

VULNERABILITÄT VON WÄLDERN IM KLIMAWANDEL – BIOTISCHE STÖRUNGEN UND BIOGEOCHEMISCHE KONSEQUENZEN

VULNERABILITY OF FORESTS UNDER CLIMATE CHANGE – BIOTIC DISTURBANCES AND BIOGEOCHEMICAL CONSEQUENCES

CARSTEN THIES & ANNE L.M.-ARNOLD

SUMMARY

Forests assimilate large amounts of carbon (C) from the atmosphere and accumulate C in biomass, soil, and dead organic matter. Climate-induced stress on trees results in reduced C-storage. In the course of biotic disturbances, forests can even release C, thereby contributing to accelerated global warming. In this essay, we deal with the vulnerability of forests in the context of matter fluxes and discuss approaches of silvicultural adaptations to climate change.

Keywords: Forest, climate change, carbon sequestration, biotic disturbances, silvicultural adaptations

ZUSAMMENFASSUNG

Wälder nehmen große Mengen an Kohlenstoff (C) aus der Atmosphäre auf und speichern C in Biomasse, Boden und toter organischer Substanz. Klimabedingt gestresste Bäume nehmen weniger C auf. Im Zuge biotischer Störungen können Wälder sogar C freisetzen, was die globale Erwärmung weiter beschleunigt. In diesem Essay behandeln wir die Vulnerabilität von Wäldern vor dem Hintergrund der Stoffflüsse und besprechen Ansätze für waldbauliche Anpassungen an den Klimawandel.

Schlüsselworte: Wald, Klimawandel, Kohlenstoffspeicherung, biotische Störungen, waldbauliche Anpassungen

1 BIOGEOCHEMISCHE FOLGEN DES KLIMAWANDELS

Wälder bedecken etwa 31 % der globalen Landfläche. Dies entspricht ~399 Millionen km² (Keenan et al. 2015). Als bedeutende Kohlenstoffsinken tragen Wälder dazu bei, die Folgen des Klimawandels zu mildern, indem sie bei der Photosynthese große Mengen an Kohlen-

dioxid (CO₂) aus der Atmosphäre aufnehmen und den Kohlenstoff (C) in Biomasse, Boden und toter organischer Substanz speichern (Cias et al. 2008).

Die negativen Effekte aktueller Klimaveränderungen beinhalten Dürren und schwere Ausbrüche von Waldbränden und Schadinsekten. Dies führt zu einer Reduktion des Waldwachstums und einer erhöhten Mortalität von Bäumen bis hin zum großflächigen Waldsterben. Im Zuge biotischer Störungen besteht das Risiko positiver Rückkoppelungseffekte im C-Haushalt. Dabei nehmen gestresste Bäume nicht nur weniger C aus der Atmosphäre auf, sondern es kann durch erhöhte heterotrophe Respiration sogar zu einer C-Freisetzung kommen, was die globale Erwärmung weiter beschleunigt (Flower & Gonzales-Meler 2015).

Die terrestrische Vegetation ist charakterisiert durch große natürliche Flüsse der Aufnahme und Abgabe von Kohlenstoff. Diese Flüsse resultieren in einem kleinen Überschuss, d.h. einer Kohlenstoffspeicherung. Messungen und Berechnungen der Kohlenstoffspeicherung durch Waldinventuren („bottom-up“) oder durch inverse Modellierung von CO₂-Flüssen („top-down“) kommen jedoch zu uneinheitlichen Ergebnissen. So wird für Europa eine terrestrische C-Speicherung zwischen 0,2 und 0,4 Gigatonnen × Jahr⁻¹ geschätzt (Valentini et al. 2000). Diese Unsicherheiten scheinen darauf zu beruhen, dass die Flüsse im Kohlenstoffzyklus auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen ermittelt werden. In deutschen Wäldern kann mit einer durchschnittlichen C-Speicherung von 2,1-3,0 t C × ha⁻¹ × Jahr⁻¹ gerechnet werden (Janssens et al. 2003).

Kasten 1

Bilanzgrößen von C-Flüssen im jährlichen Kohlenstoffzyklus:

- Netto-Biom-Produktion
- Ernteentzug
- Feuer
- = Netto-Ökosystem-Produktion
- Heterotrophe Respiration (Zersetzung organischer Substanz)
- = Netto-Primär-Produktion

Der Kohlenstoffzyklus von Wäldern ist ein dynamisches System. Insbesondere bei der Zersetzung organischer Substanz (Humus, Streu, Totholz) gibt es Pools von Zwischenprodukten, deren Umsatzrate stark variiert und daher zu unterschiedlichen Verweilzeiten von C in einem

System führt. So werden Kohlenhydrate oft innerhalb von einem Tag veratmet, während Blätter und Zweige (baumartenabhängig) für mehrere Jahre und die lebende Biomasse oder die organische Substanz im Boden (in Abhängigkeit von Spezies und Umweltbedingungen) sogar über Jahrtausende persistieren können.

