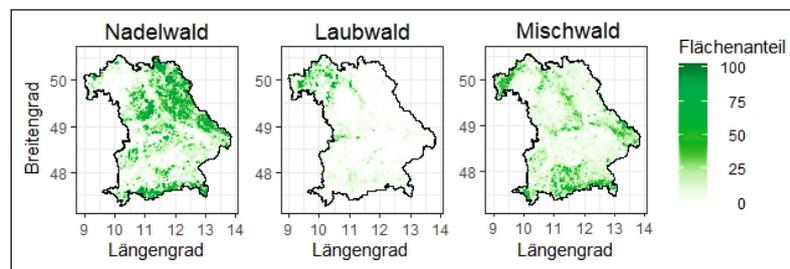


Abb. 2: Heutige Waldbedeckung in Bayern gemäß ESA-CCI (<https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>)

SENF/SEBALD/SEIDL 2020). Abbildung 3 zeigt eine mögliche jährliche Auftrittswahrscheinlichkeit von Störungsereignissen am Ende des 21. Jahrhunderts unter Annahme konstant bleibender (links) und häufigerer (rechts) Störungen. Häufigere Störungen beruhen dabei auf einer Fortsetzung des linearen Trends, der in den letzten Jahrzehnten in Europa beobachtet wurde (KRAUSE et al. 2020; SEIDL et al. 2014). Das durchschnittliche Störungsintervall, also nach wie vielen Jahren statistisch gesehen ein Störungsereignis auftritt, liegt am Ende des Jahrhunderts für konstante Störungen bei 537 Jahren und für häufigere Störungen bei 290 Jahren. In beiden Fällen treten Störungsereignisse in Nadelwäldern häufiger auf als in Laubwäldern. Der Einfluss dieser beiden Szenarien auf die Kohlenstoffspeicherung in bayerischen Ökosystemen wird mit dem Vegetationsmodell LPJ-GUESS simuliert. Waldbrände werden im Modell explizit simuliert und sind daher nicht in den Störungsintervallen enthalten.

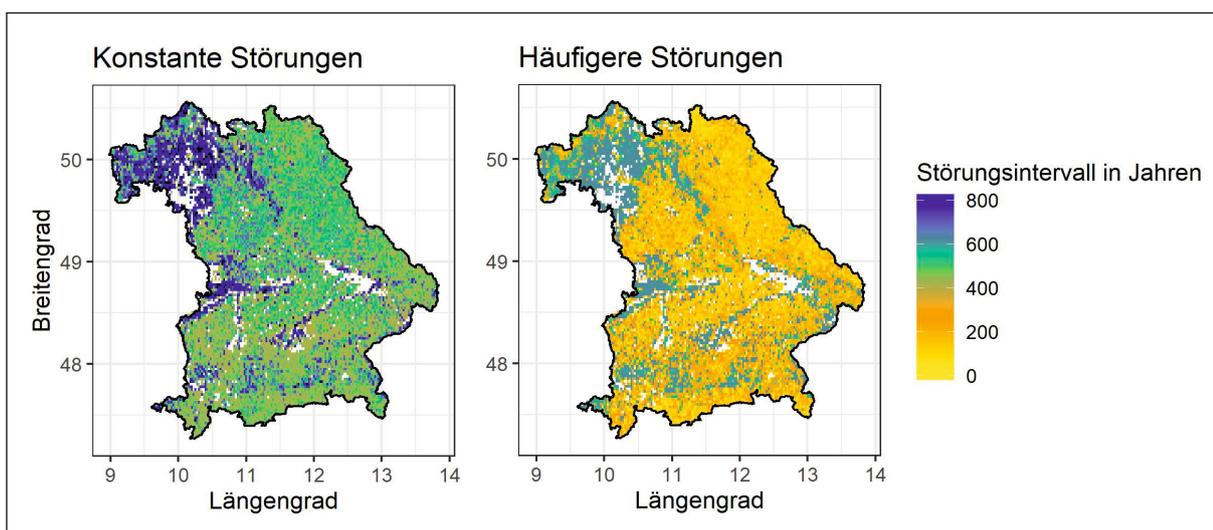


Abb. 3: Durchschnittliches Störungsintervall am Ende des 21. Jahrhunderts (2091–2100) basierend auf der Annahme, dass Störungen konstant bleiben (links) oder häufiger (rechts) auftreten. Ein Störungsintervall von 400 Jahren bedeutet z.B., dass der Wald im Durchschnitt alle 400 Jahre zerstört wird. Räumliche Unterschiede ergeben sich dadurch, dass in beiden Fällen Nadelwälder (insbesondere Fichtenwälder) häufiger Störungen ausgesetzt sind als Laubwälder und laubbaumdominierte Mischwälder (siehe auch Abbildung 2).

