


BioFeuchtHumus




Bodenökologie in Feuchtwäldern – Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis

Inhalt

Seite



1 Einleitung	4
1.1 Bedeutung von Feuchtwäldern	4
1.2 Typen von Feuchtwäldern	6
1.3 Bodenökologie	10
1.4 Feuchtwälder im Klimawandel	11



2 Handlungsempfehlungen	12
2.1 Wasserhaushalt und Boden	13
Wasserhaushalt	13
Befahrung und Bodenschutz	15
Standorteigenschaften und Humusformen	18
2.2 Waldstruktur	20
Baumartenwahl	20
Natürliche Waldentwicklung	22
Bestandeslücken	25



3 Finanzielle Fördermöglichkeiten	27
--	----



4 Glossar	29
------------------	----



5 Literaturverzeichnis	30
-------------------------------	----

Vorwort

Feuchtwälder sind im Klimawandel besonderen Beeinträchtigungen und Gefährdungen ausgesetzt. Gleichzeitig können sie durch die Speicherung von Wasser und Kohlenstoff einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Diese Broschüre soll Waldbesitzenden und -bewirtschaftenden Möglichkeiten aufzuzeigen, wie sie unterschiedliche Ausprägungen von Feuchtwäldern an den Klimawandel anpassen können. Vorgestellt werden Wege, mit denen die Forstpraxis die Vitalität der Wälder, ihre Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung wie auch ihre bodenökologischen Funktionen stärken kann. Diese Empfehlungen wurden im Rahmen des Waldklimafonds-Projektes „BioFeuchtHumus“ erarbeitet, gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sowie das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz.

Im Projekt kooperierten Forstpraxis, Wissenschaft und Naturschutz, um das Wissen über die bodenökologischen Zusammenhänge in Feuchtwäldern zu verstehen und daraus abgeleitet Empfehlungen an die Forstpraxis zu erstellen. Bereits im Waldklimafonds-Projekt „BiCO₂“ hatte ein Teil der Kooperationspartner Empfehlungen zum allgemeinen Umgang mit Wäldern aus ökologischer Sicht erarbeitet (s. www.bico2.de). Auf diese Erkenntnisse konnte in dieser Broschüre in Teilen zurückgegriffen werden.

Die Herausgeber bedanken sich beim Regionalforstamt Münsterland des Landesbetriebes Wald und Holz Nordrhein-Westfalen für die umfangreiche Unterstützung bei der Durchführung des Projektes. Darüber hinaus bedanken wir uns bei vielen weiteren Menschen aus der Forstpraxis, die vor allem bei der Erstellung der Broschüre wertvolle Beiträge geleistet haben.

Einleitung

1.1 Bedeutung von Feuchtwäldern

Als Feuchtwälder werden Wälder bezeichnet, die in besonderer Weise von Wasser beeinflusst sind. Darunter fallen stauanasse Eichen-Hainbuchenwälder, Auen-, Sumpf-, Bruch- und Moorwälder. Dominante Baumarten sind je nach Waldtyp und Nährstoffversorgung Arten, die auch mit höheren Wasserständen zurechtkommen, vor allem Stiel-Eiche, Moor-Birke, Schwarz-Erle, Weiden, Gewöhnliche Esche oder Flatter-Ulme.

Da ihr Vorkommen an besondere Standortbedingungen geknüpft ist, sind Feuchtwälder von Natur aus selten. Durch menschliche Aktivitäten wie Entwässerung, Grundwasserabsenkung, Intensivierung der forstlichen Nutzung, Nutzung als Acker- oder Grünland, Begrädigung von Gewässern oder Ausbau von Siedlungs- und Verkehrsflächen ist ihr Vorkommen in Mitteleuropa zudem weiter reduziert [1]. Ihr ökologischer Zustand ist aufgrund des meist stark durch menschliche Eingriffe veränderten Wasserhaushaltes sowie einer veränderten Baumartenzusammensetzung oft sehr schlecht [2].



Arten- und strukturreicher Erlenbruchwald mit Sumpf-Schwertlilie

Naturnahe Feuchtwälder zeichnen sich häufig durch eine große Vielfalt an teils seltenen Tier- und Pflanzenarten aus, darunter Seeadler, Biber, Sonnentau oder Sumpfschwertilie. Vor allem für Amphibien (Frösche, Kröten, Molche und Salamander) bilden sie einen wichtigen Lebensraum. Gleichzeitig können Feuchtwälder große Mengen an Kohlenstoff speichern und so einen wichtigen Beitrag zum natürlichen Klimaschutz leisten. Neben der Aufnahme und Einlagerung von Kohlenstoff in den lebenden Bäumen spielt vor allem der Boden eine große Rolle. Durch die feuchten Bedingungen werden die Abbauprozesse von Blättern, Nadeln und Zweigen stark verlangsamt. So können tiefgründige stauwasserbeeinflusste Böden im Vergleich zu flachgründigen Böden am Hang ein Vielfaches an Kohlenstoff speichern [3]. In intakten Mooren liegt durch die sehr nassen Bedingungen sogar ein dauerhafter Sauerstoffabschluss vor, der die Speicherung von besonders großen Kohlenstoffvorräten ermöglicht.

Diese Broschüre hat das Ziel, Waldbesitzenden Optionen aufzuzeigen, mit denen das Anpassungspotenzial von Feuchtwäldern an den Klimawandel gefördert werden kann und nutzungsbedingte Beeinträchtigungen verringert werden können.

Die Ausführungen betrachten dabei das Ökosystem als Ganzes, mit einem Schwerpunkt auf dem Boden samt seiner Lebewesen und mit enger Verknüpfung zum Wasserhaushalt.

1.2 Typen von Feuchtwäldern

Je nachdem, welche Standortbedingungen vorliegen und wie sich der Wasserhaushalt auf das Ökosystem auswirkt, kommen unterschiedliche Typen von Feuchtwäldern vor. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Baumartenzusammensetzung und ihrer ökologischen sowie ökonomischen Funktionen teils erheblich.

Stauanasse Eichen-Hainbuchenwälder

Die feuchte Ausprägung der Eichen-Hainbuchenwälder zeichnet sich durch einen stauenden Bodenhorizont aus. Dort staut sich vor allem nach Phasen mit stärkerem Niederschlag das Wasser. Diese Flächen sind durch starke Wechselfeuchtigkeit geprägt: Während sie im Winterhalbjahr zum Teil monatelang im Wasser stehen, können sie im Sommer vollständig austrocknen [4]. Es gibt auch Vorkommen auf grundwasserbeeinflussten Böden [1]. Mit zunehmendem Grundwassereinfluss werden sie von Sumpfwäldern abgelöst [5]. Die Vielfalt an vorkommenden Baum-, Strauch- und Krautarten kann mitunter sehr hoch sein [6].

Hauptbaumarten: Stiel-Eiche, Hainbuche.