Das Kyoto-Protokoll zielt auf eine Reduktion der Kohlenstoffemissionen in der Atmosphäre ab. Ein wesentlicher Teil dieser Strategie ist das aktive Management von terrestrischen Kohlenstoffsenken („carbon sinks“) durch verstärkte globale Aufforstung und Wiederaufforstung. Es wird davon ausgegangen, dass insbesondere junge Wälder durch hohe Zuwachsraten in der Lage sind, CO_2 aus der Atmosphäre aufzunehmen und in der Biomasse zu binden. Bei alten Wäldern hingegen wird angenommen, dass diese „kohlenstoffneutral“ sind und ein Gleichgewicht von C-Assimilation und C-Respiration erreicht wird. Im Kyoto-Protokoll erhalten alte Wälder daher auch keine Gutschriften („credits“) im Hinblick auf einen Mechanismus der nachhaltigen Entwicklung („clean development mechanism“).

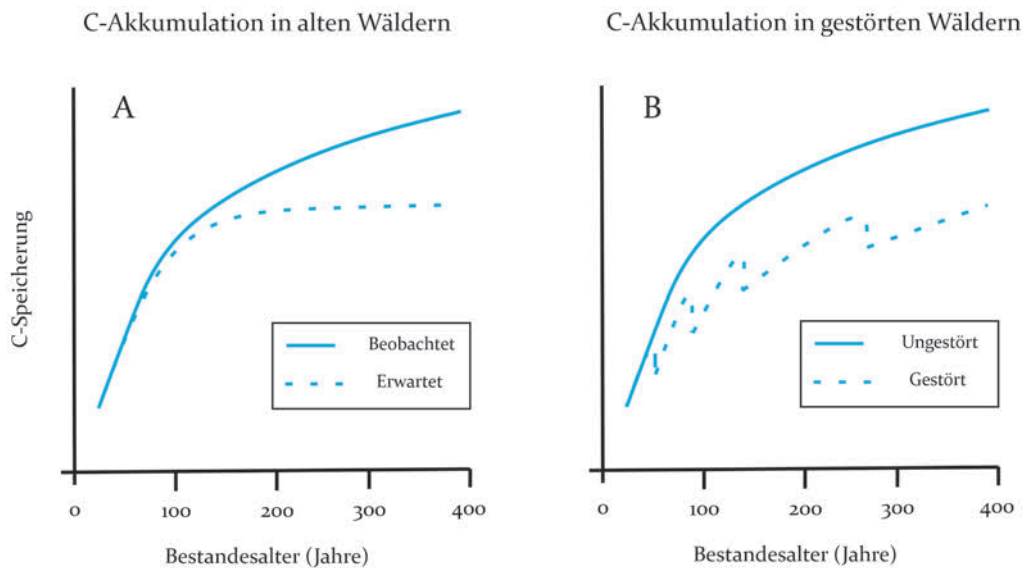


Abb. 1: Kohlenstoffspeicherung in Wäldern (schematische Darstellung). (A) Die C-Speicherung steigt mit zunehmendem Alter an. (B) Die C-Speicherung sinkt nach Störungen (durch erhöhte heterotrophe Respiration) und erreicht nicht mehr das Niveau ungestörter Wälder (nach Schulze 2000; Luysaert et al. 2008).

Fig. 1: Carbon sequestration in forests (schematic representation). (A) Carbon sequestration increases with age. (B) Carbon sequestration decreases after disturbances (as a result of increased heterotrophic respiration) and does not reach the level of undisturbed forests (after Schulze 2000; Luysaert et al. 2008).

Entgegen der Annahmen des Kyoto-Protokolls zeigen jüngere Prozessstudien, dass alte Wälder kein Gleichgewicht von C-Assimilation und C-Respiration erreichen, sondern kontinuierlich C akkumulieren und bis in ein hohes Alter eine positive Netto-Ökosystem-Produktivität aufweisen, insbesondere durch die Bildung eines persistenten (passiven) Pools an Bodenkohlenstoff (Luyssaert et al. 2008) (Abb. 1A). Das heißt, solche Wälder werden bei den Bilanzierungen zur Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nach dem Kyoto-Protokoll nicht berücksichtigt, obwohl diese erheblich zur globalen Netto-Ökosystem-Produktivität beitragen.

Über 30 % der globalen Wälder sind unbewirtschaftete, alte Primärwälder. Die Hälfte dieser Primärwälder befindet sich in borealen und temperierten Regionen der nördlichen Hemisphäre. Es ist zu erwarten, dass ein hoher Anteil des gespeicherten Kohlenstoffs in die Atmosphäre zurückfließt, wenn diese Wälder im Zuge des Klimawandels gestört und/oder durch junge Wälder ersetzt werden (Abb. 1B).

