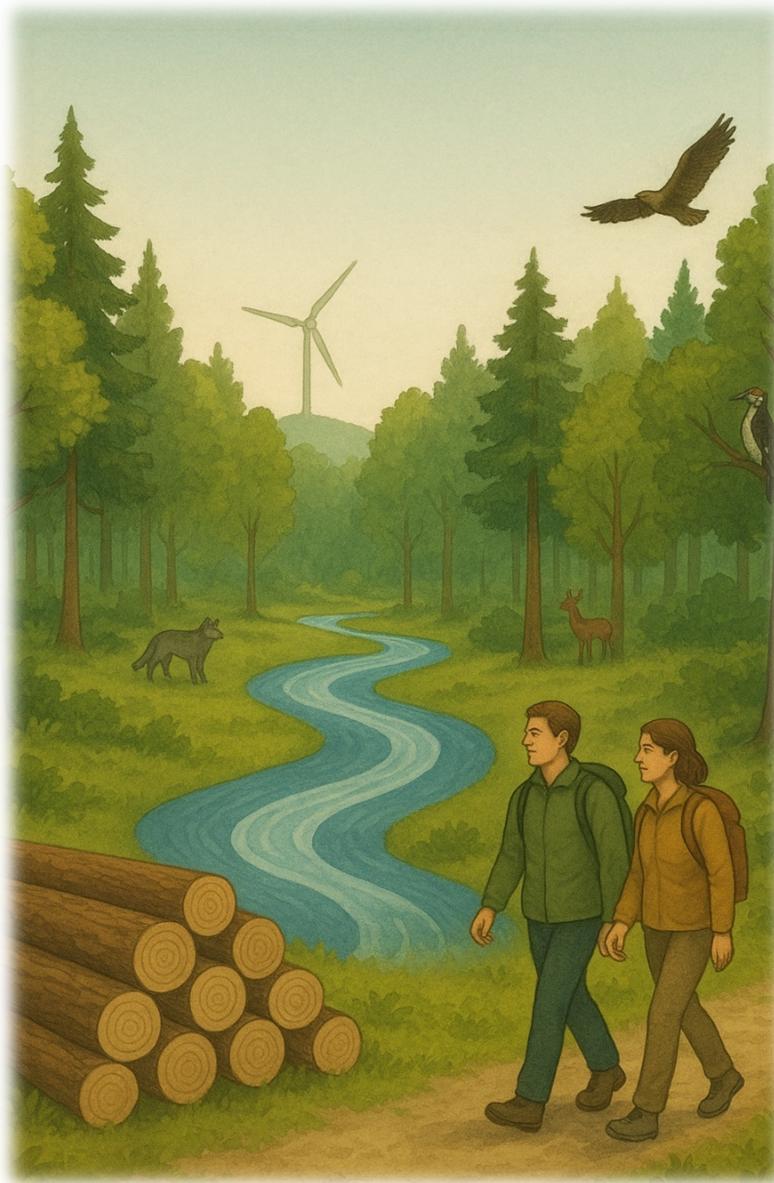


Jenseits des Kielwassers: Zielkonflikte und Synergien multifunktionaler Waldbewirtschaftung

Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldbewirtschaftung

November, 2025



Zitieren als:

Knoke T., Kleinschmit B., Bauhus J., Dieter M., Endres E., Farwig N., Hafner A., Kätzel R., Lang F., Lindner M., Meyer P., Müller J., Schraml U., Seeling U., Weber-Blaschke G. (2025): Jenseits des Kielwassers: Zielkonflikte und Synergien multifunktionaler Waldbewirtschaftung. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik (Hrsg.), November 2025. Berlin, 103 S.

Titelfoto:

KI-generiertes Bild erstellt mit DALL·E 3 via ChatGPT

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik beim BMLEH

Prof. Dr. Jürgen Bauhus (Vorsitzender), Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Waldbau

Prof. Dr. Birgit Kleinschmit (stellvertretende Vorsitzende), Thünen-Institut, Braunschweig

Prof. Dr. Matthias Dieter; Thünen-Institut für Waldwirtschaft, Hamburg

Prof. Dr. Ewald Endres, Forstrecht und Forstpolitik, Hochschule für angewandte Wissenschaften Weihenstephan

Prof. Dr. Nina Farwig, Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Biologie, Arbeitsgruppe Natur-schutz

Prof. Dr. Ing. Annette Hafner, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät Bau- und Umweltingenieur-wissenschaften

Prof. Dr. Ralf Kätzel, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Fachbereich Waldökologie und Monitoring

Prof. Dr. Thomas Knoke, Technische Universität München, School of Life Sciences, Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung

Prof. Dr. Friederike Lang, Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Bodenökologie

Dr. Marcus Lindner, European Forest Institute, Bonn

Dr. Peter Meyer, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldnaturschutz

Prof. Dr. Jörg Müller, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Biozentrum, Lehrstuhl für Tier-ökologie und Tropenbiologie

Prof. Dr. Ulrich Schraml, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Prof. Dr. Ute Seeling, Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittel-wissenschaften HAFL

Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke, Technische Universität München, Holzforschung München, Fachgebiet Stoffstrommanagement

Geschäftsführung des WBW

Christof Schwanitz, BMLEH, Referat 513, 513@bmleh.bund.de

Wissenschaftliche Mitarbeit

Stefan Sorge und Dr. Rüdiger Unseld, Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Waldbau

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iv
1 Zielsetzung des Gutachtens	1
2 Zielkonflikte, Synergien und Entscheidungsfindung - eine Einleitung	3
3 Identifikation von Zielkonflikten und Synergien	16
3.1 Walderhalt und Multifunktionalität	18
3.1.1 Wald konkurriert mit alternativen Landnutzungsformen	18
3.1.2 Multifunktionale Waldbewirtschaftung	21
3.2 Bereitstellung der Ressource Holz	23
3.3 Kohlenstoffspeicherung im Wald	28
3.4 Schutz der Biodiversität	29
3.5 Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus im Wald	30
3.6 Schutz vor Naturgefahrenen	32
3.7 Spende, Qualität und Rückhalt von Wasser im Wald	33
3.8 Steigerung der Windkraft über Wald	35
4 Umgang mit Wechselwirkungen: Synergien fördern, Kompromisse finden	37
4.1 Vorbereitung von Maßnahmen und Planungen zum Umgang mit Konflikten	37
4.2 Konzepte und Modelle zur Verbesserung des Umgangs mit Zielkonflikten	39
4.2.1 Segregation versus Integration	39
4.2.2 Modellgestützte Methoden zum Umgang mit Zielkonflikten	40
4.3 Weiterentwicklung der Waldfunktionskartierung zur Waldfunktionsplanung	45
4.4 Verlässlichere Bereitstellung von ÖSL kann Zielkonflikte mindern	48
5 Beeinflussung von Zielkonflikten und Synergien durch gesetzliche Regelungen	51
6 Waldpolitische Empfehlungen	54
7 Anhang	59
7.1 Anhang „Einsatz von Pflanzenschutzmitteln“	59
7.2 Anhang „Holzbereitstellung“	62
7.3 Anhang „Kohlenstoffspeicher im Wald“	66
7.4 Anhang „Schutz der Biodiversität“	67
7.5 Anhang „Erholung, Sport, Gesundheit, Tourismus“	71
7.6 Anhang „Schutz vor Naturgefahrenen“	72
7.7 Anhang „Spende, Qualität und Rückhalt des Wassers“	73
7.8 Anhang „Windkraft über Wald“	75
8 Literatur	78

Kurzfassung

Motivation und Struktur

Verschiedene Zielsetzungen für die Waldbewirtschaftung ergeben vielfältige Wechselwirkungen. Gepaart mit zunehmender Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Möglichkeiten Ziele zu erreichen, führt dies zu waldbewirtschaftlichen Herausforderungen. Win-Win-Lösungen durch Realisierung von Synergien sind wünschenswert, aber nicht immer möglich. Zielkonflikte sind eher die Regel als die Ausnahme. Vor diesem Hintergrund sollte es daher vorrangige waldbewirtschaftliche Aufgabe sein, Zielkonflikte klarer als bisher zu kommunizieren. Die Waldbesitzenden sowie verschiedene Interessensgruppen sollten besser in den Umgang mit Zielkonflikten und die Nutzung von Synergien einbezogen werden. Neue und kreative Lösungsansätze können dazu in die zukünftige Waldgestaltung und -nutzung einfließen. Um diesen Prozess zu unterstützen, führt dieses Gutachten zunächst in seine Aufgabenstellung (Kapitel 1) und Methodik (Kapitel 2) ein. Zweck ist dabei die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen Zielen durch gedankliche Ausweitung einzelner Zielerreichungen und Abschätzung der Auswirkungen auf andere Ziele.

Verbesserungsansätze setzen zunächst die Kenntnis von existierenden Zielkonflikten, eine Einschätzung ihrer Stärke und die Identifikation von Synergien voraus. Dazu trägt dieses Gutachten bei, vor allem durch Kapitel 3. Die Ergebnisse sollen waldbewirtschaftlichen Akteuren dabei helfen, existierende Zielkonflikte und Synergien zu identifizieren, zu priorisieren und entsprechend zu adressieren, um die Effizienz der Waldbewirtschaftung zu verbessern. Für den öffentlichen Wald sind Zielkonflikte und Synergien besonders relevant, weil es hier vorrangig um die bestmögliche Berücksichtigung gesellschaftlicher Ansprüche geht. Kapitel 4 und 5 enthalten dementsprechend Beispiele und Anregungen zum inhaltlichen und rechtlichen Umgang mit Zielkonflikten und Synergien. Diese Beispiele und Anregungen sind nicht nur für waldbewirtschaftliche Entscheidungsträger, sondern auch für landeseigene und kommunale Wäldern sowie für forstliche Versuchs- und Forschungsanstalten interessant. Für den privaten Wald sind die Verfahrensbeispiele auch deshalb von Interesse, weil diese helfen können, mögliche Kosten und Nutzen der Berücksichtigung von Multifunktionalität besser zu quantifizieren.

Die Nachfrage nach Holz, seinen Bestandteilen und Inhaltsstoffen steigt. Dieser Trend ist ein Beleg für die anhaltend hohe Bedeutung der erneuerbaren Ressource Holz und stellt keine kurzfristige Erscheinung dar. Ein Mehr an Holzverwendung ist politisch erwünscht. Dies äußert sich beispielsweise in einer Förderung des Holzbaus sowie neuer Produkte wie holzbasierte Textilien und Basischemikalien als wichtige Bestandteile einer modernen Bioökonomie, verbunden z. B. mit der Initiative „New European Bauhaus“, der Holzbauinitiative der Bundesregierung, den EU „Carbon Removal and Carbon Farming“ Regeln oder dem europäischen „Green Deal“. Zugleich erfordern aber die Beachtung der Multifunktionalität der Wälder sowie eine teilweise inkohärente

Waldbewirtschaftung eine Neubewertung der historisch gewachsenen Konzentration auf die Holzbereitstellung. Dies ist notwendig, um anderen Zielsetzungen, die sich aus verschiedenen Politikfeldern ergeben, besser gerecht werden zu können. Beispiele finden sich in der Klima-, Biodiversitäts- oder Gesundheitspolitik (vgl. z. B. Blattner et al. 2023; Caicoya et al. 2023; Hetemäki et al. 2024; Muro et al. 2023). Der wachsende Einfluss von Störungen durch Kalamitäten, die zur Förderung der Biodiversität alternden und an Nadelholz ärmer werdenden Bestände sowie zahlreiche Unsicherheiten verschärfen vorhandene Zielkonflikte. Dies lässt aus waldbewirtschaftlicher Sicht eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Zielsetzungen unter Beachtung zunehmender

Störungen und Unsicherheiten umso dringlicher erscheinen. Zu diesem Thema legt der WBW dieses Gutachten vor, welches eine Klassifikation möglicher Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Zielen vornimmt. Dazu wird jeweils eine bestimmte Wald-Ökosystemleistung (ÖSL) als Zielindikator gedank-

lich über die aktuelle Bereitstellung in Deutschland hinaus ausgeweitet, um die Auswirkungen auf andere Wald-ÖSL abzuschätzen. Wald-ÖSL sind alle Waldwirkungen, die das menschliche Wohlbefinden unterstützen.

Grundsatz

Der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik (WBW) nimmt **keine Priorisierung** einzelner Wald-ÖSL vor, sondern geht darauf ein, in welcher Wechselwirkung verschiedene Wald-ÖSL zueinanderstehen. Die Beschreibung von Konflikten durch die Ausweitung bestimmter Wald-ÖSL kann zunächst negativ klingen, damit ist jedoch keine Auf- oder Abwertung einzelner Wald-ÖSL beabsichtigt. Wald-ÖSL deren ausgeweitete Bereitstellung andere Wald-ÖSL beeinträchtigen, können in bestimmten Wäldern gesellschaftlich besonders wichtig sein. Eine Priorisierung obliegt jedoch den Entscheidungstragenden. Für den öffentlichen Wald kann dies einen gesellschaftlichen Diskussionsprozess erfordern.

Wechselwirkungen zwischen Zielen und Bedeutung von Unsicherheiten

In waldbezogenen Entscheidungssituationen stehen die verfolgten Ziele häufig in Konflikt miteinander. Es existiert in aller Regel keine Entscheidungs- oder Bewirtschaftungsstrategie, welche im Hinblick auf sämtliche Ziele besser abschneidet als alle Alternativen. Um die Zielerreichung für ein bestimmtes Ziel zu erhöhen, muss daher oft die Reduktion der Zielerreichung für ein anderes Ziel in Kauf genommen werden. Wir sprechen dann von einem Zielkonflikt für die verschiedenen Entscheidungstragenden. Kurz gefasst bedingt also die Ausweitung eines bestimmten Ziels die Reduktion eines anderen. Der im Holz eines Waldes gebundene Kohlenstoff oder der Anteil alter Waldbestände mit hoher Bedeutung für die Biodiversität lassen sich beispielsweise kurzfristig nur erhöhen, wenn man auf einen Teil der möglichen Holzbereitstellung verzichtet. Der Begriff „Waldbestand“, der eine wichtige Planungsebene darstellt, wird hier stellvertretend für das Waldökosystem verwendet. Synergistische Ziele unterstützen sich gegenseitig. So kann beispielsweise eine stärkere Diversifizierung von Baumarten und Altersstufen auf der Bestandesebene zur Steigerung des Waldkohlenstoffvorrates gleichzeitig die Attraktivität der Waldbestände für Erholungssuchende steigern. Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Zielsetzungen sind viel-

fältig und durch zahlreiche Unsicherheiten überlagert. Diese werden durch den globalen Wandel verstärkt, welcher nicht nur zum Klimawandel, sondern z. B. auch zur Einschleppung von Schadorganismen im Zuge von Importen oder zu Markt- und anderen Unsicherheiten durch weltweite Krisen führt. Eine Vernachlässigung oder unsachgemäße Berücksichtigung solcher Unsicherheiten kann beispielsweise falsche Prognosen zur zukünftigen Erreichung von Zielen verursachen, so z. B. bezüglich der zukünftig verfügbaren Holzvorräte. Eine suggerierte aber oft ungerechtfertigte Sicherheit der Prognosen kann regelmäßig zu falschen Einschätzungen von Nutzungspotenzialen und den damit verbundenen Zielkonflikten führen.

Zielkonflikte sind häufig

Ungefähr die Hälfte der in diesem Gutachten analysierten Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Zielen werden von den Autorinnen und Autoren als moderate bis starke Zielkonflikte bewertet. Es lassen sich aber auch Zielsetzungen ausmachen, die sich gegenseitig nicht beeinflussen (neutrale Zielsetzungen) oder sich gegenseitig sogar unterstützen (synergistische Zielsetzungen). Konkret klassifiziert dieses Gutachten 90 Beispiele für Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Wald-ÖSL. Neben den identifizierten Zielkonflikten handelt es sich bei 26 % der analysierten Wechselwirkungen

um Synergien. In 27 % der Paarvergleiche von Zielsetzungen kann kein gegenseitiger Einfluss der ÖSL festgestellt werden.

Starke Zielkonflikte zeigen sich insbesondere zwischen 1) der Ausweitung der Holzbereitstellung und dem Schutz der Biodiversität - vor allem wenn hiebsreife, alte Waldbestände ohne jegliche Biomasseentnahme Voraussetzung zum Schutz der Biodiversität sind -, 2) der Ausweitung des Schutzes der Biodiversität durch Verzicht auf forstwirtschaftliche Nutzung und der Holzbereitstellung, 3) der Ausweitung der Wasserspende und der langfristigen Holzbereitstellung sowie dem Kohlenstoffspeicher im Wald und schließlich 4) der Ausweitung der Windkraft über Wald und dem Schutz der Biodiversität. Synergien ergeben sich z. B. zwischen 1) der Ausweitung der Kohlenstoffspeicherung und wasserbezogenen ÖSL, 2) einem verstärkten Schutz der Biodiversität und wasserbezogenen ÖSL und 3) der Ausweitung des Schutzes vor Naturgefahren außerhalb von Auwäldern und der Kohlenstoffspeicherung im Wald. In Auwäldern kann die Anreicherung von Totholz bei Überschwemmungen die Naturgefahren für den Menschen vergrößern, wenn dieses Totholz als Treibgut in die Flüsse (Wasserstraßen) gelangt.

Unsicherheiten der Holzbereitstellungsmöglichkeiten verschärfen Zielkonflikte

Hinsichtlich der Holzbereitstellung zeigen die Ergebnisse der 4. Bundeswaldinventur (2022) das Problem einer unzureichenden Berücksichtigung von Störungen z. B. durch Wind, Borkenkäfer oder Dürre bei vorhandenen Holzaufkommensprognosen und Vorhersagen von Holzvorratsentwicklungen. Der gesunkene Holzvorrat bei Fichte und die somit abschmelzenden Holzbereitstellungsmöglichkeiten bei dieser Baumart verringern die Spielräume für Nutzungsverzichte bei den anderen Baumarten, wenn man die Holzbereitstellung auf einem hohen Niveau halten möchte. Entgegen Simulationen, die einen insgesamt schwach steigenden Holzvorrat für Fichte bis 2052 vorhersagten, ist der Fichtenvorrat von 2012 auf 2022 bereits deutlich gesunken. Der Zielkonflikt

bezüglich des Schutzes der Biodiversität durch Ausweitung von flächigen Nutzungsverzichten mit der Holzbereitstellung ist ein Beispiel für eine Zielkonfliktverschärfung vor allem durch Störungen. Dieser Zielkonflikt verschärft sich jedoch nicht nur durch ein unsicherer werdendes Holzaufkommen, sondern eventuell auch durch eine konjunkturell steigende Nachfrage nach Bauholz, aber z. B. auch vor dem Hintergrund der erhofften Nutzung von Holzressourcen in Bioraffinerien.

Betrachtungsebenen haben Einfluss auf Wechselwirkungen

Bei der Analyse von Zielkonflikten und Synergien sind sowohl die räumliche als auch die zeitliche Betrachtungsebene von Bedeutung. Ein einzelner Baum kann beispielsweise entweder als Habitatbaum oder zur Holzbereitstellung dienen. Ein Kompromiss ist nicht möglich, wenn man von der Habitatfunktion des nach der Baumernte verbleibenden Restholzes einmal absieht. In einem Waldbestand können dagegen einige Habitatbäume belassen und andere Bäume zur Holzbereitstellung geerntet werden. Auf der Ebene einer größeren Raumeinheit, z. B. eines Forstbetriebes oder einer Landschaft, lässt sich die gleichzeitige Bereitstellung mehrerer Wald-ÖSL noch einmal besser erreichen als auf der Bestandesebene, da mehr Möglichkeiten zur Diversifizierung der Waldzusammensetzung bestehen. Hier können mehr Baumarten angebaut werden und es existieren Möglichkeiten einer räumlichen Schwerpunktsetzung. Diversifizierte Waldportfolios sind anteilige Mischungen unterschiedlicher Bestandestypen mit unterschiedlicher Bewirtschaftung auf Landschaftsebene oder regionaler Ebene. Diese Waldportfolios können zu guten Kompromissen beitragen. Beispielsweise lässt sich ein höherer Eichenanteil zur Förderung des Schutzes der Biodiversität durch wünschenswerte großflächigere Beimischung leichter auf Waldlandschaftsebene erreichen als durch eine kleinflächige Mischung von Eichen mit heute noch konkurrenzstärkeren Baumarten auf der Bestandesebene. Hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Klimaschutz und Holzbereitstellung kann beispiels-

weise auf der langfristigen Zeitskala eine Steigerung des Waldkohlenstoffspeichers durch einen Waldumbau erreicht werden, wenn damit eine Stabilisierung der Waldbestände einhergeht. Die dazu nötige frühzeitige Verjüngung führt kurz- und mittelfristig, z. B. über eine Generation hinweg (30 Jahre), zu einer höheren Bereitstellung der Ressource Holz, aber gleichzeitig zunächst zu einer niedrigeren Kohlenstoffspeicherung im Wald. Langfristig könnte die oft angestrebte deutliche Anhebung des Laubholzanteils im Rahmen des Waldumbaus die Bereitstellung von Bauholz und den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten jedoch auch senken, wenn das anfallende Laubholz weiterhin nicht wirtschaftlich als Bauholz verwendet werden kann.

Möglichkeiten zum Umgang mit Zielkonflikten

Eine Möglichkeit für den Umgang mit Zielkonflikten ist es, einen akzeptablen Kompromiss zu finden. Eine solche Kompromissfindung kann Entscheidungen unterstützen, die ein Waldbesitzer oder eine Waldbesitzerin, bzw. Repräsentanten oder Repräsentantinnen, oder eine Gruppe von Waldbesitzenden mit einheitlichen Zielpräferenzen treffen möchten, um mehrere Ziele möglichst gut zu erreichen. Zum Beispiel kann die zukünftige Waldzuammensetzung im Rahmen der Waldverjüngung so verändert werden, dass jeweils die aktuell am wenigsten erreichte aber erwünschte Wald-ÖSL verbessert wird. Dieser Waldumbau wird so lange fortgesetzt, bis keine Wald-ÖSL mehr verbessert werden kann, ohne eine andere zu verschlechtern. Ein Portfolio verschiedener Wald-elemente, z. B. Waldbestände, Altersstufen, oder Bewirtschaftungsverfahren, das diesen Zustand erreicht hat, wird als „Pareto-effizient“ bezeichnet. Je nach Gewichtung der einzelnen Zielsetzungen ergeben sich jedoch andere empfehlenswerte Waldzusammensetzungen. Für konkrete Empfehlungen müssen daher die Zielpräferenzen der Entscheidungstragenden bekannt sein. Handelt es sich um verschiedene Akteursgruppen mit heterogenen, stark divergierenden Zielpräferenzen, kann es schwierig sein, einen akzeptablen Kompromiss zu finden, z. B. wenn jede Gruppe zu 100 % auf die Durchsetzung ihrer Ziele

besteht. „Pareto-effiziente“ Kompromisse sind somit nur möglich, wenn von allen Beteiligten das Prinzip der Multifunktionalität anerkannt wird, also die gleichzeitige Existenz multipler berechtigter Zielsetzungen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass jeder einzelne Waldbestand alle Ziele erfüllen muss. Vielmehr bildet die Kenntnis von Zielpräferenzen eine Voraussetzung, um Zielen im Umgang mit herrschenden Zielkonflikten je nach Stärke der Präferenz ein bestimmtes Gewicht zuzuordnen. Die Gewichtung der einzelnen Zielsetzungen wird je nach Kontext, individuellen Präferenzen und Besitzart, aber auch im Laufe der Zeit variieren. Mehr Klarheit über die herrschende Zielgewichtung wäre in vielen Fällen eine große Verbesserung zum gegenwärtigen Zustand und würde Empfehlungen zur Kompromissfindung erleichtern.

