

Eutrophierung kontra Waldvitalität: Hohe Stickstoffdeposition aus der Landwirtschaft schadet der Rotbuche

Eutrophication versus forest vitality:
High nitrogen deposition from agriculture harms European beech

Markus Hauck und Viktoria Dietrich

Zusammenfassung

Viele Baumarten reagieren empfindlich gegenüber Dürre und Hitze, wie sie vermehrt durch den Klimawandel auftreten. Die künftige Eignung von Baumarten für die Forstwirtschaft erfährt daher hohe Aufmerksamkeit. Die Diskussion fokussiert sich dabei stark auf die Dürretoleranz von Bäumen und etwaige biotische Einwirkungen durch herbivore Insekten und Pathogene. Neben dem Klimawandel wirken jedoch auch anthropogene Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft, der Verbrennung fossiler Energieträger und aus Vegetationsbränden global auf Waldökosysteme ein. Interaktionen von Effekten des Klimawandels und anthropogener Stickstoffdeposition auf die Vitalität und Produktivität von Bäumen sind bisher wenig untersucht. Wir haben in einem deutschlandweiten Netzwerk von Waldbeständen mit unterschiedlichen Kombinationen von atmosphärischer Stickstoffdeposition, mittlerem Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur Biomasse, Zuwachs, Feinwurzelmorphologie und Wassernutzungseffizienz bei Jungwuchs der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) im Vergleich zu Traubeneiche (*Quercus petraea*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Weißtanne (*Abies alba*) untersucht. Dabei wurde für die Rotbuche bei hoher atmosphärischer Stickstoffdeposition u. a. ein für den Wasserhaushalt ungünstiges, d. h. niedriges Wurzel/Spross-Verhältnis gefunden. Ferner war bei hoher Stickstoffdeposition der Sprosslängenzuwachs verringert und die Spaltöffnungen der Blätter blieben bei Trockenheit länger geöffnet, was bei starken Dürren zu kritischen Wasserverlusten führen kann. Die regionale Variabilität der Stickstoffdeposition beruhte v. a. auf Ammonium, das in erster Linie aus der Landwirtschaft stammt. In durch Massentierhaltung geprägten Gebieten (insbesondere westliches Niedersachsen) sind Vitalität und Zuwachs des Buchenjungwuchses durch die Stickstoffbelastung deutlich beeinträchtigt. Dies ist relevant für die Klimawandeladaptation der Forstwirtschaft und den Schutz von Buchenwaldökosystemen.

Stickstoffdeposition – Klimawandel – Klimawandeladaptation – Forstwirtschaft – temperate Wälder – Landwirtschaft

Abstract

Many tree species are sensitive to drought and heat, which are increasingly occurring as a result of climate change. The future suitability of tree species for forestry is therefore attracting great attention. The discussion focuses strongly on the drought tolerance of trees and biotic effects caused by herbivorous insects and pathogens. In addition to climate change, however, anthropogenic nitrogen emissions from agriculture, fossil fuel use and vegetation fires also have a global impact on forest ecosystems. Interactions between the effects of climate change and anthropogenic nitrogen deposition on the vitality and productivity of trees have been hardly studied. In a Germany-wide network of forest stands with different combinations of atmospheric nitrogen deposition, mean annual precipitation and mean annual temperature, we investigated biomass, increment, fine root morphology and water-use efficiency in the regeneration of European beech (*Fagus sylvatica*) in comparison to sessile oak (*Quercus petraea*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and silver fir (*Abies alba*). Among other findings, a low root/shoot ratio, which is unfavourable for the water balance, and a reduced shoot length increment were found for European beech at high levels of atmospheric nitrogen deposition. Furthermore, the stomates of the leaves were found to remain open longer during drought, which can lead to critical water losses during severe droughts. The regional variability of nitrogen deposition was mainly due to ammonium, which primarily originates from agriculture. In areas characterised by intensive livestock farming (especially western Lower Saxony), the vitality and growth of young beech trees are significantly impaired by nitrogen pollution. This is relevant for the adaptation of forestry to climate change and the conservation of beech forest ecosystems.

Nitrogen deposition – Climate change – Climate change adaptation – Forest management – Temperate forests – Agriculture

Double peer-reviewed, Einreichung: 2.7.2025, Annahme: 30.1.2026

DOI: 10.19217/NuL2026-05-01

1 Einleitung

Die Vitalität der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) im Klimawandel wurde aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Dürren und Hitze in den letzten Jahren häufig diskutiert (Schuldt et al. 2020; Hauck et al. 2025). Die Rotbuche weist in einem trockener und wärmer werdenden Klima fast überall in ihrem Areal Rückgänge im Holzzuwachs auf (Martinez del Castillo et al. 2022). Ihre Tole-

ranz gegenüber Trockenheit und Hitze ist zwar höher als die der wichtigsten heimischen Nadelbaumarten – der Europäischen Fichte (*Picea abies*), Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und Weißtanne (*Abies alba*) –, für einen temperaten Laubbaum ist diese jedoch moderat (Hauck et al. 2025). Insbesondere einige Ahorn- und Eichenarten wie Feld- und Spitzahorn (*Acer campestre*, *A. platanooides*) und Trauben-, Flaum- und Roteiche (*Quercus petraea*, *Q. pubescens*, *Q. rubra*) vertragen deutlich mehr Trockenheit und Hitze als die Rotbuche,