Wechselfeuchter Eichen-Hainbuchenwald

Auwälder

Auwälder grenzen an Fließgewässer (Flüsse oder Bäche) und werden vor allem durch deren Wasserdynamik beeinflusst. Der Wasserstand im Überflutungsbereich unterliegt starken Schwankungen, abhängig vom Wasserstand im Gewässer. Die Nährstoff- und Basenversorgung ist üblicherweise gut, da stets Sedimente vom Gewässer angeschwemmt werden [5]. Die Bodenvegetation in Auwäldern ist oft üppig und artenreich [7]. Auwälder gelten als eine der baumartenreichsten Waldgesellschaften in Mitteleuropa. Naturnahe Auwälder können einen wichtigen Beitrag zum natürlichen Hochwasserschutz leisten und spielen eine große Rolle für die Grundwasserneubildung und somit auch für die Gewinnung von sauberem Trinkwasser [1]. Durch Begradigungen, Deichbau, landwirtschaftliche Nutzung oder Entwässerung ist der ökologische Zustand vieler Auen in Mitteleuropa heute sehr schlecht. Nur wenige Flächen sind heute noch mit Wald bedeckt und die wenigsten dieser Wälder weisen noch eine funktionierende Auendynamik auf [8].

Hauptbaumarten: Je nach Entfernung zum Fließgewässer und dessen Typ: Weiden, Erlen, Eschen, Stiel-Eiche.



@ Max Fornfeist

Baumartenreicher Auwald

Bruch- und Sumpfwälder

Bruch- und Sumpfwälder werden durch oberflächennahes Grundwasser beeinflusst und sind in der Regel dauerhaft wasserbeeinflusst. Dadurch ist die Zersetzung der Streu so stark gehemmt, dass sich häufig Niedermoore bilden [5]. Sumpfwälder können aber auch auf mineralischen Nassböden vorkommen. Hier können größere Schwankungen des Grundwasserspiegels auftreten [1]. Wie auch Auwälder verlangsamen sie den schnellen Abfluss von Wasser aus der Landschaft und können große Wassermengen speichern. So können sie einerseits bei Starkregenereignissen zum Hochwasserschutz beitragen und wirken sich andererseits in Trockenzeiten positiv auf den Landschaftswasserhaushalt aus. Auch für die Grundwasserneubildung und damit die Trinkwassergewinnung sind Bruch- und Sumpfwälder von großer Bedeutung [1]. Erlenbruchwälder sind reich an Nährstoffen, Birkenbruchwälder kommen dagegen bei nährstoffarmen Bedingungen mit stehendem, sauerstoffarmem Grundwasser vor [7]. Durch Entwässerung oder Umwandlung in Grünland sind Bruchwälder heute selten [9].

Hauptbaumarten: Schwarz-Erle, Moor-Birke je nach Nährstoffversorgung, Esche bei etwas geringerem Wassereinfluss.



Erlenbruchwald mit üppiger Bodenvegetation

Moorwälder

Moorwälder kommen auf Niedermoorflächen oder in Randbereichen von Hochmooren vor. Sie zeichnen sich durch eine mächtige Torfauflage und ständigen Wassereinfluss aus. Moorwälder sind meist sehr licht, da die Wuchsbedingungen für die Bäume schlecht sind. Oft ist eine dichte und artenreiche Moos- und Grasvegetation vorzufinden [7]. Naturnahe, nicht entwässerte Moore können von allen Landschaftsformen die größten Mengen an Kohlenstoff speichern und somit entscheidend zum Klimaschutz beitragen. Die Artenvielfalt der vorkommenden Vegetation und auch der Baumarten ist aufgrund der extremen Standortverhältnisse meist gering. Allerdings kommen hier hoch spezialisierte und oft sehr seltene Arten vor, sodass diese Wälder auch aus Naturschutzsicht sehr bedeutend sind [10]. Nur ein kleiner Teil der in Deutschland vorkommenden Moore ist heute noch als naturnah einzustufen. Viele Flächen wurden entwässert, waren von Torfabbau betroffen und werden heute oft als Grünland genutzt, was zu einer schrittweisen Auflösung der kohlenstoffreichen Torfauflage führt.

Hauptbaumarten: Moor-Birke, zum Teil Fichte oder Kiefer in Gebirgslagen.



@ Klaus Striepen

Lichter Birken-Moorwald mit dichtem Gras- und Moosbewuchs

Insgesamt ist festzuhalten, dass der ökologische Wert des Waldes mit höherem Wassereinfluss steigt, ebenso wie die Empfindlichkeit des Bodens bzw. des ganzen Ökosystems gegenüber forstlichen Maßnahmen wie Befahrung. Während Eichen-Hainbuchenwälder in aller Regel forstlich bewirtschaftet werden können, ist dies bei intakten, nicht entwässerten Moorwäldern dagegen fast unmöglich [10].

1.3 Bodenökologie

Der Boden spielt im Ökosystem Wald eine entscheidende Rolle. Die in ihm gespeicherten Nährstoffe bilden die Lebensgrundlage für die Waldbäume und somit auch die Grundlage für eine forstliche Nutzung. Durch seine Funktion als natürlicher Wasserspeicher und durch die Möglichkeit, große Mengen an Kohlenstoff zu speichern, trägt der Waldboden erheblich zum Klimaschutz bei. Zudem bieten Waldböden zahlreichen Organismen einen Lebensraum und können nicht zuletzt Säureeinträge und atmosphärische Schadstoffe abpuffern [11].

Die organische Auflage des Bodens setzt sich aus pflanzlichen und tierischen Bestandteilen zusammen und befindet sich auf dem Mineralboden. Hauptkomponenten sind dabei Blätter oder Nadeln, an deren Zersetzung zahlreiche Organismen beteiligt sind, z. B. Regenwürmer, Pilze und Bakterien. Die Humusform beschreibt die Anordnung von unterschiedlich stark zersetzten Lagen organischen Materials. Gleichzeitig drückt sie die Umsetzungsgeschwindigkeit der Streu aus. Diese steigt von Rohhumus über Moder zu Mull an [12].



@ Tina Frank

Bodenprofil eines wechselfeuchten Pseudogleys



@ Heinz-Christian Fründ

Regenwurm und Kleinringelwurm

Böden spielen eine wichtige und bisher noch unterschätzte Rolle beim Schutz der Biodiversität. Knapp 60 % der Arten weltweit leben im Boden [13]. So kommen beispielsweise 90 % der Pilze im Boden vor. Dabei handelt es sich sowohl um Arten, die an und um die Wurzeln von Bäumen wachsen und so deren Aufnahme von Wasser und Nährstoffen erleichtern (Mykorrhiza) als auch um Arten, die an der Zersetzung von Laub und Totholz beteiligt sind. Die obersten Zentimeter des Bodens und die Humusschicht beherbergen dabei die größte Vielfalt an Arten [11].

1.4 Feuchtwälder im Klimawandel

Während (Feucht-)Wälder einerseits durch ihre Fähigkeit, große Mengen an Kohlenstoff zu speichern, ein wirksames Instrument gegen den Klimawandel sein können, sind sie ebenso selbst von ihm betroffen. In vielen Wäldern kommt es im Zuge der Klimaänderungen zu Vitalitätsabnahmen, dem Absterben von Einzelbäumen oder gar großflächigen Kalamitäten. Diese sind vor allem bedingt durch Dürrejahre mit langen trockenen Phasen in der Vegetationszeit. Hinzu kommen vermehrt auftretende Extremwetterereignisse wie z. B. Stürme oder Starkregen. Feuchtwälder reagieren besonders sensitiv auf Dürrephasen, da ihr Fortbestand von ausreichend Wasser abhängig ist [2, 14]. Insbesondere Auen-, Bruch- und Moorwälder zeichnen sich durch starken Wassereinfluss aus. In vielen Fällen sind solche Flächen schon durch menschliche Nutzung entwässert worden [8, 10] und weisen so bereits einen schlechten ökologischen Zustand auf.