Neben Problemen mit der Akzeptanz von vorgeschlagenen Kompromissen kann eine Kompromiss-optimierung ohne Zielgewichtung zu relativ niedrigen Bereitstellungen von einzelnen, tatsächlich nachgefragten Wald-ÖSL führen, z. B. wenn zahlreiche Wald-ÖSL gleichzeitig von einer Waldlandschaft oder einem Waldbestand erfüllt werden sollen. Dem kann durch eine entsprechende Gewichtung durch die Entscheidungstragenden sowie lokale oder regionale Priorisierung von bestimmten Zielsetzungen z. B. in öffentlichen Wäldern entgegengewirkt werden, eventuell unter Einbeziehung verschiedener Akteursgruppen.

Auch die Berücksichtigung vielfältiger Unsicherheiten erfordert zumindest eine gewisse landschaftliche Diversifizierung, selbst wenn nur ein einziges Ziel verfolgt wird. Diversifizierung ist vor dem Hintergrund von Unsicherheiten ratsam, weil unbekannt ist, welches aller denkbaren Zukunfts-szenarien tatsächlich eintreten wird und welche aller möglichen Entscheidungsalternativen zukünftig tatsächlich die beste ist.

Eine solche Diversifizierung auf der Landschaftsebene könnte entweder auf der Grundlage von Planungen in sehr großen Betrieben bzw. Verwaltungseinheiten erfolgen oder auch aus einer

Aufgabenteilung zwischen den Waldbesitzarten bzw. Betrieben mit unterschiedlichen Betriebszielen bestehen, die sich in unterschiedlichen Zielgewichtungen ausdrücken kann. Dabei ist es aufgrund von Zukunftsunsicherheiten unwahrscheinlich, dass diejenige Entscheidungsalternative tatsächlich optimal ist, welche wir heute für die beste Variante halten. Waldlandschaften sollten deshalb so diversifiziert sein, dass sie auch in Zukunft unter möglichst unterschiedlichen Szenarien eine breite Palette von Wald-ÖSL auf einem gewünschten Niveau bereitstellen können. Das derzeit beobachtbare politische Bemühen, vor allem die Menge des im Holzvorrat gespeicherten Kohlenstoffs als Zielsetzung zu priorisieren, ist vor diesem Hintergrund kritisch zu bewerten. Eine räumliche Differenzierung unter Beachtung einer angemessenen Risikodiversifizierung bietet sich schließlich für alle Wald-ÖSL an, die einen räumlich konkreten Bezug haben, wie z. B. der Schutz vor Naturgefahren oder die Erholung im Wald. In diesem Zusammenhang sieht der WBW eine Weiterentwicklung der Waldfunktionskartierung zu einer umfassenden Waldfunktionsplanung als hilfreich an. Das Gutachten des WBW kommt schließlich zu folgenden konkreten Empfehlungen:

Der Umgang mit Zielkonflikten und Synergien wird zur Grundlage der Waldpolitik

1. Eine systematische Analyse von Zielkonflikten sollte zukünftig waldpolitischen Rahmensexzenzen, Waldstrategien, Förderkonzepten und Abstimmungen zwischen verschiedenen Ressorts auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene vorausgehen. Die Art und die Stärke von Zielkonflikten und Synergien geben wichtige Hinweise zu Verbesserungspotenzialen für die Bereitstellung von Wald-ÖSL.
2. Die möglichen Folgen waldpolitischer Maßnahmen wie Gesetze, Richtlinien und Förderprogramme sind durch die waldpolitischen Akteure

zur Vermeidung unerwünschter Effekte und zur Sicherung der erwünschten Priorisierung von Zielsetzungen vor allem im öffentlichen Wald differenzierter als bisher und schon im Vorfeld zu bewerten.

Zielkonflikte identifizieren und mindern

3. Zielkonflikte könnten durch räumlich differenzierte Planung der Holzbereitstellung im Rahmen einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung reduziert werden. Eine Fokussierung auf die Holzbereitstellung beeinträchtigt eine Reihe anderer Wald-ÖSL. Dadurch wird beispielsweise die Förderung einer von Menschen ungestörten Entwicklung alter Wälder behindert („Old Growth“ Wälder), welche eine wichtige Möglichkeit zum Schutz der Biodiversität darstellen. Solche Zielkonflikte könnten durch räumlich differenzierte Planung der Holzbereitstellung im Rahmen einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung reduziert werden.
4. Aufgrund einer zu erwartenden steigenden Nachfrage nach Holz und dem wegen des Klimawandels langfristig sinkenden Nutzungspotenzial der Wälder sollte umgekehrt die Ausweisung von Totalreservaten ebenso evidenzbasiert und räumlich differenziert erfolgen.
5. Bei der Analyse von Zielkonflikten und Synergien sind lokale, regionale und überregionale Effekte, so genannte Verlagerungseffekte in Drittländer, zu berücksichtigen. Eine Analyse über die räumlichen Systemgrenzen hinweg mit einer Folgenabschätzung von möglichen „Leakage-Effekten“¹ ist unabdingbar.
6. Auch innerhalb der Holznutzung kommt es zu Nutzungskonkurrenzen um die zur Verfügung stehenden Rohholzsortimente. Dabei sollten insbesondere die stoffliche Holznutzung in langlebigen Holzprodukten, wie sie vorrangig im Bausektor

¹Unter „Leakage“ versteht man negative Verlagerungseffekte. So können beispielsweise Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität in deutschen Wäldern zur Ausweitung der Holzproduktion auf Kosten der Biodiversität und der Ökosysteme in anderen Ländern führen, siehe z. B. Fischer et al. (2024).

vorkommen, sowie eine möglichst lang andauernde Kaskadennutzung gefördert werden.

7. *Zur Unterstützung der Identifikation und Minderung von Zielkonflikten und der Realisierung von Synergien können für die Forstplanung innovative Optimierungs- und Szenario-Analyseverfahren eingesetzt werden.*

Differenzierte Lösungen suchen und gesetzliche Regelungen verbessern

8. *Es gibt keine universelle Waldbewirtschaftung („One-Size-Fits-All“), mit der Zielkonflikte vollständig aufgelöst werden können.* In einer Wertep pluralen Gesellschaft stellen Zielkonflikte eine dauerhafte, systemimmanente Herausforderung der Waldbewirtschaftung dar. Probleme, die aus monofunktionaler und riskanter Bewirtschaftung erwachsen, sind in Zukunft besser aufzuzeigen. Die Vielfalt von Waldstrukturen, Zusammensetzungen und Bewirtschaftungsverfahren ist zu fördern und nicht einzuschränken.

9. *Vor dem Hintergrund der zunehmenden Relevanz vielfältiger Zielsetzungen kann eine räumliche und zeitliche Priorisierung von Zielen für den öffentlichen Wald helfen, den gesellschaftlichen Nutzen der Waldbewirtschaftung durch geeignete Bewirtschaftungsstrategien zu erhöhen.*

10. *Die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei forstlichen Planungen ist bereits ein wichtiger Schritt in Richtung multifunktionaler und risikobewusster Waldwirtschaft.* Hieraus resultiert bei Nutzung geeigneter Optimierungsverfahren automatisch eine empfehlenswerte Diversifizierung der langfristigen Zusammensetzung von Waldlandschaften, auch bei Fokus auf nur eine Wald-ÖSL.

11. *Hemmisse für Diversifizierung und Risikovorsorge durch Waldbesitzende sind abzubauen, entsprechende waldbauliche Freiheiten für Waldbesitzende müssen gezielt erhalten und geschaffen werden.*

12. *Anreize für die Bereitstellung von Wald-ÖSL und zur Risikodiversifizierung werden insbesondere dort gebraucht, wo es große Zielkonflikte mit der Holzbereitstellung gibt, die bislang fast die gesamte finanzielle Basis der Waldbewirtschaftung bildet.* Ein konzeptionelles Umdenken weg von der Entschädigung und hin zur Honorierung der Bereitstellung von regulierenden Wald-ÖSL kann akzeptable Lösungen unterstützen und Anreize setzen.

13. *Die Ausweisung von Vorranggebieten zur Umsetzung bestimmter Ziele - für den privaten und kommunalen Wald auf freiwilliger Basis - kann hilfreich sein und zur Effizienzsteigerung beitragen.* Multifunktionalität ist somit vor allem eine Frage der räumlichen und zeitlichen Skalen der Zielverfolgung sowie der Schwerpunktsetzung im Einzelfall.

14. *Eine Minderung von Zielkonflikten erfordert Dialogprozesse.* Geeignete Instrumente und Prozesse zur Abstimmung der waldbpolitischen Ziele mit den relevanten Akteuren sind, ergänzend zu den schon existierenden Instrumenten, auf verschiedenen politischen Entscheidungsebenen zu entwickeln und zu etablieren, um das Bewusstsein für Zielkonflikte zu stärken und diese künftig zu mindern.

15. *Konsequenzen eines bewussteren Umgangs mit Zielkonflikten und Synergien können durch Monitoring & Entwicklung von Bewertungsinstrumenten ex-post festgestellt bzw. durch Politikfolgenabschätzungen ex-ante analysiert werden.*

1 Zielsetzung des Gutachtens

Nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern erfordert die Berücksichtigung vielfältiger Zielsetzungen. Dies gestaltet sich unter dem Einfluss des Klimawandels (Lindner et al. 2010) sowie den damit verbundenen zunehmenden Störungen und Kalamitäten (Seidl et al. 2017) zunehmend schwieriger. Die weltweit steigende Nachfrage nach dem Rohstoff Holz (Food and Agriculture Organization of the UN 2024; Peng et al. 2023) bei in Deutschland gleichzeitig sinkenden nachhaltigen Nutzungspotenzialen im Bereich des von der Holzindustrie mittelfristig sehr nachgefragten Nadelholzes (BMEL 2024) macht die Erfüllung von vielfältigen Zielsetzungen zusätzlich komplex. Dies gilt vor allem wenn diese Zielsetzungen mit einer Einschränkung der Holzbereitstellung einhergehen. Anders als von manchen Akteursgruppen angenommen, kann keine Bewirtschaftungs- oder Nichtbewirtschaftungsstrategie bei multiplen Zielsetzungen und begrenzter Waldfläche gleichzeitig jedes einzelne Ziel uneingeschränkt erfüllen. Zwar beeinflussen sich manche Zielsetzungen nicht bzw. können sich sogar gegenseitig fördern und so zu Synergien beitragen. Häufig konkurrieren jedoch Zielsetzungen miteinander. Angesichts der Vielfalt unterschiedlicher Zielsetzungen sind Zielkonflikte der Normalfall bei der Nutzung von Wald in der Kulturlandschaft (Hellström und Reunala 1995; Nousiainen und Mola-Yudego 2022). Dabei tragen der Klimawandel (Harrington et al. 2021) und allgemeine globale Veränderungen zu wachsender Unsicherheit (Polasky et al. 2011; Lawrence et al. 2020) bezüglich zukünftiger Möglichkeiten und Risiken der Zielerreichung bei. Auch die räumlichen Betrachtungsebenen und verschiedene Zeitskalen beeinflussen die Interpretation von Zielkonflikten und Synergien (Rodríguez et al. 2006). Eine Steuerung der Waldbewirtschaftung auf politischer Ebene bedarf daher eines soliden Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Zielen und wie diese effektiv miteinander kombiniert werden können, um

eine möglichst hohe und möglichst sichere Erreichung multipler Zielsetzungen zu erlangen.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der sich stetig wandelnden Ansprüche an den Wald herrscht im politischen Raum Unsicherheit darüber, welche Zielsetzungen für die Waldbewirtschaftung tatsächlich bestehen, in welchem Maße Waldbewirtschaftungsverfahren zu einem bestimmten Ziel beitragen und wie sich unterschiedliche Ziele gegenseitig befördern oder beeinträchtigen. Dies wird z. B. deutlich an der gegenwärtigen Diskussion der Frage, ob die Nutzung von Holz aus den Wäldern in Deutschland einen höheren Beitrag zum Klimaschutz leisten kann als der Verzicht auf Nutzung (Böhn 2021; Mayer et al. 2010). Darüber hinaus herrscht z. B. auch Unsicherheit über die Anbaeignung verschiedener Baumarten und welche Leistungen und auch Risiken man vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels von diesen zukünftig erwarten kann. Anbauempfehlungen variieren in ihren Aussagen und für verschiedene zukünftige Perioden, lassen nur relativ grobe Empfehlungen zu und berücksichtigen oft die menschlichen Ansprüche an den Wald nur untergeordnet, wenn überhaupt (Walentowski et al. 2014; Koch et al. 2022). In den vor uns liegenden Jahrzehnten wird beispielsweise eine Engpasssituation hinsichtlich der zum Anbau geeigneten Baumarten erwartet (Wessely et al. 2024). Auch wenn das Klima ab 2090 Anbaumöglichkeiten für ein erweitertes Baumartenportfolio in Mitteleuropa eröffnen sollte, können viele europaheimische und außereuropäische Baumarten oder Herkünfte unter heutigem Klima, das z. B. durch regelmäßige Spätfröste gekennzeichnet ist, noch nicht erfolgreich angebaut werden. In der Übergangsphase zum zukünftigen Klima (bis 2090) entsteht so eine Flaschenhalssituation, während der weniger Baumarten mit hohem Potenzial für die Holzproduktion, Kohlenstoffspeicherung und den Schutz der Biodiversität verfügbar sind (Wessely et al. 2024).

Vor dem Hintergrund der herrschenden Unsicherheiten und der sich abzeichnenden Veränderungen der Wuchsbedingungen und Störungsregime zielt dieses

Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik (WBW) darauf ab, anhand der Literatur und der im WBW vorhandenen Expertise beispielhaft grundsätzliche Konflikte und Synergien bei der Bereitstellung von waldbezogenen Ökosystemleistungen (ÖSL) einzuschätzen. Dabei wird nach kurzfristigen (innerhalb des kommenden Jahrzehnts), mittelfristigen (etwa 30 Jahre oder eine Generationsdauer) und langfristigen Auswirkungen differenziert (kommende Generationen). Es erfolgt zudem eine Differenzierung nach der räumlichen Betrachtungsebene (z. B. Bestandes-² oder Landschaftsebene). ÖSL sind alle Wirkungen von Ökosystemfunktionen, aus denen Menschen einen Nutzen ziehen (im Englischen als Ecosystem Services bezeichnet, siehe z. B. Fisher et al. 2009). Indikatoren für ÖSL können so als Zielkriterien dienen, um abzuschätzen, wie stark bestimmte Waldbestandestypen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen zu welchen Zielen beitragen. Das Gutachten zeigt u. a. Methoden auf, um den Einfluss des zukünftigen Waldaufbaus auf Bestandes- und Landschaftsebene sowie den Einfluss der Bewirtschaftungsver-

fahren auf das Erreichen mehrerer ÖSL unter Unsicherheit zu analysieren. Der WBW stellt mit diesem Gutachten zudem Verfahren der waldbezogenen Szenarioanalyse vor, um etwaige Zielkonflikte und Synergien besser identifizieren und bei Planungen berücksichtigen zu können.

Wichtige Anliegen des Gutachtens sind:

- 1) Typen von Zielkonflikten und Synergien in der Waldbewirtschaftung zu identifizieren und unter Berücksichtigung von Unsicherheiten aufgrund des Klimawandels und des globalen Wandels neu einzuschätzen.
- 2) Möglichkeiten zum Umgang mit Zielkonflikten und Synergien darzulegen und Lösungsmöglichkeiten zur Konfliktminderung aufzuzeigen.
- 3) Waldpolitische Empfehlungen zur Minderung von Zielkonflikten und zur Förderung von Synergien zu entwickeln sowie dazu notwendige politische Rahmenbedingungen zu identifizieren.

Grundsatz

Das Gutachten geht vom aktuellen Zustand des Waldes in Deutschland aus und schätzt die Auswirkungen einer erweiterten Bereitstellung bestimmter Wald-ÖSL auf andere Wald-ÖSL qualitativ ab. Der WBW nimmt jedoch **keine Priorisierung** bestimmter Zielsetzungen bzw. Wald-ÖSL vor. Durch eine möglichst ausgewogene Darstellung aller betrachteten Wald-ÖSL wird versucht, eine indirekte Priorisierung einzelner Wald-ÖSL zu vermeiden.

² Eine aufgrund von Struktur und Baumartenzusammensetzung einheitlich bewirtschaftete Waldfläche, vgl. Knoke (2012), S. 374.

2 Zielkonflikte, Synergien und Entscheidungsfindung - eine Einleitung

"Schon früher kamen (...) die verschiedenen Arten der Wald- und Holznutzung einander häufig in die Quere" (Radkau 2018, S. 12). Dieser historische Befund beschreibt die widersprüchlichen Erwartungen von Menschen an Wald und dessen Nutzung in ihren jeweiligen Rollen als Landwirte, Jäger, Zeitler, Holzhändler, Hausbauer, Betreiber von Bergwerken oder Kriegsherren. Selbst im sogenannten "hölzernen Zeitalter" war die Holzgewinnung und -bereitstellung nur ein Anspruch an die Waldfläche neben anderen. Obwohl komplexe Ordnungen von Eigentums- bzw. Nutzungsrechten (z. T. als Allmenden) etabliert wurden, um die vielen Akteure mit ihren vielfach existentiellen Belangen zu koordinieren und die regelmäßig aufkeimenden Nutzungskonflikte zu begrenzen, führte die Vielfachnutzung zu regelmäßigen Streit und einem Verlust von Wäldern und/oder deren Funktionen. Die Forstgeschichte beschreibt vor diesem Hintergrund einen mehrere Jahrhunderte währenden Prozess der Emanzipation der nachhaltigen Holzproduktion gegenüber ihren Konkurrenten vor allem aus dem Bereich der Landwirtschaft, des Bergbaus und der Jagd (Hilf und Röhrig 2007; Mantel 1990). Die räumliche Trennung von Holzproduktion einerseits und konkurrierenden Landnutzungen wie der Viehhaltung und des Ackerbaus andererseits gilt seither als wirkungsvolles Konzept des Wiederaufbaus sowie des Erhalts devastierter Wälder. Die Schaffung von - in diesem Sinne - vereinfachten Waldbeständen oft mit nur einer Baumart führte dazu, dass Wälder hohe Holzproduktivität aufweisen bzw. im Kohlenstoffhaushalt zu Senken werden konnten und die intensivierte landwirtschaftliche Produktion zur Quelle (Gingrich et al. 2019). Mit der Begründung einer "rationalen Forstwirtschaft" begann sich – von der Entstehung der Forstwissenschaft begleitet – ab etwa 1800 das Prinzip der Holzproduktion gegenüber anderen Waldnut-

zungen durchzusetzen. Daran hat sich bis in die Gegenwart nicht viel geändert. Die meisten Forstbetriebe erzielen ihr Einkommen auch heute im Wesentlichen aus dem Verkauf von Holz (Ermisch et al. 2015).

Forstpolitisch wurde vielfach postuliert, dass eine ordnungsgemäße Waldbewirtschaftung mit Fokus auf die Holzproduktion alle anderen Ziele mit erfüllen könne. Seit den 1970er Jahren gilt dieses Postulat zumindest in der akademischen Forstpolitik-wissenschaft als überholt (Glück 2000; Schmithüsen et al. 2007; Borrass et al. 2017). In der forstlichen Praxis wirkte das Prinzip der Holzproduktion, in deren Kielwasser alle anderen Ziele optimal erfüllt werden, jedoch weit über die 1970er Jahre hinaus und Konflikte blieben zwischen verschiedenen Zielsetzungen ein in Kauf genommener blinder Fleck der Walddebatte. Mittlerweile sind die Ansprüche an den Wald und die Zielsetzungen der Waldbewirtschaftung noch vielfältiger geworden, wohingegen die Bereitstellung der Wald-ÖSL unter anderem durch die abnehmende Vitalität vieler Wälder und die Zunahme von Störungen unsicherer und tendenziell knapper geworden ist. Zudem zeigt sich eine Konkurrenz der verschiedenen Akteursgruppen hinsichtlich der Festlegung und Priorisierung möglicher Zielsetzungen zunehmend deutlicher. Dies macht so genannte Win-Win-Situationen immer schwieriger (Prins et al. 2023). Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, Zielkonflikte (aber auch Synergien zur Steigerung der Bewirtschaftungseffizienz) zu identifizieren, diese einzuschätzen, eventuell neu zu bewerten und zu thematisieren.

Einführung in die Thematik: Zielkonflikte und Synergien

Konflikte sind der Normalfall im menschlichen Zusammenleben (Dahrendorf 1996; Bonacker 2009). In der Konflikttheorie werden intra- und interpersonelle Konflikte unterschieden. Intrapersonelle Konflikte liegen vor, wenn etwa eine Waldbewirtschafterin sich zwischen Alternativen zu entscheiden hat, welche unter vielen Management-optionen sie nutzt.

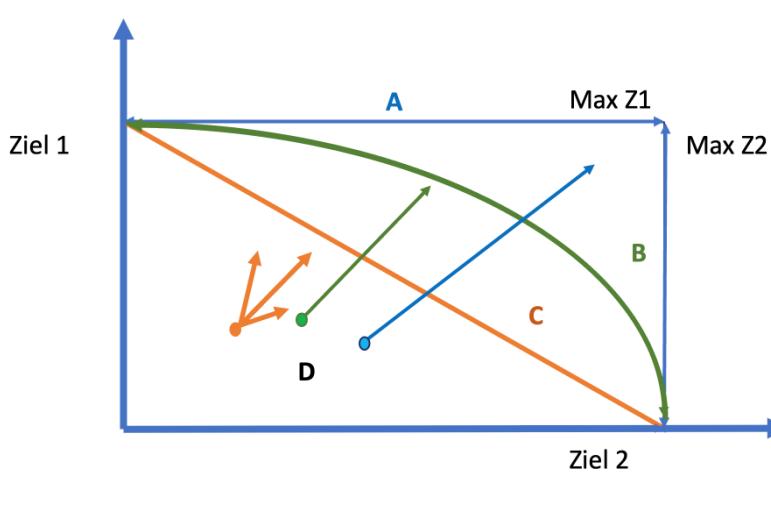
Interpersonelle Konflikte bestehen zwischen Personen oder Gruppen. Gegenstand dieser Konflikte sind häufig divergierende oder als besonders belastend empfundene Normen (Normenkonflikt) sowie gegensätzliche Interessen (Interessenkonflikt) (Wiswede 1998). Letztere werden ausgelöst, weil Ressourcen vielfach endlich sind und daher nicht die Ziele aller Beteiligter gleichermaßen erreicht werden können (z. B. Schutz natürlicher Waldentwicklungen versus Holzbereitstellung) bzw. die Ressource schlicht nicht für alle nachgefragten Verwendungsmöglichkeiten reicht (z. B. energetische versus stoffliche Nutzung von Holz). Damit verknüpfte Zielkonflikte zwischen Akteuren oder Akteursgruppen eröffnen ein weites Feld für deskriptive sozialwissenschaftliche Studien, welche die verschiedenen Beteiligten und deren Einfluss in das Zentrum ihrer Betrachtung rücken (Turkelboom et al. 2018).

Der WBW wählt in diesem Gutachten jedoch einen anderen Zugang, der sich weniger auf die Analyse der Ursachen von Zielkonflikten konzentriert, sondern auf ihre Identifikation und auf entscheidungstheoretische Überlegungen zum Umgang mit Zielkonflikten abzielt. Damit soll nicht ausgesagt werden, dass ein deskriptiver Analyserahmen nachrangig ist; vielmehr sind beide Perspektiven wichtig. Der hier gewählte Zugang besteht in der Beschreibung und Bewertung von möglichen Wechselwirkungen zwischen Zielen, z. B. Zielkonflikte, Zielkonflikttypen oder Synergien, die aus der Natur der verschiedenen Wald-ÖSL selbst und nicht aus den Machtverhältnissen und dem Einflussreichtum bestimmter Akteursgruppen erwachsen. Ein Zielkonflikt bezüglich der Bereitstellung von Wald-ÖSL entsteht aus Sicht der Autoren und Autorinnen dieses Gutachtens, wenn zur Verbesserung eines Ziels ein oder mehrere andere Ziele reduziert oder ganz aufgegeben werden müssen (Deng et al. 2016).