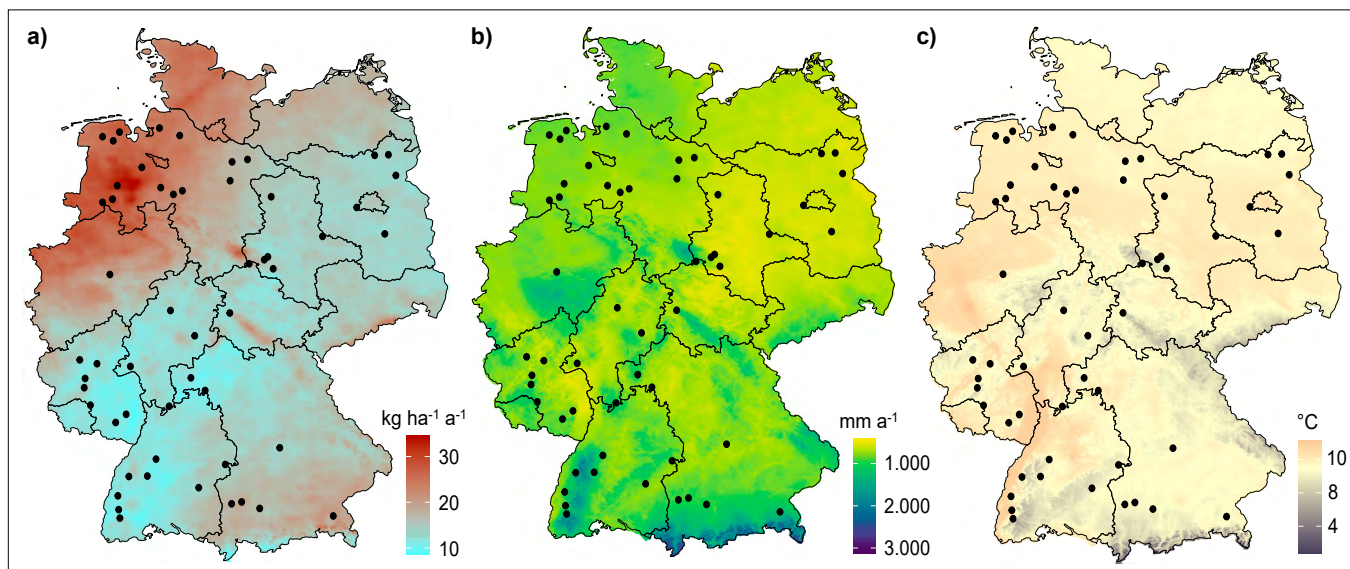


Abb. 1: Die untersuchten Waldgebiete (schwarze Punkte) mit 54 Untersuchungsflächen in Deutschland mit unterschiedlichen Kombinationen von a) atmosphärischer Stickstoffdeposition, b) mittlerem Jahresniederschlag und c) Jahresmitteltemperatur.

Fig. 1: The forest areas studied (black dots) with 54 study plots in Germany with different combinations of a) atmospheric nitrogen deposition, b) mean annual precipitation and c) mean annual temperature.

bevor ihre Vitalität stark herabgesetzt wird und sie schließlich absterben (Hauck et al. 2025).

Neben dem Klima verändert der Mensch jedoch auch andere Umwelteigenschaften, die sich auf die Vitalität und den Holzzuwachs von Bäumen auswirken können. Diese werden aber in der Diskussion um die Reaktion von Wäldern auf den Klimawandel und die Klimawandelanpassung von Wäldern bisher kaum berücksichtigt. Ein sehr wichtiger Faktor dabei ist Stickstoff. Stickstoff ist der mengenmäßig wichtigste Makronährstoff für Pflanzen, der von Natur aus in den meisten Ökosystemen einen Mangelfaktor darstellt und daher die Produktivität der Vegetation begrenzt. Durch den Menschen wurde Stickstoff seit der Industrialisierung in großen Mengen in die Umwelt freigesetzt (Schellenberger Costa et al. 2022). Organismen, die im Zuge ihrer Evolution eine möglichst hohe Effizienz bei der Stickstoffaufnahme entwickelt haben, finden sich dadurch heute in Ökosystemen mit einem radikal erhöhten Stickstoffangebot wieder. Die Fähigkeit, Stickstoff möglichst effizient aufzunehmen, musste in einer derart veränderten Umwelt zwangsläufig zu Problemen führen.

Das Stickstoffangebot interagiert in Pflanzen auf zweifache Weise mit dem Wasserhaushalt: Zum einen sendet eine gute Stickstoffversorgung das Signal an die Pflanze, das Wurzelwachstum zu reduzieren und stattdessen mehr Ressourcen in das oberirdische Wachstum zu investieren (Feng et al. 2023). Zum anderen bleiben bei hohem Stickstoffangebot die Spaltöffnungen in den Blättern länger geöffnet als bei Stickstoffmangel (Dulamsuren, Hauck 2021). Beides dient dem Ziel, vorhandenen Stickstoff optimal für das Wachstum auszunutzen. Bei Stickstoffmangel soll umgekehrt die Verlagerung von Ressourcen in die Wurzelbildung die Nährstoffaufnahme verbessern. Das Schließen der Spaltöffnungen bei geringer Stickstoffverfügbarkeit verlangsamt das Wachstum und beugt dadurch Mangelsymptomen vor.

Die Wurzel dient außer zur Nährstoffaufnahme auch der Wasseraufnahme. Wenn die Pflanze durch ein hohes Stickstoffangebot das Signal erhält, weniger Wurzeln (und stattdessen mehr transpirierende oberirdische Biomasse) zu bilden, kann dies bei Trockenheit dazu führen, dass der durch die Wurzeln erschlossene Bodenraum nicht ausreicht, um genügend Wasser aufzunehmen. Werden durch eine hohe Stickstoffverfügbarkeit die Spaltöffnungen länger offen gehalten, steigert dies ebenfalls das Risiko von Trockenschäden, da die Pflanze mehr Wasser verliert, bis sie bei Trockenheit dann letztendlich doch die Spaltöffnungen schließen muss.