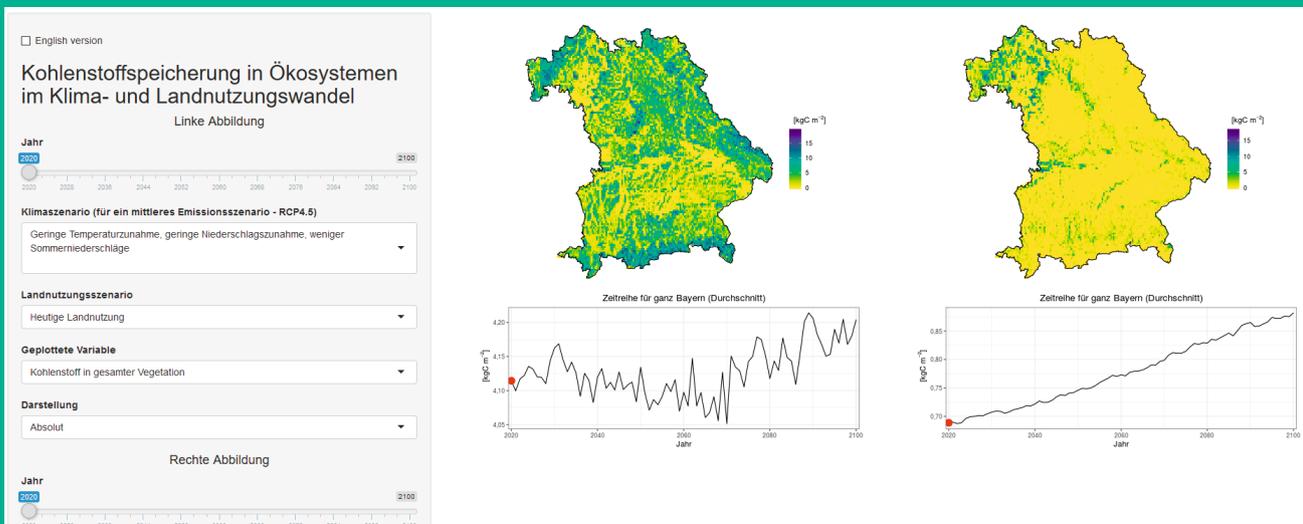
LPJ-GUESS Simulationen in der App selbst erforschen

Interessierte Leser haben die Möglichkeit die hier gezeigten Simulationen selbst zu erforschen. Hierfür ist eine interaktive web-basierte App verfügbar, die unter dem angefügten Link aufgerufen werden kann.

Der Nutzer hat dabei die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Jahren, Landnutzungsszenarien und Variablen zu wählen und sich dabei zwei verschiedene

Kombinationen gleichzeitig anzeigen zu lassen. Neben den hier diskutierten Klimaprojektionen mit konstanten und häufigeren Störungsereignissen stehen auch drei weitere Klimaprojektionen zur Auswahl die für das RCP4.5 Szenario eine höhere Temperaturzunahme und unterschiedliche Niederschlagsmuster simulieren (siehe auch KRAUSE et al. 2020), allerdings wurden diese Szenarien nur für die Annahme konstanter Störungsereignisse in der Zukunft gerechnet.

► <https://andreaskrause1.shinyapps.io/VegetationssimulatorBayern/>



3 Wie können Wälder zum Klimaschutz beitragen?

Bäume betreiben Photosynthese und wandeln dabei CO_2 aus der Luft in Kohlenstoff um, welcher anschließend in der Biomasse (Blätter, Holz, Wurzeln) gespeichert wird. Wenn Bäume Blätter abwerfen oder sterben wird der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff nicht sofort in die Atmosphäre zurückgegeben, sondern erst nach und nach zersetzt. Der in Vegetation und Boden gespeicherte Kohlenstoff (ohne Permafrost) beträgt global etwa 2000–2500 Gt C (Gt C steht für Milliarde Tonnen Kohlenstoff; eine Tonne Kohlenstoff entspricht 3,67 Tonnen CO_2) und ist damit 2–3x größer als die Menge an Kohlenstoff in der Atmosphäre. Zusätzlich dazu nehmen Ökosysteme momentan auch noch rund 30% des vom Menschen in die Atmosphäre emittierten Kohlenstoffs (etwa durch die Nutzung fossiler Brennstoffe) auf (FRIEDLINGSTEIN et al. 2019). Dies trägt dazu bei, dass die atmosphärische CO_2 -Konzentration nur etwa halb