2 Handlungsempfehlungen

Diese Broschüre soll Waldbesitzenden und Waldbewirtschaftenden Möglichkeiten aufzeigen, Feuchtwälder an die sich ändernden klimatischen Bedingungen anzupassen und gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz und zum Schutz der biologischen Vielfalt zu leisten. Ausgewählt wurden sechs Maßnahmen bzw. Themenbereiche, die im Folgenden vorgestellt werden. Nach einer stichpunktartigen Zusammenfassung werden der Hintergrund sowie konkrete Möglichkeiten zur Umsetzung im Wald erläutert. Zudem wird auf finanzielle Fördermöglichkeiten hingewiesen.



@ Max Fornfeist

Wechselfeuchter Eichen-Hainbuchenwald mit ausgeprägter Staunässe im Frühjahr



Mit einem Lehmstau verschlossener Entwässerungsgraben (links) verhindert den Wasserabfluss in einen größeren Graben

2.1 Wasserhaushalt und Boden

Wasserhaushalt

- Die Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes in Feuchtwäldern wirkt sich bei standortangepasster Bestockung positiv auf die Vitalität der Bäume aus.
- Wasserbeeinflusste Böden können große Mengen an Kohlenstoff speichern.
- Auch teils seltene, an die feuchten Bedingungen angepasste Pflanzen- und Tierarten profitieren von Wasserrückhaltmaßnahmen.

Empfehlungen

- Verschluss von Entwässerungsgräben und Rückbau von Drainagen
- Viele Grabenverschlüsse pro Fläche erhöhen die gleichmäßige Verteilung des Wassers im Bestand

Hintergrund: In der Vergangenheit wurden vor allem zur Bestandesbegründung von Eichen-(Misch)Wäldern auf stau- und wechselfeuchten Böden in großem Umfang Entwässerungsgräben angelegt [15]. Durch steigende Temperaturen, verursacht durch Klimaveränderungen, kommt es in Feuchtwäldern zunehmend zu einem reduzierten Wasserangebot, welches in sommerlichem Trockenstress resultiert. Dadurch wird die Vitalität und das Wachstum von Bäumen negativ beeinflusst und führt lang-

fristig zu einer Abnahme der Widerstandsfähigkeit und Stabilität von Waldökosystemen [14]. Durch eine Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes durch den Rückbau von Entwässerungsgräben kann der Frühjahrsabfluss vor Laubaustrieb reduziert und die Wasserrückhaltefunktion des Waldbodens erhöht werden. Dadurch steht den Bäumen auch in trockenen Jahren mehr Wasser zur Verfügung [16]. Außerdem wirkt sich eine Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes positiv auf die Kohlenstoffspeicherung im Waldboden aus [17, 18].

In wasserbeeinflussten Böden befinden sich besonders hohe Kohlenstoffgehalte, da die Zersetzung der Streu gehemmt ist [17, 19]. Intakte Feuchtwälder können als natürliche Wasserrückhalteräume eine wichtige Funktion im Klimaschutz übernehmen, indem sie große Wassermengen nach Starkregenereignissen teilweise speichern und daraufhin sukzessive abgeben [20]. Nasse Standortverhältnisse können auch für ein Wiederauftreten feuchtwaldtypischer, teils seltener Pflanzen- und Moosarten sorgen.



Verschlossener Entwässerungsgraben

Umsetzung: Ein Rückbau des Entwässerungsnetzes sollte stufenweise erfolgen, um negative Effekte zu vermeiden. Dabei empfiehlt es sich, zunächst kleine Grabenstrukturen an möglichst vielen Stellen zu verschließen [21]. Dies ist z. B. mit Lehmbaggen per Kleinbagger oder dem zusätzlichen Einbau von Holzplatten realisierbar [16]. In Bruch- und Moorwäldern mit angepassten Baumarten empfiehlt es sich dagegen, Gräben komplett zu verschließen und Drainagen zu entfernen. Bereiche mit staunässeempfindlichen Baumarten wie Buche oder Fichte sollten gemieden werden, um eine Destabilisierung zu vermeiden. Um die Funktion von Feuchtwäldern als natürliche Wasserrückhalteräume wiederherzustellen, wird eine schrittweise Überführung in Bestände mit Baumarten potentiell natürlicher Vegetation empfohlen [20] (siehe Maßnahme 2 Baumartenwahl).

Förderung: Wiedervernässung von bodenfeuchten Eichenwäldern und Rückbau von Drainagen in Bruch- oder Moorwäldern sind in NRW förderfähig (siehe Kapitel 3 Finanzielle Fördermöglichkeiten).



Ausgeprägte Fahrspuren in einem feuchten Wald signalisieren Schäden der Bodenstruktur

Befahrung und Bodenschutz

- Befahrung kann negative Auswirkungen auf das Wachstum der Bäume, die Bodenorganismen, den Wasserhaushalt sowie Funktionen wie die C-Speicherung haben.
- Vor allem die erstmalige Befahrung eines Waldbodens kann zu einer starken und langfristigen Verdichtung führen.
- Nasse Böden in Feuchtwäldern sind besonders sensibel.

Empfehlungen

- Befahrung nur bei relativ trockenen Bodenbedingungen
- Besonders feuchte und daher sensible Bereiche nicht befahren
- Maßnahmen zur Vorbeugung starker Bodenverdichtung bei der Befahrung von Rückgassen, z. B. breite Bereifung oder Nutzung von Bändern bzw. Kettenfahrzeugen
- Erhöhung der Gassenabstände ohne Schaffung neuer Rückgassen, Aufgabe von Rückgassen
- Prüfung alternativer bodenschonender Rücketechniken wie z. B. Seilkräne, -winden oder Rückepferde

Hintergrund: Eine Befahrung des Waldbodens mit schweren Maschinen kann zu einer langfristigen Schädigung der Bodenstruktur, der Bodenlebewesen und der zahlreichen Bodenfunktionen führen [22]. Feuchtwälder sind aufgrund ihrer humusreichen, biologisch sehr aktiven Oberböden und den nassen Verhältnissen besonders empfindlich gegenüber Bodenverdichtung [23]. Holzerntemaschinen beeinträchtigen durch Bodenverdichtung und Spurrillenbildung die Waldböden, wodurch sie zudem einen negativen Effekt auf die Bodenfauna haben [24]. Nach der Befahrung von Waldböden kann es z. B. zu einer starken Abnahme in der Regenwurmdichte und -biomasse kommen. Oft ist dann, wenn überhaupt, nur eine langsame Regeneration der Population möglich [25]. Zudem führt Bodenverdichtung zu einer Reduktion des Porenraums im Boden [26]. Dies zieht einen erheblich reduzierten Luftaustausch nach sich [27]. Durch den Wegfall von Grobporen verringert sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens [28, 29, 30]. Dadurch kommt es zu einer Einschränkung der Wasser- und Sauerstoffversorgung von Mikroorganismen und Pflanzen, die sich negativ auf das Ökosystem Wald auswirkt [22, 24, 31]. In verdichteten Bereichen nimmt die Dichte an Feinwurzeln ab, was die Bäume in ihrem Wachstum und ihrer Vitalität einschränken kann [32, 33]. Bei hängigem Gelände kann ein Verlust des fruchtbaren Oberbodens durch Erosion und erhöhten Abfluss die Folge sein [24]. Verdichtete Böden können zudem weniger Kohlenstoff speichern [34]. Oftmals wirkt sich besonders die erstmalige Befahrung schädigend aus [32, 35].