2 STÖRUNGEN DES WALDWACHSTUMS

Das Waldwachstum ist eine Funktion von Umweltgrößen sowie von inner- und zwischenartlicher Konkurrenz. Die Beeinträchtigung des Wachstums durch abiotische und biotische Störungen ist ein offensichtliches Kennzeichen des Klimawandels. Kurzfristige Witterungsextreme wie Trockenheit oder langfristig wirkende Faktoren wie Temperaturanstieg, veränderte Niederschläge oder Schädlingsbefall sind dabei zunehmend von Bedeutung (Seidl et al. 2014). Insbesondere Massenvermehrungen von Forstinsekten wurden früher nur als diskrete biotische Störungen auf relativ kleinen räumlichen Skalen und in kurzen Zeitintervallen wahrgenommen. In Anbetracht des Klimawandels erscheinen diese Kalamitäten in jedoch nie dagewesener Ausdehnung und Stärke. Ausbrüche von blatt- und nadelfressenden Insekten (oder Pathogenen) vermindern die C-Aufnahme für ein oder mehrere Jahre, mit einer Erholung der Biomasseproduktion in den nachfolgenden Jahren. Bei Ausbrüchen von xylobiontischen Insekten (z.B. Borkenkäfern) führt die Baum mortalität zu einer verminderten C-Speicherung in der Biomasse und erhöhten CO₂-Emissionen durch Dekomposition der Bäume über Jahrzehnte (Kurz et al. 2008).

Da die globale Erwärmung als ein wesentlicher Faktor für Massenvermehrungen von Forstschädlingen erscheint, ist zu erwarten, dass Insekten ein zunehmend wichtiger Faktor im Kohlenstoffhaushalt von Wäldern werden (Ayres & Lombardero 2000). Massenvermehrungen von Forstschädlingen sind mit beträchtlichen Flüssen von organischer Substanz und Nährstoffen durch Insektenkot und Streuframente sowie durch Bestandesniederschlag (Precipitation) verbunden. Diese Transformation von pflanzlicher Biomasse in schnell zersetzbare organische Substanz beschleunigt das mikrobielle Wachstum und die Mineralisati-



Abb. 2: Douglasie mit Borkenkäferbefall im Göttinger Wald. Der extreme Trockenstress im Jahr 2019 hat die Abwehrkraft der forstlich tadellos geförderten Douglasie soweit herabgesetzt, dass der noch grüne Baum dem Befall nicht standhalten konnte und abstirbt. Douglasien gelten durch ihre Fähigkeit tief zu wurzeln als relativ trockenheitsresistent. Diese Douglasie konnte ihre Fähigkeit auf einer flachgründigen Kalkrendzina mit 10-15 cm Mächtigkeit nicht ausbilden. Photographie vom 02. Oktober 2019 (Carsten Thies).

Fig. 2: Douglas fir infested by bark beetles in a forest near the city of Goettingen. Extreme drought stress during 2019 decreased tree resistance. The tree dies when still of green colour. Douglas firs are known to be drought tolerant due to their ability to root deeply. This particular tree could not develop its skills on a shallow rendzina soil (10-15 cm). Photography, 02. October 2019 (Carsten Thies).

on. Solche Rückkoppelungseffekte zwischen Pflanzen und Nährstoffzyklen scheinen einen bedeutenden Mechanismus zu repräsentieren, durch den Pflanzenfresser Veränderungen von Ökosystemfunktionen vermitteln können (Abb. 2).

Simulationen des Waldwachstums zeigen, dass eine zunehmende Häufigkeit von Störungsereignissen mit einer signifikanten Reduktion der Derbholzproduktion einhergeht und damit einer Reduktion der C-Speicherung in der oberirdischen Biomasse. So kulminieren in Deutschland gesunde Kiefernbestände mittlerer Bonität in ihrer Biomasseproduktion im Alter von 115-120 Jahren bei ~288 Festmetern Derbholz pro Hektar. Ein-, drei- und fünfmalig gestörte Kiefern zeigten im Vergleich zu gesunden Kiefern eine Reduktion der Derbholz-Gesamtmasse von 4,1 %, 12,1 % bzw. 23,7 % während eines Bewirtschaftungszeitraumes von 140 Jahren. Dies entspricht einer Reduktion der Kohlendioxidspeicherung von ~22,9, ~67,9 bzw. ~133,0 t CO₂ × ha⁻¹ (Tab. 1).

Tab. 1: Simulation der Derbholz-Gesamtmasse von gesunden Kiefern sowie von ein-, drei- und fünfmalig gestörten Kiefern mittlerer Bonität bei mäßiger Durchforstung (verbleibender + ausscheidender Bestand) während eines Bewirtschaftungszeitraumes von 140 Jahren unter Zugrundelegung einer vollständigen Rekonvaleszenz der Wachstumsraten innerhalb von 10 Jahren nach einem massiven Störungsereignis (Thies et al., unpubl. Daten). Holz besteht zu ~50 % aus Kohlenstoff. Bei einem Darrgewicht von ~500 kg pro Kubikmeter enthält ein Kubikmeter Holz ~250 kg C. Dies entspricht ~917,5 kg CO₂.

Tab. 1: Simulating solid wood mass of healthy pines as well as of pines that have been disturbed one-time, three times, and five times, respectively, during a management period of 140 years. We assumed a full reconvalescence of growth rates within 10 years after a massive disturbance event (Thies et al., unpublished data).