In Deutschland herrschen sehr starke regionale Unterschiede in der atmosphärischen Stickstoffdeposition (Abb. 1). Die höchsten Werte finden sich in Nordwestdeutschland (und hier besonders im westlichen Niedersachsen) und im bayerischen Alpenvorland. Die atmosphärische Stickstoffdeposition ist überwiegend anthropogen und hat verschiedene Ursachen. Stickoxide entstammen in erster Linie aus Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger und von Biomasse; die daraus resultierende Deposition von Nitrat ist seit den 1980er-Jahren im Rückgang begriffen (Waldner et al. 2014; Schellenberger Costa et al. 2022). Hauptquelle für Ammoniak und das sich daraus in Kontakt mit Wasser bildende Ammonium ist die Landwirtschaft. Auch hier ist seit den 1980er-Jahren die Deposition in Deutschland zurückgegangen, jedoch in sehr viel geringerem Ausmaß als bei Nitrat.

Da die atmosphärische Stickstoffdeposition in Deutschland regional stark variiert und zudem eine drastische Reduktion der Stickstoffemissionen aus der Landwirtschaft nicht absehbar ist, stellt sich die Frage, wie sich diese Unterschiede in der Stickstoffversorgung auf die Dürretoleranz von Baumarten und damit deren Überlebensfähigkeit unter dem Einfluss des Klimawandels auswirken. Da hierzu nur wenige Daten vorliegen (z. B. Dzionek 2016a, b, 2017), wurde das Projekt „Interaktion von Klimaerwärmung und atmosphärischen Stickstoffeinträgen bei der Steuerung des Verjüngungserfolgs der Rotbuche im Vergleich zu trockenheitstoleranteren Baumarten“ (NitroClim), gefördert durch den Waldklimafonds, durchgeführt. Anhand eines deutschlandweiten Proben Designs entlang von Stickstoffdepositions- und Klimagradierten wurde dabei untersucht, wie sich das Zusammenspiel aus Stickstoffversorgung und Klima auf die Rotbuche sowie drei weitere Baumarten, die als mögliche Alternativen zur Klimawandelanpassung der Forstwirtschaft diskutiert werden (Hauck 2023), auswirkt. Bei diesen Baumarten handelte es sich um die Traubeneiche, die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und die Weißtanne.

In der Studie lag der Fokus auf der Naturverjüngung, die bei Freilanduntersuchungen meist weniger im Vordergrund steht, aber mindestens ebenso kritisch für die dauerhafte Erhaltung von Beständen ist wie die Altbäume. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf Ergebnisse zur Rotbuche, die unter Naturschutzaspekten eine besondere Rolle spielt, da sie von Natur aus die dominante Baumart der Wälder in Mitteleuropa wäre und Deutschland im Zentrum des Areals der Rotbuche eine besondere Verantwortung für die dauerhafte Erhaltung der Art hat (Leuschner, Ellenberg

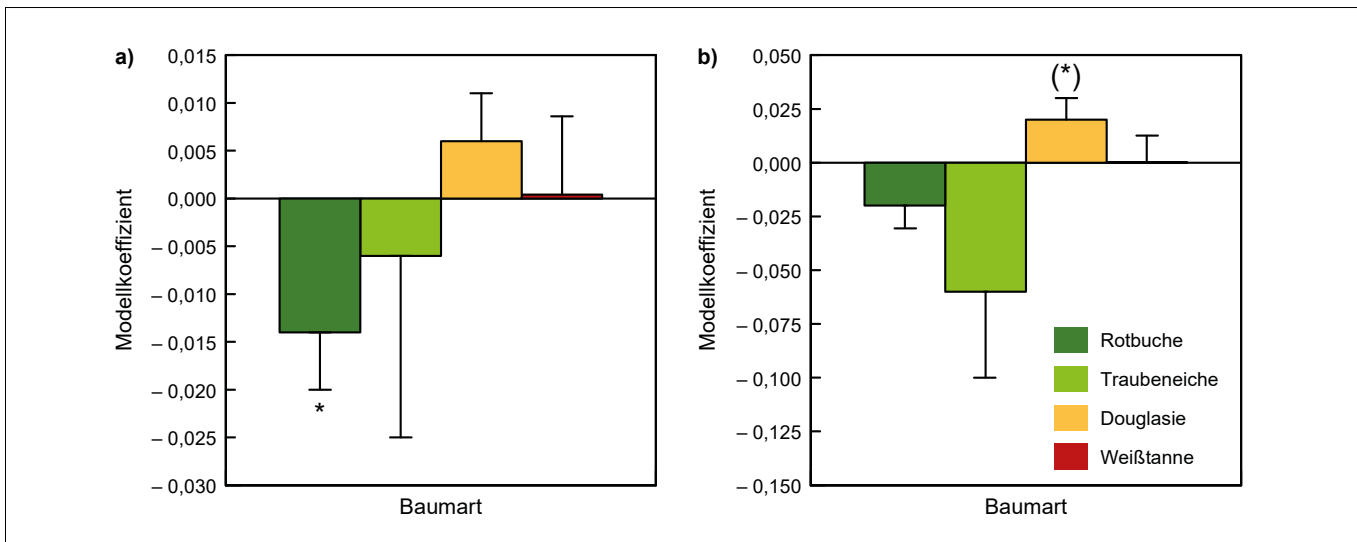


Abb. 2: Modellkoeffizienten (\pm Standardfehler) aus linearen gemischten Modellen für den Einfluss a) der atmosphärischen Stickstoffdeposition und b) der Interaktion der atmosphärischen Stickstoffdeposition und des mittleren Jahresniederschlags auf das Wurzel/Spross-Verhältnis von Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Traubeneiche (*Quercus petraea*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Weißtanne (*Abies alba*). (*): $p \leq 0,10$; **: $p \leq 0,05$.