Echte Zielkonflikte sind oft nicht vollständig auflösbar, da ihnen Wertvorstellungen zugrunde liegen können, die schwer plan- bzw. verhandelbar sind. Dennoch können Alternativen der Waldbelebung gefunden werden, welche die oft notwendige Reduktion von Zielen zur Ausweitung anderer Ziele möglichst klein halten und somit helfen, Zielkonflikte zu minimieren. Die Unternehmensforschung bietet dazu Verfahren zum Auffinden optimaler Kompromisse an (Ramík und Vlach 2002; Ortiz-Urbina et al. 2022; Barberà und Coelho 2022). Dabei wird beispielsweise die Differenz zwischen theoretisch möglicher maximaler Zielerreichung für jede einzelne Zielsetzung zum tatsächlich erreichten Zielbeitrag im Rahmen einer Kompromisslösung minimiert. Der Zugang des WBW zur Unterstützung zukünftiger waldbaulicher Entscheidungen ergänzt somit vorhandene deskriptive Studien, indem waldbauliche Empfehlungen zur Verbesserung des Umgangs mit Zielkonflikten und Synergien erarbeitet werden.

Ziele können ganz unterschiedliche Wechselwirkungen miteinander aufweisen (Abbildung 1). Beispielsweise können manche Ziele ohne gegenseitige Beeinflussung erreicht werden. Bei solchen „neutralen Zielen“ (Wechselwirkung Typ A) lässt sich die Erfüllung von Ziel 1 bis zu seinem Maximum steigern, während das Erreichen von Ziel 2 nicht beeinträchtigt wird. Dies wird durch eine senkrechte Linie für Ziel 2 dargestellt. Bei „neutralen“ Zielsetzungen lassen sich gleichzeitig mehrere Ziele maximieren, es liegen keine Zielkonflikte vor.

In Situation A (Abbildung 1) liegt somit kein Zielkonflikt, aber auch keine Synergie vor. Häufiger kommt es allerdings dazu, dass man die Erwartung an ein Ziel reduzieren muss, um den Beitrag zu einem anderen Ziel zu erhöhen. In Situation B vermindert sich der Beitrag zu Ziel 1, wenn der Beitrag zu Ziel 2 erhöht werden soll - zunächst allerdings nur wenig.



A Neutrale Ziele: Ziele können ohne gegenseitige Beeinträchtigung maximiert werden

B Moderate Zielkonflikte: Um eine Zielerreichung zu steigern, muss etwas von einer anderen Zielerreichung aufgegeben werden

C Starke Zielkonflikte: Steigerung einer Zielerreichung führt zu anteiligem Verlust bei der anderen Zielerreichung

D Komplementäre Ziele: symbolisiert durch Verschiebung der farbigen Punkte: Erreichung beider Ziele kann gleichzeitig verbessert werden, weil die Verbesserung eines Zielbeitrags auch einen höheren Beitrag zu einem anderen Ziel bedingt

Abbildung 1: Theoretische Beziehungen zwischen Zielen. Die Pfeile geben Entwicklungsmöglichkeiten für die Zielerreichung an. Der Kasten (blaue Pfeile), die grüne Kurve sowie die orangefarbene Gerade stellen maximale Zielerreichungen dar, die bei Vorliegen bestimmter Zielbeziehungen möglich sind.

Mit zunehmender Steigerung von Ziel 2 wird aber der Verlust von Ziel 1 für denselben Zugewinn für Ziel 2 immer größer. Hier sprechen wir von einem „**moderaten Zielkonflikt**“.

Zielkonflikte können unterschiedlich stark ausgeprägt sein. In manchen Situationen muss die Verfolgung eines Ziels anteilig reduziert werden, um das andere Ziel entsprechend steigern zu können (Zielkonflikt Typ C in Abbildung 1). Dabei handelt es sich um einen „**starken Zielkonflikt**“.

Schließlich existieren synergistische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen „**komplementären Zielsetzungen**“. Dies zeigt beispielsweise der blaue aufsteigende Pfeil in Abbildung 1 an, wo automatisch Ziel 2 ein Maximum erreicht, wenn Ziel 1 maximiert wird. In dieser Situation D lassen sich somit die Beiträge zu mehreren Zielen gleichzeitig verbessern, z. B. wenn verfügbare Ressourcen besser genutzt werden.

Box 1: Kompromisse

Bei Zielkonflikten sind oftmals Kompromisse möglich, um mehrere Zielsetzungen zu erreichen. Wir verstehen einen Kompromiss als einen Bewirtschaftungsvorschlag, bei dem keines der einzelnen Ziele maximal erfüllt wird, die Summe der erreichten einzelnen Ziele aber über dem Ergebnis liegt, welches mit nur einer Zielsetzung erreicht werden kann. Nehmen wir an, dass die grüne Kurve in Abbildung 1 die maximalen kombinierten Ergebnisse für zwei Wald-ÖSL darstellt, die durch verschiedene Waldbewirtschaftungsstrategien erreichbar sind, so sind Ergebnisse oberhalb der grünen Linie per Definition unmöglich. Alle Punkte zwischen dem Anfang und Ende der grünen Linie stellen Kompromiss-Ergebniskombinationen dar. Die Kompromisse entlang der Linie zwischen den Maxima für die Ziele 1 und 2 sind effizient, da durch weitere Veränderungen der Bewirtschaftung keines der beiden Ziele erhöht werden kann, ohne das jeweils andere Ziel zu reduzieren. Die grüne Kurve wird daher auch Effizienzlinie genannt. Bewirtschaftungsstrategien mit Ergebnissen auf der Effizienzlinie nennt man Pareto-effizient. Will man nun empfehlen, welche der im Prinzip unendlich vielen Ergebniskombinationen auf der grünen Linie zu empfehlen ist, benötigt man die Präferenzen der Nutzer der ÖSL. Sie sind in der Regel abhängig von der betrachteten Ausgangssituation und lassen sich mit Hilfe verschiedener ökonomischer Methoden wie z. B. „Bedingte Bewertungsmethoden“ oder sogenannte „Choice Experimente“ bestimmen.

Liegen solche Bewertungen nicht vor, kann ein Kompromiss mit Hilfe von Gewichtungen der einzelnen Ziele gesucht werden; auch zur Bestimmung der Gewichte gibt es Verfahren. Objektiv kann lediglich abgeschätzt werden, ob Ergebniserhöhungen für ein oder mehrere Ziele möglich sind, ohne ein anderes Ziel zu reduzieren. Die Wahl der waldbewirtschaftung optimalen Bewirtschaftung erfordert somit eine subjektive Gewichtung der erwünschten Ziele durch die Entscheidungsbefugten und gegebenenfalls andere Akteure. Möglicherweise entstehende Kosten für Maßnahmen oder Kontrollen sind dabei zu berücksichtigen.

In der Realität dürften allerdings oft lediglich Ergebnisse erreicht werden, die mehr oder weniger weit unterhalb der grünen Linie liegen, in Abbildung 1 beispielhaft durch einen grünen Punkt mit Pfeil dargestellt. Der grüne Pfeil deutet an, dass durch eine geschickte Veränderung der Bewirtschaftung beide Ziele verbessert werden können, z. B. durch gleichzeitige Ausweitung der Flächenanteile produktiver Baumarten und der Flächenanteile biodiverser Waldbestände. Das wäre dann eine synergistische Wechselwirkung des Typs D, Beispiele weiter unten.

Als Beispiel für neutrale Zielsetzungen vom Typ A können die Holzbereitstellung und die Energiegewinnung durch Windkraft im Wald genannt werden. Durch gute und flächensparende Planung unter Beachtung der Stabilität benachbarter Waldbestände beim Bau einzelner Windräder kann der Produktionsflächenverlust minimiert werden, so dass eine merkliche Beeinträchtigung der Holzbereitstellung allenfalls lokal auftritt. Der Betrieb der Windräder beeinträchtigt die Bereitstellung von Holz auf der

übrigen Fläche nicht, zumindest wenn deren Stückzahl nicht zu groß ist. Unter diesen Voraussetzungen könnte man beispielsweise die Holzbereitstellung steigern, ohne dass dies durch die Errichtung von einzelnen Windrädern beeinträchtigt würde.

Ein Beispiel für einen moderaten Zielkonflikt vom Typ B ist die Wechselwirkung zwischen dem Schutz der Biodiversität und der Wirkung des Waldes als Kohlenstoffspeicher. Lichte und artenreiche Waldstrukturen zum Schutz der Biodiversität lassen sich

beispielsweise nicht zu 100 % mit einer hohen Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse von Wäldern vereinbaren. Für Störungsflächen in Wäldern wurde gezeigt, dass der positive Beitrag für die Biodiversität in etwa in der gleichen Größenordnung lag wie der negative für die Kohlenstoffspeicherung (Thom und Seidl 2016). Dies spricht zunächst für einen starken Zielkonflikt auf der Bestandesebene. Aktuelle Waldzusammensetzungen können jedoch oft auf Landschaftsebene verbessert werden, ohne jeweils den Schutz der Biodiversität oder die Kohlenstoffspeicherwirkung stark zu verschlechtern. Hierbei ist die räumliche Betrachtungsebene der Landschaft allerdings entscheidend. So kann die zunehmende Integration einer Baumart mit sehr hohem Wachstumspotenzial und hohen Holzvorräten (z. B. Douglasie) auf der Landschaftsebene die Kohlenstoffsenkenwirkung im Wald steigern und dennoch große Flächenanteile von Baumarten wie Eiche zulassen, die eine hohe Artenvielfalt unterstützen (Gang et al. 2024). Sabatini et al. (2019) folgerten vor diesem Hintergrund, dass es auf der Bestandesebene sinnvoll sein kann, sich auf ein Ziel zu beschränken, z. B. entweder auf die Sicherung der Biodiversität oder auf die Erhöhung des Kohlenstoffspeichers. Positive Effekte für die Biodiversität und die Kohlenstoffsenkenleistung können so auf größeren räumlichen Ebenen verbessert werden.

Auf der Landschaftsebene können Zielkonflikte also durch geschickte Mischung der Bestände reduziert werden, was auf der Bestandesebene deutlich schwieriger ist. Dabei ist eine solche Mischung von Bestandestypen basierend auf Standortseignung und insbesondere klimatischer Eignung (Fernandes 2013) zielführend, die unterschiedliche ÖSL erbringen, z. B. Eichenbestände zum Schutz der Biodiversität und Douglasien-Bestände zur Holzbereitstellung, anstelle von Kiefern- und Fichtenbeständen, die beide schwerpunktmäßig der Holzbereitstellung dienen. Dies unterstreicht, dass eine Differenzierung der Betrachtung zwischen der Bestandesebene und der Landschaftsebene unter simultaner Betrachtung mehrerer Bestandestypen

wichtig ist. Die folgenden beispielhaften Beschreibungen von Wechselwirkungen zwischen Wald-ÖSL beziehen sich auf die Landschaftsebene, wenn nichts anderes erwähnt wird.

Die mit dem erwünschten Waldumbau verbundenen zeitlichen Aspekte müssen Eingang in die Identifikation und Analyse von Zielkonflikten und Synergien finden. Eine nennenswerte Steuerung der Baumarten- und Bestandeszusammensetzung von Forstbetrieben lässt sich vor allem im Rahmen der Waldverjüngung (Etablierung eines neuen Waldbestandes) und der frühen Bestandspflege erzielen, z. B. im Zuge der Begründung und der Förderung von bisher selteneren Baumarten und Bestandestypen mit vorteilhaften Eigenschaften. Die Etablierung wünschenswerter Waldstrukturen ist ein langfristiges Unterfangen und kann nicht von heute auf morgen erreicht werden. So kann die Einbringung von bisher seltenen Baumarten, wie z. B. Tanne, zunächst eine Auflichtung der vorhandenen Waldbestände erfordern, wobei viele umzubauenden Waldbestände nach kommerziellen Maßstäben noch nicht erntereif sind (z. B., Knoke et al. 2023b). Auch der Erhalt und die Pflege von wuchsunterlegenen seltenen Baumarten erfordert stärkere Durchforstungseingriffe. In beiden Fällen wird der durchschnittliche Kohlenstoffvorrat im Wald aber zunächst sinken. Langfristig kann jedoch ein stabiler und resilenter Wald erzielt werden, z. B. durch frühzeitige Einbringung von Vorausverjüngung, welcher einen erhöhten oder weniger risikobehafteten Kohlenstoffspeicher darstellt. Ein Wald gilt als resilient, wenn er sich nach Störungen schnell wieder erholt.

Unsere Betrachtungen heben in diesem Gutachten in der Regel auf einen mittelfristigen Zeitraum über eine Generation oder die nächsten 30 Jahre hinweg ab. Uns ist bewusst, dass dieser Zeitraum für Forstwirtschaft sehr kurz ist, um die Folgen heutiger Entscheidungen im Wald umfassend aufzuzeigen. So führen z. B. Nutzungsverzichte zur Erhöhung des Holzvorrates im Wald langfristig zu CO₂-Emissionen aus der natürlichen Zersetzung des Holzes, die die Klimabilanz zukünftiger Genera-

tionen belasten werden. Diese Effekte dürfen nicht unerwähnt bleiben. Im Hinblick auf die Dringlichkeit gerade beim Klimaschutz wird der Fokus aber auf die nächsten 30 Jahre gelegt.

Ein starker Zielkonflikt vom Typ C kann bei Umsetzung pauschaler Flächenziele vorliegen. Wird beispielsweise ein starker Schutz unter Aufgabe der Biomassenutzung auf einem bestimmten Anteil der Waldfläche unter repräsentativer Beteiligung aller vorhandenen Bestandestypen und Entwicklungsphasen gefordert, dann verringert sich die Holzbereitstellung zunächst linear mit der Größe des Schutzgebiets. Kurz- und mittelfristig kann dieser Konflikt kaum aufgelöst oder reduziert werden. Langfristig kann die Produktion dann auf den nicht geschützten Waldanteilen durch eine Intensivierung der Bewirtschaftung eventuell erhöht werden, z. B. durch den Anbau sehr produktiver Baumarten, was auf lange Sicht zu einer teilweisen Kompensation des Produktionsrückgangs führen kann (z.B. Di Fulvio et al. 2025). Erfolgt eine solche Kompensation jedoch nicht innerhalb Deutschlands und bleibt die Nachfrage nach Holz konstant oder steigt sogar, muss entweder mehr Holz importiert oder weniger exportiert werden. Beide Konsequenzen bergen die Gefahr des Leakage durch Biodiversitätsverluste in Ländern mit weniger nachhaltigen Produktionsverfahren, in denen aufgrund rückläufiger deutscher Holzproduktion unter Vernichtung wertvoller Lebensräume mehr Holz produziert wird. Diese Gefahr diskutieren beispielsweise Balmford et al. (2025) und Fischer et al. (2024) quantifizieren mögliche Größenordnungen des Leakage. Basierend auf diesen Studien würde es weltweit zu einem Netto-Biodiversitätsverlust kommen, auch wenn in Deutschland die Biodiversität erfolgreich geschützt werden könnte.

Wie eine Studie von Gregor et al. (2024) anhand von Modellsimulationen zeigt, können auch bei Kompensation von rückläufigen Nutzungsmöglichkeiten in Europa durch regionale Intensivierung negative Effekte entstehen. Durch intensiver bewirtschaftete Waldregionen können sich homogene und monofunktionale Waldstrukturen bilden, um die fehlenden

ÖSL wie z. B. ausbleibende Holzbereitstellung auf streng geschützten Flächen zu kompensieren. Somit könnte auf längere Sicht eine Intensivierung wiederum weniger resistente und resiliente Waldlandschaften erzeugen. Dies hängt aber von vielen Faktoren wie z. B. der Baumartenzusammensetzung, Bestandestruktur oder den gewählten Produktionszeiten ab.

Eine Wechselwirkung des Typen D (Abbildung 1) beschreibt eine Zielsynergie. Z. B. kann mittels Durchforstungen gleichzeitig Einkommen generiert und die Holzproduktion auf der Bestandesebene sicherer gemacht werden; z. B. durch Reduktion von Risiken durch Windwurf oder Trockenstress (Sohn et al. 2016), aber auch durch Förderung einer erwünschten Baumartenmischung. Auf Dauer können so die planmäßige Holzbereitstellung und wahrscheinlich auch die Kohlenstoff-speicherung erhöht werden, wenn Stabilisierungseffekte tatsächlich einsetzen. In Durchforstungsbeständen können Holzbereitstellung und Kohlenstoffspeicherung somit komplementäre Ziele darstellen, es herrscht eine Zielsynergie.

Die farbigen Linien in Abbildung 1 bilden mit der maximalen Zielerreichung (Beispiele A, B, und C) jeweils Grenzen, die ohne innovative Veränderungen in der Bewirtschaftung nicht überschritten werden können. Die Wirkung einer innovativen Veränderung ist beispielhaft in Abbildung 3 weiter unten dargestellt, wodurch sich die Produktionsmöglichkeiten ausweiten. Dies kann beispielsweise durch Integration bisher nicht oder kaum vorhandener Baumarten (Gang et al. 2024) oder innovativer Bestandestypen erfolgen (z. B. Knoke et al. 2023b), wenn diese beispielsweise zu einer Minderung der Unsicherheit von Wald-ÖSL auf der Landschaftsebene beitragen (z. B. Messier et al. 2022). Die Integration von naturnahen, ungleich-altrigen Waldbeständen, welche sich aus Baumgruppen mit verschiedenen Altern zusammensetzen, kann eine solche innovative Veränderung re-präsentieren (Knoke et al. 2025).

Synergien können sich auch durch den Umbau gleichaltriger in heterogene, ungleichaltrig aufgebaute Waldbestände ergeben (Typ D in Abbildung 1). Diese sind oft widerstandsfähiger (Mohr et al. 2024) und resilenter (Knoke et al. 2023b) als gleichaltrige Waldbestände und werden aus ästhetischer Sicht zudem hoch bewertet. Sie dienen damit der Erholung besser als andere Waldbestände (Giergiczny et al. 2015; Filyushkina et al. 2017; Weller und Elsasser 2018). Über ihre höhere Widerstandsfähigkeit und Resilienz können sich heterogene, ungleichaltrig aufgebaute Waldbestände auch im Hinblick auf die laufende Einbindung von Kohlenstoff als überlegen erweisen (Knoke et al. 2020b). Hier kann eine Synergie zwischen Risikominderung, Kohlenstoffspeicherung und der Bereitstellung von Erholungsmöglichkeiten vorliegen. Durch die Vorteile solcher Bestandestypen hinsichtlich der Unsicherheit und der gleichzeitigen Steigerung mehrerer Wald-ÖSL führt deren Integration auf Landschaftsebene zu einer Erhöhung der gesamten landschaftlichen Produktionsmöglichkeiten (Pohjanmies et al. 2021, Eyvindson et al. 2021, Knoke et al. 2025). Allerdings können heterogene Besitzverhältnisse und Präferenzen die Umsetzung optimaler multifunktionaler Waldzusammensetzungen auf Landschaftsebene erschweren.

Die stärkere Integration ungleichaltriger Bestände in Waldlandschaftsportfolios bedeutet allerdings nicht notwendigerweise, dass ungleichaltrige Bestandestypen unsere Landschaften in Zukunft dominieren sollten. Ungleichaltrige Bestandestypen können zwar auf der Landschaftsebene nennenswerte Anteile einnehmen, ganze Landschaften mit 100 % ungleichaltrigen Beständen sind jedoch problematisch, wenn es um Multifunktionalität geht (Knoke et al. 2025). Beispielsweise ist auf Landschaftsebene eine Variation der Waldbauverfahren und somit der Waldstrukturen für den Schutz der Biodiversität wünschenswert (Schall et al. 2018; Schall et al. 2020). Dies führt zu einer größeren Habitatvielfalt. Zudem kann die Bewirtschaftung ungleichaltriger Bestände komplizierter und kostenintensiver sein als

die Bewirtschaftung gleichaltriger Bestände (Price und Price 2006).

Politischer Rahmen

Ein überlegter Umgang mit Zielkonflikten und Synergien ist forstpolitisch wichtig, denn es existieren vielfältige (z. B. Winkel et al. 2015; Dieter 2010) und zunehmend polarisierende Erwartungen an den Wald (Prins et al. 2023). Diese Erwartungen können räumlich variieren, z. B. bezogen auf Wald im ländlichen oder im stadtnahen Raum. Zielkonflikte können auch durch politische Inkohärenz unterstützt werden oder erst entstehen (Elomina und Pülzl 2021). Politische Inkohärenz kann in Umfang und Ausmaß variieren. Die schwerwiegendsten Arten von Inkohärenz können auftreten, wenn die allgemeinen politischen Ziele nicht aufeinander abgestimmt sind. Wenn beispielsweise die EU oder die Bundesregierung ehrgeizige, aber konkurrierende Ziele für die Produktion von Holz einerseits und die Bereitstellung bestimmter regulierender Wald-ÖSL andererseits festlegt, kann dies zu komplexen Problemen der politischen Inkohärenz führen. In der Waldpolitik treten regelmäßig Fälle von Inkohärenz in unterschiedlichem Umfang und Ausmaß auf, allein, weil die Zuständigkeiten auf unterschiedlichen politischen Ebenen (Bundesland, Bund, EU) und Ressorts verteilt sind. Zahlreiche rechtlich bindende Instrumente sowie Strategien und Abkommen erhöhen zudem die Wahrscheinlichkeit für Zielkonflikte (Abbildung 2).

Die Dichte der existierenden Dokumente und Regelungen ist mittlerweile so hoch, dass eine Koordination und Harmonisierung der Ziele und Empfehlungen kaum mehr möglich erscheinen. Daher sind Zielkonflikte vorprogrammiert. Die EU-Biodiversitätsstrategie sieht beispielsweise Einschränkungen der Holznutzung zugunsten von strengen Schutzgebieten, Habitatbäumen und Totholz vor, was kurz- und mittelfristig zu einer rückläufigen Holzbereitstellung innerhalb der EU führen wird. Die Politik zur Renaturierung sieht beispielsweise die Wiederherstellung von 30 % der degradierten Ökosysteme vor, was auch mit der Einrichtung von neuen

Schutzgebieten einhergehen kann (SRU und Wissenschaftliche Beiräte 2023).

Aufgrund der rückläufigen Binnen-Holzbereitstellung wird eine Verlagerung der Holzernte und -produktion in andere Regionen, insbesondere in die Tropen, mit negativen Konsequenzen für die dortigen megadiversen Wälder befürchtet (Cerullo et al. 2023; Schier et al. 2022; Mayer et al. 2005)³. Ein solcher Verlagerungs-Effekt wird „Leakage“ genannt und verstößt gegen das Nachhaltigkeitsprinzip im Waldmanagement, welches Schäden an anderen Ökosystemen eindeutig ausschließt (European Community 1993). Ein Rückgang der inländischen Holzbereitstellung muss dabei jedoch nicht notwendigerweise zu erhöhten Holzimporten führen. Nach Schier et al. (2022) könnte der Rückgang der Holzbereitstellung in der EU weniger zu einer erhöhten Einfuhr als vielmehr zu einer geringeren Ausfuhr an Holz und Holzhalbwaren beitragen. Der Selbstversorgungsgrad der EU würde sich damit erhöhen und die steigende Produktion außerhalb der EU verbleibt dort zur Kompensation der geringeren Ausfuhren aus der EU.