so stark ansteigt wie durch die menschlichen Emissionen eigentlich zu erwarten wäre (ein weiterer Teil geht in die Ozeane). Durch den Schutz der Wälder kann sichergestellt werden, dass diese wichtige Kohlenstoffspeicher weiterhin bestehen wird. Auch wenn Holz aus dem Wald entnommen wird kann dies die atmosphärische CO_2 -Konzentration verringern, etwa wenn es anstelle fossiler Energieträger zu Heizzwecken verbrannt wird oder langfristig in Form von Möbeln oder Bauwerken gespeichert wird. So werden bei der Verbrennung von 1 kg Holz (dies entspricht etwa 0,5 kg C) etwa 0,33 kg C eingespart, sowie zusätzlich etwa 0,75 kg C, wenn das Holz zuvor als Werkstoff genutzt wurde und dadurch energie-intensivere Baumaterialien (z.B. Beton) erst gar nicht hergestellt werden mussten (KNAUF et al. 2015; KRAUSE/KNOKE/RAMMIG 2020; RÜTER 2011). Durch Aufforstung und Umstellungen in der Waldbewirtschaftung besteht die Möglichkeit diese Kohlenstoffspeicherfunktion der Wälder weiter zu erhöhen und der Atmosphäre noch mehr Kohlenstoff zu entziehen.

4 Wie funktionieren dynamische Vegetationsmodelle?

Die Ökosysteme der Erde reichen von hoch produktiven tropischen Regenwäldern rund um den Äquator bis zur kargen Tundra im hohen Norden. Doch auch ein und dasselbe Ökosystem kann sehr unterschiedlich aussehen, etwa ein sehr junger Wald mit vielen Pionierpflanzen (z.B. nach einem Störungsereignis) im Vergleich zu einem alten Wald mit wenigen, großen Bäumen. In den meisten Regionen der Erde hat außerdem der Mensch das Landschaftsbild merklich verändert, etwa durch die Abholzung von Wald für Ackerbau und Viehzucht oder durch die Anpflanzung fremder Baumarten für die wirtschaftliche Nutzung. Die Komplexität dieser Prozesse kann in Modellen nur vereinfacht dargestellt werden.

In dynamischen Vegetationsmodellen wird das Pflanzenwachstum in Abhängigkeit von sich ändernden Umweltbedingungen simuliert. Die Erdoberfläche wird dabei üblicherweise in ein Gitternetz unterteilt, wobei die Größe der Gitterzellen abhängig ist von der gesamten simulierten Fläche und der Auflösung der verfügbaren Eingangsdaten. Die Gitterzelle wird oftmals noch weiter unterteilt (z.B. wächst in einem Teil der Gitterzelle Wald, während der Rest für

Ackerbau genutzt wird), die Umweltbedingungen (z.B. Klima) sind jedoch überall innerhalb einer Gitterzelle gleich. Die verschiedenen Pflanzenarten der Erde werden zu sogenannten Pflanzenfunktionstypen (PFTs) zusammengefasst, welche sich in ihrer Wuchsform und klimatischen Bedingungen voneinander unterscheiden. In vielen dynamischen Vegetationsmodellen wird pro Gitterzelle und PFT nur ein einziger, durchschnittlicher Baum gerechnet, wodurch Interaktionen zwischen den Bäumen nur sehr vereinfacht simuliert werden können. Das Vegetationsmodell LPJ-GUESS (LINDESKOG et al. 2013; B. SMITH 2014) hingegen simuliert verschiedene Altersklassen pro PFT, welche untereinander und mit anderen PFTs um Bodenressourcen und Licht konkurrieren (Abbildung 4). So können junge Bäume beispielsweise absterben, wenn sich das Kronendach schließt und daher nicht mehr genügend Licht die bodennahen Schichten erreicht. Mortalität ergibt sich weiterhin durch ein begrenztes Ressourcenangebot im Boden (z.B. Wasser), beim Überschreiten der maximalen Lebensspanne eines Baumes oder wenn bestimmte Temperaturlimits überschritten werden. Außerdem kann der gesamte Wald durch mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftretende Störungsereignisse vernichtet werden (siehe Abbildung 3). Diese Störungsereignisse repräsentieren dabei alle