Fig. 2: Model coefficients (\pm standard errors) of linear mixed models for the effect of a) atmospheric nitrogen deposition and b) the interaction of atmospheric nitrogen deposition and mean annual precipitation on the root/shoot ratio of European beech (*Fagus sylvatica*), sessile oak (*Quercus petraea*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and silver fir (*Abies alba*). (*): $p \leq 0,10$; **: $p \leq 0,05$.

2017). Ergebnisse zu den anderen Baumarten werden jedoch in unterschiedlicher Intensität mit dargestellt und mit diskutiert, um eine bessere Einordnung der Reaktion der Rotbuche zu ermöglichen.

Mithilfe von Geländeuntersuchungen wurde den Fragen nachgegangen, wie sich zunehmende Stickstoffdeposition allein oder in Kombination mit Trockenheit auf die Naturverjüngung auswirkt. Dabei sollten die Fragen geklärt werden,

- ob die Wurzelbiomasse abnimmt,
- ob die Wassernutzungseffizienz der Photosynthese mit zunehmender Stickstoffdeposition abnimmt,
- ob der oberirdische Zuwachs durch Stickstoff zunimmt,
- wie Wurzelmorphologie und Mykorrhizierung beeinflusst werden,
- ob eine hohe Stickstoffdeposition durch beschleunigtes Wachstum zu Mangel an anderen Nährstoffen in den Blättern führt.

Die Resultate zu diesen Untersuchungen wurden bereits im Detail in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert (Dietrich et al. 2024, 2025a, b, c; Hauck, Dietrich 2025) und werden hier zusammenfassend für die anwendungsorientierte Fachöffentlichkeit dargestellt.

2 Methodik

In Gebieten mit unterschiedlicher atmosphärischer Stickstoffdeposition und in unterschiedlichen Klimaregionen wurden 54 über weite Teile Deutschlands verteilte Waldgebiete ausgewählt (Abb. 1). Die Waldgebiete sollten eine hohe Vielfalt der in Deutschland auftretenden Kombinationen von Klima- und Stickstoffdepositionsbedingungen abdecken. Ferner wurden die Bestände so ausgewählt, dass für die Gesamtfragestellung des NitroClim-Projekts in räumlicher Nähe zu Wäldern mit Buchenverjüngung auch Bestände mit Verjüngung der Traubeneiche, Douglasie und Weißtanne vorhanden waren. Es wurden nur Bestände mit Naturverjüngung aus dem Altbestand eingeschlossen. Die 54 Untersuchungsstandorte deckten eine Spannweite der atmosphärischen Deposition von Stickstoff (N) von 10 bis 32 kg N ha⁻¹ a⁻¹ ab (im Mittel: 22 kg N ha⁻¹ a⁻¹) sowie einen Niederschlagsgradienten von 560 bis 1.690 mm a⁻¹ (im

Mittel: 1.130 mm a⁻¹) und einen Gradienten der Lufttemperatur über 3,4 K (Minimum/Maximum: 6,8 – 10,2 °C). Für einzelne Teiluntersuchungen wurde die Probeflächenzahl auf 45 Bestände reduziert, die Gradienten wurden aber vollständig beibehalten. An jedem der Untersuchungsstandorte wurden drei Probenahmekreise von im Mittel 125 \pm 9 m² ausgewählt. Die genaue Größe der Probenahmekreise richtete sich nach der Vorgabe, dass jeweils 50 Jungbuchen mit einer Höhe bis zu 2 m vorhanden sein mussten. Gleiches galt für die Probeflächen mit Traubeneiche, Douglasie und Weißtanne.

An allen 54 Untersuchungsstandorten wurde an 50 Jungbäumen bis 2 m Höhe der Sprosslängenzuwachs im Jahr 2019 gemessen (Dietrich et al. 2024). An 45 Standorten wurden jeweils 9 Jungbuchen (3 Bäume pro Probenahmekreis; Höhe bis 50 cm; Alter 5 – 15 Jahre) geerntet (Dietrich et al. 2025a). Die ober- und unterirdische Biomasse wurde am Wurzelhals getrennt und erstere sofort, letztere nach Lagerung bei –20 °C und der Durchführung von Analysen zur Feinwurzelmorphologie und Mykorrhizierung bei 70 °C für 72 h getrocknet und anschließend gewogen. Pro Baum wurden 3 – 5 Feinwurzeln (Durchmesser \leq 2 mm) von den Grobwurzeln für die morphologische Analyse abgetrennt. Die Anzahl der Wurzelspitzen (mit und ohne Mykorrhizierung) wurde unter dem Lichtmikroskop ausgezählt. Die Wurzeln wurden anschließend mit einem Flachbettscanner (800 dpi) eingescannt, Wurzellänge und Wurzelvolumen wurden mit dem Programm WinRhizo (Regent Instruments) ermittelt. Aus diesen Informationen wurden die spezifische Wurzellänge (in cm mg⁻¹), die Gewebedichte (in g cm⁻³), die Wurzelspitzendichte (Spitzen pro mg) und die Mykorrhizierungsrate der Wurzelspitzen (in %) bestimmt (Dietrich et al. 2025a).