Die fehlende Berücksichtigung von Leakage in Naturschutzprogrammen wird zunehmend bemängelt, verbunden mit der Forderung einer sorgfältigeren Planung von Schutzgebieten (Balmford et al. 2025). Zur Abschätzung solcher Effekte für die EU-Biodiversitätsstrategie siehe u. a. Dieter et al. (2020), Schier et al. (2022), Timm et al. (2022), Regelmann et al. (2023) und Fischer et al. (2024). Verlagerungseffekte durch Export negativer Umweltwirkungen in andere Länder werden durch so genanntes „Telecoupling“ erklärt. Damit ist gemeint, dass globale Märkte, Entscheidungen von Regierungen in entfernt liegenden Ländern sowie globale Zielsetzungen in zunehmendem Maße lokale Land-

(und Wald-) Nutzungsentscheidungen beeinflussen (Meyfroidt et al. 2020).

Für Deutschland relevante politische Zielsetzungen konkurrieren innerhalb des Europäischen „Green Deals“. Einerseits wird die stoffliche Nutzung von Holz als Voraussetzung für innovativen Gebäudebau vorgeschlagen, denn in der Holzverwendung im Bauwesen wird hohes Klimaschutspotenzial gesehen. Dieses Ziel spiegelt sich beispielsweise in der Initiative New European Bauhaus (NEB) (Schellnhuber et al. 2022) sowie in der Charta für Holz 2.0 des BMLEH⁴ oder in der aktuellen Holzbauinitiative der Bundesregierung⁵ wider.

Gewinnung nachhaltiger Energie aus Biomasse als wichtiger Baustein für die Abkehr von fossilen Energieträgern wird ebenfalls hohes Potenzial beigemessen (siehe auch Schulze et al. 2020). Andererseits schlägt die EU-Biodiversitätsstrategie, die ebenfalls Bestandteil des „Green Deals“ ist, Bewirtschaftungsbeschränkungen vor, welche beispielsweise für Deutschland einen Rückgang der Holzbereitstellung um 13 % bis 44 % bedeuten könnten (Regelmann et al. 2023).

Während manche Ziele im „Green Deal“ die Bioökonomie stützen sollen und den Klimaschutz als zentrales öffentliches Gut hervorheben, zielt die Biodiversitätsstrategie vor allem auf den Schutz der „Vielfalt des Lebens“ ab. Von beiden öffentlichen Gütern profitieren alle Bürgerinnen und Bürger, denn ihre Nutzung durch bestimmte Personen oder Gruppen beeinträchtigt die Nutzung durch andere Personen nicht. Eine gleichzeitige uneingeschränkte Erfüllung der Klimaschutzfunktion und des Schutzes der Biodiversität in Wäldern ist jedoch nicht möglich.

³Eine optimistischere Studie weist auf Möglichkeiten zur Steigerung der Holzproduktion durch Intensivierung bei wärmer werdendem Klima hin und kommt für Europa zu anderen Ergebnissen, siehe Di Fulvio et al. (2025). Diese Studie berücksichtigt jedoch die immer wichtiger werdenden Störungen durch Insekten, Wind und Feuer nicht ausreichend und ist somit kaum auf Deutschland übertragbar.

⁴<https://www.bmleh.de/DE/themen/wald/holz/charta-holz.html>.

⁵<https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/holzbauinitiative.pdf?blob=publicationFile&v=11>

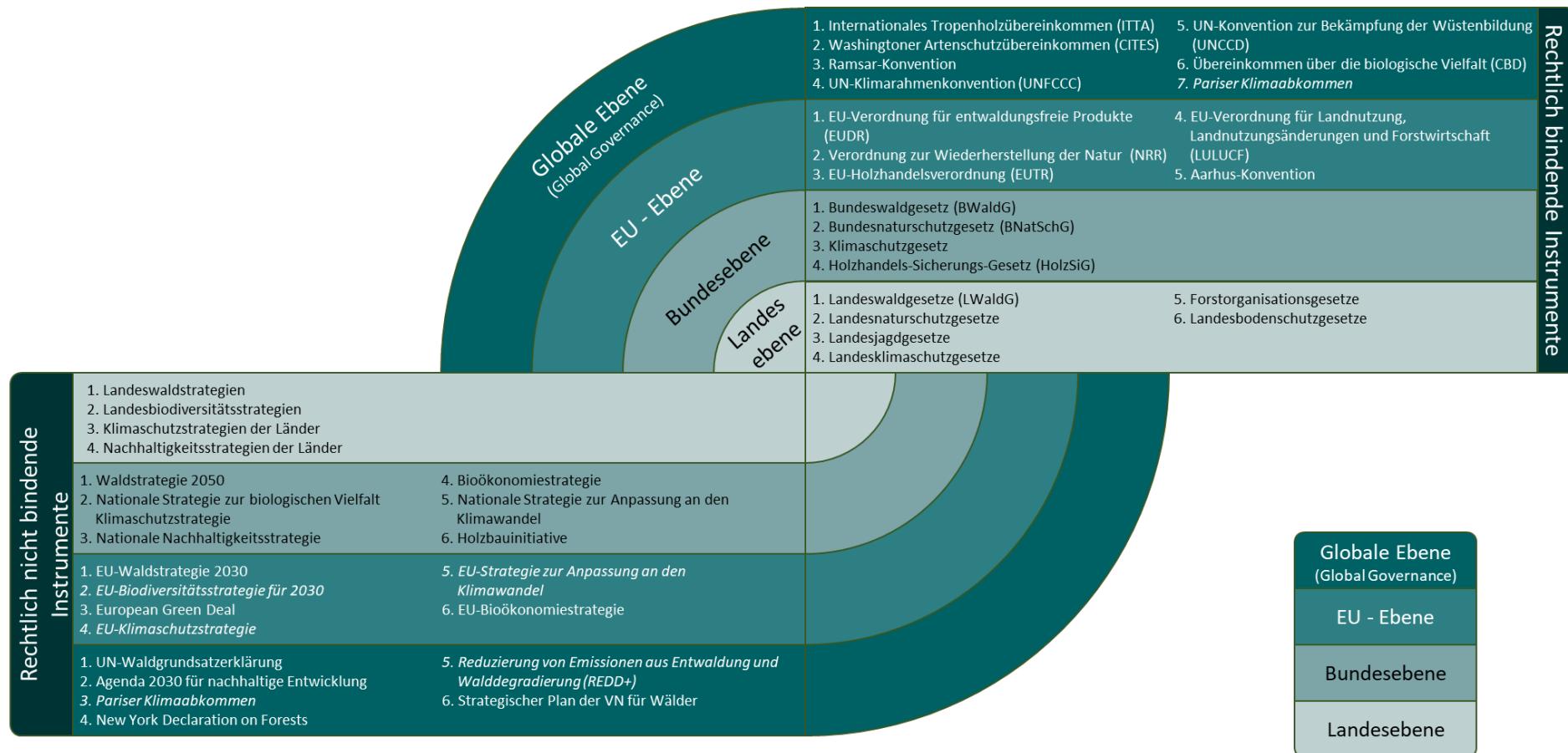


Abbildung 2: Übersicht zu rechtlich bindenden und nicht bindenden Politikinstrumenten (unvollständig; kursiv markierte Instrumente enthalten sowohl bindende als auch nicht bindende Bestandteile)

Die Maximierung der Klimaschutzwirkungen erfordert stabile Wälder mit möglichst hoher Dichte an Kohlenstoff pro Hektar bei hoher Bereitstellung an konstruktiv, z. B. im Gebäudebereich langfristig verwendbaren Holzsortimenten. Gleichzeitig müsste die Bereitstellung von Brennholzsortimenten reduziert werden, die derzeit insbesondere von Laubholz beigesteuert werden⁶. Die Erfüllung einiger Biodiversitätsziele ist dagegen an den strengen Schutz natürlicher Habitate gebunden, z. B. durch einzelne Habitatbäume oder durch alte naturnahe Waldbestände. Häufig wird dieses Ziel in einen Anteil geschützter Flächen übersetzt, in denen dann möglichst geringe oder keine menschlichen Nutzungseingriffe stattfinden. Wie man vor allem in von Nadelholz dominierten Nationalparken erkennen kann (z. B. Nationalpark Bayerischer Wald oder Nationalpark Harz), führt ein großflächiger Nutzungsverzicht nicht unbedingt zu optimalem Klimaschutz. Durch Störungen können unmittelbar nach der Aufgabe der forstwirtschaftlichen Nutzung bis dahin konventionell bewirtschaftete Wälder einerseits im Mittel fast 40% an Ökosystem-Kohlenstoff verlieren und andererseits eine Erhöhung der Biodiversität um 36% erfahren (Thom und Seidl 2016). Somit können in solchen Situationen die Klimaschutzwirkung und das Biodiversitätsziel mittelfristig nicht gleichzeitig uneingeschränkt erreicht werden. Es liegt ein typischer moderater Zielkonflikt vom Typ B vor (Abbildung 1), bei dem es um das Auffinden eines akzeptablen Kompromisses geht. Dieser Zielkonflikt kann im Falle von Laubwäldern, je nach Entwicklungsphase deutlich geringer ausfallen, denn dort treten Störungen bisher nicht so massiv auf und Zielkonflikte zwischen dem Schutz der Biodiversität und Klimaschutz fallen bei alten Laubwäldern weniger stark aus (Meyer et al. 2023). Eine weitere Studie hat darüber hinaus gezeigt, dass etablierte Schutzgebiete über einen längeren Zeitraum hinweg keine höheren, sondern tendenziell

sogar niedrigere Störungsraten und -intensitäten aufweisen können als forstwirtschaftlich genutzte Wälder (Krüger et al. 2025).

Ein Beispiel für einen weiteren Konflikt zwischen Zielsetzungen des Naturschutzes und der Waldbewirtschaftung stellen die abweichenden Vorstellungen zur Baumartenwahl dar. Die Natura 2000 Richtlinie strebt für die Lebensraumtypen beispielsweise einen günstigen Erhaltungszustand von naturnahen Waldökosystemen verbunden mit Verschlechterungsverboten an und somit den Schutz eines an historischen Verhältnissen orientierten, möglichst natürlichen Waldzustandes (statische Betrachtung). Das impliziert die Verjüngung der Wälder mit standortheimischen Baumarten der potenziell natürlichen Vegetation. Ein Waldumbau zur Klimaanpassung muss jedoch zukünftige Entwicklungen berücksichtigen (dynamische Betrachtung). Dies erfordert kurz- und mittelfristig die Einbringung von Baumarten und Herkünften mit einer höheren Anpassungskapazität an jetzige und zukünftige klimatische Bedingungen (Lindner et al. 2010) und damit oftmals eine abweichende Baumartenwahl im Vergleich zur aktuell vorhandenen Bestockung oder der potenziell natürlichen Vegetation. Baumarten mit der gewünschten Anpassungskapazität können neben wenigen derzeit angebauten Baumarten auch die gleichen Baumarten nur aus anderen Herkunftsgebieten mit anderem Klima oder andere europaheimische und außereuropäische Baumarten sein (eingeführte Baumarten aus anderen Ländern). Besser angepasste Baumarten aus entfernten Herkunftsgebieten innerhalb Europas würden sich zwar auch auf natürliche Weise bei geändertem Klima ausbreiten, allerdings passiert dies zu langsam. Daher wird ihre künstliche Einbringung unter dem Fachbegriff „Assisted migration“ diskutiert (Chakraborty et al. 2024). Aus dem oben Gesagten ergibt sich somit ein weiterer Zielkonflikt zwischen den Ansprüchen des Naturschutzes und den Erfordernissen der nach-

⁶ Durch Weiterentwicklung der Möglichkeiten der Laubholzverwendung in langlebigen Produkten kann sich dies mittel- bis langfristig ändern. Prognosen hierzu sind aber kaum möglich und wenn mit sehr großen Unsicherheiten verbunden.

haltigen multifunktionalen Bewirtschaftung von Wald.

Zielbewertung

Seit etwa 2005 hat sich bei der Beurteilung von möglichen nützlichen bzw. wünschenswerten Wirkungen von Ökosystemen der Begriff der ÖSL⁷ als Maßstab durchgesetzt. Konkret kann man die Zielerreichung mit Hilfe von Zielkriterien oder Indikatoren (Maes et al. 2016; Olander et al. 2018) für solche ÖSL messen und so beurteilen, wie hoch der Beitrag von waldbezogenen Handlungsalternativen (Pflanzung bestimmter Baumarten oder Mischungen, Durchforstungen oder Eingriffe zur Verjüngung) zu bestimmten ÖSL ist. In aller Regel ist dies bei waldbaulichen Entscheidungen aber nur mit großer Unsicherheit möglich, da funktionale Zusammenhänge zwischen der Struktur und Zusammensetzung von Wäldern und der Funktion ökologischer Prozesse zwar in Grundsätzen, aber nicht in ihrer konkreten Ausprägung bekannt und vorhersagbar sind (Bauhus und Pyttel 2015). Die Veränderungen im Rahmen des Klimawandels erschweren eine Einschätzung zudem.

Ein Kriterium zur Beurteilung der Holzbereitstellung ist beispielsweise die nachhaltig mögliche Holznutzungsmenge, bei der die natürliche Regenerationsfähigkeit des Waldes mindestens erhalten wird, z. B. indem der erwartete Zuwachs nicht durch die Nutzung überschritten wird. Dabei kann auch der Holzverwendungszweck beurteilt werden, wobei ein möglichst hoher Anteil stofflicher Holznutzung aufgrund der erhöhten Kohlenstoffspeicherung ökologisch aber auch unter dem Gesichtspunkt der Wertschöpfung zu bevorzugen ist. Zur Beurteilung der Biodiversität werden häufig die Artenzahl oder die Artenzusammensetzung (unter Berücksichtigung der Anteile der einzelnen Arten) herangezogen, es kann

aber auch die Menge und Qualität des Totholzes, die Unterschiedlichkeit von Ökosystemen auf der Landschaftsebene und vieles mehr sein. Als Indikator für den Klimaschutz wird oft die Menge an durchschnittlich in der Biomasse eines Waldes gespeichertem Kohlenstoff verwendet. Für waldbauliche Entscheidungen kann es wichtig sein, über den Wald als Kohlenstoffspeicher hinauszugehen und die ganze Wertschöpfungskette zu betrachten, da beispielsweise das durch Waldwirtschaft bereitgestellte Holz teilweise auch in der Form langlebiger Holzprodukte verwendet wird und wichtige Substitutionseffekte durch Ersatz von emissionsintensiven Konstruktionsmaterialien zu beachten sind (z. B. Härtl et al. 2017).

Eine Messung von Substitutionseffekten ist allerdings nur dann transparent, wenn vergleichbare Berechnungen für funktionsäquivalente Produktsysteme vorgenommen werden (Hafner und Schäfer 2017). Es entzieht sich zwar der Kontrolle der Waldbewirtschaftenden, wie das verkaufte Holz tatsächlich verwendet wird. Waldbewirtschaftende können aber mit einer optimalen Sortimentsaushaltung den Weg für eine entsprechend hochwertige Holznutzung ebnen.

Man kann auch die mit einzelnen Wald-ÖSL verbundene Wertschöpfung als Indikator zur Messung der Zielerreichung diskutieren. Informationen zur Wertschöpfung im Bereich der Holzbereitstellung liegen beispielsweise für den Cluster Forst und Holz vor⁸. Die Erfassung der gesamten Wertschöpfungskette Forst und Holz mit all ihren positiven und negativen Externalitäten ist aber einerseits methodisch schwierig (auch wegen Fragen der Zurechnung). Andererseits müsste aus Fairnessgründen die Wertschöpfung aller anderen Wald-ÖSL ähnlich bewertet werden. Man denke z. B. an die

⁷ Als ergänzendes Konzept wurden die Beiträge der Natur zu einem guten menschlichen Leben („Nature's Contributions to People“, NCP) eingeführt, z. B. in Díaz et al. (2018). NCP beziehen auch negative Auswirkungen der Natur für den Menschen ein und sind somit weiter gefasst als die ÖSL. Insbesondere der kulturelle Kontext ist dabei wichtig. In diesem Gutachten des WBW verwenden wir jedoch den schon länger eingeführten und bekannteren Begriff der ÖSL.

⁸ Siehe z. B. die statistischen Analysen zum Cluster Forst und Holz:
https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00107370

Wertschöpfung die mit der Bereitstellung von Erholungsmöglichkeiten im Touristik-, Sport- und Gesundheitsbereich verknüpft ist (eine ÖSL die im Übrigen verstärkt mit Schutzgebieten verbunden sein kann). Auch trägt der Bereich der Windenergie direkt zur Wertschöpfung bei und diversifiziert das Einkommen der Waldbesitzenden. Versicherungsleistungen des Schutzwaldes tragen zum ökonomischen Wohlstand von Gemeinden in Gebirgsregionen bei, und Biodiversität kann ein produktiver Input für die Bereitstellung von marktfähigen ÖSL sein (Paul et al. 2020). Hinzu kommen die Berücksichtigung der Governance-Aspekte und die institutionellen Herausforderungen bei einer solchen ganzheitlichen Bewertung, die somit kaum leistbar ist, zumindest nicht im Rahmen dieses Gutachtens des WBW. Eine lediglich partielle Darstellung sollte jedoch unterbleiben, weil dies andere ÖSL abwerten würde. Als möglicher Nachteil von auf Geld gestützten Indikatoren zur Messung von Zielerreichungen, wie die Wertschöpfung, muss zudem die oft implizite Annahme der Austauschbarkeit zwischen den verschiedenen Wald-ÖSL im Auge behalten werden. Eine höhere Kohlenstoffspeicherung könnte demnach beispielsweise eine niedrigere Wertschöpfung im Bereich der Biodiversität kompensieren. Austauschbarkeit anzunehmen ist nicht immer sinnvoll, z. B. bei systemkritischen Wald-ÖSL, deren Verlust irreversibel kaum bewertbare Schäden zur Folge haben könnte.

Abbildung 3 verdeutlicht schematisch wie eine Analyse bzw. Messung eines Zielkonflikts zwischen dem „Schutz der Biodiversität“ und der „Holznutzung“ aussehen kann. Die hypothetisch unter aktuellen Bedingungen maximalen Zielerreichungsmöglichkeiten für beide ÖSL sind in Abbildung 3 mit der blauen Linie dargestellt.

Die Holznutzung und der Schutz der Biodiversität werden in vielen Fällen als antagonistische, miteinander im Konflikt stehende Ziele bewertet (Ezquerro et al. 2023). In unserem hypothetischen Beispiel lässt sich jedoch von maximaler Holznutzung ausgehend (ganz rechts in Abbildung 3) zunächst ein großer

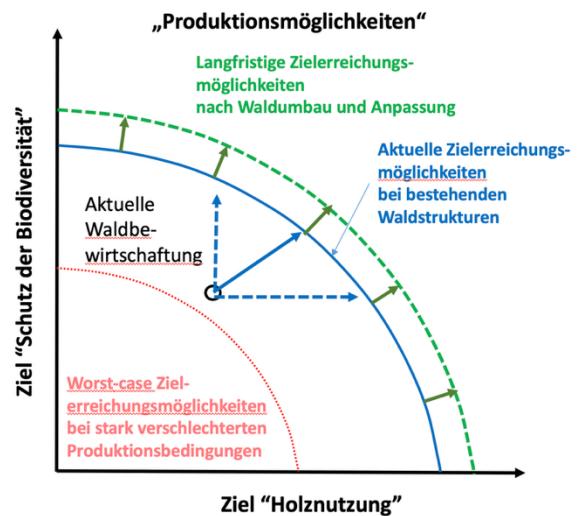


Abbildung 3: Schematische Darstellung von „Zielerreichungsmöglichkeiten“ zweier Wald-ÖSL.

Gewinn an Biodiversität erreichen, der mit nur geringen wirtschaftlichen Einbußen bei der Holznutzung verbunden ist, z. B. durch Belassen von Habitatbäumen mit nur geringem Volumen an wertvollem Holz. Auch bei einer relativ intensiven, naturnahen Waldbewirtschaftung können viele für die Habitatqualität bedeutsame Waldstrukturen erhalten werden (Storch et al. 2019). Weitere Steigerungen in den Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität erfordern aber zunehmend größeren Verzicht auf Holznutzung, z. B. durch Ausweisung größerer Flächen ohne Holzentnahme zum Schutz natürlicher Entwicklungen. Die Kurven der für beide Zielsetzungen möglichen Erfüllungsgrade können sich schließlich auch verlagern, zum Beispiel durch Veränderungen der Produktionsbedingungen aber auch durch Umgestaltung der Waldstrukturen (grüne oder rote Kurve).

Bei allem berechtigten Streben nach Effizienz darf nicht vergessen werden, dass waldbpolitische Empfehlungen oft durch tiefgreifende Unsicherheiten erschwert werden, die durch den Klimawandel weiter gesteigert werden. Dies bedeutet, dass einmal getroffene forstliche Entscheidungen unerwartet mit stark veränderten Umweltbedingungen oder Veränderungen von Werten und Einstellungen konfrontiert

werden können und dennoch zu akzeptablen Ergebnissen führen sollten. Handlungsempfehlungen anhand klassischer Maximierungsüberlegungen sind schwierig, wenn große Unsicherheit die Identifikation der „besten“ Entscheidung unmöglich macht. Unsicherheit legt somit „robuste“ Ansätze der Entscheidungsfindung nahe, die auf eine zuverlässige Bereitstellung von ÖSL abzielen und vorsorglich multiple mögliche Zielsetzungen und Zukunftsszenarien simultan berücksichtigen können (Lawrence et al. 2020). Die Ergebnisse solcher Entscheidungsmodelle sind oft durch Diversifizierung von Maßnahmen zum Erhalt und Aufbau von vielfältigen Handlungsmöglichkeiten und ein Bestreben nach Erhalt der Flexibilität gekennzeichnet (Knoke et al. 2017).

Vor dem aufgespannten Hintergrund sollen im Folgenden beispielhaft mögliche Zielkonflikte oder Synergien in der Waldbewirtschaftung identifiziert, beschrieben und analysiert werden.

3 Identifikation von Zielkonflikten und Synergien

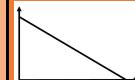
Die Vorteile einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung (siehe Kapitel 3.1.2) sind global allgemein anerkannt (Cesaro 2008; Cubbage et al. 2007; Martynova et al. 2021; Sharma et al. 2016). Selbst in intensiv bewirtschafteten, gepflanzten Wäldern und Plantagen spielen neben der Bereitstellung von Holz zusätzliche ÖSL eine zunehmend wichtigere Rolle (Bauhus et al. 2010; FAO 2023). Damit sollten bei der Waldbewirtschaftung möglichst mehrere ÖSL beachtet werden. Damit einhergehende Konflikte und Synergien zwischen verschiedenen Zielsetzungen der Waldbewirtschaftung sind vielfältig und können hier nur beispielhaft beleuchtet werden. Der WBW orientiert sich dazu an waldpolitisch wichtigen ÖSL (BMEL 2021a) und schätzt basierend auf dem vorhandenen einschlägigen Wissen ein, wie sich eine Ausweitung beispielhafter ÖSL auf andere Wald-ÖSL auswirken würde. Dabei wird der aktuelle Zustand in deutschen Wäldern als gedanklicher Ausgangspunkt verwendet. In Tabelle 1 sind übersichtsartig die eingeschätzten hauptsächlichen Wechselwirkungen zwischen jeweils zwei ÖSL auf der Landschaftsebene und bezogen auf einen Zeitraum von 30 Jahren (eine Generation) dargestellt. Es werden 90 Beispiele für Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Wald-ÖSL klassifiziert.

In rund der Hälfte der von uns analysierten Wechselwirkungen werden Zielkonflikte erkannt, während es sich bei 26 % um Synergien handelt (Tabelle 1). In 27 % der Paarvergleiche kann kein gegenseitiger Einfluss der ÖSL festgestellt werden. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Wechselwirkungen erfolgt in den Kapiteln 3.2 bis 3.7, ergänzt durch Detailinformationen in den Anhängen.