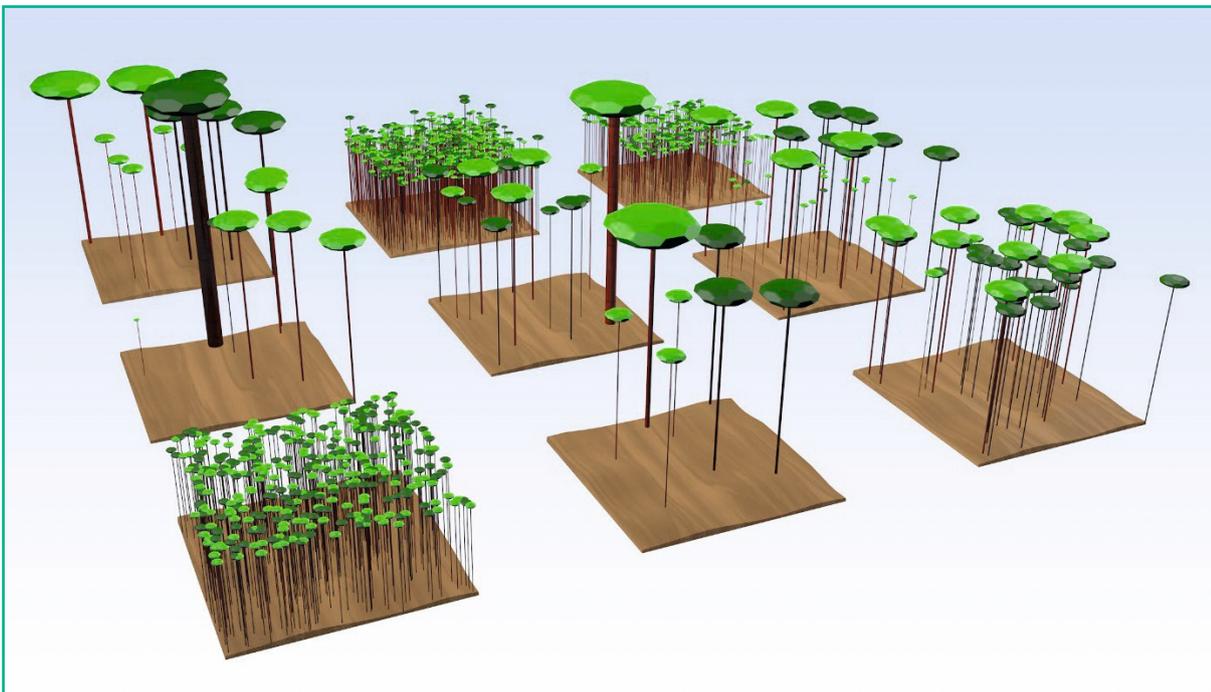


Abb. 4: Darstellung des Waldes im dynamischen Vegetationsmodell LPJ-GUESS. Unterschiedliche Baumarten und Altersklassen konkurrieren dabei um Bodennährstoffe, Wasser, Licht und Raum. Als Eingangsdaten dienen Klimavariablen (Temperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung), Stickstoffeintrag, atmosphärische CO_2 -Konzentration und Bodentextur. Waldwirtschaftliche Prozesse (Artenauswahl, Holzentnahme) werden ebenso simuliert wie die landwirtschaftliche Nutzung außerhalb von Wäldern.

großflächigen Mortalitätsereignisse, die im Modell nicht explizit simuliert werden (z.B. Sturmschäden oder Borkenkäferbefall). Die abgestorbene Biomasse geht dabei in den Boden, wo sie nach und nach zersetzt wird. Anschließend kommt es zu einem langsamen Nachwachsen der Vegetation, zunächst hauptsächlich in Form von lichtbedürftigen PFTs, die mit der Zeit von schattentoleranten PFTs verdrängt werden.

5 Häufigere Störungsereignisse reduzieren die simulierte Kohlenstoffspeicherung in bayerischen Wäldern

Abbildung 5 zeigt die von LPJ-GUESS simulierte Änderung verschiedener Kohlenstoffspeicher im Laufe des 21. Jahrhunderts für konstante und häufigere Störungen. Während die Biomasse unter konstanten Störungen bis zum Jahr 2100 leicht zunimmt, kommt es bei häufigeren Störungen zu einer starken Abnahme ab etwa dem Jahr 2040. Im Jahr 2100 verringern häufigere Störungen die Biomasse um rund 80 Mt C (27%) im Vergleich zum Szenario mit konstanten Störungen. Der Bodenkohlenstoff

hingegen erhöht sich mit häufigeren Störungen um 42 Mt C, da die abgestorbenen Bäume in den Boden übergehen. Die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten fällt für das Szenario mit häufigeren Störungereignissen um 12 Mt C geringer aus, da weniger Bäume den Erntedurchmesser erreichen. In der Summe ergibt sich für das optimistischere Szenario im Jahr 2100 eine um 47 Mt C größere Kohlenstoffspeicherung im Vergleich zum Szenario mit häufigeren Störungereignissen.