Anzahl von Störungsereignissen	Derbholz-Gesamtmasse (fm × ha ⁻¹)	Reduktion Derbholz (fm × ha ⁻¹)	Reduktion Derbholz (%)
0	611	-	-
1	586	25	4,1
3	537	74	12,1
5	466	145	23,7

In Eichenwäldern des Sollings (301-350 m ü. NN) in Niedersachsen wurden im Zuge einer Massenvermehrung des kleinen Frostspanners (*Operophtera brumata*) und des großen Frostspanners (*Erannis defoliaria*) über einen Zeitraum von drei Jahren Depositionen von 4333 kg Kohlenstoff (C) × ha⁻¹ und 319 kg Stickstoff (N) × ha⁻¹ in Form von Insektenkot, Streufragmenten und Bestandesniederschlag gemessen. In befallenen Wäldern war das C- und das N-Niveau in der Bodenlösung erhöht und das C/N-Verhältnis in der Humusaufgabe reduziert. Dies zeigt im Vergleich zu unbefallenen Wäldern einen erweiterten Pfad der Elementflüsse von der Vegetation zum Boden.

In einem Inkubationsexperiment zeigten Bodenbehandlungen mit Insektenkot im Vergleich zu Bodenbehandlungen ohne Insektenkot 16-fach höhere Flüsse an Kohlendioxid und 10-fach höhere Flüsse an gelöstem organischen Kohlenstoff (Tab. 2). Das heißt, die Deposition von Stickstoff und schnell zersetzbarer organischer Substanz im Zuge einer Massenvermehrung von Forstschädlingen stimuliert die bodenbiologische Aktivität sowie die heterotrophe Respiration.

Tab. 2: Flüsse von Kohlendioxid-Kohlenstoff ($\text{CO}_2\text{-C}$) und gelöstem Kohlenstoff (DOC-C) im Boden in einem Inkubationsexperiment zur Simulation der Massenvermehrung von Forstschädlingen mit Addition von Insektenkot (befallen) bzw. ohne Addition von Insektenkot (unbefallen). Die gemessenen Werte wurden in Kilogramm pro Hektar konvertiert (Arithmetische Mittel \pm Standardfehler) (I.M.-Arnold et al. 2016).

Tab. 2: Fluxes of carbon dioxide ($\text{CO}_2\text{-C}$) and dissolved organic carbon (DOC-C) in soil in a incubation experiment simulating a mass outbreak of forest pests, with addition of insect faeces (befallen) and without addition of insect faeces (unbefallen). Measured values were converted to kilograms per hectare (arithmetic means \pm standard errors) (I.M.-Arnold et al. 2016).

Woche	$\text{CO}_2\text{-Abfluss (kg C} \times \text{ha}^{-1}\text{)}$		$\text{DOC-Abfluss (kg C ha}^{-1}\text{)}$	
	unbefallen	befallen	unbefallen	befallen
1	4,6 \pm 0,01	48,5 \pm 0,01	3,2 \pm 0,00	39,0 \pm 0,12
2	5,4 \pm 0,00	144,3 \pm 0,02	3,7 \pm 0,03	28,2 \pm 0,04
3	3,7 \pm 0,00	107,6 \pm 0,01	4,0 \pm 0,01	37,6 \pm 0,12
4	4,5 \pm 0,01	45,0 \pm 0,01	2,3 \pm 0,03	20,1 \pm 0,03
5	4,8 \pm 0,00	58,0 \pm 0,01	2,2 \pm 0,02	27,3 \pm 0,06
6	4,1 \pm 0,00	56,8 \pm 0,02	2,4 \pm 0,02	43,3 \pm 0,04
7	3,5 \pm 0,01	36,9 \pm 0,01	3,8 \pm 0,002	29,3 \pm 0,05
Total	30,6 \pm 0,25	497,8 \pm 14,98	21,5 \pm 0,30	224,8 \pm 3,06

Bei einer Zunahme biotischer und abiotischer Störungen ist im Zuge des Klimawandels damit zu rechnen, dass die Netto-Primärproduktivität (und damit die langfristige C-Speicherung) durch eine verringerte Produktion von Biomasse reduziert wird. Auf ökosystemarer Ebene sollten solche Ereignisse in Wäldern eine besondere Relevanz erreichen, wenn diese großflächig, mit hoher Intensität und in periodischer Abfolge auftreten. Die langfristigen Effekte von Störungen auf den Kohlenstoffkreislauf und die damit verbundene Veränderung der Stabilität von Waldökosystemen sind wenig erforscht, ebenso wenig wie die Effekte auf den biogeochemischen Kreislauf des Stickstoffs (N), der an den Kohlenstoffkreislauf gekoppelt ist. Stickstoff kommt in den oft N-limitierten mitteleuropäischen Wäldern eine besondere Bedeutung für das Waldwachstum zu (Abb. 3).