Alle Blätter eines Baumes wurden zu einer Sammelprobe vereinigt und gemahlen. Eine Teilprobe wurde einem Druckaufschluss mit Schwefelsäure unterzogen. Diese Aufschlüsse wurden zur Elementanalyse von Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und Phosphor mit optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, Ultima 2, Horiba Jobin-Yvon) verwendet (Dietrich et al. 2025b). Ein Teil der gemahlenden Blattproben wurde direkt zur Messung der Konzentrationen von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (Dietrich et al. 2025b) sowie zur Bestimmung der Kohlenstoff-Isotopensignatur ($\delta^{13}\text{C}$) (Dietrich et al. 2025b, c; Hauck, Dietrich 2025) genutzt. Die massenspektroskopisch ermittelten $\delta^{13}\text{C}$ -

Geschichte und Klimafolgen der Entwaldung des Murnauer Moooses

History and climate impacts of the deforestation of the Murnauer Moos peatland

Stephan Gampe

Zusammenfassung

Die heutige Gemarkung Murnau war bis auf wenige Flächen um Mooreseen und extreme Nassstandorte vor Beginn der menschlichen Besiedlung nahezu komplett bewaldet. Während vier Torfbildungs- und Sedimentationsphasen im Murnauer Moos entwickelte sich waldfreie Vegetation immer wieder zu Wald. Während der letzten Torfbildungsphase nutzte und beseitigte der Mensch seit etwa 3.000 Jahren den Wald. Bis ins 15. Jahrhundert zurückreichende Akten des Marktes Murnau und Klosters Ettal belegen diese Waldzerstörungen. Bis 1845 waren nur noch 10 % der Waldfläche in Murnau übriggeblieben. Ursachen und Zeiträume der Rodungen in der Gemarkung Murnau, die rund 1.000 ha Moor- und Auwälder im Murnauer Moos umfasste, werden mit historischen Belegen und auf einer Übersichtskarte dargestellt. Wesentliche Ursachen waren (1) die nicht nachhaltige Brennholznutzung mit anschließender Weidenutzung der Flächen und teils Mahd seit der Römerzeit, (2) die Ansiedlung von Schwaighöfen mit hohem Bedarf an Holz, Weideflächen und Wiesen seit dem 15. Jahrhundert, (3) die Brennholznot im Markt Murnau, (4) der hohe Bedarf an Holz, Asche und Pottasche der nahe gelegenen Glashütte Aschau, (5) der Export von Lohe (Baumrinde) für Gerbereien v. a. aus Auwäldern, (6) die hohe Streunachfrage für die Militärpferdezucht in Schwaiganger im 19. Jahrhundert und (7) die Intensivierung der Landwirtschaft und Milchproduktion im 19. Jahrhundert mit Verdreifachung des Viehbestands und zusätzlichem Bedarf an Weiden, Heu und Streu. Im 20. Jahrhundert schuf der aufkommende Naturschutz das Narrativ überwiegend natürlich waldfreier Flächen im Murnauer Moos, das aber historisch nicht haltbar ist. Naturschutzfachliche Ziele orientierten sich an diesem „gehölzfreien“ Landschaftsbild. Mit hohen Fördersummen werden heute im Markt Murnau rund 500 ha Moos wieder streugenutzt. Entwaldung und Entwässerung von Mooren haben aber klimaschädliche Folgen. Unter Klimaschutzaspekten sollten entwässerte und entwaldete Flächen mit hohen Treibhausgas(THG)-Emissionen wieder vernässt und mit standortangepassten Gehölzen bewaldet werden. So könnten die kulturbedingten THG-Quellen im Moos hocheffizient und kostengünstig wieder in die ehemaligen naturnahen und bewaldeten THG-Senken verwandelt werden.

Murnauer Moos – Entwaldung – Holznot – nacheiszeitliche Vegetationsdynamik – Treibhausgas(THG)-Emissionen – Klimaschutz – Wiedervernässung – Wiederbewaldung

Abstract

The Murnau district was almost completely forested before the beginning of human settlement, with the exception of a few areas around moor lakes and extremely wet sites. During four peat formation and sedimentation phases in the Murnauer Moos, forest-free vegetation repeatedly developed into forest. During the last peat formation phase, humans used and eliminated the forest for about 3,000 years. Files from the Murnau market town and the Ettal Monastery dating back to the 15th century document this destruction of the forest. By 1845 only 10 % of the forest remained in Murnau. The causes and periods of the clearings, which comprised around 1,000 ha of peatland and alluvial forests in the Murnauer Moos, are shown on an overview map on the basis of historical evidence. The main causes were 1) unsustainable use of firewood with subsequent transformation of the areas to pastureland and partly mowing since Roman times, 2) increased livestock farming since the 15th century with a high demand for wood, pastures and meadows, 3) shortage of firewood in the Murnau market town, 4) high demand of the nearby Aschau glass factory for wood, ash and potash, 5) blaze export for tanneries mainly from alluvial forests, 6) high demand for litter due to military horse breeding in Schwaiganger in the 19th century, and 7) intensification of agriculture and milk production in the 19th century with tripling of livestock and heightened demand for pasture, hay and litter. In the 20th century, emerging nature conservation created a narrative of predominantly naturally forest-free areas in the Murnauer Moos, which is historically untenable. Nature conservation objectives were based on this image of a “wood-free” landscape. With high subsidies, an area of around 500 ha is now used for litter production in the Murnau market town. However, deforestation and drainage of peatland have negative consequences for the climate. From a climate change mitigation perspective, drained and deforested areas with high greenhouse gas (GHG) emissions should be rewetted and reforested with site-appropriate woody plants. With such an approach, anthropogenic GHG sources could be converted back into the former, near-natural and wooded GHG sinks in a highly efficient and cost-effective manner.