LPJ-GUESS kann auch benutzt werden, um den Einfluss häufigerer Störungen auf die Kohlenstoffemissionen, inklusive möglicher Substitutionseffekte, im Vergleich zu anderen sich ändernden Umweltbedingungen abzuschätzen. Am Ende des Jahrhunderts führen häufigere Störungen zu um 80 Mt C höheren Kohlenstoffemissionen im Vergleich zu konstanten Störungen (Abbildung 6). Dies liegt wie oben erwähnt zum einen an der abnehmenden Biomasse in Wäldern (-80 Mt C, jedoch +42 Mt C im Boden; siehe auch Abbildung 5), zum anderen aber auch an einer Verringerung der Holzprodukte und Substitutionseffekte (-43 Mt C), da weniger Holz aus dem Wald entnommen werden kann (tote Bäume werden im Modell Teil des Bodens und werden

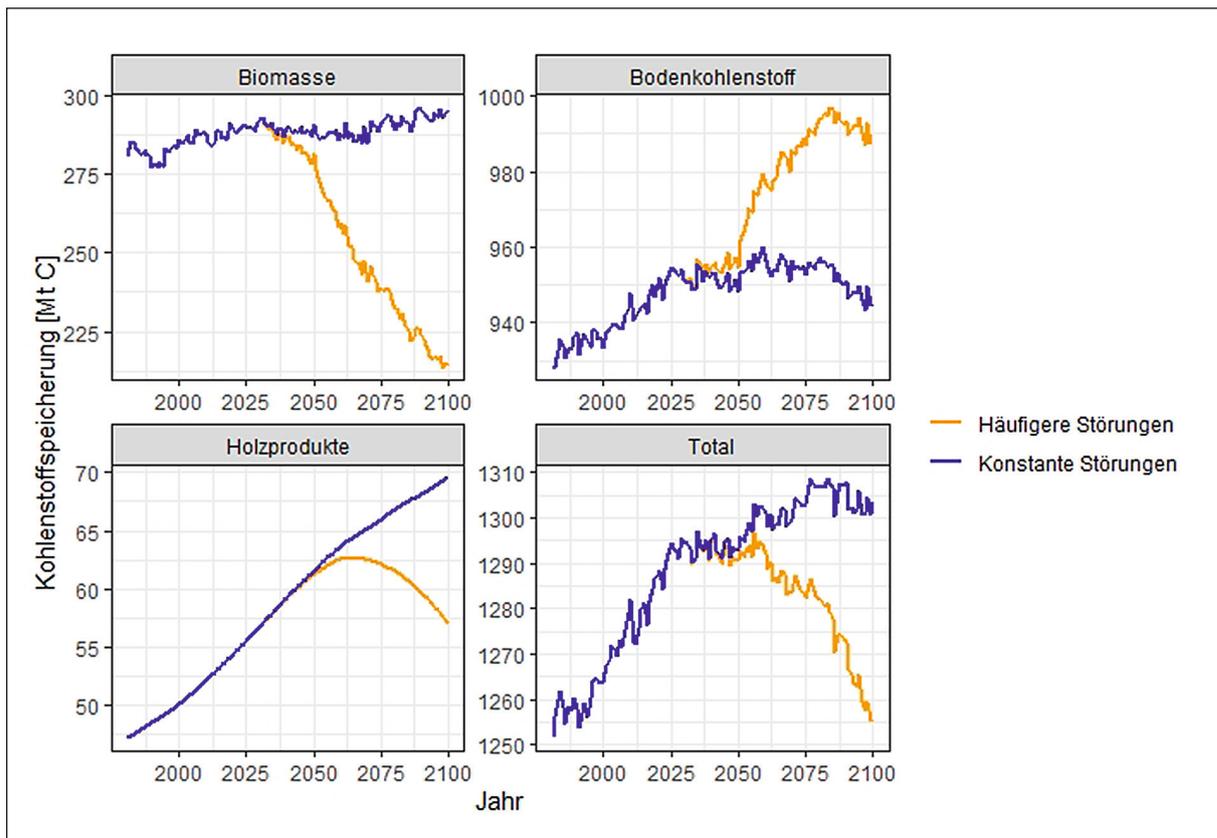


Abb. 5: Kohlenstoffspeicherung in verschiedenen Pools unter Annahme von konstanten Störungen und häufigeren Störungen in der Zukunft. Substitutionseffekte sind hier nicht berücksichtigt.