Das Vorgehen des WBW in Kapitel 3 orientiert sich an der Studie von Zabel et al. (2018). Dort wurde untersucht, wie sich der Ausbau der Energiegewinnung durch Windräder und durch thermische Holzverwertung auf andere Wald-ÖSL auswirken könnte. Im Folgenden erörtert dieses WBW-

Gutachten zunächst das grundsätzliche Ziel „Walderhalt“ als Basis aller Wald-ÖSL und den Grundsatz der „Multifunktionalität“. Anschließend folgt eine beispielhafte Beschreibung möglicher Wechselwirkungen zwischen folgenden Wald-ÖSL: Der Bereitstellung der Ressource Holz (3.2); Klimaschutz bzw. Kohlenstoffspeicherung (3.3); Biodiversität bzw. Naturschutz (3.4); Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus (3.5); Schutz vor Naturgefahren (3.6); Wasserspende, -qualität und Wasserrückhalt (3.7) sowie 7) Windkraft über Wald (3.8). Aufgrund des identifizierten Konfliktpotenzials zwischen der Holzbereitstellung und dem Schutz der Biodiversität werden diese beiden ÖSL etwas ausführlicher dargestellt als andere Wald-ÖSL.

Tabelle 1 Einschätzungen ausgewählter Wechselwirkungen bei Ausweitung einzelner Wald-ÖSL mit anderen ÖSL. Dargestellt werden überwiegende Wechselwirkungen auf Waldlandschaftsebene basierend auf Experten- und Expertinnen-Wissen im WBW für einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren. * Auf lokaler und regionaler Ebene. Bei Ausweitung des Biodiversitätsschutzes durch alte Wälder kann lokal/regional ein Zielkonflikt mit der Kohlenstoffspeicherung im Wald auftreten, wenn es sich um labile Wälder handelt, bei Erhöhung des Wasser-Rückhaltes im Wald durch Rückbau von Drainagegräben kommt es auf Grundwasserbeeinflussten Standorten zu Konflikten mit der Holzbereitstellung, bei Ausweitung der Windkraft kann lokal Erosion auftreten. ** Langfristig. # Kurzfristig. ## Bei Integration von Habitatbäumen in bewirtschaftete Wälder.

		Ausweitung der Bereitstellung von									
Einfluss auf die Bereitstellung von	Holz	Kohlenstoffspeicherung im Wald	Biodiversität		Erholung	Schutz vor Naturgefahren	Wasser			Windkraft	
	(1)	(2)	Alte Wälder (3)	Lichte Wälder (4)	(5)	(6)	Spende (7)	Qualität (8)	Rückhalt (9)	(10)	
Holz		B	C (B##)	B	B	B	C (A#)	B (D#)	B (C*D**)	A (B*)	
Kohlenstoffspeicherung im Wald	B		D (B*)	C	B	D	C	D	B	A	
Biodiversität alter Wälder	C	D (B*)		B	B	A	D	D	D	C (B*)	
Biodiversität lichter Wälder	B	C	B		B	C	A	D	D	C (B*)	
Erholung	B	B	A (B*)	A		A	D	D	D	B	
Schutz vor Naturgefahren	B	B	A	B	A		B	D	D	A (B*)	
Wasserspende	B	B (A, D)	D	A	D	B		B	B	A (B*)	
Wasserqualität	B	D	D	D	A	D	B		A	A (B*)	
Wasserrückhalt	B	D	D	D	A	D	B	A		A (B*)	
Windkraft	A (B*)	A	C (B*)	C (B*)	B	A (B*)	A (B*)	A (B*)	A (B*)		
A Kein Zielkonflikt: Neutrale Ziele			B Moderate Zielkonflikt		C Starker Zielkonflikt			D Synergie: Komplementäre Ziele			
											

3.1 Walderhalt und Multifunktionalität

3.1.1 Wald konkurriert mit alternativen Landnutzungsformen

Den Wald zu erhalten und erforderlichenfalls zu mehren ist das übergeordnete Ziel der Waldbiologie in Deutschland (vgl. z. B. Bundeswaldgesetz §1). Ohne Wald gibt es keine Wald-ÖSL. Allerdings ist selbst die gemeinhin als unkontrovers betrachtete Zielsetzung „Walderhalt und -mehrung“ mit Zielkonflikten behaftet, vor allem unter einem historischen und einem weltweiten Blickwinkel.

Historisch betrachtet musste der Wald in Mitteleuropa stark zurückgedrängt werden, um landwirtschaftliche Produktionsflächen für eine wachsende Bevölkerung zu gewinnen (Holmes 1975). Der wachsende Bedarf für Acker- und Weidefläche zog gravierende Waldzerstörungen nach sich. Wald wurde meist als unerwünschtes Kulturhindernis angesehen, weil er davon abhielt, den Boden für Landwirtschaft zu nutzen. Im späten Mittelalter und danach wurden dann erste Methoden zum Erhalt der Waldressourcen und für deren nachhaltige Bewirtschaftung entwickelt (Fernow 1911). Bereits seit dem 19. Jahrhundert wurden in Mitteleuropa großflächig degradierte Flächen wieder aufgeforstet (Erdozain et al. 2025). Nach dem zweiten Weltkrieg und extensiven Reparationshieben folgte eine weitere intensive Aufforstungswelle in Deutschland mit Höhepunkt Mitte der 60er Jahre (Zundel und Schwartz 1996; Küster 1998).

Der Zielkonflikt zwischen landwirtschaftlicher Produktion und Walderhalt ist heute vor allem in den Tropen und Subtropen vorzufinden. Walderhalt bedeutet dort fehlende Fläche für die landwirtschaftliche Produktion, wodurch Lebensmittelversorgungslücken entstehen können, so genannte „food gaps“. Dem kann beispielsweise durch innovative Landnutzungskonzepte gegengesteuert werden, die landwirtschaftliche Flächen mit nachhaltiger Intensivierung integrieren (Knoke et al. 2022). Weltweit ist die Waldfläche jedoch weiterhin rückläufig. Der globale Landnutzungswandel hat in

den letzten 1.000 Jahren rund 3/4 der Landflächen erfasst, wobei allein in der Periode 1960 bis 2019 32 % der Landfläche vom Menschen verändert wurden (Mehrfachveränderungen eingerechnet) (Winkler et al. 2021). In der Zeit von 1960 bis 2019 waren damit erhebliche Netto-Waldverluste von fast 82 Millionen Hektar verbunden (Estoque et al. 2022). Das entspricht einer Fläche von mehr als der doppelten Größe Deutschlands.

Das ambitionierte Ziel des globalen Walderhalts mit einer Netto-Null-Entwaldung bis 2020 wurde aufgrund des anhaltend starken Drucks vor allem auf die tropischen Waldflächen verfehlt (Lyons-White et al. 2020). Vor diesem Hintergrund hat die EU weitreichende Regelungen zur Sicherung des Handels mit entwaldungsfreien Produkten auf Europäischen Märkten (EUDR) erlassen, die umfassende Dokumentations- und Nachweispflichten sowohl für Holz verarbeitende Betriebe als auch für die Waldbewirtschaftenden in Deutschland mit sich bringen. Die EUDR verfolgt dabei das wichtige Ziel, tropische Entwaldung zu mindern. Allerdings kann es zu Leakage-Effekten kommen, weil durch Reduktion entwaldungsbasierter Produkte in der EU solche Produkte vermehrt in Länder außerhalb der EU exportiert werden könnten. Zudem ist ein Dokumentations- und Nachweisaufwand zur Umsetzung entwaldungsfreier Lieferketten erforderlich, was Holz und Holzprodukte aus europäischen Wäldern verteuern könnte. Bei jedem Holzeinschlag müssen Holzmengen und -arten, Produktionszeitraum und Geokoordinaten, versehen mit einer Sorgfaltserklärung auch in Deutschland, an die EU gemeldet werden. Es bleibt abzuwarten, in wie weit die EUDR-Regelungen z. B. durch Verteuerung der Beschaffungspreise kurz- und mittelfristig zu einer Verschiebung des Handels in weniger regulierte Länder führen werden (Köthke et al. 2023).

In Deutschland ist die Waldfläche mit rund 11,5 Millionen Hektar und einem Anteil von 32 % an der Landbedeckung in den letzten Jahren annähernd konstant. Von 2012 bis 2022 gingen 66.118 Hektar Wald verloren, aber es kamen 81.724 Hektar neuer Wald hinzu, was einer minimalen Zunahme von

+15.606 Hektar bei einem statistischen Fehler (Standardfehler) von ± 12.049 Hektar entspricht (<https://bwi.info>). Auch wenn es in Deutschland zu keinem Netto-Waldflächenverlust gekommen ist, hat die Waldflächendynamik Änderungen in der Qualität der Wälder zur Folge. Die ÖSL verloren gegangener älterer Waldbestände können beispielsweise nicht unmittelbar durch die Neuanpflanzung von Wald kompensiert werden.

Zielkonflikte können im Falle von Waldmehrungen mit dem Lebensraum von Offenlandarten auftreten (Brockerhoff et al. 2008). Dagegen werden durch Waldmehrung in waldarmen Regionen neue Lebensräume für waldbewohnende Arten und bei entsprechender Saumgestaltung auch für zahlreiche waldrand-

bewohnende Arten geschaffen. Bei der räumlichen Planung neuer Waldflächen ist vor diesem Hintergrund sorgsam auf eine Minimierung solcher Zielkonflikte zu achten.

Zur Veranschaulichung konkreter Zielkonflikte im Zusammenhang mit dem Erhalt des Waldes finden sich im Folgenden der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (Box 2) und die Regulierung der Schalenwilddichte (Box 3) als illustrierende Fallbeispiele. Hier geht es allerdings nicht um den Erhalt der Waldfläche per se durch Beschränkung der Ausdehnung anderer Landnutzungen (wie oben beschrieben) sondern um den Erhalt von Waldbeständen.

Box 2: Schutz von Bäumen durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln

Im Vergleich zur Landwirtschaft ist die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) im Wald kein Teil der regulären Bewirtschaftung zur Sicherung der Produktion, sondern setzt eine durch Monitoringmaßnahmen nachgewiesene Gefährdungssituationen voraus (u. a. Petercord 2015; Möller und Heinitz 2016; Schafellner und Möller 2019). In Deutschland liegt der Anteil der mit PSM behandelten Waldfläche pro Jahr daher deutlich unter 1 % (Berendes et al. 2025). Der Einsatz von PSM für den Erhalt von Baumbeständen und Wäldern wird jedoch regelmäßig kontrovers diskutiert. Im Unterschied zur Landwirtschaft soll die Verwendung von PSM die Funktion langlebiger Waldökosysteme erhalten und nicht durch ein einmaliges Schadereignis gefährden.

Der vordergründige Zielkonflikt bei der Verwendung von PSM im Wald besteht aufgrund der konkurrierenden Prioritäten des Schutzes von Pflanzen vs. des Schutzes von Insekten bzw. anderer Tiere (Scherzinger 1996).

Konfliktpotenziale bestehen u. a. in der unterschiedlichen Bewertung eines intakten Kronendachs zur Kohlenstoffbindung durch Fotosynthese und zur Pufferwirkung gegenüber Temperatur- und Strahlungsextremen vor dem Hintergrund von Massengradationen blattfressender Insekten. Die Gefährdung des Fotosynthesevermögens und damit der Klimaschutzleistung durch den Blattverlust wird von Befürwortern als auch von Gegnern des Einsatzes von PSM zwar weitgehend akzeptiert, allerdings in den Zielhierarchien unterschiedlich bewertet. Fraßschäden durch herbivore Insekten führen in der Regel zu einer deutlichen Schwächung der Bäume gegenüber Folgeschädigungen (u. a. Delb 1996; Schafellner und Möller 2019).

Wildverbiss ist eine der wichtigsten Einflussgrößen auf den Höhenzuwachs junger Bäume (Bödeker et al. 2023). Er wirkt nicht gleichmäßig auf alle Baumarten, sondern bestimmte Arten werden bevorzugt verbissen, so dass solche Arten einen Nachteil im Konkurrenzkampf vor allem um Licht haben. Die Folge eines solchen selektiven Verbisses ist die Entmischung von Jungbeständen hin zu Beständen, die gegenüber ihrem Potenzial an Baumarten verarmt sind. Dabei werden insbesondere seltene Baumarten der Gattung *Sorbus* und Arten wie Eiche, Linde und Tanne beeinträchtigt oder gehen in vielen Beständen verloren, die gerade für die Anpassung an den Klimawandel von großer Bedeutung sind. Finanzielle Schäden durch unangepasste Wildbestände und überhöhten Wildverbiss allein durch Rehwild können ein Ausmaß in der Größenordnung der zukünftig durch den Klimawandel zu erwartenden Kosten für die Waldbesitzenden annehmen (Knoke et al. 2024).

Die Regulierung der Schalenwildbestände ist folglich unerlässlich, um einen widerstandsfähigen, anpassungsfähigen und resilienten Wald zu erzielen. Hierzu sind an wildbiologischen Erkenntnissen orientierte Bejagungsstrategien geeignet. Auch die Wiederbesiedlung bestimmter Regionen in Deutschland durch Prädatoren kann hilfreich sein. Hinsichtlich der Wirkung natürlicher Fressfeinde auf den Rehwildbestand konnten Randon et al. (2020) zeigen, dass der Wolf Rehwildpopulationen in einem Zeitraum von 10 Jahren nach der Besiedlung eines zuvor Wolfsfreien Gebietes stark reduzieren kann. Die Autoren führen dies jedoch vor allem auf das reduzierte Fluchtverhalten des nicht an den Wolf gewöhnten Rehwildes zurück. Eine Reduktion überhöhter Wildbestände steht jedoch im Konflikt mit dem traditionellen jagdlichen Hegegedanken, der auf einen hohen Bestand insbesondere an männlichem Wild ausgerichtet ist. Der oben skizzierte starke Zielkonflikt wird beispielsweise im Bayerischen Waldgesetz durch den Grundsatz „Wald vor Wild“ deutlich¹. Ein Grundsatz, der allerdings auch zu verhärteten Fronten zwischen den Forstbehörden und großen Teilen der Jägerschaft geführt hat. In Zukunft ist hinsichtlich dieses Konfliktes eine bessere Kommunikation notwendig. Vegetationsgutachten mit statistisch belastbaren Ergebnissen sowie gemeinsame Revierbegänge von Waldbesitzenden, Jagenden und dem Forstpersonal können helfen, ein besseres gegenseitiges Verständnis aufzubauen. Flankiert durch finanzielle Schadenskalkulationen können Waldbesitzende so z. B. informierte Entscheidungen hinsichtlich zukünftiger Verpachtungen von Waldflächen treffen.

Box 3: Regulierung der Populationsdichte von Schalenwild

Das geringe Vorkommen natürlicher Feinde, intensive Landnutzung mit niedrigem winterlichen Biomassevorrat in Offenlandschaften aber mit enormen Nahrungs- und Einstandspotentialen im Sommer sowie eine reduzierte Bejagungsintensität führen oft zu überhöhten Schalenwildbeständen (Donini et al. 2024). Hohe Wilddichten verhindern das ungestörte Aufwachsen natürlich verjüngter oder künstlich begründeter Waldbestände (Holzer et al. 2024), wenn diese nicht mit teuren Schutzmaßnahmen gesichert werden (Ammer et al. 2010). Praktiken wie eine zurückhaltende Bejagung gerade des weiblichen Wildes – also der Zuwachsträger der Wildbestände – und/oder die Fütterung des Rehwildes außerhalb der Notzeit führen darüber hinaus zu unnatürlich hohen Wildbeständen und überhöhtem Wildverbiss.

3.1.2 Multifunktionale Waldbewirtschaftung

Das Prinzip der Multifunktionalität beinhaltet die Bereitstellung mehrerer Wald-ÖSL gleichzeitig und setzt somit die Existenz und Anerkennung multipler berechtigter Zielsetzungen voraus. Die Entstehung von Zielkonflikten bzw. Zielsynergien ist naturgemäß an zwei oder mehrere Zielsetzungen gebunden. Somit machen multiple Zielsetzungen die Analyse von Zielkonflikten und Zielsynergien überhaupt erst möglich bzw. erforderlich.

Häufig wird unter multifunktionaler Bewirtschaftung die systematische Bereitstellung mehrerer ÖSL neben einer „Haupt-ÖSL“ verstanden, wie z. B. die Bereitstellung von Nahrungsmitteln in der Landwirtschaft bei gleichzeitigem Schutz der Biodiversität. Garibaldi et al. (2023) beschreiben in diesem Kontext die Umwandlung einer heterogenen, multifunktionalen Landschaft in eine monofunktionale Agrarlandschaft durch landschaftliche Homogenisierung als eine

Abkehr von einer multifunktionalen Nutzung. Vor diesem Hintergrund kann man auch die Einführung der geregelten Forstwirtschaft mit dem Ziel einer hohen Holzproduktion und Holzbereitstellung vor rund 200 Jahren als Trend zur Monofunktionalisierung betrachten (Hölzl 2010). Eine Motivation dieser Umstellung war es, die Kontrolle und Steuerung der nachhaltigen, aber auf Holzbereitstellung ausgerichteten Waldbewirtschaftung zu verbessern (Bauhus et al. 2009; Puettmann 2009).

Eine einheitliche und klare Definition von Multifunktionalität in der Landnutzung, zu der ja auch die Waldbewirtschaftung zählt, fehlt jedoch (Stürck und Verburg 2017). Wie schon weiter oben erwähnt, sind vor allem die Landschaftsebene oder eine regionale Raumebene vorteilhafte räumliche Einheiten für die Analyse von Multifunktionalität. Vor dem Hintergrund einer Verbesserung von Multifunktionalität ist folgende Definition hilfreich:

Box 4: Optimale Multifunktionalität

Optimale Multifunktionalität für eine Waldlandschaft wird als Bereitstellung multipler Wald-ÖSL definiert, deren Menge und Qualität so nah wie möglich an den für die einzelnen ÖSL jeweils erwünschten Erfüllungsgrad herankommt (Pohjanmies et al. 2021).

Multifunktionalität erfordert demnach im Gegensatz zur Spezialisierung auf die Bereitstellung einer einzigen ÖSL meist einen Kompromiss. Wenn Zielkonflikte existieren, ist es nicht möglich, gleichzeitig alle wünschenswerten ÖSL uneingeschränkt zu erreichen. Ähnlich wie Zielkonflikte wirkt auch die Unsicherheit bezüglich der künftigen Waldentwicklung. Angesichts vieler möglicher Zukunftsszenarien existiert keine Art der Waldbewirtschaftung, die für alle denkbaren Zukunftsszenarien die maximale ÖSL bereitstellen kann.

Die Bereitstellung multipler Ökosystemleistungen erfordert vielfach eine Mischung verschiedener Baumarten auf der Bestandes- und der Landschaftsebene. Für größere räumliche Betrachtungsebenen werden multiple ÖSL und eine Kompensation von Unsicherheiten am besten durch eine Mischung ganz verschiedener Bestandes- oder Landnut-

zungstypen erreicht, die jeweils unterschiedliche ÖSL erbringen. Dies belegen Studien zur Landnutzung (van der Plas et al. 2016; van der Plas et al. 2019; Grass et al. 2020; Garibaldi et al. 2023; Frei et al. 2020; Barbaro et al. 2021; Knoke et al. 2016), aber auch Studien zur Waldbewirtschaftung (Knoke et al. 2025; Friedrich et al. 2021; Gregor et al. 2022; Gregor et al. 2024; Gang et al. 2024). So sollte beispielsweise derjenige Bestandestyp, der die Holzproduktion wahrscheinlich im Durchschnitt auf den gegebenen Standorten maximieren würde, nicht vollflächig angebaut werden, wenn weitere ÖSL wie z. B. Habitatleistungen wichtig sind, die durch andere Bestandestypen oder durch strenge Schutzgebiete besser erbracht werden. Sobald verschiedene Ökosysteme also unterschiedlich zu verschiedenen Funktionen und ÖSL beitragen, erfordert Multi-

funktionalität eine diversifizierte Landschaftszusammensetzung (van der Plas et al. 2019).

Multifunktionalität bedeutet somit auch eine Suche nach möglichen Kompromissvorschlägen, um mehrere Zielsetzungen möglichst gut erreichen zu können. Das kann die aus heutiger Sicht erwartbaren Ergebnisse bestimmter, eventuell in der Vergangenheit präferierter ÖSL wie z. B. die Holzbereitstellung senken, was dann auch Auswirkungen auf die mit diesen ÖSL verbundenen Wertschöpfungsketten haben kann. Solche Wertschöpfungsketten bestehen jedoch nicht nur für die Holzbereitstellung, sondern auch für andere ÖSL, z. B. assoziiert mit der Bereitstellung von Erholungsmöglichkeiten im Wald. Eine umfassende Quantifizierung möglicher Einflüsse auf Wertschöpfungsketten für verschiedene Wald-ÖSL ist jedoch derzeit nicht verfügbar. Was ein akzeptabler Kompromiss sein könnte, entscheiden immer die Akteure, wobei die tatsächlichen Verfügungsrechte zu beachten sind. Durch notwendige Reduktion bisher vorherrschender marktfähiger ÖSL entstehen beispielsweise Opportunitätskosten, die bislang von den Waldbesitzenden getragen werden (Friedrich et al. 2021). Daher erfordert Multifunktionalität als Kompromiss oft eine finanzielle Prämie. Um erwartete Ergebnisverluste zu reduzieren, können beispielsweise eine Priorisierung/Gewichtung der Zielsetzungen sowie eine räumliche Differenzierung

nach vorrangig wünschenswerten ÖSL eingesetzt werden, um die multiplen ÖSL auf der regionalen Ebene auszubalancieren (siehe z. B. Kap. 4).

Aus dem oben Gesagten folgt, dass sich Multifunktionalität mit einer Maximierung bzw. uneingeschränkten Bereitstellung der Ressource Holz oder anderer einzelner Wald-ÖSL nicht verträgt. Durch die in der Vergangenheit priorisierte Holzbereitstellung liegt die Holznutzung pro Hektar und Jahr in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern derzeit auf einem hohen Niveau (siehe Abbildung A2, Anhang „Bereitstellung der Ressource Holz“). Eine bessere Berücksichtigung anderer Wald-ÖSL im Rahmen der Multifunktionalität der Waldbewirtschaftung bedeutet vor diesem Hintergrund eine tendenziell eher rückläufige Holzbereitstellung mit entsprechendem Einfluss auf nachgelagerte Bereiche. Allerdings hängt es vom konkreten Szenario ab, wie stark sich die maximal mögliche Holzbereitstellung und die Multifunktionalität entgegenstehen.

Auch bei Fokussierung auf die Holzbereitstellung sollte eine Diversifizierung der Bestandestypen auf Waldlandschaftsebene zur Absicherung gegenüber Unsicherheiten erfolgen, um eine robuste Bereitstellung der Ressource Holz zu erreichen (z. B. Knoke et al. 2025).

Box 5: Robuste Bereitstellung der Ökosystemleistung Holz

Ökosystemleistungen sollen zuverlässig erbracht werden. Robuste Holzbereitstellung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine bestimmte Mindestholzmenge unter verschiedenen Umweltbedingungen und im Rahmen möglichst vieler möglicher Zukunftsszenarien bereitgestellt wird – unabhängig davon, welches Szenario letztlich eintritt. Ein Wald, der diese Anforderung erfüllt, „minimiert unser Bedauern“ bezüglich der getroffenen Entscheidung, sollten sich die Umweltbedingungen nicht wie erwartet entwickeln. Tritt zukünftig ein Szenario ein, für welches sich im Rückblick zeigt, dass die gewählte Waldbewirtschaftung nicht optimal war, soll somit der daraus resultierende Nachteil möglichst gering ausfallen. Diese Entscheidungsregel des geringsten Bedauerns findet beispielsweise auch Anwendung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Klimapolitik (z. B. DeCanio et al. 2022).