Ein Forwarder transportiert geerntetes Holz an den Waldweg

Umsetzung: Die Befahrung mit schweren Maschinen sollte in Feuchtwäldern auf das geringstmögliche Maß beschränkt werden. Zwingend erforderliche Fahrbewegungen sollten ausschließlich auf dauerhaft festgelegten Rückegassen erfolgen [33, 36]. Besonders feuchte oder sensible Bereiche sollten grundsätzlich gemieden werden. Der Einsatz von alternativen Holzerntemaßnahmen, wie z. B. Seilkränen, -winden oder Rückepferden sollte geprüft werden. Diese sind vor allem bei schwachem Laubholz praktikabel und mindern die Bodenverdichtung erheblich.

Sind doch konventionelle Rückearbeiten geplant, sollten Maßnahmen getroffen werden, um die negativen Folgen durch den Einsatz von schweren Maschinen zu verringern. Es sollten trockene Bodenbedingungen abgewartet werden, da in trockenem Zustand eine erhöhte Tragfähigkeit des Bodens gewährleistet ist [24]. Bei immer wärmeren und feuchteren Wintern, zunehmenden Starkregenereignissen und abnehmenden Frosttagen ist der Zeitraum mit geeigneten Bedingungen für die Holzernste allerdings stark begrenzt [14]. Auch die Berücksichtigung des Feuchtwaldtyps ist wichtig, da Böden z. B. in Auwäldern selbst bei starkem Frost häufig nur unvollständig gefrieren [37]. Sensible Bereiche sollten vor einer Maßnahme gut sichtbar z. B. mit Flatterband markiert werden [37].

Breite Bereifung, Nutzung von Bändern an den Rädern der Fahrzeuge und andere technische Maßnahmen zur Minderung des Kontaktdrucks auf den Boden sind zu empfehlen [26, 33, 38]. Auf geraden Rückegassen haben sich Erntefahrzeuge mit Ketten als deutlich bodenschonender erwiesen [32]. Generell sind kleinere Maschinen mit geringerer Beladung zu empfehlen. Auf das Ablegen von Schlagabraum sollte in Feuchtbereichen verzichtet werden. Holz sollte in feuchten Bereichen nicht gelagert werden [24, 37].

In besonders feuchten und ertragsschwachen Bereichen ist zudem eine Erhöhung des Gassenabstands oder die Aufgabe von Rückegassen empfehlenswert [20]. Dabei sollten allerdings in keinem Fall neue Rückegassen angelegt werden. So gibt beispielsweise die FSC-Richtlinie vor, dass Rückegassen maximal 10 % der Waldfläche einnehmen sollen, was einem mittleren Gassenabstand von 40 m entspricht [39].

Förderung: Der Einsatz von Rückepferden ist in NRW förderfähig (s. Kapitel 3 Finanzielle Fördermöglichkeiten).



Kleine Senken in Feuchtwäldern können z. T. dauerhaft wasserbeeinflusst sein

Standorteigenschaften und Humusformen

- Wälder können kleinräumige Standortunterschiede aufweisen, die in Feuchtwäldern insbesondere durch unterschiedlich starken Wassereinfluss und dadurch unterschiedliche Standortbedingungen auftreten.
- Humusformen können als Indikatoren für den Zustand des Waldökosystems genutzt werden.

Empfehlungen

- Bei der Planung forstlicher Maßnahmen kleinräumige Standortunterschiede berücksichtigen
- Schutz der organischen Auflage der Böden bei Pflanzmaßnahmen
- Berücksichtigung der Humusform zur Bewertung des Zustands von Waldökosystemen
- Stärkere Berücksichtigung der Humusformenansprache bei der Standortkartierung in der Forstausbildung

Hintergrund: Wälder und ihre Böden weisen oft eine kleinteilige Differenzierung auf. Selbst innerhalb eines Bestandes können kleinräumige Unterschiede hinsichtlich der Verjüngung in kleinen Bestandeslücken, der Humusform (z. B. bedingt durch das Mikrorelief) oder des Bodentyps auftreten. Kleinräumige Standortunterschiede sind oft anhand der Humusform erkennbar. Vor allem in Feuchtwäldern können Standortunterschiede aufgrund der Wasserdynamik besonders ausgeprägt sein. Feucht- und Nasstandorte in kleinen Senken können sich hinsichtlich ihrer Biodiversität z. T. deutlich von der Umgebung unterscheiden und sollten nicht beeinträchtigt werden.

Die Humusauflage auf dem Waldboden bildet die Schnittstelle zwischen Mineralboden und Vegetation. Da diese von allen Teilbereichen des Ökosystems Wald beeinflusst wird, kann sie als Indikator für den Zustand des Waldes dienen [40]. Kenntnisse über Humusformen ermöglichen Rückschlüsse auf andere Teile des Waldökosystems [41]. Aus Humusformen lässt sich beispielsweise die Umsetzungsgeschwindigkeit der Streu ableiten sowie die Zusammensetzung der Zersetzergesellschaft oder der pH-Wert im Oberboden grob abschätzen.

Eine intakte Humusauflage auf dem Mineralboden schützt den Boden vor starker Verdunstung, kann Wasser speichern und schnellem oberflächlichen Abfluss bei Starkregenereignissen vorbeugen [33].

Umsetzung: Bei der Planung und Durchführung forstlicher Maßnahmen sollten Standorteigenschaften und deren kleinräumige Differenzierung stärker berücksichtigt werden. So können beispielsweise kleine Senkenstrukturen, die bedeutend für die Biodiversität sein können, bei der Planung von Rückegassen ausgespart werden (s. a. Maßnahme Befahrung & Bodenschutz).

Auf Kalamitätsflächen sollte bei Pflanzarbeiten der Oberboden mit der Humusauflage so gut wie möglich vor Störungen geschützt werden. Kleinflächige Öffnungen des Oberbodens für Pflanzlöcher oder auch für die Saat stellen flächenmäßig kein Problem dar. Flächiges Abschieben ist aus bodenökologischer Sicht aber zu vermeiden.

Kenntnisse über Humusformen erlauben Rückschlüsse auf den Zustand des Waldökosystems und sollten aufgrund ihrer Indikatorfunktion stärker bei der Standortkartierung in der Forstausbildung berücksichtigt werden.



Spatenausstich an einem wechsel-feuchten Pseudogley-Standort



Pflanzung von Flatter-Ulmen, Stiel-Eichen und anderen Laubbaumarten auf einer ehemaligen Fichtenfläche

2.2 Waldstruktur

Baumartenwahl

- Standorttypische Laubbaumarten stabilisieren das Ökosystem und wirken sich positiv auf die Bodenfunktionen aus.
- Schnellere Nährstoffumsetzung und stabile Kohlenstoffspeicherung im Boden bei der Bestockung mit standorttypischen Laubbaumarten.
- Erhöhung der lebensraumtypischen Artenvielfalt.
- Baumartenmischungen reduzieren das Risiko bei Störungen.