daher nicht wirtschaftlich genutzt). Im Vergleich dazu erhöhen die direkten Effekte des Klimawandels die Kohlenstoffemissionen um 56 Mt C, was mit dem Überschreiten der im Modell implementierten Temperaturlimits von Nadelbäumen und der Verringerung der Produktivität von Nadel- und Laubbäumen durch Wassermangel erklärt werden kann. In der Realität lässt sich der Einfluss von häufigeren Störungen natürlich nicht klar von den direkten Klimaeffekten trennen, da beide miteinander interagieren (etwa, wenn durch Dürre geschwächte Bäume von Borkenkäfern befallen werden). Die CO₂-Düngung bewirkt in unseren Simulationen eine Vermeidung von Kohlenstoffemissionen im Umfang von 80 Mt C, da die Wälder bei einer höheren atmosphärischen CO₂-Konzentration besser wachsen und somit sowohl Biomasse als auch Substitutionseffekte ansteigen. Ob der CO₂-Düngeeffekt auch in der Realität so stark ausfallen wird, ist allerdings umstritten (siehe etwa SMITH 2016).

6 Klimaschutz durch Änderungen in der Waldbewirtschaftung

Änderungen in der Waldbewirtschaftung und Vergrößerung der Waldfläche sind mögliche Optionen, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen und so den Klimawandel zu verlangsamen. Der Erfolg solcher Maßnahmen ist jedoch abhängig von der Häufigkeit zukünftiger Störungsereignisse (Abbildung 7). Das größte Entzugspotential besitzt die Wiederaufforstung von Ackerflächen: 512 Mt C bis zum Ende des Jahrhunderts sowohl für konstante Störungen als auch häufigere Störungen. Durch die Aufforstung von Grasflächen könnten weitere 220 Mt C (konstante Störungen) bzw. 209 Mt C (häufigere Störungen) entzogen werden. Allerdings wird ein Großteil der landwirtschaftlichen Flächen auch in Zukunft für die Nahrungsproduktion benötigt werden, sodass sich, abhängig von zukünftigen Steigerungen der Ernteerträge, nur ein kleiner Bruchteil dieses Potentials realisieren lassen wird (LEE et al. 2019).

Der Verzicht auf Holzentnahme aus Wäldern resultiert sowohl für konstante als auch für häufigere Störungsereignisse in um 96 Mt C erhöhten Kohlenstoffemissionen. Dies liegt daran, dass diese Maßnahme Substitutionseffekte in einem so großen Umfang verringert, dass diese nicht durch den Gewinn an Biomasse und Bodenkohlenstoff ausgeglichen werden können. Der Gewinn an Biomasse ist unter konstanten Störungen größer als unter häufigeren Störungen, allerdings fallen auch die verlorenen Substitutionseffekte stärker aus, wodurch der Gesamteffekt für beide Szenarien gleich ist.

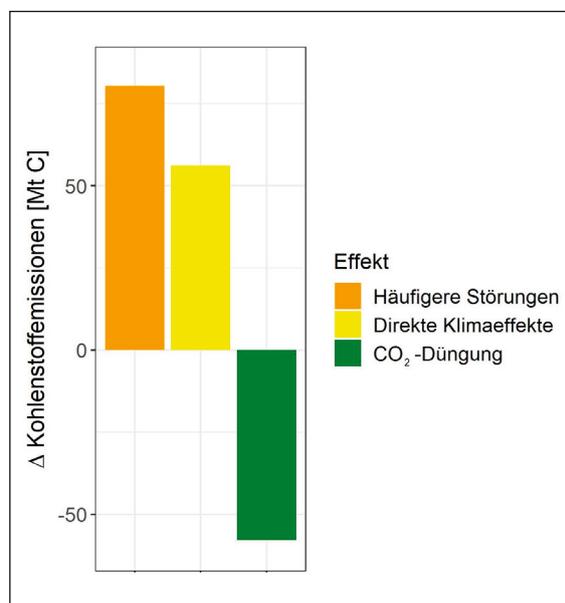


Abb. 6: Einfluss von veränderten Umweltbedingungen auf die Kohlenstoffemissionen bayerischer Wälder bis zum Jahr 2100. Der zukünftige Klimawandel und häufigere Störungen bewirken erhöhte Kohlenstoffemissionen, während höhere zukünftige CO₂-Konzentrationen aufgrund der CO₂-Düngung eine verstärkte Kohlenstoffaufnahme zur Folge haben. Im Gegensatz zu Abbildung 5 werden hier neben Änderungen in der Kohlenstoffspeicherung in Biomasse, Boden und Holzprodukten auch Substitutionseffekte berücksichtigt (siehe auch Abbildung 7).