Robuste Bereitstellungsmöglichkeiten der bislang gegenüber der Holzbereitstellung weniger gewichteten Wald-ÖSL können darüber hinaus durch eine systematische multifunktionale Optimierung mehr oder weniger stark verbessert werden (siehe Lösungsmöglichkeiten, Kap. 4.2). Jedoch darf bei Multifunktionalität für keine der einzelnen Wald-ÖSL automatisch eine maximale Bereitstellung erwartet werden.

3.2 Bereitstellung der Ressource Holz

Holz ist nach wie vor das bei weitem wichtigste kommerzielle Produkt der Bewirtschaftung von Wald in Deutschland. Im Gegensatz zu den meisten anderen Wald-ÖSL ist die Bereitstellung der natürlichen Ressource Holz eine ÖSL, die nachhaltig nur mit Hilfe einer planmäßigen Bewirtschaftung erreicht werden kann. Durch die Einführung einer geregelten Forstwirtschaft vor rund 200 Jahren wurde in einem kontinuierlichen Rationalisierungsprozess vielerorts auf eine gut kontrollier- und steuerbare Holzproduktion und -bereitstellung mit Hilfe künstlich begründeter, relativ artenärmer und homogener Waldbestände abgezielt. Dieser Prozess hat über Jahrzehnte hinweg zu einer hohen Holzbereitstellung pro Hektar Waldfläche in Deutschland geführt. Allerdings zeigte sich auch schon bald eine hohe Störungsanfälligkeit der homogenisierten Wälder (Köhl und Knoke 2024). Eine Reihe von anderen ÖSL wurde lange bei der Bewirtschaftung des Waldes dagegen weniger beachtet, unter anderem weil diese Leistungen des Waldes jahrzehntelang von niemandem finanziell

honoriert wurden. Auch aktuell sind Honorierungen für die meisten Wald-ÖSL unzureichend bzw. nicht vorhanden.

In Deutschland wurden nach der für die internationale Berichterstattung verwendeten Methode der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts für Waldwirtschaft (Jochem et al. 2015) von 1995 bis 2023 zwischen 45 und 93 Millionen Kubikmeter Holz (Erntefestmeter Derbholz, Efm⁹) eingeschlagen (Abbildung A1 in Anhang „Bereitstellung der Ressource Holz“). Von 1995 bis 2007 ist das Volumen des eingeschlagenen Holzes deutlich gestiegen und hat sich seitdem auf circa 75 Millionen Efm pro Jahr stabilisiert, mit einem kurzen Anstieg in Folge der Trockenschäden 2018 - 2022. Die 4. Bundeswaldinventur weist zwischen 2012 und 2022 einen ähnlichen durchschnittlichen jährlichen Holzeinschlag von 73 ($\pm 0,9$)¹⁰ Millionen Efm aus (<https://bwi.info>). Dies entspricht 91% des Holzzuwachses (80 ($\pm 0,6$) Millionen Efm). Damit liegt Deutschland bei der flächenbezogenen Holznutzung mit knapp 7 Efm pro Hektar pro Jahr im weltweiten Vergleich im Bereich der Spitzengruppe aller Länder (Abbildung A2).

Die Verwendung von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft soll aufgrund der EU-Waldstrategie zukünftig weiter zunehmen (European Union 2021). Nachhaltige Forstwirtschaft unterstellt hier vereinfachend, dass jährlich nicht mehr Holz genutzt wird als nachwächst (siehe Box 6).

⁹ Ein Kubikmeter verkaufbares Holz, meist als Erntefestmeter ohne Rinde (Efm o. R.) wird von der üblichen Maßeinheit für das Volumen des im Walde stehenden Holzes (Vorratsfestmeter) durch Abzug des so genannten Ernteverlustes abgeleitet (Volumen des Stocks, Holzverlust durch Anbringen der Trennschnitte die forstübliche Abrundung bei der Durchmesserermittlung sowie Überlängen).

¹⁰ Standardfehler bzw. Unsicherheit des jährlichen Holzeinschlags.

Box 6: Vereinfachte Modellvorstellung zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung

Das Konzept der nachhaltigen Waldbewirtschaftung geht vom Idealbild des sogenannten Normalwaldes aus. Damit ist ein Wald gemeint, der im einfachsten Fall aus nur einer Baumart besteht und bei dem alle Altersstufen mit der gleichen Flächengröße vertreten sind. Im Laufe jeden Jahres wächst jede Altersstufe ein Jahr weiter, die älteste Altersstufe wird geerntet und neu aufgeforstet. Im nächsten Jahr wachsen wieder alle Altersstufen und die älteste wird erneut geerntet und neu verjüngt. Die Bestandesstruktur, das heißt die Flächen der Altersstufen und deren Vorräte, bleiben bei diesem Waldmodell zu einem bestimmten Zeitpunkt im Jahr, z. B. am Anfang oder Ende, immer gleich. Daher müssen zwangsläufig auch Zuwachs und Holznutzung jedes Jahr gleich hoch sein; anderenfalls würden sich Änderungen im Vorrat ergeben. Unter diesen Umständen bietet der Wald jedes Jahr das gleiche Nutzungspotential, das auch genau dem jährlichen Zuwachs entspricht.

Dieses Normalwaldmodell dient ausgezeichnet zum Verständlich-Machen nachhaltiger Waldbewirtschaftung. Es ist aber ein idealisiertes Modell, das in den meisten Fällen nicht der Realität entspricht. Durch natürliche Störungen oder menschliche Eingriffe sind häufig die Altersstufen mit ganz unterschiedlichen Flächen vertreten, es kommen verschiedenste Baumarten zu ganz unterschiedlichen Anteilen vor und die einzelnen Waldbestände sind häufig ungleichaltrig, also gar nicht mehr einer Altersstufe eindeutig zuzuordnen. In Deutschland beispielsweise ist die Fläche des Waldes vor allem durch die sogenannten Reparationshiebe nach dem zweiten Weltkrieg ungleich auf Altersstufen verteilt.

Aus einer solchen Ungleichverteilung ergibt sich, dass im Zeitablauf unterschiedliche Zuwächse und Nutzungspotentiale erwachsen. In Deutschland dominierten nach den Reparationshieben infolge des 2. Weltkriegs die jungen Altersstufen mit ihren hohen Zuwächsen. Der Einschlag lag dabei viele Jahrzehnte unter dem Zuwachs, da die jungen, wuchskräftigen Bestände noch gar nicht hiebsreif waren. In naher Zeit wird sich das Bild umkehren: Die vormals jungen Bestände lassen in ihrem Wachstum nach und werden hiebsreif. Damit beginnt eine Phase, in der in Deutschland die Nutzung über dem Zuwachs liegen wird. Nachhaltigkeit der Waldbewirtschaftung unter solchen ungleichen Ausgangsvoraussetzungen zeigt sich in der Anpassung des Einschlages an die gegebenen natürlichen Voraussetzungen. Ein wichtiges Instrument zur Einhaltung von Nachhaltigkeit ist hierbei, Zielalter oder Zieldurchmesser der Bäume für die Holznutzung langfristig festzulegen und einzuhalten.

Da bis 2012 rein rechnerisch das Holzvolumen ausgeschiedener Bäume¹¹ unterhalb des Holzzuwachses lag (BMEL 2014), wurde generell eine Steigerung der Holznutzung als ein mögliches Szenario erachtet, um die Entwicklung der Bioökonomie und insbesondere die Verwendung von Holz im Bausektor zu fördern (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2020). Um die Umsetzbarkeit einer

Erhöhung des Anteils von Gebäuden in Holzbauweise (Holzbauquote) zu prüfen, wurde beispielsweise auf vom BMEL (2016) publizierte Szenarien zum Holzaufkommen zurückgegriffen. Diese Szenarien wiesen einen erwarteten Vorratsanstieg der Baumartengruppen Fichte und Kiefer in einem Durchmesserbereich ab 30 cm BHD von 245 Millionen Vorratsfestmetern bis 2052 aus, verbunden mit zusätzlichen

¹¹ So genannter „Abgang“, der alle Ausscheidegründe umfasst, auch das Holz von Bäumen die durch Kalamitäten ausgeschieden sind.

Nutzungsmöglichkeiten dieser Holzarten von rund 8 Millionen Vorratsfestmetern pro Jahr (Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik 2018). Die Waldstrategie 2050 sieht dementsprechend bis 2030 eine Steigerung der Holzbauquote im Wohnungsbau in Deutschland auf 30 % vor (BMEL 2021b).

Bei der Betrachtung der Holzbereitstellung müssen jedoch kurzfristige und mittelfristige Auswirkungen, z. B. über die nächsten 30 Jahre, also jetzige Generationen betreffend, von langfristigen Auswirkungen unterschieden werden, die mehrere kommende Generationen betreffen. So führt der vielerorts laufende Waldumbau durch die frühzeitige Einbringung von Vorausverjüngung unter dem Kronenschirm von Altbäumen kurz- und mittelfristig zu höherer Holzbereitstellung, insbesondere in den umzubauenden Nadelholzbeständen (z.B. Hilmers et al. 2020). Gleichzeitig wird durch Entnahme noch produktiver Bäume der Holzzuwachs gesenkt. Mittelfristig können sich somit Holznutzungsmöglichkeiten weiter reduzieren, vor allem wenn der Waldumbau auf weniger produktive Baumarten hinausläuft. Allerdings reduziert die geänderte Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur (mehr ungleichaltrige Bestände) langfristig die Störungsanfälligkeit der Waldbestände (Mohr et al. 2024), wodurch eventuell die planmäßigen Nutzungsmöglichkeiten wieder ansteigen könnten. Mögliche Lösungen zum Umgang mit zumindest zeitweise reduziertem Angebot aus inländischen Wäldern wären in diesem Zusammenhang auch 1) die Reduktion des Frischholzbedarfs durch Wiederverwendung von Bauhölzern, aber auch Möbelholz und Holz anderer Produkte, 2) die stoffliche Nutzung von Laubholz oder, 3) die stoffliche Verwendung von Brennholzsortimenten.

Aus dem gedanklichen Szenario einer mittelfristig gesteigerten Bereitstellung der Ressource Holz ergeben sich konkrete Wechselwirkungen mit anderen

ÖSL des Waldes (siehe Tabelle 1). Diese Wechselwirkungen bestehen meist aus moderaten Zielkonflikten (Typ B, Abbildung 1). Ein Beispiel für einen moderaten Zielkonflikt ist die Wechselwirkung zwischen der Holzbereitstellung und dem Kohlenstoffspeicher im Wald (wie schon in Kap. 2 beleuchtet)¹².

Eine umfassende Betrachtung der Wirkung der Waldbewirtschaftung auf den Kohlenstoffhaushalt sollte jedoch über den Wald hinausgehen und auch die zusätzliche Klimaschutzwirkung von Holzprodukten berücksichtigen. Neben der alleinigen Betrachtung der Menge der Holzbereitstellung ist für die spätere Holzverwendung auch die Holzart sowie die Qualität und Dimension der Stämme entscheidend dafür, ob eine stoffliche Nutzung mit langlebigen Holzprodukten und eine entsprechend größere und längere Kohlenstoffspeicherung möglich ist. Der mindestens mittelfristig existierende Zielkonflikt zwischen Holzbereitstellung und Kohlenstoffspeicherung auf Ebene des Waldes kann auf einer höheren Betrachtungsebene (Wirtschaftskreislauf) vermindert werden, wenn die Speicher- und Klimaschutzwirkungen der Holzprodukte in die Betrachtung einbezogen werden. Eine eingehendere Erörterung der Zusammenhänge findet sich im Anhang „Bereitstellung der Ressource Holz“. Hierzu verweisen wir auf die Stellungnahme des WBW „Die Ermittlung der Klimaschutzeistung von Wald und Holznutzung: Orientierungshilfe in einer kontroversen Debatte“ (WBW 2025), sowie auf eine Veröffentlichung des Thünen-Instituts (Rüter 2023).

Einen starken Zielkonflikt (Typ C) bildet die Wechselwirkung zwischen der Holzbereitstellung und dem Schutz der Biodiversität, wenn letzteres das Ermöglichen alter, naturnaher Waldökosysteme umfasst. Der starke Zielkonflikt entsteht vor allem, da alte Wälder mit ihrer typischen Flora und Fauna nur unter Aufgabe der Holzernte erreicht werden können.

¹² Die erhöhte Holzbereitstellung senkt den Waldkohlenstoffspeicher zumindest kurz- und mittelfristig. Setzt jedoch durch kluge Holznutzung eine Stabilisierung von aktuell labilen Waldstrukturen ein, kann der Kohlenstoffspeicher langfristig wieder steigen.

Waldflächen, auf denen Holz bereitgestellt wird, können sich unter dieser Prämisse nicht zu alten, naturnahen Wäldern entwickeln. Bei gleichmäßiger Verteilung der Flächen mit Nutzungsverzicht sinken die Holzbereitstellungsmöglichkeiten kurz- bis mittelfristig im Verhältnis zur Größe der streng geschützten Flächen (siehe auch Beschreibung eines starken Zielkonfliktes in Kapitel 2). Der starke Zielkonflikt gilt im Prinzip auch auf einer kleineren Betrachtungsebene. Das Belassen von marktfähigem Holz im Wald, um Totholzvorräte aufzubauen, schließt die Verwendung dieses Holzes für andere Zwecke, z. B. als Möbelstück oder als Fußboden, aus. Dieser Zielkonflikt lässt sich nicht auflösen, auf der Bestandes- und Landschaftsebene kann er allerdings gemindert werden, siehe hierzu Beispiele in Kapitel 4.2.2.

Anders als es die „Kielwassertheorie“ vermuten lassen würde, können keine echten Synergien anderer ÖSL mit einer Steigerung der Holzbereitstellung identifiziert werden. Allerdings bilden die Holzbereitstellung und die Gewinnung von Windkraft über Wald (je nach Ausgestaltung) neutrale Ziele (Typ A), die sich nicht gegenseitig beeinträchtigen (siehe Tabelle 1).

Grenzen der Holzbereitstellung: Eine dauerhafte Steigerung der Holzbereitstellung aus deutschen Wäldern bei gleichzeitig verstärkter Berücksichtigung anderer in Konflikt stehender Zielsetzungen ist ein ambitioniertes, eventuell nur eingeschränkt erreichbares Szenario. Schon das langfristige Aufrechterhalten des aktuellen Niveaus der Holzbereitstellung dürfte problematisch sein, auch ohne weitere Ausweitung von Flächen mit Verzicht auf forstwirtschaftliche Nutzung. Mit jährlichen Zuwächsen von rund 101 Millionen Vorratsfestmeter von 2012 bis 2022 gegenüber 122 Millionen Vorratsfestmetern von 2002 bis

2012 deutet die 4. Bundeswaldinventur auf einen um 16 % niedrigeren Holzzuwachs hin¹³ (bwi.info). Interessant ist dabei, dass das Holzvolumen der ausgeschiedenen Bäume den Holzzuwachs laut 4. Bundeswaldinventur erstmals seit Einführung der Bundeswaldinventur überschritten hat¹⁴. An dem hohen Volumen ausgeschiedener Bäume hatten Kalamitäten mit rund 36 Millionen Efm pro Jahr einen großen Anteil. Die aktuelle Vorratsentwicklung wird von älteren Prognosen der Holznutzungsmöglichkeiten nicht korrekt abgebildet, vor allem, weil diese Prognosen die Auswirkungen von Störungen vernachlässigen, oder nicht korrekt berücksichtigen. So skizzierte ein Szenario des BMEL (2016) einen Anstieg des Holzvorrates der Baumartengruppe Fichte bis 2052 gegenüber dem Holzvorrat 2012 um rund 5 %. Die 4. Bundeswaldinventur weist dagegen schon bis 2022 einen Rückgang des Holzvorrates bei der Baumartengruppe Fichte um rund 190 Millionen Vorratsfestmeter aus, das ist eine Reduktion gegenüber dem Fichtenvorrat in 2012 von mehr als 13 %. Es ist unwahrscheinlich, dass die Baumartengruppe Fichte diesen Vorratsverlust bei rückläufigen Flächenanteilen bis 2052 überkompensieren kann. Das erwähnte Holzaufkommens-Szenario überschätzt somit die tatsächliche Vorratsentwicklung und die damit verbundene Holzverfügbarkeit der Baumartengruppe Fichte erheblich. Die bessere Berücksichtigung von Unsicherheiten in solchen Prognosen ist dringend erforderlich.

¹³ Auch von der 2. auf die 3. Bundeswaldinventur war für die alten Bundesländer bereits ein rückläufiger Zuwachs erkennbar. Der Zuwachs konnte im Rahmen der 2. Bundeswaldinventur nur für die alten Bundesländer kalkuliert werden.

¹⁴ Allerdings wird dabei gedanklich (hinsichtlich der Grundflächen-spezifischen Gewichtungsfaktoren einzelner Bäume) von einem Ausscheiden aller „abgegangenen“ Bäume gleich zu Beginn der Inventurperiode ausgegangen.

Box 7: Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Holzaufkommensprognosen

Es gibt vereinzelt Versuche, Unsicherheiten und Störungen bei Projektionen des Holzaufkommens in Deutschland zu berücksichtigen, z. B. durch eine Studie von Öko-Institut e.V. (oeko.de 2024) oder auch durch frühere englischsprachige Studien, z. B. von Härtl und Knoke (2014) sowie Härtl et al. (2017) für das Bundesland Bayern. Methodisch verbleiben allerdings erhebliche Herausforderungen. So greift der Ansatz, Störungen anhand von Einzelbaummortalität zu modellieren, zu kurz (wie z. B. in oeko.de 2024). Einzelnes Ausscheiden von Bäumen würde die Wuchsbedingungen für die verbleibenden Bäume eventuell sogar verbessern (weil eine Art Durchforstungseffekt entsteht). Dies ist bei den häufig tatsächlich zu beobachtenden flächigen Störungen jedoch nicht der Fall. Zudem erhöhen einzelne geworfene Fichten das Potenzial für nachfolgende flächige Borkenkäferkalamitäten, was z. B. in Bayern nach dem Orkan „Niklas“ 2015 zu beobachten war. Solche Interaktionen zwischen verschiedenen Störungsursachen bleiben bislang unberücksichtigt (Bastit et al. 2023).

Zukünftig sollten die mittlerweile in mehreren international publizierten Studien entwickelten Mortalitätsmodelle für flächige Störungen stärker in Holzaufkommensprognosen berücksichtigt werden (z. B. Schmidt et al. 2010; Brandl et al. 2020; Maringer et al. 2021; Knapp et al. 2024). Eine intensivere Kooperation zwischen den einzelnen Gruppen, die sich mit Störungsmodellierung befassen, verbunden mit einer Berücksichtigung der vorhandenen Mortalitätsfunktionen ist wünschenswert. Der erhebliche Einfluss von Extremereignissen (Knoke et al. 2021a; Senf et al. 2025) kann dabei in existierenden Prognosemodellen nur unzureichend abgebildet werden. Hier besteht im Vergleich zur Abbildung historischer Störungen mit Hilfe vorhandener Mortalitätsmodelle noch größerer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Durch Berücksichtigung von Unsicherheiten werden die Prognosen des Holzaufkommens jedoch keineswegs präziser, und dies sollte auch nicht suggeriert werden. Im Gegenteil, die Variabilität der Modellergebnisse steigt durch Berücksichtigung von Unsicherheiten. Diese Variabilität kann beispielsweise durch simultane Berücksichtigung der möglichen Streuung aller oder zumindest vieler unsicherer Modellannahmen quantifiziert werden. Hierzu eignen sich Monte-Carlo-Simulationen mit Zufallszahlen, um die Modellannahmen in zahlreichen Simulationsläufen gleichzeitig zu variieren. Beispiele zur Unsicherheitsabschätzung bei Prozessmodellen bilden unter anderem die Studien von Reyer et al. (2016) und Augustynczik et al. (2017). Aus den durch Monte-Carlo-Simulationen erlangten Ergebnisverteilungen können dann konservative und robuste Schätzungen anhand der linken Verteilungsbereiche abgeleitet werden, die eine höhere Verlässlichkeit als die Mittelwerte aufweisen. Beispielsweise können die Ergebnisse der niedrigsten 5% der Szenarien als konservativer Schätzwert berichtet werden (siehe z. B. Knoke et al. 2021a). Ohne entsprechende konservative Schätzungen anhand der Modellierung von Unsicherheiten und Störungen sind auch Studien, die für sich eine innovative Unsicherheitsberücksichtigung reklamieren, anfällig für Überschätzungen der möglichen Holzbereitstellung aus der Waldbewirtschaftung in Deutschland. Damit verbunden ist die Gefahr einer Unterschätzung von Zielkonflikten. Gleches gilt für die Möglichkeit, Kohlenstoff in Wäldern zu speichern, siehe nächstes Kapitel.

Kurzfristig können die zusätzliche Holzbereitstellung im Rahmen des notwendigen Umbaus der Waldbestände und die bevorzugte Nutzung besonders labiler

Waldbestände eine rückläufige Holzproduktion eventuell abfangen bzw. sogar überkompensieren. Die frühzeitige Waldverjüngung und die Nutzung von

labilen Nadelholzbeständen haben zwar das primäre Ziel, einen resilenteren und anpassungsfähigeren Wald zu erzielen und nicht vorrangig die Holzbereitstellung zu erhöhen. Die Umbau-Strategie bringt jedoch als Nebeneffekt eine erhöhte Holzbereitstellung mit sich, allerdings nur kurz- bis maximal mittelfristig. Die Fortführung des Trends zum Umbau der Waldbestände überwiegend in Laubwälder wird dagegen langfristig die Bereitstellung konstruktiv verwendbarer Holzsortimente, von denen die Forstwirtschaft heute lebt, stark einschränken, wenn kein Durchbruch bei der Laubholzverwendung im Konstruktionsbereich oder in anderen Bereichen erzielt wird. Notwendige Technologien hierfür sind vorhanden, diese sind allerdings mit höheren Kosten verbunden und somit noch unattraktiv. Teilweise fehlen auch die erforderlichen Bauzulassungen für Bauprodukte aus Laubholz.

Insgesamt rückläufige Potenziale zur Holzbereitstellung verschärfen die Zielkonflikte zwischen der Holzbereitstellung und anderen Wald-ÖSL, insbesondere wenn die alternativen Wald-ÖSL eine Reduktion bzw. Aufgabe der Holznutzung auf erheblicher Fläche erfordern. Dies unterstreicht, dass nicht nur der Wald-Forst-Holz-Sektor, sondern auch andere Sektoren in zukünftige übergreifende Betrachtungen der Potenziale von natürlichen Klimaschutzlösungen stärker einbezogen werden müssen.

3.3 Kohlenstoffspeicherung im Wald

Die Speicherung von Kohlenstoff und die damit verbundene Klimaschutzwirkung bilden ein globales und öffentliches Gut. Egal wo auf der Welt der Atmosphäre Kohlenstoff entzogen wird, von den positiven Wirkungen dieses Prozesses wird niemand ausgeschlossen und somit profitiert die gesamte Weltgemeinschaft davon (Franklin und Pindyck 2018). Bevor wir auf Einzelheiten eingehen, weisen wir zunächst darauf hin, dass es neben der Kohlenstoffspeicherung viele andere Indikatoren für die Klimaschutzwirkung des Waldes gibt, wie z. B. die Reflexionseigenschaften und das Potenzial zur

Wolkenbildung der Vegetationsdecke (Luyssaert et al. 2018; Hasler et al. 2024; Ellison et al. 2024).

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf der Kohlenstoffspeicherung im Wald, da hierzu das vorhandene Wissen am umfangreichsten ist und weil Waldbesitzende diese Ökosystemleistung zumindest tendenziell beeinflussen können. Zur Erweiterung der Betrachtung um die Klimaschutzwirkungen von Holzprodukten verweisen wir auf den Anhang „Holzbereitstellung“.