Empfehlungen

- Entfernung standortfremder Bestockung, vor allem Neophyten und Nadelbäume in Auen- und Quellbereichen
- Erhöhung des Anteils heimischer standorttypischer Laubbaumarten: Förderung von Naturverjüngung und kleinflächiger Initialpflanzung

Hintergrund: Die Anlage von Entwässerungsgräben und die häufig folgende Bestockung mit Nadelbäumen haben zum Verlust der typischen Vegetation von Feuchtwäldern, ihrer Wasserdynamik und ihrer Fähigkeit zur Wasserrückhaltung geführt [20]. Um eine standortangepasste, stabile Bestockung wiederherzustellen, sollten Nadelbestände auf nassen Böden in Feuchtwaldtypen überführt werden (s. a. Kapitel 1.2: Typen von Feuchtwäldern) [16, 20].



Naturverjüngung und Pflanzung von standortangepassten Laubbaumarten in einer Bestandeslücke

Geeignet sind dabei vor allem Baumarten wie Stiel-Eiche, Flatter-Ulme, Moor-Birke, Erle, Esche und auch Weiden, die einen großen Toleranzbereich gegenüber verschiedenen Feuchte- und Bodenzuständen haben [5]. Die teils seltenen und an feuchte Standortbedingungen angepassten Baumarten leisten als Lebensraum für eine große Anzahl Tier- und Pflanzenarten einen bedeutenden Beitrag zur Artenvielfalt [42, 43]. Mischbestände aus mehreren Baumarten fördern die Stabilität des Ökosystems. Fällt eine Baumart aus, z. B. durch Trockenheit, Pilzbefall, Windwurf oder Insektenbefall, sind nach wie vor Bäume vorhanden [44]. Baumartenmischung fördert außerdem die Artenvielfalt, da z. B. Pilze oder Insekten teilweise an ganz bestimmte Baumarten gebunden sind [45, 46].

Außerdem fördern Edellaubbäume wie Ulme, Erle und Esche durch ihre leicht zersetzbare Streu die Ausbildung von Mull-Humusformen, die optimale Bedingungen für eine artenreiche Bodenfauna bieten [47, 48] und einer Bodenversauerung vorbeugen. Insbesondere Regenwürmer profitieren von solchen Bedingungen und tragen ihrerseits zur schnellen Streuumsetzung und Durchmischung des Bodens bei. Diese schnelle Streuumsetzung in Mull-Humusformen trägt besonders zur zeitnahen Verfügbarkeit von Nährstoffen für die Bäume bei und fördert die langfristige stabile Kohlenstoffspeicherung im Mineralboden [49].

Umsetzung: Um Feuchtwälder wiederherzustellen, ist die Entfernung von standortfremder Bestockung notwendig. Dies gilt insbesondere für Nadelbäume im Bereich von Quellen und Auen oder auch für Neophyten wie die Spätblühende Traubenkirsche. Damit das kühlfeuchte Mikroklima erhalten bleibt und Kahlschläge vermieden werden, wird eine sukzessive Überführung von Nadelbaumbeständen in Bestände

mit standorttypischen Baumarten empfohlen [20]. Dies kann z. B. durch Ringelung statt durch Fällen der Bäume geschehen. Gerade in Auwäldern sollte Nadelholzreisig allerdings entfernt werden, um einer Versauerung vorzubeugen [20]. Grundsätzlich ist in Feuchtwäldern die Naturverjüngung der Saat oder Pflanzung stets vorzuziehen, um Eingriffe in das Ökosystem zu minimieren.

Gibt es allerdings in der Umgebung keine oder zu wenige standorttypische Baumarten, sind kleinflächige Initialpflanzungen empfehlenswert. Je nach Feuchtwaldtyp sind unterschiedliche Baumarten zu empfehlen, s. a. Kapitel 1.2 Typen von Feuchtwäldern. Die Förderung in NRW ist z. T. an sog. Waldentwicklungstypen (WET) aus dem Waldbaukonzept NRW ausgerichtet. Für Feuchtwälder kommen folgende WET in Frage:

Waldentwicklungstypen (WET) und deren Baumarten nach Waldbaukonzept NRW [50], die für Feuchtwälder geeignet sind

WET-Nr.	Baumarten	Standort, Waldtyp
WET 12	Stiel-Eiche mit Hainbuche, zudem Ulme, Esche u. a.	Wechselfeuchter Wald mit Staunässe
WET 13	Stiel-Eiche mit Ulme, Esche, Hainbuche, Erle und Schwarzpappel	Hartholz-Auwald oder staunasse Standorte
WET 32	Berg-, Flatter-Ulme, Spitz-Ahorn, Esche, Sommer-Linde, Kirsche, Stiel-Eiche, Schwarzerle, Schwarzpappel, Hainbuche, Weiden	Auwald
WET 40	Schwarz-Erle mit Moor-Birke, Esche, Flatter-Ulme, Stiel-Eiche, Schwarzpappel und Weide	Bruchwald oder Auwald
WET 44	Moor-Birke mit Schwarz-Erle, Weide, Schwarzpappel	Nährstoffarmer Bruchwald oder Moorwald

Förderung: Initialpflanzungen von Au- und Moorwaldarten, die Entfernung standortfremder Bestockung und die Wiederbewaldung von Kalamitätsflächen sind in NRW förderfähig (siehe Kapitel 3 Finanzielle Fördermöglichkeiten).



@ Max Fornfeist

Stehendes und liegendes Totholz in einem wechselfeuchten Eichen-Hainbuchenwald

Natürliche Waldentwicklung

- Feuchtwälder sind überaus sensible Ökosysteme und profitieren deshalb in besonderem Maße von einer Einstellung der Bewirtschaftung.
- Natürliche Waldentwicklung führt zu einer Anreicherung von Totholz und Mikrohabitaten und damit zur Steigerung der Biodiversität auch in den Böden.

Empfehlungen

- Einstellung der forstlichen Bewirtschaftung in Kernflächen von besonders feuchten, schwer erreichbaren und ertragsschwachen Au-, Bruch- und Moorwäldern
- Entnahme von standortfremden Gehölzen

Hintergrund: Feuchtwälder als seltene und sensible Ökosysteme gelten als besonders bedroht durch den Klimawandel. Um in Anbetracht der Zunahme von klimatischen Extremereignissen ihren Erhalt zu gewährleisten, ist die Stabilisierung dieser Waldgesellschaften unerlässlich [51]. Vor allem strukturreiche und naturnahe Wälder mit hoher Artenvielfalt sind durch Regenerationsfähigkeit, Stabilität und Vitalität gekennzeichnet und können dadurch unter Umständen Auswirkungen des Klimawandels besser abpuffern [51, 52]. Alt- und Totholz mit zahlreichen Kleinstlebensräumen wie Höhlen, Pilzen oder Moosen ist dabei von großer Bedeutung,

indem es als Lebensraum zur Erhöhung der biologischen Vielfalt und als Wasserspeicher im Wald dient [51]. Neben Vögeln, Fledermäusen und Flechten erhöht sich auch die Boden-biodiversität, wie z. B. Pilze und Käfer, von höheren Mengen an Totholz [11]. In Feuchtwäldern können insbesondere Althölzer zur Vermeidung von Temperaturschwankungen und Erosion durch Wasser und Wind sowie die darauf folgende Zersetzung der organischen Auflage beitragen, da sie die Wasserrückhaltekapazität des Bodens steigern [52].