Die Stickstoffdüngung von Wäldern hat nur ein geringes Entzugspotential, da bayerische Wälder nur wenig stickstofflimitiert sind. Das Potential unter konstanten Störungen ist allerdings etwas größer (68 Mt C) als unter häufigeren Störungen (58 Mt C). Wenn man die dabei noch verbundene Erhöhung an N₂O-Emissionen als weiteres Treibhausgas berücksichtigen würde, würde die Klimaschutzwirkung in beiden Szenarien noch geringer ausfallen.

Eine Umwandlung von Nadelwäldern in Mischwälder führt zu einem Kohlenstoffentzug von 7 Mt C für das Szenario mit konstanten Störungen, jedoch zu 39 Mt C für das Szenario mit häufigeren Störungen. Dies liegt daran, dass häufigere Störungen vor allem Nadelwälder gefährden und somit die Klimaschutzwirkung von Mischwäldern erhöhen. Trotzdem ist das Potential beider Szenarien limitiert, da Laubholz weniger als Bauholz geeignet ist und daher weder eine Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten noch eine nennenswerte Materialsubstitution erreicht werden kann. Eine langlebigere und effektivere Nutzung von Laubholz ist in Zukunft also gefragt, wenn diese Managementoption einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz leisten soll.

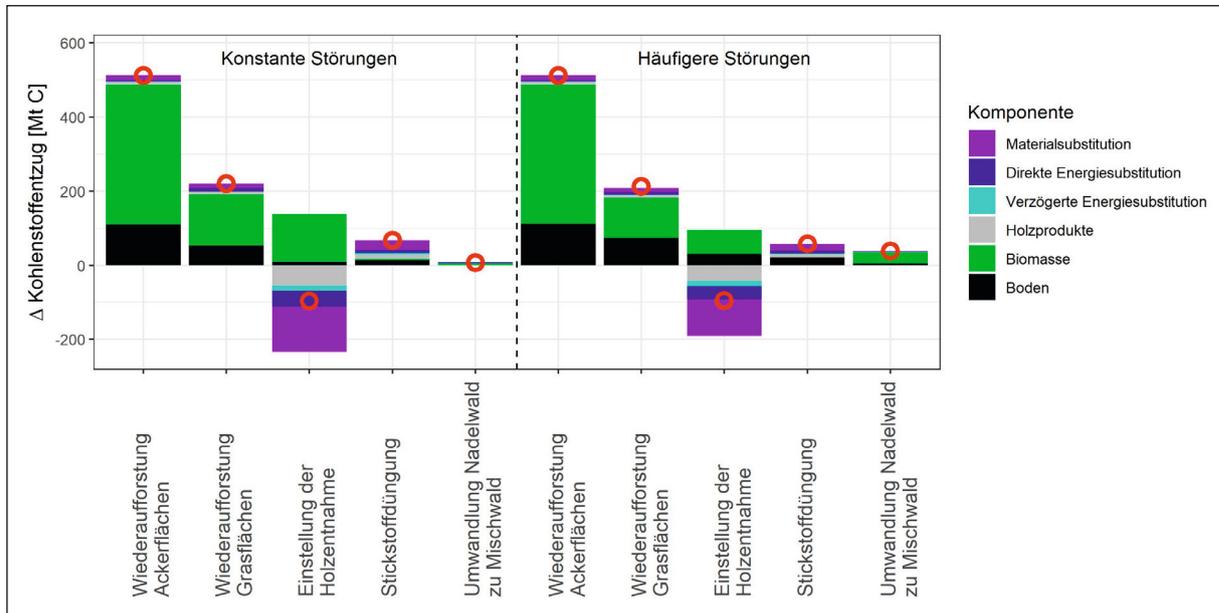


Abb. 7: Kohlenstoffzug durch verschiedene Managementoptionen bis zum Jahr 2100 unter Annahme konstanter (links) und häufigerer (rechts) Störungen. Kohlenstoffzug kann sowohl durch die Erhöhung an Biomasse und Bodenkohlenstoff im Wald erfolgen als auch durch Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten und deren Substitutionseffekte, durch die Kohlenstoffemissionen vermieden werden. Die roten Kreise geben die Summe der einzelnen Komponenten an.

7 Fazit

Dynamische Vegetationsmodelle sind vielseitige Werkzeuge, um die Folgen des Klimawandels auf Ökosysteme abschätzen zu können. Störungen und deren gehäuftes Auftreten in der Zukunft können einen großen Einfluss auf die Kohlenstoffspeicherung bayerischer Wälder haben. Dieser Effekt ist möglicherweise sogar stärker als die direkten Auswirkungen des Klimawandels und bestimmt somit das Potential für landbasierten Klimaschutz entscheidend mit. Ein besseres Verständnis darüber, wie sich die Anzahl an Störungsereignissen in Zukunft verändern werden, ist entscheidend dafür, zuverlässige Aussagen über den Beitrag des Waldes zum Klimaschutz treffen zu können.