Die natürlichen Kohlenstoffspeicher sollen innerhalb der EU gestärkt werden (European Union 2018). Maßnahmen zum natürlichen Klimaschutz (so genannte „natur-basierte Lösungen“) werden auch über die Grenzen der EU hinaus diskutiert (Seddon et al. 2020). Insbesondere die Senkenwirkung der Wälder Europas durch Ausweitung der Kohlenstoffspeicherung soll erhöht werden (European Union 2021). Allerdings berichteten Nabuurs et al. (2013) bereits von ersten Anzeichen einer Kohlenstoff-sättigung der europäischen Wälder, womit ihre Funktion als Kohlenstoffsenke rückläufig sein könnte. Die Speicherfähigkeit wird beispielsweise durch Waldstörungen aufgrund von Sturmeinfluss, Dürre, Insekten- und Waldbrandkalamitäten beeinträchtigt. Solche Störungen nehmen bedingt durch Klimawandel und Extremwetterereignisse zu (Patacca et al. 2023; Seidl et al. 2017). Erhebliche Störungen haben beispielsweise dazu beigetragen, dass sich der Holzvorrat des deutschen Waldes von 2012 bis 2022 nicht weiter erhöht und gegenüber 2017 sogar geringfügig abgenommen hat (<https://bwi.info>).

Maßnahmen für eine weitere Steigerung bzw. den Erhalt der Waldkohlenstoffspeicher können den Waldumbau zu widerstandsfähigen und resilienten Mischbeständen und die Ausweitung der Flächenanteile von Laubholzbeständen mit hoher Holz- und Kohlenstoffdichte beinhalten. Kurzfristig sind durch Nutzungsverzichte die stärksten Effekte auf die Kohlenstoffspeicherung in existierenden Waldbeständen zu erwarten, jedoch ist deren Richtung uneindeutig. Hier spielt die Widerstandsfähigkeit der

Wälder unter Nutzungsverzicht eine herausragende Rolle (Thom und Seidl 2016). Der zeitliche Aspekt ist gerade bei der Klimaschutzwirkung besonders wichtig. Effekte bis 2050 sind von großer Bedeutung (Camarasa et al. 2022). Wissenschaftliche Studien berücksichtigen den zeitlichen Effekt über die Diskontierung (Abzinsung) der erzielten Kohlenstoffbindungen je nach deren zeitlichem Auftreten (z.B. Johnston und van Kooten 2015; Jarisch et al. 2022; van Kooten 2023). Allerdings würde der reine Aufschub von Emissionen wie bei der Einstellung der Holznutzung langfristig zu erwarten, zu einem Nullsummenspiel werden. Ob eine Diskontierung der späteren Emissionen dann immer noch der Generationengerechtigkeit entspricht, ist eher ein moralisches Urteil als Ergebnis analytischer Überlegungen.

Die Wechselwirkungen der Steigerung der Kohlenstoffspeicherung im Wald mit anderen Wald-ÖSL (siehe Tabelle 1) bestehen sowohl aus moderaten Zielkonflikten (Typ B) als auch aus Synergien (Typ D) (eine ergänzende Darstellung findet sich im Anhang „Kohlenstoffspeicherung im Wald“). Gesteigerte Waldkohlenstoffspeicher können beispielsweise mit einem hohen Holzvorrat und gesteigerter Störungsanfälligkeit einhergehen und so die Schutzwirkung des Waldes beeinträchtigen. Mehr Biomasseproduktion zum Aufbau von Kohlenstoffspeichern kann auch durch die damit einhergehenden Prozesse wie Interzeption und Transpiration zu geringerer Grundwasserbildung führen (Vertessy et al. 1996) (Zielkonflikt Typ B). Mit einem Aufbau der Biomasse in den Wäldern nimmt jedoch auch das durchschnittliche Waldalter zu und damit sinkt der Wasserverbrauch (neutrale Wechselwirkung, Typ A, oder synergistische Ziele, Typ D). Mit zunehmender Baumhöhe geraten Bäume schneller unter Wasserstress und schließen ihre Stomata daher während eines längeren Zeitraums am Tag (Ryan et al. 2006). Hohe Kohlenstoffvorräte verbunden mit hohen Holzvorräten beeinträchtigen fallweise auch den Schutz der Biodiversität. Beispielsweise ist eine

hohe Artendiversität in lichten Waldstrukturen möglich, in dichten, vorrats- und kohlenstoffreichen Wäldern jedoch nicht gleichermaßen (starker Zielkonflikt Typ C). Synergien ergeben sich dagegen mit Aspekten der Wasserqualität und des Wasserrückhalts, insbesondere wenn die Steigerung der Kohlenstoffspeicherung mit einer Anhebung der Anteile stabiler Laubholzbestände oder -beimischungen einhergeht.

3.4 Schutz der Biodiversität

Der Schutz der Biodiversität ist ein wichtiges waldbritisches Ziel der EU und Deutschlands. So sieht die EU-Biodiversitätsstrategie den Schutz von mindestens 30 % und den strengen Schutz von mindestens 10 % der Landflächen der EU-Mitgliedsstaaten vor (European Commission 2021). In Bezug auf den Wald in Deutschland sind zudem die strengen Schutzziele der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt relevant (BMU 2023). Danach sollen 5 % der deutschen Waldfläche einer natürlichen Entwicklung überlassen werden (im öffentlichen Wald ist das Ziel 10%). Diese Flächen stehen für eine Holzbereitstellung nicht mehr zu Verfügung. Neben den Zielen für Schutzgebiete erfolgt der Schutz der Biodiversität auch durch zahlreiche Maßnahmen, die in die Waldbewirtschaftung integriert werden können. Dazu zählen u. a. der Erhalt von Totholz und Habitatbäumen, eine naturnahe Baumartenzusammensetzung oder Schutzmaßnahmen für einzelne Biotope und Arten (WBW und WBGR 2020).

Eine Voraussetzung für die Analyse von Wechselwirkungen zwischen der Steigerung des Biodiversitätsschutzes und anderen Wald-ÖSL ist zunächst ein gemeinsames Verständnis und eine hinreichende Konkretisierung des Begriffs „Biodiversität“ (Piechocki et al. 2003). Zur Strukturierung der Biodiversität kann auf die Systematik des Internationalen Übereinkommens über die biologische Vielfalt (Convention on Biological Diversity) aus dem Jahr 1993 Bezug genommen werden. Hier werden drei Betrachtungsebenen der Biodiversität unterschieden:

die Vielfalt innerhalb der Arten (genetische Vielfalt), zwischen den Arten (Artenvielfalt) und die der Ökosysteme (Ökosystemvielfalt). Neben dieser inhaltlichen Skalierung sind für das Erreichen von Biodiversitätszielen auch die räumlichen Betrachtungsebenen vom einzelnen Waldbestand bis zur Landschaft von Bedeutung (Schall et al. 2020). Der Begriff „Biodiversität“ integriert wissenschaftliche, politische und ethische Belange. Subjektiv gefärbte Wertvorstellungen über Naturschutzziele sind wesenhaft und führen regelmäßig zu Zielkonflikten auch innerhalb des Naturschutzes. So gibt es bisher keinen naturschutzpolitischen Konsens zu der Frage, ob Schutzbemühungen sich vorrangig auf a) die natürliche, b) die durch kulturhistorische Nutzung entstandene, c) die gegenwärtig naturraumtypische oder, d) auf die gesamte Biodiversität richten sollten, oder wie viel von welcher Biodiversität wünschenswert ist. Ein klassischer Zielkonflikt innerhalb des Naturschutzbereiches selbst besteht beispielsweise zwischen der Erhaltung und Schaffung vorratsreicher geschlossener Wälder, die dem Leitbild von Urwäldern, so genannte „Old-Growth“ Wälder, mit ihren typischen Lebensgemeinschaften nahekommen, und dem Schutz offener Lebensräume, wie Heiden oder Magerrasen, oder lichten Waldstrukturen, die nur durch regelmäßige Nutzungs- und Pflegemaßnahmen erhalten werden können.

Die Steigerung des Schutzes der Biodiversität bildet mittelfristig einen starken Zielkonflikt mit der Bereitstellung der Ressource Holz (Typ C), insbesondere, wenn dies durch Ausweitung des Anteils von Wäldern mit natürlicher Entwicklung und damit Waldflächen ohne Holznutzung erfolgt. Dieser Konflikt wird beispielsweise auch in den Kapiteln 2 und 3.2 behandelt. Allerdings hängt der Zielkonflikttyp auch von den konkreten Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität ab. Denn Biodiversität kann im Rahmen einer integrativen Waldwirtschaft auch auf bewirtschafteten Waldflächen gefördert werden (Krumm et al. 2020). Durch solche Maßnahmen kann die Wechselwirkung

zu einem moderaten Zielkonflikt verbessert werden (Typ B) (vgl. Tabelle 1).

Moderate Zielkonflikte zwischen dem Schutz der Biodiversität durch die Einstellung der Holznutzung können lokal in störungsanfälligen Waldbeständen mit der Kohlenstoffspeicherung vorliegen (Typ B), wobei sich in widerstandsfähigen Wäldern zumindest phasenweise auch Synergien durch hohe Kohlenstoffspeicherraten ergeben können (Typ D). Synergien ergeben sich mit der Bereitstellung von Erholungsmöglichkeiten, da alte, naturnahe Laubwälder sowie halboffene, strukturreiche Landschaften, wie sie durch die Schaffung lichter Wälder entstehen, als besonders attraktiv empfunden werden. Allerdings muss aus Artenschutzgründen mitunter die Zugänglichkeit in Schutzgebieten stark eingeschränkt werden und durch absterbende Habitatbäume kann es zu Verkehrssicherungsproblemen kommen, was dann zu einem moderaten Zielkonflikt führen kann. Insgesamt stuft der WBW die Wechselwirkung zwischen einer Ausweitung des Schutzes der Biodiversität und der Erholungsfunktion als neutral ein (Typ A). Synergien (Typ D) ergeben sich mit den Zielen Wasserspende, -qualität und -rückhalt. So führen Renaturierungsmaßnahmen zu einer Zunahme der Wasserretention und zu einer Verbesserung des Wasserhaushaltes, siehe Kapitel 3.7. Eine ausführliche Beschreibung der Wechselwirkungen findet sich im Anhang „Schutz der Biodiversität“.

3.5 Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus im Wald

Klassische Analysen der Waldpolitik sowie der Waldbehandlung in Deutschland bewegen sich vielfach entlang eines Gradienten ökologisch versus ökonomisch und ordnen auch die Akteure der politischen Arena dementsprechend nur zwei „Diskursallianzen“ zu (Winkel 2006; Kleinschmit et al. 2009). Dies führt zu einem blinden Fleck, der die Wahrnehmung der praktizierten Waldnutzung ebenso wie der waldpolitischen Interessenvertretung durch viele Akteure etwa aus dem „Lager“ der Sportverbände und

Gesundheitsakteure ausblendet. Die Neugründung von Lobbyorganisationen und die Professionalisierung der Interessenvertretung etwa der Fahrradindustrie und der damit verbundenen Gewerbe und Kunden sind Indikatoren für bestehende Zielkonflikte und deren Verschärfung. Im Zuge der Debatte um ein neues Bundeswaldgesetz bzw. das Betretungsrecht im Wald hat diese Ausweitung der Akteursarena eine große Rolle gespielt (Pukall 2014). Es gibt offensichtliche Zielkonflikte zwischen jenen Bestrebungen, das Betreten generell räumlich bzw. für neue Nutzerguppen ausweiten zu wollen und jenen, es umgekehrt z. B. zeitlich und räumlich zu begrenzen. Entsprechende Zielkonflikte sind sowohl am einzelnen Waldort wie in der politischen Debatte um Regeln der Waldnutzung zu verzeichnen (Wald – Sport, Erholung, Gesundheit 2023).

Die traditionelle Erholungsnutzung des Waldes durch Wandern, Fahrradfahren oder Jagen hat sich zu einer diversen Waldnutzung durch verschiedenste Akteursgruppen entwickelt, die zahlreichen unterschiedlichen Tätigkeiten nachgehen (Schraml 2008). Die einschlägige Literatur unterscheidet in der Regel zwischen jenen Zielkonflikten, die innerhalb des Erholungssektors wahrnehmbar sind und jenen, die sich zwischen Zielen der Erholungssuchenden selbst bzw. den damit verbundenen wirtschaftlichen Zielen des Tourismus und anderen Zielen der Landnutzung abbilden lassen (Jacob und Schreyer 1980; Graefe und Thapa 2004). Ein besonderes Interesse an einer Steigerung der Erholungsnutzung des Waldes wird sowohl in stadtnahen Wäldern als auch in touristisch genutzten Räumen wie den Mittelgebirgen formuliert. Mit der klassischen „Waldästhetik“ sowie der sogenannten „Urbanen Waldwirtschaft“ haben sich in Wissenschaft, Ausbildung und Management eigene Behandlungsformen für Wald etabliert, die die sozialen und gesundheitlichen Wirkungen von Wald in den Blick nehmen und gleichzeitig das Management so anleiten, dass Konflikte reduziert oder sogar Synergien erreicht werden (Konijnendijk und Randrup 2004; Freuler 2008). Vor allem während der

COVID Pandemie wurde deutlich, wie herausfordernd eine erhöhte Frequentierung von Stadtwäldern, aber auch Schutzgebieten für das Erreichen von Synergien ist (Anderson et al. 2023; Brown 2021; Derks et al. 2023; Wunderlich et al. 2024). Während das Management vor Ort vielfach in Presseberichten über erhebliche Zielkonflikte geklagt hat, machen Studien deutlich, dass es keinen Automatismus gibt, der davon geprägt ist, dass eine hohe Frequentierung des Waldes automatisch zu vielen Zielkonflikten führt (Weinbrenner et al. 2021).

Studien zeigen, dass die Erholungsfunktion des Waldes ökonomisch wichtig ist. So konnte in Deutschland eine positive Zahlungsbereitschaft der Bevölkerung für die Anhebung des Waldanteils in der Landschaft ermittelt werden (Weller und Elsasser 2018). Eine Abnahme des Waldanteils wurde dagegen abgelehnt, was sich in einer negativen Zahlungsbereitschaft äußerte. Es herrschen allerdings heterogenen Vorlieben (Präferenzen) der Erholungssuchenden vor (Horne et al. 2005). Gleichaltrige Reinbestände und Kahlschläge als mögliche Indikatoren einer rationalisierten und intensiven Forstwirtschaft werden demnach eher negativ bewertet. Besonders bevorzugt werden dagegen offene Waldstrukturen, geringe Spuren einer Holznutzung, Abwechslungsreichtum, stufige, naturnahe Waldstrukturen und einzelnstehende alte Bäume. Insgesamt wird Abwechslungsreichtum sehr geschätzt (Filyushkina et al. 2017). Allerdings können andere Faktoren die Qualität der Erholungsfunktion dominieren, wie z.B. Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und Wegequalität (Elsasser und Weller 2013). So fördert ein für eine intensive Holznutzung notwendiges Wegesystem auch die Erholungsfunktion eines Waldes (Synergie). Für den Bereich Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus existiert eine Reihe von moderaten Zielkonflikten mit anderen Wald-ÖSL (Typ B, Tabelle 1). Die Rücksichtnahme der Forstbetriebe auf erholungssuchende Menschen schränkt sowohl die Baumartenwahl, die Entscheidung für bestimmte Waldbauverfahren als auch die Entscheidung für bestimmte

Holzerntetechnik bzw. -logistik ein. Gleichzeitig führt die Pflege von Erholungswäldern sowie die Gewährleistung von Verkehrssicherungspflichten zu Holzanfall. In Erholungswäldern gelten jedoch besondere Sorgfalts- und Informationspflichten, die zu einem Mehraufwand und somit höheren Betriebskosten führen. Der Bund dokumentiert den aus der Erholungsfunktion der Wälder resultierenden Mehraufwand bzw. Minderertrag in einem eigenen Berichtswesen (Dög et al. 2016). Demnach ergibt sich aus der Pflege der entsprechenden Infrastruktur, aber eben auch der Beseitigung von Müll oder illegal errichteter Infrastruktur (MTB Strecken, Hütten), der Prävention von Schäden (Waldbrand) ein substantieller finanzieller Aufwand, der insbesondere im Privatwald regelmäßig nicht die Betriebsziele unterstützt. Auch mit dem Schutz der Biodiversität bzw. der Wildtiere und deren Nutzung kann es moderate Konflikte geben. Intensive Erholungsnutzung beeinflusst das Wachstum von Pflanzen, die zertreten oder anderweitig beschädigt werden, insbesondere aber die Habitatnutzung oder den Reproduktionserfolg vieler störungsanfälliger Tierarten. Studien belegen neben Verhaltensänderungen, Flucht oder Vermeidungsverhalten z. B. auch einen erhöhten Stresslevel, welches auch negative physiologische Folgen haben könnte (Peters et al. 2022). Die Störung von Tieren - vor allem von Vogelarten - durch den intensiven Erholungsverkehr gilt als wichtiger Faktor, der zumindest den Schutz einzelner Arten sehr negativ beeinflusst. Das Management von Schutzgebieten wird regelmäßig durch intensive Erholungsnutzung herausgefordert: Schutzgebiete werden traditionell in landschaftlich besonders reizvollen Regionen ausgewiesen und sind selbst wichtige Tourismusdestinationen (Mayer und Woltering 2018). Hier werden Synergien aus Erholungsnutzung, Umweltbildung, Förderung des Tourismus und des Naturschutzes verfolgt. Gerade Nationalparke sollen über eine Steigerung der Besuchsfrequenz bzw. von Übernachtungszahlen die Regionalwirtschaft unterstützen (Mose und Weixlbaumer 2003; Woltering 2011).

Gleichzeitig gelingt es vielfach vor Ort nicht, Betretungsregeln durchzusetzen oder das Verkehrsaufkommen sowie die Besuchsfrequenz an den Schutzzweck anzupassen. Nicht nur in der Pandemie stellen Zielkonflikte rund um die Erholungsnutzung von Schutzgebieten ein intensiv diskutiertes Thema dar, das durch den sogenannten "digitalen Wegebau", also die Nutzung von Online-Plattformen durch Besucherinnen und Besucher zunehmend schwieriger zu gestalten ist (Ammer 1975; Moczek et al. 2025).

Hinsichtlich des Schutzes vor Naturgefahrenen und den mit Wasser verknüpften ÖSL ergeben sich entweder neutrale Ziele (Typ A) oder komplementäre Ziele (Typ D), siehe auch Kapitel 3.7. Eine ausführliche Beschreibung der Wechselwirkungen findet sich im Anhang „Erholung, Sport, Gesundheit, Tourismus“.

3.6 Schutz vor Naturgefahrenen

Von Wald gehen vielfältige Schutzwirkungen aus. Solche Schutzwirkungen sind vor allem in Gebirgslandschaften, z. B. gegen so genannte gravitationsbedingte Schäden durch Schnee- und Erdbewegungen sowie Steinschlag, aber auch gegen Überflutungen bedeutsam, hier z. B. durch wasserregulierende Auwälder (Barth und Döll 2016). Entscheidend ist dabei die räumliche Lage des Waldes. Eine optimale Schutzwirkung erfordert meist ununterbrochene Abdeckung des Waldbodens mit den Kronen der Waldbäume und einen stufigen Waldaufbau. Diese kann durch Integration von kleinflächiger Waldverjüngung auf ganzer Fläche erreicht werden, mit hohem Anteil immergrüner Waldbäume wegen ihrer hohen Interzeption, z. B. durch Schneerückhalt in ihren Kronen. Ein ungleichaltriger Waldaufbau mit zwei oder mehr Altersstufen auf der Bestandesebene bietet aufgrund der damit verbundenen Stabilität und Resilienz hohe Schutzwirkungen (O’Hara 2006). Zur Verbesserung der Schutzwirkungen sollte daher versucht werden, einen vielschichtigen und gruppenweise gemischten, ungleichaltrigen Waldaufbau zu erzielen (Motta und Haudemand 2000).

Aus einer Ausweitung von Waldbeständen mit hoher Schutzwirkung entsteht eine Reihe von Wechselwirkungen mit anderen Zielen. Beispielsweise kann mit einem moderaten Zielkonflikt (Typ B) mit der langfristigen Holzproduktion gerechnet werden. Die Schutzfunktion erfordert eine selektive Holznutzung unter Vermeidung flächiger Eingriffe. Der kontinuierliche Verjüngungsprozess erfordert es, das Kronendach frühzeitig und regelmäßig zu öffnen, was fallweise zu langfristigen Verlusten für die Holzproduktion führen kann (Hilmers et al. 2020). Solche Produktionsverluste wurden beispielsweise in einer Modell-basierten Studie von Knoke und Pluszczyk (2001) im Rahmen der simulierten Überführung von gleichaltrigen in ungleichaltrige Bestände gezeigt.

Durch moderate Holzbereitstellung können trotz etwas geringerer Holzproduktion synergistische Wechselwirkungen mit dem Waldkohlenstoffspeicher entstehen, was z. B. Kindu et al. (2022a) für ungleichaltrige Wälder zeigen konnten (Wechselwirkung Typ D). Die oft mit einer hohen Schutzwirkung verbundenen dichten und schattigen Bestockungen verdrängen jedoch lichte und artenreiche Vegetation, wie z. B. Schneeholz-Kiefernwälder (Hildebrandt 1997). Lichte Bestockungen gehen beispielsweise durch Einbringung von schattentoleranten Laubholzarten in einen alternativen Waldtyp über. Hieraus ergibt sich ein starker Zielkonflikt vom Typ C mit dem Ziel des Schutzes bzw. der Förderung der Biodiversität (Tabelle 1). Die Erholung, die Gesundheit, der Sport und der Tourismus sind im Verhältnis zum Schutz vor Naturgefahren neutrale Ziele (Typ A), während die Aspekte der ÖSL Wasser auch synergistische Wechselwirkungen bilden (Typ D). So fördert der stufige Bestandesaufbau die Wasserretention, was zu einer gewissen Reduktion der Hochwassermengen führen kann (Acreman et al. 2021, siehe auch Kapitel 3.7). Eine ausführliche Beschreibung einzelner Wechselwirkungen findet sich im Anhang „Schutz vor Naturgefahren“.

3.7 Spende, Qualität und Rückhalt von Wasser im Wald

Der Wasserhaushalt von Wäldern wird bestimmt durch die Niederschlagsmenge, die Interzeption im Kronendach, die Evapotranspiration von Bodenwasser, die Retention von Wasser im Boden, die Abführung von Wasser aus dem Wurzelraum mit dem Sickerwasser (Weis et al. 2023; Bittner et al. 2010) sowie durch Entwässerungsmaßnahmen. Die letzte Komponente wird auch als Grundwasserneubildung oder Grundwasserspende bezeichnet. In hängigen Lagen und bei wenig Bodenvegetation bzw. geringer Humusauflage ist außerdem mit Oberflächenabfluss zu rechnen.

Insgesamt wirkt der Wald ausgleichend auf die Wasserspende in Oberflächengewässern und das Grundwasser, Hochwassermengen sind in bewaldeten Einzugsgebieten geringer (Acreman et al. 2021). Die Wasserretentionskapazität ungestörter Waldböden ist aufgrund geringer Lagerungsdichte oft gut und das Kronendach verhindert eine schnelle Reaktion des Bodenwassergehaltes auf Niederschläge (Zimmermann et al. 2008). Die als Interzeptionsverlust bezeichnete kontinuierliche Verdunstung von Wasser aus der Baumkrone während und nach dem Regen liegt meist bei 10 - 30 % des Freiland-niederschlags, kann aber auch bis zu 50 % betragen (van Dijk et al. 2015). Die Erhöhung der Wasser-retention im Boden bedeutet, dass weniger Wasser ins Grundwasser gelangt, weil es in den oberen und gut durchwurzelten Bodenbereichen verbleibt. Die Retention von Wasser im Wald ist für die Abflussregulation und die Vermeidung von Hochwasser wichtig aber auch für das Waldökosystem selbst, insbesondere für die Überdauerung von regenarmen Perioden (Meusburger et al. 2022).