Stoffflüsse in Waldökosystemen unter biotischem Stress

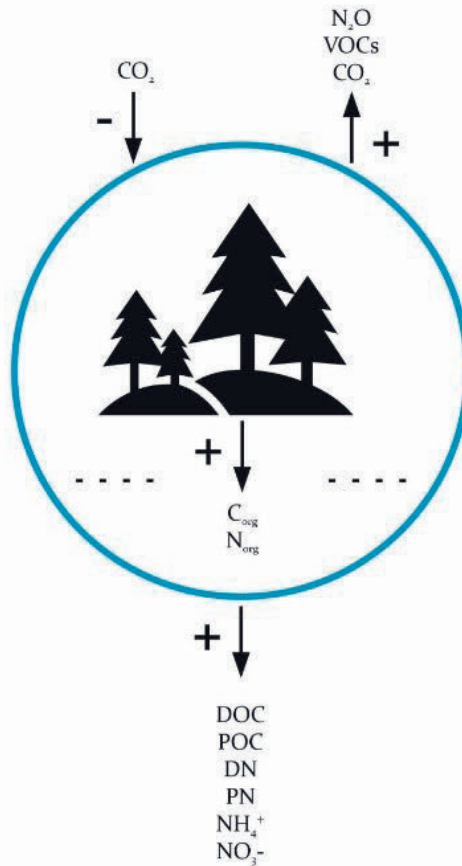


Abb. 3: Flüsse umwelt- und klimarelevanter Stoffe und Stoffgruppen in Waldökosystemen unter biotischem Stress. CO_2 = Kohlendioxid, N_2O = Di-Stickstoffoxid (Lachgas), VOCs= Volatile organische Komponenten, C_{org} = Organisch gebundener Kohlenstoff, N_{org} = Organisch gebundener Stickstoff, DOC= Gelöster organischer Kohlenstoff, POC= Partikulärer organischer Kohlenstoff, DN= Gelöster Stickstoff, PN= Partikulärer Stickstoff, NO_3^- = Nitrat, NH_4^+ = Ammonium.

Fig. 3: Fluxes of environmental and climate relevant substances and substance groups in forest ecosystems under biotic stress. CO_2 = carbon dioxide, N_2O = nitrogen dioxide, VOCs= volatile organic components, C_{org} = organically bound carbon, N_{org} = organically bound nitrogen, DOC= dissolved organic carbon, POC= particulate bound carbon, DN= dissolved nitrogen, PN= particulate bound nitrogen, NO_3^- = nitrate, NH_4^+ = ammonium.

3 WALDBAULICHE ANPASSUNGEN AN DEN KLIMAWANDEL

Der Klimawandel wird in Deutschland zu deutlich veränderten Standortbedingungen führen, die insbesondere durch Trockenstress gekennzeichnet sein werden. Damit einher geht eine höhere Anfälligkeit von Wäldern gegenüber Schädlingen, eine höhere Waldbrandgefahr sowie ein erhöhtes Risiko von Sturmschäden. Doch welche Baumarten werden mit den klimatischen Bedingungen im 21. Jahrhundert zurechtkommen? Diese Frage ist angesichts der aktuellen Klimaszenarien mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Zukünftige Leitbilder im klimaangepassten Waldbau werden daher auf Risikovorsorge ausgerichtet sein.

Die klimatische Wasserbilanz für Deutschland weist im Trockenjahr 2019 für das Frühjahr und den Sommer für weite Bereiche Defizite von -50 bis -125 mm bzw. -125 bis -250 mm aus (Abb. 4). Solche Daten mögen einen Vorgeschmack auf das zukünftige Klima in Deutschland geben. Und es ist zu erwarten, dass sich solche Defizite in der klimatischen Wasserbilanz entsprechend der Klimaszenarien extrem verschärfen werden. Dies schließt eine Bestockung mit Fichte, Buche und ähnlich empfindlichen Baumarten auf vielen Standorten mit geringer Wasserversorgung aus.

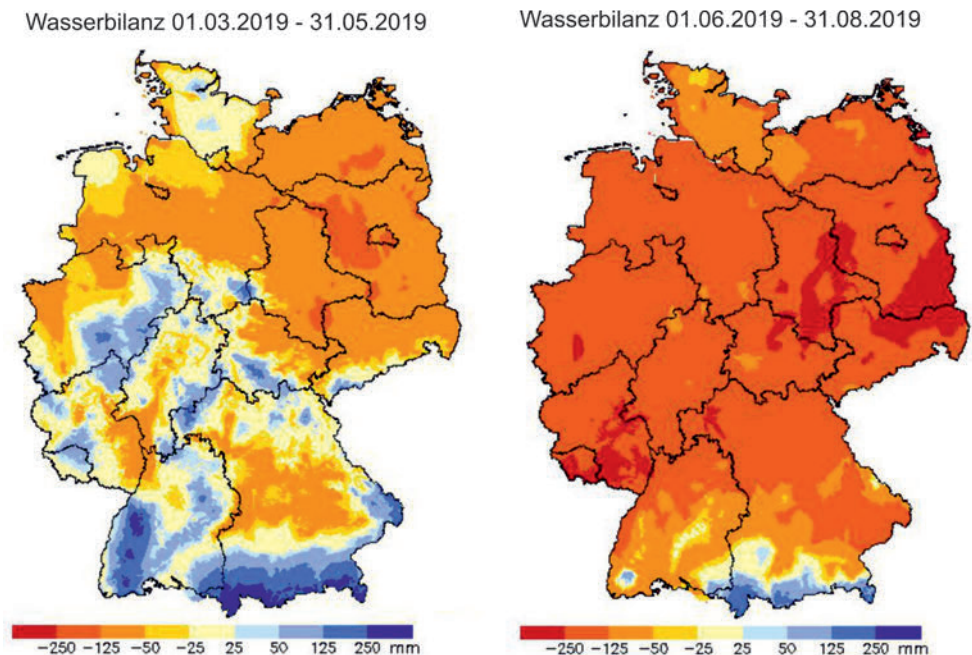


Abb. 4: Klimatische Wasserbilanz für Deutschland im Frühjahr (01.03.-31.05.) und Sommer (01.06.-31.08.) des Jahres 2019 (Quelle: Deutscher Wetterdienst).