Danksagung

Die Studie wurde im Rahmen des BLIZ Projektes durch das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks (bayklif) gefördert. Wir danken Sebastian Rössert, Johannes Oberpriller und Florian Hartig für die hilfreichen Kommentare.

Literatur

- ANDEREGG, W. R. L. et al. 2020: Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. In: *Science*, 368/1327. doi:10.1126/science.aaz7005.
- FRIEDLINGSTEIN, P. et al. 2019: Global Carbon Budget 2019. In: *Earth System Science Data*, 11/4: 1783-1838. doi:10.5194/essd-11-1783-2019.
- IPCC. 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Online: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- KNAUF, M. et al. 2015: Modeling the CO₂-effects of forest management and wood usage on a regional basis. In: *Carbon Balance and Management*.
- KRAUSE, A.; KNOKE, T.; RAMMIG, A. 2020: A regional assessment of land-based carbon mitigation potentials: bioenergy, BECCS, reforestation, and forest management. In: *Global Change Biology Bioenergy*. doi:10.1111/gcbb.12675.
- LEE, H. et al. 2019: Implementing land-based mitigation to achieve the Paris Agreement in Europe requires food system transformation. In: *Environmental Research Letters*. doi:10.1088/1748-9326/ab3744.
- LINDESKOG, M. et al. 2013: Implications of accounting for land use in simulations of ecosystem carbon cycling in Africa. In: *Earth System Dynamics* 4/2: 385-407. doi:10.5194/esd-4-385-2013.

- MCDOWELL, N. G. et al. 2020: Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. In: *Science* 368/6494. doi:10.1126/science.aaz9463.
- RÜTER, S. 2011: Welchen Beitrag leisten Holzprodukte zur CO₂-Bilanz? In: *AFZ, der Wald* 66: 15–18.
- SEIDL, R. et al. 2014: Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. In *Nature Climate Change* 4/9: 806-810. doi:10.1038/Nclimate2318.
- SENE, C., SEBALD, J., SEIDL, R. 2020. Increasing canopy mortality challenges the future of Europe's forests. doi:10.5281/zenodo.3561925.
- SMITH, B. 2014: Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model. In: *Biogeosciences* 11/7: 2027-2054. doi:10.5194/bg-11-2027-2014.
- SMITH, W. K. 2016: Large divergence of satellite and Earth system model estimates of global terrestrial CO₂ fertilization. In: *Nature Climate Change* 6/3: 306-310. doi:10.1038/Nclimate2879.

Abstract: How will more frequent disturbances affect carbon storage in Bavarian forests? An assessment with a dynamic vegetation model

Terrestrial ecosystems, in particular forests, represent an important carbon pool which removes some of our fossil fuel carbon dioxide emissions from the atmosphere. This fraction could be further increased via adequate forest management. On the other hand, our forests are threatened by climate change and associated increases in disturbances such as windthrows or insect outbreaks.

Dynamic vegetation models simulate plant growth and mortality in response to changing environmental conditions based on our understanding of the underlying processes and their mathematical descriptions. They can thus be used to estimate interactions between land-use change, climate change, and disturbances. In this study we simulate different land-use scenarios in Bavaria for a middle-of-the-road emission scenario (RCP4.5). Bavaria can absorb around 15 Mt C (mega tons carbon) until the end of the 21st century under climate change, assuming present-day land use and disturbance rates. More frequent disturbances, however, might reduce carbon uptake by around 47 Mt C, thereby transforming the forest from a carbon sink to a carbon source. On the other hand, alternative land management could remove carbon from the atmosphere: 512/512 Mt C (constant disturbances/more frequent disturbances) via reforestation of croplands, 220/209 via reforestation of grasslands, 7/39 Mt C via converting coniferous forests into mixed forests and 68/58 Mt C via nitrogen fertilization of forests. Stopping wood harvest, however, is not desirable from a climate mitigation perspective (-96 Mt C for both scenarios) as associated reductions in substitution effects (e.g. burning fossil fuels instead of wood) result in an increase in atmospheric carbon dioxide levels, despite increases in forest biomass.

Keywords: climate change, forest management, forest conversion, land-based climate mitigation, carbon cycle, forestation, forest dieback

Autor*innen: Dr. Andreas Krause, andy.krause@tum.de, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München; Phillip Papastefanou, papa@tum.de, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München; Prof. Dr. Anja Rammig, anja.rammig@tum.de, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München.