Für Arten, die auf alte Wälder angewiesen sind, die in bewirtschafteten Wäldern unterrepräsentiert sind, kann sich eine Aufgabe der Waldbewirtschaftung positiv auswirken [53]. Auch störungsempfindliche Arten können von einem Ausbleiben der forstlichen Bewirtschaftung profitieren. Dies gilt auch für die Bodengesundheit, da das Befahren des Waldbodens mit schweren Forstmaschinen komplett entfällt (siehe auch Maßnahme Befahrung & Bodenschutz). Artenreiche Wälder sind außerdem durch das erhöhte Vorkommen natürlicher Fressfeinde (z. B. Schlupfwespen oder Spechte) resilienter gegen Forstschädlinge [54].

Umsetzung: In Teilbereichen kann sich eine natürliche Waldentwicklung durch Einstellung der forstlichen Bewirtschaftung anbieten. Dies gilt vor allem für ertragschwache, schlecht erreichbare sowie besonders sensible Bereiche. Dazu gehören z. B. feuchte Kernbereiche von Moor-, Bruch- und Auwäldern. Eine Einstellung der forstlichen Bewirtschaftung bietet sich insbesondere dann an, wenn diese nur mit großem Aufwand möglich wäre. Für eine natürliche Waldentwicklung empfehlen sich vor allem Bestände mit überwiegend standortgerechter Bestockung. Es ergibt Sinn, standortfremde oder invasive Gehölze, die das Ökosystem negativ beeinflussen können, vor der Einstellung der Bewirtschaftung zu entnehmen (siehe auch Maßnahme Baumartenwahl).



In einer Naturwaldzelle wird die ungestörte Waldentwicklung wissenschaftlich untersucht

Bestandeslücken



@ Klaus Striepen

Durch das Absterben einer Buche ist eine Bestandeslücke entstanden

- Bestandeslücken erhöhen die Strukturvielfalt und können sich positiv auf die Artenvielfalt auswirken.
- Lichtbedürftige Mischbaumarten wie die Eiche können gefördert werden.

Empfehlungen

- Lücken von bis zu 60 m Durchmesser durch femelartige Durchforstung aktiv anlegen
- Ungestörte Entwicklung der Vegetation in entstandenen Lücken ermöglichen

Hintergrund: Um eine Erhöhung der Strukturvielfalt in Feuchtwäldern zu erreichen, können Bestandeslücken geschaffen werden. Das dortige Heranwachsen einer neuen Baumgeneration trägt zur räumlichen Heterogenität bei [55]. Unterschiedliche Waldstrukturen bzw. Entwicklungsstadien beherbergen dabei ganz unterschiedliche Arten. Sowohl im Absterben befindliche Wälder als auch in Lücken nachwachsende, frühe Entwicklungsphasen bieten vielen Arten einen Lebensraum und sind zudem vergleichsweise selten [56]. Die Auflichtung wirkt sich insbesondere positiv auf die Erhöhung der Artenvielfalt und Abundanz von Pflanzen der Krautschicht, Kleinsäu- gern und Vögeln im Unterholz aus [55, 57, 58]. Dies gilt auch für im Boden lebende

Arten. So profitieren licht- und wärmeliebende Arten, die bei vollständiger Überschirmung fehlen [11]. Eine teilweise Öffnung des Kronendaches fördert nicht nur eine vielfältige Flora und Fauna, sondern auch die Bildung von biologisch sehr aktiven Mull Humusformen [41, 59]. Erhöhte Lichteinstrahlung beschleunigt erheblich die Zersetzungsrate der Streu [60–62]. Die Bestandeslücken sollten deshalb auch nicht zu groß sein, um einen höheren CO₂-Ausstrag aus dem Boden zu vermeiden [63]. Die Schaffung von Bestandeslücken kann zudem das Wachstum lichtbedürftiger Baumarten wie der Eiche sowie anderer seltener lichtbedürftiger Mischbaumarten und ihrer jeweiligen auf sie spezialisierten Arten fördern [64].

Umsetzung: Lücken können durch die Entnahme einiger Bäume, z. B. im Rahmen einer femelartigen Durchforstung, aktiv geschaffen werden. Je nach Lichtbedürftigkeit der Naturverjüngung sind unterschiedliche Lückengrößen sinnvoll [50]. Unter Abwägung möglicher negativer Auswirkungen auf den Kohlenstoffvorrat im Boden oder den Wasserhaushalt durch erhöhte Sonneneinstrahlung, wird eine Lückengröße bis zu 0,3 ha (Durchmesser max. 60 m) empfohlen [21]. Lücken sollten in großzügigen Abständen zueinander angelegt werden, damit stets ungestörter Bestand dazwischen verbleibt. Eine Auflichtung sollte stets vorsichtig erfolgen. Durch direkte Sonneneinstrahlung sind Schäden an den verbleibenden Randbäumen möglich, am Eichenstamm auch eine Wertholzmindering durch das Austreiben von kleinen Ästen.



Nach der Entnahme einzelner Bäume hat sich in der Lücke eine arten- und struktureiche Verjüngung eingestellt. Zudem kommen zahlreiche andere Pflanzenarten vor

Lücken können auch natürlich entstehen, z. B. durch das Absterben von Einzelbäumen oder durch einen kleinflächigen Sturmwurf. Hier bietet es sich oft an, einige solcher Flächen sich selbst zu überlassen und weder Totholz zu entnehmen noch aktiv Bäume anzupflanzen. So können besonders struktur- und artenreiche Bestände gefördert werden [56]. Auch die dauerhafte Sicherung von Altbaumgruppen ist möglich, diese verbleiben dann bis zu ihrem Absterben als Totholz im Wald und bieten neben lichten Bedingungen auch für viele Arten wie z. B. Spechte einen Lebensraum [30].

Maßnahme	Fördersätze	Förderrichtlinie
Befahrung & Bodenschutz	Einsatz von Rückepferden: 7,50 €/ Festmeter (Rücken oder Vorrücken von Holz zur Rückegasse oder zur Abfuhrstelle)	PKW
Natürliche Waldentwicklung	Teil des Klimaangepassten Waldmanagements	

Die Förderrichtlinien Privat- und Körperschaftswald und Extremwetterfolgen sowie weitere aktuelle Fördermöglichkeiten in Nordrhein-Westfalen sind unter folgendem Link verfügbar:

www.waldbauernlotse.de

Förderprogramm Klimaangepasstes Waldmanagement:

<https://www.klimaanpassung-wald.de/>

Bis zu 100 €/ ha bei der Umsetzung von 12 Kriterien

4 Glossar

Basenversorgung: Anteil an basischen (nicht sauren) Kationen (positiv geladene Teilchen) im Vergleich zur Gesamtmenge der Kationen im Boden. Diese können einer Bodenversauerung entgegenwirken und sind oft gleichzeitig für die Waldbäume wichtige Nährstoffe, z. B. Calcium oder Kalium. Baumarten wie Erlen oder Eschen sind an eher basenreiche Standorte gebunden.

Bestand: Anhand der Baumartenzusammensetzung und des Alters kleinste abgrenzbare Einheit eines Waldes.

Bestockung: Auf einer Waldfläche vorhandene Bäume.

Drainage: Rohre oder Gräben zur Entwässerung des Bodens.

Femel-/ Lochhieb: Art der Waldbewirtschaftung, bei der Baumgruppen geerntet werden. So entstehen Lücken, in denen junge Bäume nachwachsen können.