Fig. 4: Climatic water balance in Germany in spring (01.03.-31.05.) and summer (01.06.-31.08.) of 2019 (Source: The German Meteorological Service).

Kasten 2

RCP-Klimaszenarien:

Im 5. Sachstandsbericht des IPCC (2015) wurden vier mögliche Konzentrationspfade der zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen („representative concentration pathways“, RCP) dargestellt. Diese RCP-Szenarien bilden die Konzentration von Treibhausgasen, Aerosolen und die zugehörigen Emissionen ab. Dies erlaubt Projektionen möglicher Klimaänderungen. Unterschieden werden die RCP-Szenarien durch ihren Strahlungsantrieb (Radiative Forcing, RF; Watt pro m²) gegen Ende des 21. Jahrhunderts:

- RCP2.6 RF: relativ niedrig (2.6 W/m²)
- RCP4.5 RF: mittel (4.5 W/m²)
- RCP6.0 RF: hoch (6.0 W/m²)
- RCP8.5 RF: sehr hoch (8.5 W/m²)

Diese physikalischen Schwellenwerte können durch verschiedene sozioökonomische Entwicklungen und klimapolitische Maßnahmen erreicht werden. Im RCP2.6 steigt die mittlere globale Temperatur (in 2 m Höhe) um lediglich knapp 1 °C zum Ende des 21. Jahrhunderts (gegenüber 1986–2005). RCP2.6 beinhaltet sehr ambitionierte Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und erreicht als einziges Szenario das „2 °-Ziel“ zum Vergleichszeitraum der Jahre 1850–1879. Im RCP8.5 hingegen wird ein „worst case scenario“ mit einem kontinuierlichen Anstieg der Treibhausgasemissionen beschrieben. Die mittlere globale 2 m-Temperatur steigt im RCP8.5 um über 4 °C (gegenüber 1986–2005). Im RCP8.5 sind die Niederschlagsmengen in der forstlichen Vegetationszeit (von Mai bis Oktober) in Deutschland für den Zeitraum 2071–2100 (gegenüber 1986–2005) um etwa 25–50 % reduziert, mit ausgeprägten Trockenphasen von Juni bis September, während die Niederschlagsmengen von November bis April regional um etwa 0–50 % ansteigen. Die Szenarien RCP4.5 und RCP6.0 bewegen sich im mittleren Bereich zwischen diesen Extremen.

Eine standortangepasste Baumartenwahl ist eine elementare Grundlage des Waldbaus. Vor dem Hintergrund der Dürrejahre 2018 und 2019 und dem damit verbundenen Baumsterben hat die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) die Trockenstress-

gefährdung von Baumarten klassifiziert. Als Grundlage diente das in der Vegetationszeit verfügbare Wasser, d.h. eine Standortwasserbilanz als Summe aus klimatischer Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationszeit und der nutzbaren Feldkapazität (nFK) von Böden (Tab. 3).

Tab. 3: Klassifizierung einer mittleren Trockenstressgefährdung von Baumarten, d.h. einer noch ausreichenden Wasserversorgung gemäß Standortwasserbilanz (Quelle: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt).

Tab. 3: Classification of mean drought stress of tree species, i.e., sufficient water supply based on the water balance of a site (Source: NW-FVA).

<u>Standortwasserbilanz</u>			
- 200 bis -450 mm	- 150 bis -350 mm	-50 bis -100 mm	0 bis -80 mm
Kiefer	Eiche	Buche	Fichte
Sandbirke	Douglasie	Roterle	Weißtanne
Schwarzkiefer	Roteiche	Moorbirke	Jap. Lärche
	Ahornarten		Bergulme
	Esche		Schwarznuß
	Hainbuche		
	Linde		
	Europ. Lärche		
	Küstentanne		

Da die zukünftige Entwicklung der Standortbedingungen mit einer großen Unsicherheit verbunden ist, sollte eine Risikovorsorge im Waldbau schon aufgrund von theoretischen Überlegungen auf die Entwicklung von standortangepassten Mischbeständen ausgerichtet werden. Denn eine höhere Artendiversität trägt dazu bei, die Stabilität von Ökosystemen zu erhöhen. Bei vielen Arten ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass einige Arten Ökosystemfunktionen aufrechterhalten können, selbst wenn andere Arten versagen (Naeem & Li 1997). Da einzelne Arten individuell auf Umweltveränderungen reagieren, weisen artenreiche Systeme nicht nur geringere zeitliche Fluktuation in der Produktivität auf, sondern – durch komplementäre Ressourcennutzung – auch eine insgesamt höhere Produktivität. Die Stärke solcher stabilisierenden Effekte hängt von der artspezifischen Reaktion auf Umweltveränderungen ab und dem Grad der interspezifischen Asynchronität dieser Reaktionen (Yachi & Loreau 2000).