Murnauer Moos – Deforestation – Wood shortage – Post-glacial vegetation dynamics – Greenhouse gas (GHG) emissions – Climate protection – Rewetting – Reforestation

Double peer-reviewed, Einreichung: 8.5.2025, Annahme: 16.2.2026

DOI: 10.19217/NuL2026-05-02

1 Einleitung

Das Murnauer Moos ist geprägt vom Narrativ einer „intakten“, überwiegend „gehölzfreien“ Moorlandschaft. Dieses Narrativ ist Leitbild für naturschutzfachliche Vorgaben und Regelungen aus den letzten

Jahrzehnten, die seit etwa 1980 das Ziel der großflächigen Mahd von Streu zur Erhaltung der „historischen Kulturlandschaft um etwa 1850“ im Moos begründen. Auswertungen von Archivmaterial (Malzer 2018a, b, c; Rädlinger 2019) sowie neuere Forschungen zur geologischen Entwicklung des Moooses (Schneider 2008 et al.; Jerz

2025) zeigen aber, dass in der Neuzeit nur wenige Flächen im Moos von Natur aus dauerhaft waldfrei waren. Menschliche Nutzungen haben seit der Römerzeit Moore und Auen flächig entwaldet und entwässert. Die negativen Klimafolgen der Entwässerung und Entwaldung von Mooren wurden erst seit dem Ende des 20. Jahrhunderts gut erforscht und diskutiert; diese Ergebnisse sind in den o. g. Publikationen aber nicht enthalten. Die hohe Bedeutung des Klimaschutzes verlangt heute eine offene Diskussion der künftigen Behandlung des Moores mit staatlichen Subventionen.

Die ausschließlich dem Artenschutz und der Erhaltung einer „historischen Kulturlandschaft“ dienende Streunutzung und „Entbuschungen“ sind aus Klimaschutzgründen sehr kritisch zu sehen, wird doch die ursprüngliche, als hervorragende Kohlenstoffsenke wirkende, wertvolle Moor- und Auwaldvegetation hierdurch „gestört“. Die Weiterentwicklung des vom Menschen zur Quelle schädlicher Treibhausgase (THG) gemachten Moores zu einer wieder hoch effizienten THG-Senke sollte aber angesichts der heutigen Klimakrise konsequent und rasch angegangen werden.

Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Entstehung des Murnauer Moores mit den historisch belegten Fakten der Waldrodung zusammenzubringen und die Klimafolgen der heutigen naturschutzfachlich orientierten Nutzung aufzuzeigen. Lösungsvorschläge wie Vernässung und Bewaldung ehemaliger Waldmoore werden in [Abschnitt 7](#), S. 210 ff., vorgestellt.

2 Methodik

Die Archivrecherche mit Schwerpunkt 15. bis 18. Jahrhundert erfolgte vorwiegend im Marktarchiv Murnau (MAM), dem Staatsarchiv München (StAM; v. a. Pfliegergericht und Rentamt Weilheim, Triftamt Uffing), dem Bayerischen Hauptstaatsarchiv München (HStAM; Archivalien des Klosters Ettal, Plansammlung) und dem Archiv des Deutschen Museums (Nachlass Joseph Utzschneider). Insbesondere Akten des Holzmeisteramtes Ettal (HMA) und des übrigen Klosterarchivs, das den 1703 teils verbrannten Murnauer Aktenbestand gespiegelt hatte, gaben sehr wertvolle Hinweise.

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Landnutzung – insbesondere der Holzversorgung sowie der lokalen Viehbestände und der Märkte von Agrarprodukten, Holz und Streu – wurde durch Informationen aus folgenden Quellen ergänzt: historischen Steuerbeschreibungen, Akten zu Nutzungsrechten und deren Ablösung, Marktkammerrechnungen, Ratsprotokollen, statistischen Meldungen zur Landwirtschaft, Gebührenlisten für Behirtung, Daten zu Rinderseuchen, digital verfügbaren Texten und aus historischer, wissenschaftlicher Fachliteratur, die in Online-Katalogen verschiedener Bibliotheken und Online-Portalen wie bavarikon, digiPress, E-Periodica der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich und ZOBODAT recherchiert wurde.

Jahrzehntelange Ortskenntnisse und Erfahrungen des Autors im Raum Murnau sowie genaue Kartierungen der in den Archivalien genannten Orte teils nach historischen Markbeschreibungen ließen zeitliche und regionale Zusammenhänge der Wirtschaftsgeschichte klar werden, v. a. den Brennholzmangel in Murnau. Realistische Einschätzungen der Holznutzungen und der Landwirtschaft vor Einführung der Milchwirtschaft im 19. Jahrhundert lieferten historische Karten, Umweltdaten aus dem digitalen Bayernatlas, Fachliteratur aus dem 18. und 19. Jahrhundert, eigene auf historischen Daten beruhende Berechnungen der Häuserzahlen und des Holzverbrauchs, Ertragsberechnungen für Wälder, standörtliche Erfahrungen zur regionalen Waldentwicklung bei Bewirtschaftung, Berechnungen von Arbeitsleistungen und -kapazitäten und Rückfragen bei versierten alten Landwirten. Kenntnisse der Entwaldungsprozesse in Entwicklungsländern waren auch auf die historischen Entwaldungsprozesse im Bayerischen Voralpenland gut übertragbar.

Die Nutzungsgeschichte des Moores in der Gemarkung Murnau ist in sehr ähnlicher Form auch in den umgebenden bäuerlichen Gemarkungen zu erwarten: Dort ist sie wegen fehlender gemeind-

licher Akten vor 1800 allein aus Akten des Klosters Ettal nachvollziehbar. Die Ergebnisse aus der Gemarkung Murnau sind für das gesamte Murnauer Moos im Grundsatz übertragbar.