Forwarder: Auch Rückezug oder Tragrückeschlepper genannte Forstmaschine zum Transport von Baumstämmen. Der Forwarder lädt geerntete Baumstämme in der Regel im Bestand auf und transportiert sie zum nächstgelegenen Waldweg, wo er die Stämme ablädt und stapelt.

Kalamität: Großflächiges Absterben von Bäumen, z. B. durch Schädlinge oder Stürme.

Mikrohabitat: Abgrenzbarer Kleinstlebensraum an einem Baum, z. B. Baumhöhle, Pilz, Astabbruch oder Moosbewuchs.

Neophyten: Gebietsfremde, nicht heimische Pflanzenarten. Diese können sich u. U. stark ausbreiten und sich negativ auf die heimischen Pflanzen und Tiere auswirken.

Ökosystem: Einheit aus Lebensraum und darin lebenden Lebewesen. So wird das Ökosystem Wald von unbelebten (u.a. Gestein, Wasser) und belebten Bestandteilen (den dort vorkommenden Bäumen, Sträuchern, Bodenpflanzen, Moosen, Tieren, Pilzen) und den damit verbundenen Wechselwirkungen gebildet.

Relief: Form der Bodenoberfläche, z. B. eben oder hügelig.

Schlagabraum: Nach der Holzernte im Wald verbleibende Reste von Bäumen, insbesondere Äste und Zweige.

Sediment: Ablagerungen von Boden- oder Gesteinsmaterial. Kann je nach Korngröße von Kies über Sand bis Ton reichen und mit organischer Substanz angereichert sein.

Streu: Auf den Boden gefallene Blätter, Nadeln, Zweige. Durch Bodenlebewesen wird dieses Material nach und nach zersetzt und humifiziert.

Verjüngung: Nachwachsende, junge Bäume, die in der Zukunft die nächste Baumgeneration bilden können.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (1995). Bruch-, Sumpf- und Auwälder. Karlsruhe. 34 S.
- [2] Ssymank A, Röhling M, Ellwanger G, Scheele S (2024). Natura2000 Waldlebensraumtypen im Klimawandel. Forschungsbedarfe und Möglichkeiten für Anpassungsstrategien, Management und Maßnahmen. BfN-Schriften 681, Bonn
- [3] Hamer U, Klein-Raufhake T, Meyer M, Schaper J, Rentemeister K (2023). Kohlenstoffspeicherung in Wäldern Nordrhein-Westfalens. AFZ - Der Wald 21, S. 21–23
- [4] Frank T, Beylich A, Graefe U, Brauckmann H-J, Broll G (2024). Feuchtwälder im Klimawandel - Bodenökologische Prozesse. AFZ-Der Wald 15, S. 16–20
- [5] Ellenberg H, Leuschner C (2010). Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Eugen Ulmer, Stuttgart, 6. Aufl.
- [6] Fornfeist M, Santora L, Frank T, Linnemann B, Bergmann M, Elmer M (2024). Feuchtwälder im Klimawandel - Projekt BioFeuchtHumus. AFZ-Der Wald 15, S. 12–15
- [7] Hofmeister H (2016). Lebensraum Wald. Kessel, 4. Aufl.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2021). Auenzustandsbericht 2021. Flussauen in Deutschland. Bonn, 72 S.
- [9] Pott R (1995). Die Pflanzengesellschaften Deutschlands. Eugen Ulmer, Stuttgart, 2. Aufl.
- [10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hrsg.) (2022). Nationale Moorschutzstrategie. Berlin, 76 S.
- [11] Eisenhauer N, Ristok C, Guerra CA, Tebbe CC, Xylander W, Babin D, Bartkowski B, Burkhard B, Filser J, Glante F, Hohberg K, Kleemann J, et al. (2024). Bodenbiodiversität. In: Faktencheck Artenvielfalt - Bestandesaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland. Oekom, München, S. 917-1047.
- [12] Klein-Raufhake T, Schaper J, Fornfeist M, Hölzel N, Hamer U (2024). Wirkung der Waldnutzung auf Bodenökologie und C-Speicherung. Natur in NRW 2, S. 14–18
- [13] Anthony MA, Bender SF, van der Heijden MGA (2023). Enumerating soil biodiversity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 120, Nr. 33.

- [14] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.) (2015). Wald und Waldmanagement im Klimawandel - Anpassungsstrategie für Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 64 S.
- [15] Linnemann B, Elmer M, Bieker D, Hochhäuser H-P, Wälter T (2018). Fit für den Klimawandel: Anpassung von Feuchtwäldern. AFZ-Der Wald 2, S. 10–12
- [16] Bieker D, Elmer M, Wittjen K, Linnemann B (2018). Mehr Wasser für feuchte Wälder und Moore. AFZ-Der Wald 2, S. 13–15
- [17] Eglin T, Walter C, Nys C, Follain S, Forgeard F, Legout A, Squiquidant H (2008). Influence of waterlogging on carbon stock variability at hillslope scale in a beech forest (Fougères forest — West France). *Annals of Forest Science* 65, S. 202–202
- [18] Greiving K, Brinkert A, Wertebach T-M, Elmer M, Bieker D, Linnemann B, Hölzel N (2018). Kohlenstoffvorräte in den Feuchtwäldern des Münsterlandes. AFZ-Der Wald 2, S. 22–24
- [19] Christiansen JR, Gundersen P, Frederiksen P, Vesterdal L (2012). Influence of hydromorphic soil conditions on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in a Danish temperate forest. *Forest Ecology and Management* 284, S. 185–195
- [20] SaarForst Landesbetrieb, Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, (Hrsg.) (2021). Biodiversitätsstrategie für den Staatswald des Saarlandes. Saarbrücken, 104 S.
- [21] Fornfeist M, Bergmann M, Elmer M, Hamer U, Hölzel N, Klein-Raufhake T, Linnemann B, Meyer M, Rentemeister K, Santora L, Schaper J, Wöllecke J (2024). Forstliche Handlungsoptionen und deren Auswirkungen auf die Biodiversität und die Kohlenstoffspeicherung im Wald. Münster, 59 S.
- [22] Fründ H-C, Gaertig T, Kietz B, Merkel H, Blohm R, Hemker O, Schacht H, von Dressler H (2017). Abschlussbericht Projekt RÜWOLA - Rückegassen als Feinerschließungssysteme im Wald – Optimierung durch natürliche Regeneration und technische Maßnahmen unter Berücksichtigung der Belange von Naturschutz und Landschaftsplanung. Osnabrück, 57 S.
- [23] Horn R, Vossbrink J, Peth S, Becker S (2007). Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* 248, S. 56–63
- [24] Cambi M, Certini G, Neri F, Marchi E (2015). The impact of heavy traffic on forest soils - A review. *Forest Ecology and Management* 338, S. 124–138