Die Produktivität von Baumarten ist wesentlich durch ihren unterschiedlichen Energiebedarf (Licht) gekennzeichnet. Die Entwicklung von Mischwäldern kann sich daher an der Lichtbedürftigkeit der Baumarten orientieren. So können unter Berücksichtigung des Wasser- und Nährstoffbedarfs insbesondere Kiefern, Lärchen, Eichen, Eschen, Erlen und

Birken auf lichten Standorten gepflanzt werden. Douglasien, Fichten, Bergahorn, Hainbuchen und Linden passen hingegen eher auf halbschattige Plätze, während Rotbuchen und Tannen schattentolerant sind.

Eine wesentliche Aufgabe des klima-angepassten Waldbaus wird es sein, neue waldbauliche Entwicklungs- und Behandlungskonzepte vom Ausgangszustand bis zum Zielzustand durchgängig und flächenscharf zu definieren. Dafür ist die Kenntnis der (zukünftigen) Standortbedingungen für die Auswahl von Baumarten elementar und erfordert exakte Standortkartierungen. Diese liegen in Deutschland jedoch nicht flächendeckend vor. Die Art und Weise der Bewirtschaftung von Wäldern hängt von der Baumart und dem Betriebsziel ab. Anpassungen an den Klimawandel werden sich im Hinblick auf eine nachhaltige Bewirtschaftung zukünftig stärker an der Vitalität der Einzelpflanze und an der Stabilität der Bestände ausrichten haben. Dabei kommt der Hiebsführung für die Verjüngung und den Umbau von Wäldern sowie für den Erhalt der Bestandesstabilität eine große Bedeutung zu.

Für die Stabilisierung der vorhandenen, gestressten Nadelwälder sind zur Senkung der Wasserkonkurrenz mehrere starke Eingriffe in Jungwuchs und Jungbestand zielführend, gefolgt von einer mäßigen Durchforstung im Stangenholz und einer schwachen Durchforstung im Baumholz. Auf gut versorgten und feuchteren Standorten eignen sich „Femelschläge“ zur Entwicklung von Mischwäldern mit Douglasie, Tanne, Buche und Fichte, auf denen die Bäume horstweise und unregelmäßig auf der Fläche entnommen werden. Dadurch kann eine Verjüngung, insbesondere von Schattenbaumarten, in den entstandenen Lücken eingeleitet werden. Auf mäßig versorgten und frischen Standorten können mehrschichtige Mischwälder mit Eichen und Buchen für die Erzeugung von Wertholz aufgebaut werden, mit führenden Stiel- oder Traubeneichen und einer dienenden Buche im Zwischen- und Unterstand. Dies ermöglicht in gut entwickelten Beständen sukzessive „Schirmschläge“ mit einer Entnahme von größeren Mengen an Altholz. Auf eher schwach versorgten und trockeneren Standorten mit Kiefern, Eichen oder Douglasien (und Sandbirken) sind einschichtige Bestände vorteilhaft. Diese können als Artenmischung in Horsten oder auch als mosaikartige Mischwälder mit unterschiedlicher Altersstruktur entwickelt werden. Solche Bestände können in unterschiedlichen Phasen über einen Zeitraum von etwa 20–30 Jahren mit „Schirmschlägen“ risikobewusst bewirtschaftet werden.

Generell sollte die Bewirtschaftung auf den Standraum der Zukunftsbäume (Z-Bäume) als „Ausledurchforstung“ gestaltet werden. Z-Bäume verbleiben im gesamten Produktionszeitraum und machen die Wertleistung und Produktivität eines Bestandes aus. In gefährdeten Fichten- und Buchenbeständen kann zur Risikosenkung auch eine Verkürzung der Produktionszeiträume durch Absenkung der Zielstärken in Betracht gezogen werden. Dies führt allerdings gleichzeitig zu einer Reduzierung der Vorratshöhen.

Kasten 3

Standortwasserbilanz für terrestrische Böden (ohne Stau- und Grundwasserstandorte):

Die Standortwasserbilanz ist die Summe aus klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationsperiode und der nutzbaren Feldkapazität von Böden.

Die klimatische Wasserbilanz ist die Differenz aus der Niederschlagssumme und der Summe der potentiellen Evapotranspiration über Gras.

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist die Differenz zwischen dem Wassergehalt bei Feldkapazität (pF ~ 1,8 bis 2,5) und beim permanenten Welkepunkt (pF = 4,2) aus der pF-Kurve (dem Wasservorrat eines Bodens, der von Pflanzen genutzt werden kann). Die nFK von Böden reicht von < 60 l/m² (Sandböden) bis zu > 300 l/m² (Schwarzerden, Parabraunerden).