3 Boden- und Waldentwicklung im Raum Murnau

3.1 Bodenentwicklung nach der Eiszeit

Nach Ende der Würmeiszeit entwickelten sich um Murnau – vereinfacht dargestellt – aus Gesteinen Mineralböden, aus Sedimenten von Fließgewässern Auenböden mit örtlichen Torfbildungen und aus nicht zersetzten Pflanzenresten Torf(moor)böden. Im nördlichen Murnauer Moos, das seit über 17.000 Jahren vor heute von der damals über 20 m tiefer fließenden Loisach und ihren Seitenbächen sowie randlichen Schwemmkegeln rasch (im Mittel 1,3 m/Jahrtausend) zu einer weitgehend ebenen Wildflusslandschaft aufgefüllt wurde, bildeten sich örtlich auch kleinere Seen mit zeitweiser lokaler Torfbildung ([Schneider 2006](#)). Ein ehemals großer, verlandender „Murnauer See“ wird heute nicht mehr postuliert ([Jerz 2025](#)).

Die Bodenentwicklung im Moos ist durch wechselnde oder dauernde Vernässungen und mineralische Übersättigungen geprägt. Sie durchlief vier jeweils mehrere Jahrhunderte dauernde Phasen ohne Torfwachstum, die auch in anderen voralpinen Mooren belegt sind. Spätestens in der ersten Trockenphase vor rund 12.000 Jahren vor heute waren die Auen- und Moorböden aber schon mit lichtem Kiefern-Birkenwald besiedelt ([Bludau 1985](#), [Weber 1999](#); [Feeser et al. 2024](#); [Jerz 2025](#)). Die Bodenbildung in solchen Vorwäldern war spätestens während der nächsten Trockenphase so weit fortgeschritten, dass sich geschlossene Wälder bilden konnten.

Im Moos der Gemarkung Murnau sind erste lokale Torfbildungen seit 13.500 vor heute belegt, die örtlich bis 20 m Mächtigkeit erreichen können. Diese Böden wurden regelmäßig durch Hochwasser überschwemmt ([Schneider et al. 2008](#)). Nässtandorte um Seen waren randlich sicher waldfrei. Viele Feinsedimentablagerungen auf Torfflächen boten aber gute Möglichkeiten für die Bildung neuer Wälder. Nachweise von Bränden mit Holzasche belegen das Vorkommen von Wald auf Moorböden. Über lange Zeiträume betrachtet gab es immer Chancen zur Wiederbewaldung. Die letzte Torfbildungsphase mit möglichem natürlichem Rückgang der Moorböden begann im Moos erst vor etwa 2.000 bis 4.500 Jahren vor heute, war also bereits geprägt von menschlichen Rodungsaktivitäten ([Schneider et al. 2008](#)).

3.2 Natürliche Waldtypen

Die natürliche Vegetationsdynamik auf den Auen- und Moorböden im voralpinen Murnauer Moos mit Jahresniederschlägen über 1.000 mm führt ohne menschlichen Einfluss langfristig zu Wald – seien es Auwälder, Schwarzerlenbruch-, Birken-, Kiefern- oder andere Moorböden ([Vollmar 1942](#); [Krämer 1965](#)).

[Schneider \(2006\)](#), [Schneider et al. \(2008\)](#) analysierten alle im Moos durchgeführten Bohrungen, Sondierungen, neuere Forschungsbohrungen sowie 319 neuere und einige ältere Pollenanalysen ([Paul, Ruoff 1927](#); [Hohenstatter 1984](#)). Dabei zeigten die verschiedenen Moortypen fast überall auch Reste von Wald, die auf den Auen- und Moorböden im Moos natürlich entstanden waren. Die nacheiszeitliche Waldentwicklung mit verschiedenen Waldtypen, Holzaschefunde und Torfbildungsphasen im Murnauer Moos zeigt [Abb. 1](#), S. 204.

Bereits 7.000 Jahre vor heute waren alle gegenwärtig heimischen Baumarten etabliert; dichte Wälder wuchsen dort, wo der Standort geeignet war. Die Vegetation auf nassen Böden im Moos unterlag der Sukzession zu wuchsarmer, unterschiedlich dichten Birken-, Kiefern-, Fichten- und Schwarzerlenwäldern bzw. auf Hochmooren zu Spirkewäldern ([Weber 1999](#); [Schwarz 2010](#)). Auf Auenstandorten im Moos entwickelten sich die artenreichsten, aber oft wuchsarmeren Wälder mit vielen Laubwaldarten. Auf Mineralböden wie z. B. auf den Köcheln (Hügel im Moos aus kreidezeitlichen Hartgesteinen) im Moos entstand

Nacheiszeitliche Waldentwicklung, Holzschneefunde und Torfbildungsphasen im Murnauer Moos															
Jahre vor heute	13.000	12.000	11.000	10.000	9.000	8.000	7.000	6.000	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000	Heute	
Einwanderung von Baumarten nach Pollenanalysen	Kiefer (3 Arten), Birke (4 Arten)														
					Fichte, Ulme (2 Arten), Linde (2 Arten), Eiche, Hasel, Erle (3 Arten)										
								Tanne, Esche, Ahorn (3 Arten)							
										Buche, Weiden					
													Hainbuche, Getreide		
Landwald auf Mineralböden	Kiefer/Birke				Fichte/Kiefer, Ulme, Linde, Eiche, Hasel, Erle			Fichte/Tanne, Kiefer, Ulme, Linde, Esche, Erle, Eiche		Fichte, Tanne, Buche, Esche, Ulme, Linde, Eiche, Erle, Kiefer			Fichte, Tanne, Buche, Esche, Ulme, Linde, Eiche, Hainbuche, Erle, Kiefer		
Auwald auf Auenböden	Kiefer/Birke				Kiefer, Fichte, Erle, Birke, Ulme, Linde, Eiche			Erle, Esche, Eiche, Ulme, Ahorn, Birke, Buche, Fichte, Tanne, Kiefer, Weide							
Moorwald auf Moorböden	Kiefer/Birke				Kiefer/Birke, Fichte, Erle			Kiefer/Birke, Fichte, Erle, Latsche, Spirke, Weide							
Holzschneefunde	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	Holz-asche	
Torfbildung	Torfbildung	Akkumulation und Erosion			Torfbildung	Akkumulation und Erosion			Torfbildung	Akkumulation und Erosion			Torfbildung	Torfbildung	

Abb. 1: Schema der nacheiszeitlichen Waldentwicklung auf Mineral-, Auen- und Moorböden, Holzschneefunde und Torfbildungsphasen im Murnauer Moos.