- [25] Bottinelli N, Capowiez Y, Ranger J (2014). Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied Soil Ecology* 73, S. 130–133
- [26] Solgi A, Najafi A (2014). The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. *Journal of Forest Science* 60, S. 28–34
- [27] Frey B, Kremer J, Rüdts A, Sciacca S, Matthies D, Lüscher P (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45, S. 312–320
- [28] Ampoorter E, Goris R, Cornelis WM, Verheyen K (2007). Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management* 241, S. 162–174
- [29] Startsev AD, McNabb DH (2000). Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 80, S. 617–624
- [30] Jansson K-J, Johansson J (1998). Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. *Forestry* 71, S. 57–66
- [31] Frey B, Kremer J, Rüdts A, Sciacca S, Matthies D, Lüscher P (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45, S. 312–320
- [32] Riggert R (2015). Spannungseinträge unter Holzerntemaschinen und Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter. Diss. Univ. Kiel, 191 S.
- [33] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (2021). Bodenschutz im Wald. Gülzow-Prüzen, 94 S.
- [34] Klein-Raufhake T, Schaper J, Hölzel N, Hamer U (2023). Einfluss der Waldbewirtschaftung auf bodenökologische Prozesse. *AFZ - Der Wald* 21, S. 17–20
- [35] Riggert R, Fleige H, Kietz B, Gaertig T, Horn R (2013). Einfluss von üblichen Forst- und Spezialmaschinen auf die Bodenstruktur und -stabilität. Beitrag zur Jahrestagung der DBG, Rostock, 4 S. <https://eprints.dbges.de/969/>
- [36] Borchert H (2024). Sind die Forstmaschinen zu schwer für unsere Waldböden? *AFZ - Der Wald* 23, S. 45–47
- [37] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.) (2017). Holzernte in Feuchtwald-Flächen. Vorsicht Grubenlaufkäfer! Freising, 2 S.
- [38] Gaertig T, Ebeling C, Riggert R (2018). Bodenschutz beim Forstmaschineneinsatz. *Bodenschutz* 1, S. 9–15
- [39] FSC Deutschland - Verein für verantwortungsvolle Waldwirtschaft e. V. (2024). Deutscher FSC®-Standard 3-1. Freiburg, 74 S.

- [40] Klein-Raufhake T, Hölzel N, Schaper JJ, Elmer M, Fornfeist M, Linnemann B, Meyer M, Neuenkamp L, Rentemeister K, Santora L, Wöllecke J, Hamer U (2025). Disentangling the Impact of Forest Management Intensity Components on Soil Biological Processes. *Global Change Biology* Vol. 31 (1) 1–15
- [41] Frank T, Brauckmann H-J, Broll G (2023). Humus Forms of Moist and Wet Forest Stands. A Review. *International Journal of Plant Biology* 14, S. 780–796
- [42] Müller-Kroehling S (2019). Sonderstandorte - Schatztruhen der Biodiversität. *LWF aktuell* 122, S. 13–16
- [43] Müller-Kroehling S, Schmidt O (2019). Eschentriebsterben und Naturschutz: 7 Fragen, 7 Antworten. *Anliegen Natur* 41, S. 145–156
- [44] Jactel H, Bauhus J, Boberg J, Bonal D, Castagnéyrol B, Gardiner B, Gonzalez-Olabarria JR, Koricheva J, Meurisse N, Brockerhoff EG (2017). Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Current Forestry Reports* 3, S. 223–243
- [45] Leidinger J, Blaschke M, Ehrhardt M, Fischer A, Gossner MM, Jung K, Kienlein S, Kózak J, Michler B, Mosandl R, Seibold S, Wehner K, et al. (2021). Shifting tree species composition affects biodiversity of multiple taxa in Central European forests. *Forest Ecology and Management* 498, 13 S.
- [46] Prescott CE (2024). Perspectives: Regenerative forestry – Managing forests for soil life. *Forest Ecology and Management* 554, 6 S.
- [47] AG Boden (Hrsg.) (2024). *Bodenkundliche Kartieranleitung KA6*. Hannover, 6. Aufl.
- [48] Müller-Kroehling S (2019). Biodiversität an Ulmen, unter besonderer Berücksichtigung der Flatterulme. *LWF Wissen* 83, S. 49–64
- [49] Walser M, Schneider Mathis D, Köchli R, Stierli B, Maeder M, Brunner I (2021). *Der Waldboden lebt - Vielfalt und Funktion der Bodenlebewesen*. 2. überarbeitete Aufl. Merkblatt für die Praxis 60. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 12 S.
- [50] Ministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg) (2023). *Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen - Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung*
- [51] Elmer M, Bieker D, Linnemann B (2018). Förderung von Alt- und Totholz im privaten Wirtschaftswald. *AFZ-Der Wald* 2, S. 16–18
- [52] Norris C, Hobson P, Ibisch PL (2012). Microclimate and vegetation function as indicators of forest thermodynamic efficiency. *Journal of Applied Ecology* 49, S. 562–570

- [53] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2024). Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur. Bonn, 60 S.
- [54] Wimmer N, Zahner V (2010). Spechte: ein Leben in der Vertikalen. Braun, Karlsruhe, 112 S.
- [55] Carey AB, Wilson SM (2001). Induced Spatial Heterogeneity in Forest Canopies: Responses of Small Mammals. *The Journal of Wildlife Management* 65, S. 1014-1027
- [56] Müller J, Hilmers T (2020). Katastrophen für den Menschen - Segen für die Biodiversität. *LWF aktuell* 4, S. 13-15
- [57] Hayes JP, Weikel JM, Huso MMP (2003). Response of birds to thinning douglas-fir forests. *Ecological Applications* 13, S. 1222–1232
- [58] Verschuyt J, Riffell S, Miller D, Wigley TB (2011). Biodiversity response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 261, S. 221–232
- [59] Amendola D, Mutema M, Rosolen V, Chaplot V (2018). Soil hydromorphy and soil carbon: A global data analysis. *Geoderma* 324, S. 9–17
- [60] Epron D, Ngao J, Granier A (2004). Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study. *Annals of Forest Science* 61, S. 499–505
- [61] Strandberg B, Kristiansen SM, Tybirk K (2005). Dynamic oak-scrub to forest succession: Effects of management on understorey vegetation, humus forms and soils. *Forest Ecology and Management* 211, S. 318–328
- [62] Prescott CE, Blevins LL, Staley C (2004). Litter decomposition in British Columbia forests: Controlling factors and influences of forestry activities. *BC Journal of Ecosystems and Management* 5 (2), S. 44–57
- [63] Tong R, Ji B, Wang GG, Lou C, Ma C, Zhu N, Yuan W, Wu T (2024). Canopy gap impacts on soil organic carbon and nutrient dynamic: a meta-analysis. *Annals of Forest Science* 81:12, 23 S.
- [64] Mölder A, Meyer P, Nagel R-V (2019). Integrative management to sustain biodiversity and ecological continuity in Central European temperate oak (*Quercus robur*, *Q. petraea*) forests: An overview. *Forest Ecology and Management* 437, S. 324–339

Impressum

Herausgeber

Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen, Universität Osnabrück,
NABU-Naturschutzstation Münsterland e. V.
& Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH

Autoren: Max Fornfeist, Tina Frank, Lea Santora, Maren Bergmann, Hans-Jörg Brauckmann, Gabriele Broll, Michael Elmer, Britta Linnemann, Wiebke Theisinger, Jens Wöllecke

Layout: Silvia Banyong

Stand: Februar 2025

Diese Broschüre wurde im Rahmen des durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Waldklimafonds-Projektes „Humusformen als Indikatoren für die Zersetzergesellschaft in Zeiten des Klimawandels“ (BioFeuchtHumus, FKZ: 2219WK41A4/-B4) erstellt.

Titelfoto: Max Fornfeist, Foto Rückseite: Tina Frank

Landesbetrieb Wald und Holz
Nordrhein-Westfalen



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