4 RÉSUMÉ

Die Vulnerabilität von Wäldern muss neu bewertet werden. Der Klimawandel führt zu Störungen des Waldwachstums und löst Elementflüsse aus, welche die Funktion der Ökosysteme beeinträchtigen. Neue Befunde deuten darauf hin, dass Forstschädlinge nicht nur die C-Speicherung in der Biomasse reduzieren, sondern auch beträchtliche Mengen von Biomasse in schnell zersetzbarer organischer Substanz transformieren, was zu erhöhten CO₂-Ausgasungen aus dem Boden führt.

Die relative Bedeutung von Forstschädlingen sowie deren Interaktionen mit abiotischen und biotischen Faktoren unter variierenden Umweltbedingungen sind wenig erforscht. Mehr detailliertes Wissen ist auch über die in situ Bedingungen erforderlich: Böden mit hohen pH-Werten und einer hohen oxidativen und mineralischen Aktivität scheinen eher in ihrer Substratzufuhr limitiert zu sein und organische Substanz nur eingeschränkt zu akkumulieren, während Böden mit gegensätzlichen Charakteristika dazu tendieren, in ihrer mikrobiellen Aktivität limitiert zu sein und die Speicherung von organischer Substanz begünstigen.

Mit einer angepassten Forstwirtschaft wird es auch unter den zukünftigen Umweltbedingungen möglich sein, Kohlenstoff in Wäldern effektiv zu speichern und gleichzeitig Holz zu produzieren. Biotische und abiotische Störungen in Wäldern können einen positiven Bilanzsaldo in der Kohlenstoffspeicherung allerdings schnell zunichtemachen.

LITERATUR

- AYRES, M. P. & LOMBARDELO, M. J. (2000): Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of the Total Environment*, 262: 263-289.
- CIAIS, P., SCHELHAAS, M. J., ZAEHLE, S., PIAO, S. L., CESCATTI, A., LISKI, J., LUYSSAERT, S., LE-MAIRE, G., SCHULZE, E.-D., BOURIAUD, O., FREIBAUER, A., VALENTINI, R. & NABUURS, G. J. (2008): Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience*, 1: 425-429.
- FLOWER, C. E. & GONZALES-MELER, M. A. (2015): Responses of temperate forest productivity to insect and pathogen disturbances. *Annual Review of Plant Biology*, 66: 547-569.
- IPCC (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151.
- JANSSENS, I. A., FREIBAUER, A., CIAIS, P., SMITH, P., NABUURS, G.-J., FOLBERTH, G., SCHLAMADINGER, B., HUTJES, R. W. A., CEULEMANS, R., SCHULZE, E.-D., VALENTINI, R. & DOLMAN, A. J. (2003): Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12 % of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 300: 1538-1542.
- KEENAN, R. J., REAMS, G. A., ACHARD, F., DE FREITAS, J. V., GRAINGER, A. & LINDQUIST, E. (2015): Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352: 9-20.
- KURZ, W. A., DYMOND, C. C., STINSON, G., RAMPLEY, G. J., NEILSON, E. T., CARROLL, A. L., EBATA, T. & SAFRANYIK, L. (2008): Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452: 987-990.
- L.M.-ARNOLD, A., GRÜNING, M., SIMON, J., REINHARDT, A.-B., LAMERSDORF, N. & THIES, C. (2016): Forest defoliator pests alter carbon and nitrogen cycles. *Royal Society Open Science*, 3: 160361.
- LUYSSAERT, S., SCHULZE, E.-D., BÖRNER, A., KNOHL, A., HESSENMÖLLER, D., LAW, B. E., CIAIS, P. & GRACE, J. (2008): Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455: 213-215.

- NAEEM, S. & LI, S. (1997): Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 390: 507-509.
- SCHULZE, E.-D. (2000): Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems. *Ecological Studies*, Vol. 142, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 499.
- SEIDL, R., SCHEHAAS, M.-J., RAMMER, W. & VERKERK, P. J. (2014): Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4: 806–810.
- VALENTINI, R., MATTEUCCI, G., DOLMAN, A. J., SCHULZE, E.-D., REB-MANN, C., MOORS, E. J., GRANIER, A., GROSS, P., JENSEN, N.O., PILEGAARD, K., LINDROTH, A., GRELE, A., BERNHOFER, C., GRÜNWARD, T., AUBINET, M., CEULEMANS, R., KOWALSKI, A. S., VESALA, T., RANNIK, Ü., BERBIGIER, P., LOUSTAU, D., GUDMUNDSSON, J., THORGEIRSSON, H., IBROM, A., MORGENSTERN, K., CLEMENT, R., MONCRIEFF, J., MONTAGNANI, L., MINERBI, S. & JARVIS, P. G. (2000): Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404: 861-865.
- YACHI, S. & LOREAU, M. (1999): Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96: 1463-1468.

Eingang des Manuskripts: 09.12.2019
Annahme des Manuskripts: 26.01.2020

Anschriften der Autoren:

Dr. Carsten Thies

Natural Resources Research Laboratory
Bremer Str. 15
29308 Winsen
E-Mail: carsten.thies@n-lab.de

Dr. Anne I.M.-Arnold

Büsgen-Institut
Büsgenweg 2
37077 Göttingen
E-Mail: agerald@gwdg.de