Fig. 1: Schematic representation of postglacial forest development on mineral, floodplain and peatland soils, wood ash finds, and peat formation phases in the Murnauer Moos.

wüchsiger „Landwald“, der seit mindestens 5.000 Jahren vor heute aus ertrags- und vorratsreichen Fichten-Tannen-Buchenwäldern besteht.

Heute wachsen Wälder außerhalb ehemaliger Allmenden noch bis in die Randlagen verlandender Moorseen. Die Bäume werden mit zunehmender Seenähe lichter und bilden wuchsschwache Krüppelformen aus. In waldfreien Zentren Allgäuer Waldmoore (Mooraugen) wurden mithilfe von Radargrammtechnik sogar tief liegende große Stämme gefunden. Reste der dazugehörigen Baumbiomasse (Blattorgane, Zweige, Äste) waren aber nicht mehr nachweisbar (Stojakowits 2014).

Während neuer Torfbildungsphasen waren geschlossene Waldmoorflächen auf sehr nassen Böden wahrscheinlich wieder lichter geworden oder sogar völlig verschwunden. Dort bildete sich dann jahrhundertlang ohne Baumbewuchs Torf aus Schilf, Seggen und Torfmoosen. Aber spätestens in der nächsten Trockenphase oder nach neuen Störungen (Brände, Überlagerungen und Überschwemmungen) besiedelten wieder Bruch- oder Moorwälder diese Standorte. Dauerhaft waldfreie Flächen waren also in ungestörten Mooren im Voralpenland wohl eher selten. In der Gemarkung Murnau wird deshalb die natürlich waldfreie Fläche vor etwa 2.000 Jahren um die wenigen Moorseen auf maximal 5 % der Gemarkungsfläche geschätzt.

4 „Holz, Wun, Wayd und Mahd“ – Entwicklung und Folgen der anthropogenen Nutzung des Murnauer Moores

4.1 Überblick über die Einführung landwirtschaftlicher Nutzungen

Bereits vorrömische Siedler rodeten seit ca. 1.400 v. Chr. Wald für Acker- und Weideflächen bei Murnau und deckten ihren Holzbedarf v. a. durch diese Rodungen. Diese danach beweideten Rodungs-

flächen lagen wohl auch teilweise am Moosrand, waren wegen der geringen Bevölkerungszahl aber unbedeutend.

Seit 15 v. Chr. kamen die professionellen Erfahrungen der Römer mit der Entwässerung nasser Böden durch Gräben, Holzeinschlag oder Brandrodung des Waldes und mit nachfolgender landwirtschaftlicher Nutzung durch Beweidung ins Voralpenland. Die Siedlungsdichte der Menschen und damit der Viehbestand stiegen an. Rodungs- und Weideflächen von einigen Hundert Hektar dürften dabei im Südosten des Murnauer Moores entlang der Römerstraße und um die Siedlung am Moosberg entstanden sein. Spätere Siedler übernahmen die römischen Entwässerungs- und Entwaldungstechniken – auch durch künstliche gelegte Brände. Diese traditionelle Technik zur Entwaldung und kurzfristigen Steigerung des Futterangebots führte die Bürgerinnen und Bürger des Marktes Murnau* und im Kloster Ettal bis ins 19. Jahrhundert fort (MAM 5, 8; HStAM 4). Alle im Text zitierten Archivalien finden sich in Abschnitt 9, S.213.

Die historisch dokumentierten Weiderechte im Moos umfassten zunächst ein Holznutzungsrecht (Holz = Rodung), dann die Nachtweide (Wun) und Tagweide (Wayd) sowie fallweise die Mahd (MAM 1). Die Weide im Moos wurde mit Hirten in drei Weidezyklen (Frühjahr: bis 3. Mai, Sommer: Karfreitag bis 25. Juli, Herbst: ab 24. August) betrieben. Die Moosmahd war zur Überwinterung des eigenen Viehs auf berechtigten und geeigneten Flächen nur zur Ergänzung der viel effizienteren Wiesenmahd bzw. Nutzung der Ackerstreu als Einstreu nötig. Der wenig ertragreiche Ackerbau wurde im Murnauer Raum, der Getreideeinfuhrgebiet war, noch bis Anfang des 20. Jahrhunderts betrieben und lieferte als Koppelprodukt billigere Einstreu als die Streumahd im Moos. Erst die landwirtschaftlichen Reformen des 19. Jahrhunderts und die Einführung der Milchwirtschaft ließen die Rinder- und Pferdebestände ansteigen und das Interesse der Menschen an Landwirtschaft als Erwerbsquelle nahm zu (MAM 4, 7).

Weideberechtigte Flächen wurden wohl seit der Römerzeit (Dark, Dark 1997) traditionell durch randliche Gräben abgegrenzt

* Bis zu den Eingemeindungen von Weindorf (1974) und Hechendorf (1978) war der Markt Murnau mit der Gemarkung Murnau identisch.