Bei der Passage durch den Boden wird das Regenwasser gereinigt, Schadstoffe werden an feste Bodenbestandteile gebunden. Anders als in Acker- oder Stadtböden ist die Bodenfestphase der Waldböden oft schadstoffarm. Die Schadstoffgruppe der Schwermetalle kann jedoch regional im Bereich von Indus-

trieanlagen und für das ubiquitär vorhandene Blei großflächig erhöhte Konzentrationen in Waldböden aufweisen (Gehrman 2013; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2016), bedingt durch höhere Auskämmeffekte im Wald. Schwermetalle sind in Waldböden dauerhaft gebunden und daher größtenteils von untergeordneter Bedeutung für die Wasserqualität. Es werden im Wald insgesamt kaum Schadstoffe vom Boden in das Sickerwasser abgegeben. Dadurch ist die Wasserqualität in bewaldeten Einzugsgebieten häufig sehr gut. Eine Ausnahme bilden Regionen, die sehr stark von anthropogenen bedingten Säureeinträgen beeinflusst werden mit schwach puffernden Böden. Dort kann die Versauerung zur Aluminium-Freisetzung in die Bodenlösung führen. Erhöhte Aluminium-Konzentrationen im Grundwasser können die Folge sein (Wilpert et al. 2000).

Der Wasserhaushalt von Wäldern wird maßgeblich durch die Baumartenzusammensetzung und die Bestandesdichte beeinflusst. Eine Steigerung der Wasserspende ist zu erreichen durch Erhöhung des Laubholzanteils, denn durch den Blattabwurf wird unter Laubbäumen der Bestandesniederschlag außerhalb der Vegetationsperiode erhöht und die Interzeption nimmt ab (z. B. Prietzel und Bachmann 2012). Einschränkend muss jedoch berücksichtigt werden, dass Laubbäume während der Vegetationsperiode wegen oft tiefer reichendem Wurzelsystem eine höhere Transpirationsleistung aufweisen als Nadelbäume, was zu einer Verminderung der Wasserspende gerade in sommerlichen Trockenperioden führen kann (Meusburger et al. 2022). Die Verringerung der Bestandesdichte führt hingegen zu einer Verbesserung der Wasserspende, da Transpiration und Interzeption von Wasser abnehmen (Del Campo et al. 2022).

Maßnahmen, die die Interzeption und Verdunstung von Wasser im Wald vermindern, können gleichzeitig Wasserretention und Wasserspende erhöhen. Andere Maßnahmen, wie beispielsweise die Drainage, führen - zumindest auf kurzer bis mittlerer Zeitskala

betrachtet - durch die Verminderung der Wasserretention zur Erhöhung der Wasserspende. Bereits zwischen diesen beiden Wasser-bezogenen Zielen gibt es demzufolge Zielkonflikte. Gleches gilt für Wasserspende und Wasserqualität. Lange Verweilzeit von Wasser im Boden intensiviert die Reinigungsprozesse aber vermindert die Wasserspende. In vielen Fällen sind Synergien zwischen den Zielen „Wasserretention“ und „Wasserqualität“ zu erwarten, hingegen gibt es Konflikte zwischen „Wasserqualität“ und „Wasserspende“. Aus diesem Grunde werden diese Ziele im Anhang „Spende, Qualität und Rückhalt von Wasser im Wald“ getrennt voneinander erörtert.

Eine Ausweitung der verschiedenen Wasser-ÖSL führt zu Wechselwirkungen innerhalb dieser ÖSL und mit anderen ÖSL (Tabelle 1). Maßnahmen zur Reduktion der Bestandesdichte um die Wasserspende zu erhöhen, führen kurzfristig zu einer höheren Holzbereitstellung, mittelfristig jedoch zu einer niedrigeren Holzbereitstellung und Kohlenstoffspeicherung im Wald (Typ C). Ähnlich verhält es sich, wenn die Wasserqualität durch verstärkten Umbau in Richtung Laubholz erhöht werden soll, wodurch sich mittel- und langfristig die Bereitstellung der Ressource Holz, insbesondere Konstruktionsholz, vermindert, wobei derzeitige Marktverhältnisse und Verarbeitungstechnologien vorausgesetzt sind. Dagegen profitieren Bestandesstabilität und Produktivität auf grundwasserfernen Standorten von einer Verbesserung des Wasserrückhaltes, wodurch die Holzbereitstellung langfristig ebenfalls verbessert wird (Typ D). Anders verhält es sich auf Standorten mit hoch anstehendem Grundwasser. Dort kann Wasserretention durch einen Rückbau von Drainage-Gräben erhöht werden. Diese Maßnahme schafft große Synergien mit dem Schutz der Biodiversität und des Kohlenstoffspeichers (Typ D) insbesondere im Boden. Konflikte gibt es im Hinblick auf die Holzbereitstellung. Die Wuchsleistung der Bestände kann sich nach Drainage-Rückbau verringern, es kann ein Wechsel der Baumart nötig sein und die Holzernte

wird kostenintensiver, da spezielle Maßnahmen, wie zum Beispiel die Errichtung partiell befestigter Rückegassen ergriffen werden müssen. Bei den Wechselwirkungen mit dem Schutz der Biodiversität sowie mit den ÖSL Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus handelt es sich meist um synergistische Wechselwirkungen (Typ D). So können sich durch Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhaltes Feuchtbiopte als Hotspots der Artenvielfalt entwickeln. Für Wälder mit Grundwasseranschluss kann sich ein Zielkonflikt zwischen der Bereitstellung von Wald-ÖSL und der Produktion von Nahrungs-mitteln durch die Landwirtschaft ergeben, wenn eine Wasserentnahme durch die Landwirtschaft erfolgt. Eine ausführliche Beschreibung der Wechselwirkungen ist im Anhang „Spende, Qualität und Rückhalt des Wassers“ enthalten.

3.8 Steigerung der Windkraft über Wald

Zur Umsetzung der aktuellen klimapolitischen Ziele werden für den Ausbau der Windenergienutzung auch Waldflächen ausgewählt. Ende 2023 waren in Deutschland etwa 2.450 Windenergieanlagen in bewaldeten Gebieten in Betrieb, die gut 11 % der insgesamt installierten Leistung ausmachten (FA Wind 2024). Besonders in waldreichen Bundesländern mit zu wenigen windhöflichen Flächen im Offenland ist aktuell der Betrieb von Windenergieanlagen (WEA) im Wald zulässig (derzeit BB, BW, BY, HE, RP, SL und eingeschränkt in NI, NW, SN und TH).

Die Regional- und Bauleitplanungen regeln u. a. die Flächenkategorien, die aus naturschutzfachlicher Sicht nicht in Frage kommen oder Restriktionen unterliegen (z. B. Schutzwälder, ältere Waldbestände, historisch alte Waldstandorte). Konflikte entstehen vor allem in ländlichen Kommunen mit hochwertigeren Wäldern und historischer Forstwirtschaft (UBA 2021b).

Windkraftanlagen im Wald haben aufgrund ihres geringen Flächenanspruchs vernachlässigbare Auswirkungen auf die Holzbereitstellung (Zabel et al.

2018) (Wechselwirkung Typ A) (Tabelle 1), wenn die Stückzahl der Windräder nicht zu groß ist und diese gut geplant werden. Mit der Kohlenstoffspeicherung als Element des Klimaschutzes ergibt sich Komplementarität, denn die Ökobilanz von WEA ist ausgesprochen gut. Die Einsparung von CO₂ durch WEA liegt mehr als 1.000-fach höher, als die verlorene CO₂-Aufnahme des für die Errichtung der WEA gerodeten Waldes (UBA 2021b, 2021a) (Typ D).

Der Schutz der Biodiversität wird allerdings aus verschiedenen Blickwinkeln durch die Errichtung von WEA behindert, so dass sich lokal und regional ein starker Zielkonflikt vom Typ C ergibt. Der Betrieb der WEA kann zu starken Beeinträchtigungen für bestimmte Tierarten führen, wie beispielsweise für Fledermäuse (Ellerbrok et al. 2022; Ellerbrok et al. 2023; Dietz et al. 2024).

Im Gegensatz zum Offenland liegen jedoch bisher nur wenige Studien zu den Auswirkungen von WEA im Wald auf die Biodiversität vor (Lehmann et al. 2024). Während der Bauphase werden Rodungen um die WEA und für die Zuwegung vorgenommen, dabei können Habitate von baumbewohnenden Arten, wie Specht, Eule oder Fledermaus zerstört werden. Durch den Betrieb von WEA im Wald können vor allem sogenannte „windenergiesensible Tierarten“ beeinträchtigt werden. Diese Arten werden durch die Geräusche und den Schattenwurf der Anlagen verscheucht, es entstehen Barrieren zwischen den Teillpopulationen oder Kollisionen führen zum Tode (Zabel et al. 2018). Eine Studie in der Schweiz zeigt, dass v. a. Vögel und Fledermäuse betroffen sind (Mueller 2015). Bei den Fledermäusen ist zudem das sogenannte Barotrauma bedeutsam, bei dem innere Verletzungen durch Druckunterschiede zwischen der Umgebung und dem Druck in der Nähe der Turbinen hervorgerufen werden (Schuster et al. 2015). Zur Reduktion des Schlagrisikos für Fledermäuse an WEA wurde ein Fledermausabschaltalgorithmus entwickelt, welcher anhand der an der WEA gemessenen Windgeschwindigkeit, der Jahres- und Nachtzeit, der Temperatur und des Niederschlags die

Beeinträchtigungswahrscheinlichkeit für Fledermäuse berechnet und die Anlage bei hoher Wahrscheinlichkeit abschaltet (FA Wind 2017). Für Greifvögel wie den Rotmilan kann eine Minderung des Kollisionsrisikos erzielt werden, indem Einschaltgeschwindigkeiten leicht erhöht werden. Ab 5,4 m/s (6,0 m/s über Wald, 5,2 m/s über Offenland) Windgeschwindigkeit liegen 90 % der Flugbewegungen des Rotmilans außerhalb der kritischen Rotorzone oder unterhalb der Rotorblätter (Becker et al. 2024; Becker et al. 2025).

Die Errichtung von WEA im Wald kann negative Auswirkung auf die Erholungsfunktion, die Gesundheit und den Tourismus haben (moderater Zielkonflikt Typ B). Zum Beispiel haben in Schweden ästhetische Bedenken, die mitunter mit der Größe, Farbe, Form und Anzahl der Windmühlen sowie mit Flackereffekten zusammenhängen, und das Empfinden einer Landschaftsverschandelung zur Ablehnung von Windkraftanlagen, besonders in Erholungsgebieten, geführt (Ek und Persson 2014; Anshelm und Simon 2016; Enevoldsen 2016).

Durch die Baumaßnahmen entstehen lokal moderate Zielkonflikte (Typ B) mit den Wasserhaushaltsfunktionen sowie durch erhöhte Erosionsgefahr eine leichte Verringerung des Schutzes vor Naturgefahren (Fisher und Binkley 2012; Ranger et al. 2008; Palviainen et al. 2022).

Als Folge der geplanten Forcierung des Windenergieausbaus durch die Verabschiedung des Windflächenenergiebedarfsgesetz und durch die Änderung des Erneuerbaren Energie Gesetze in Kombination mit dem verstärkten wirtschaftlichen Interesse vieler Forstbetriebe an der Bereitstellung von Waldflächen für Windenergieanlagen (Kaul 2021) dürften sich die Konflikte zukünftig verstärken.

Eine ergänzende Beschreibung der Wechselwirkungen ist im Anhang „Windkraft über Wald“ enthalten.

4 Umgang mit Wechselwirkungen: Synergien fördern, Kompromisse finden

Der Umgang mit Zielkonflikten und Synergien kann durch gute Vorbereitung entscheidungsunterstützender Planungen, durch Szenarien- und Optimierungsbasierte Analysen sowie passende Umsetzungsinstrumente und durch eine Weiterentwicklung der Waldfunktionskartierung zu einer umfassenden Waldfunktionsplanung verbessert werden. Dabei erschweren die Komplexität der Waldökosysteme, die vielfältigen Anforderungen an die Bereitstellung von ÖSL und erhebliche Unsicherheiten Planungen auf Ökosystem- und Landschaftsebene (Salliou und Strith 2023). Unsicherheit entsteht durch die nicht vorhersagbare Variabilität der tatsächlich zukünftig erreichbaren ÖSL, aber auch durch die heterogenen Erwartungen der Waldbesitzenden und sonstigen Entscheidungsträger sowie durch unterschiedliche und sich rasch ändernde Präferenzen der Bevölkerung. Es existieren aber zahlreiche Methoden, um diese Probleme zu adressieren (Bingham et al. 2024). Mögliche Ansätze zur Entscheidungsunterstützung werden im Folgenden beispielhaft dargestellt. Die mit Hilfe von verschiedenen Verfahren bereitgestellten Informationen sind dabei jedoch nicht als Vorwegnahme der Problemlösung zu verstehen, sondern tatsächlich als Entscheidungshilfen.

Das Erreichen vielfältiger Zielsetzungen kann dabei beispielsweise durch räumliche und zeitliche Diversifikation in der Waldbewirtschaftung unterstützt werden (Knoke et al. 2017). Räumliche Diversifikation kann durch geeignete Baumartenmischungen aber auch durch Beteiligung verschiedener Bestandestypen erreicht werden, z. B. gleichaltrig und ungleichaltrig. Hierbei ist noch einmal hervorzuheben, dass die Möglichkeiten der Diversifizierung auf der Bestandesebene beschränkt sind.

Das folgende Kapitel 4.1 spricht vor allem Waldbesitzende mit einem Interesse an der Einbeziehung vielfältiger Akteure und deren Ziele an, was

beispielsweise für den öffentlichen Wald zutrifft. Aber auch stadtnaher Privatwaldbesitz könnte an einer Einbeziehung von Akteuren interessiert sein, um die Akzeptanz seiner Art der Waldbewirtschaftung in der Bevölkerung aufrecht zu erhalten bzw. zu erhöhen. In Kapitel 4.2 werden konkrete Methoden zur Identifikation, Quantifizierung und zum Umgang mit Zielkonflikten und Synergien beschrieben, die für alle Waldbesitzarten mit multiplen Zielsetzungen interessant sind. Mit den Kapiteln 4.3 und 4.4 schließen sich Überlegungen zur Weiterentwicklung der Waldfunktionskartierung zu einer umfassenden Waldfunktionsplanung und einer robusten Bereitstellung von Wald-ÖSL an.

4.1 Vorbereitung von Maßnahmen und Planungen zum Umgang mit Konflikten

Einbindung von Akteuren. Eine gute Einbindung von Akteuren in die Abwägung und Kommunikation von Zielkonflikten sowie Synergien wird oft als Voraussetzung für eine breite Akzeptanz der Waldbewirtschaftung und der gewählten Bewirtschaftungsverfahren z. B. im öffentlichen Wald herausgestellt (Taylor und Lindenmayer 2021). Marques et al. (2020) zeigten beispielsweise, wie sich durch Befragung forstlicher Schlüssel-Akteure Zielkonflikte zwischen Holznutzung und einer guten Wasserqualität kombiniert mit einer Reduktion der Bodenerosion, dem Schutz der Biodiversität, der landschaftlichen Schönheit und der Umweltbildung identifizieren lassen. Borges et al. (2014) schlugen vor, interaktive Kartierungen von ÖSL mit räumlich konkreten Optimierungen zur optimalen Entscheidungsunterstützung bei der Produktion von Kork (mit Kork-Eichen) in Verbindung mit der Kohlenstoffspeicherung im Wald durchzuführen, um wichtige Akteursgruppen an forstlichen Entscheidungen zu beteiligen. Darüber hinaus wurden partizipative Methoden zur Ableitung der Präferenzen von forstlichen Akteuren zur Verbesserung von Entscheidungsmodellen für multiple Zielsetzungen zur Lösungsvorbereitung und Entscheidungsunter-

stützung vorgeschlagen (Ortiz-Urbina et al. 2022). Die Präferenzen der Akteure wurden dazu häufig durch paarweise Vergleiche von Entscheidungsalternativen abgeleitet.

Eine andere Form der interaktiven Bewertung von ÖSL und von damit verbundenen forstlichen Entscheidungen nutzt kreative Diskussionsprozesse mit Akteursgruppen. Diese Diskussionsprozesse können auch auf Zielkonflikte und Synergien angewendet werden. Diese Methode wurde unter dem Namen „Bewusste Bewertung“ eingeführt (deliberative valuation) (Kenter et al. 2016). Dabei werden Werte von Gütern und ÖSL durch intensive Diskussion (Beratschlagung) mit Schlüssel-Akteuren analysiert und aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. So können Lernprozesse und das vielfältige Wissen der Teilnehmenden genutzt werden. Solche Aushandlungsprozesse sind vor allem dann sinnvoll, wenn die beteiligten Akteure für Entscheidungen oder Priorisierungen legitimiert sind.

Bislang beschränken sich Innovationen in der Bewirtschaftung von Wald häufig auf die Optimierung der Bereitstellung von Biomasse. Nach einer EU-weiten Befragung werden dagegen regulierende und kulturelle ÖSL oft bei der Entwicklung von Innovationen ausgeklammert (Mann et al. 2022). So genannten Governance-Innovationen stellen in diesem Zusammenhang einen vielversprechenden waldbewirtschaftlichen Rahmenansatz dar, um mit Zielkonflikten bei der Bereitstellung verschiedener Wald-ÖSL besser umgehen zu können. Governance-Innovationen verbessern die Interaktionen zwischen Akteursgruppen und beinhalten neue Steuerungs- und Verwaltungsprozesse, um Konflikte durch Aushandlungsprozesse abzumildern und eine nachhaltige Bereitstellung von Wald-ÖSL zu fördern. Als ganzheitliche Ansätze betrachten sie mehrere Wald-ÖSL integrativ, ohne einzelne Leistungen zu priorisieren. Ein wesentlicher Vorteil dieser Innovationen liegt in ihrer lokalen und regionalen Anpassungsfähigkeit, die den beteiligten Interessengruppen mehr Freiraum bietet (Sorge et al. 2022).

Konkrete Beispiele umfassen freiwillige Zahlungen für ÖSL, generiert durch den Kauf symbolischer Waldaktien in Mecklenburg-Vorpommern, Habitat-Banken in Finnland, die Aufwertung der lokalen Wertschöpfungskette Wald und Holz in Österreich oder das Wald-Weide-Management in Italien durch aktive Waldbewirtschaftung zum Erhalt von Kulturlandschaften und damit der Biodiversität.

Für den Erfolg von Governance-Innovationen ist eine politische und finanzielle Unterstützung zur Förderung günstiger Rahmenbedingungen für ihre Entstehung und Entwicklung von Bottom-Up-Prozessen wichtig. Um langfristig erfolgreich zu sein, müssen diese Innovationen finanziell tragfähig sein und gleichzeitig die Bedürfnisse verschiedener Interessengruppen vor Ort berücksichtigen.

Das waldbewirtschaftliche Rahmenkonzept der Governance-Innovationen hat allerdings derzeit noch eher einen allgemeinen Charakter. Im Folgenden werden daher beispielhaft konkrete Methoden und Ergebnisse zur Identifikation, Quantifizierung und Beschreibung von Zielkonflikten und Synergien beschrieben, die eventuell in den übergeordneten Rahmen von Governance-Innovationen einfließen könnten. Zu beachten ist dabei, dass die im Folgenden beschriebene Einbeziehung wichtiger Akteursgruppen nicht auf die Vorbereitung von Planungen beschränkt sein muss. Diese kann sich auch auf den gesamten Umsetzungsprozess beziehen.

Vorbereitungen zum Schutz der Biodiversität. Aufgrund mehrerer Zielkonflikte sollte als Voraussetzung für Naturschutzhandeln zunächst eine Schutzverantwortung begründet werden (Demant 2022). Diese kann für die naturraumtypische, d. h. sowohl die kulturhistorisch entstandene als auch die natürliche biologische Vielfalt unmittelbar abgeleitet werden. Dieser Ansatz zielt nicht auf eine Maximierung der Biodiversität auf der Bestandesebene ab, denn dies kann der abgeleiteten Schutzverantwortung sogar entgegenstehen, z. B. weil Unterschiede auf der Landschaftsebene bzw. zwischen Naturräumen nivelliert werden können (Schall et al. 2018).

Ein Beispiel zur effizienten Vorbereitung des Schutzes der Biodiversität bezieht sich auf die zukünftige Ausweisung von Totalreservaten, welche evidenzbasiert, räumlich differenziert und mittels transparenter Entscheidungskriterien erfolgen sollte. Ziel sollte es auch sein, die Produktion des umweltfreundlichen Rohstoffes Holz nicht mehr als unbedingt notwendig zu beeinträchtigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele Schutzgebietsverordnungen aus einer Zeit stammen, in der noch von einer Konstanz der Umweltbedingungen ausgegangen wurde. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der damit einhergehenden Veränderungen erscheint es ratsam, Schutzziele, konkrete Schutzmaßnahmen und Gebietskulissen zu überprüfen, diese erforderlichenfalls neu abzuwegen und anzupassen.

4.2 Konzepte und Modelle zur Verbesserung des Umgangs mit Zielkonflikten

4.2.1 Segregation versus Integration

Räumliche Segregation. In der Literatur wird unter anderem eine räumliche Differenzierung der Landnutzung vorgeschlagen, um mehrere Ziele auf der Landschaftsebene möglichst weitreichend zu erfüllen. Eine Ausweisung von Schutzgebieten auf der einen Seite und eine intensive Landnutzung der verbleibenden Fläche auf der anderen Seite kennzeichnen das so genannte „Land Sparing“. Dieses Konzept wurde als eine Lösung für die optimale Landnutzung zur Produktion von Nahrungsmitteln bei gleichzeitig bestmöglichem Schutz der Biodiversität entwickelt (Phalan et al. 2011). Das Konzept hebt auf Intensivierung durch Ertragsteigerungen pro Hektar ab, um so den Flächenbedarf zu reduzieren und größere Schutzgebietsflächen zu ermöglichen. „Land Sparing“ wird häufig mit dem Prinzip der nachhaltigen Intensivierung kombiniert (Cassman und Grassini 2020). Nachhaltige Intensivierung beabsichtigt ebenfalls durch Produktivitätssteigerungen den Bedarf an Produktionsfläche zu reduzieren, dies aber dauerhaft. Ähnliche Überlegungen

existieren für die Bewirtschaftung von Waldlandschaften.

Unter dem Namen „triad forestry“ (TRIAD Forstwirtschaft) wurde ein räumlich strukturiertes Landnutzungskonzept für Waldlandschaften vorgeschlagen, welches (1) intensive Waldwirtschaft (i. d. R. in Form von Plantagen), mit (2) strengen Waldschutzgebieten und (3) multifunktionaler Bewirtschaftung der Bestände nach ökologischen Prinzipien in der Waldmatrix kombiniert (Himes et al. 2022). In die räumlich differenzierte TRIAD Forstwirtschaft werden große Hoffnungen gesetzt, um die EU-Biodiversitätsziele mit der nachhaltigen und hohen Holzbereitstellung in Einklang zu bringen (Nagel et al. 2024). Bislang bleibt dabei aber weitgehend offen, wie die erwünschte räumliche Zonierung praktisch erreicht werden kann und wer hierüber entscheiden darf oder soll. Zudem kann hinterfragt werden, ob die Intensivierung auf sehr begrenzter Fläche vor dem Hintergrund der zumindest in Deutschland bereits intensiven Waldbewirtschaftung (zu erkennen an der hohen flächenbezogenen Holzbereitstellung im weltweiten Vergleich, siehe Abbildung A2 im Anhang) überhaupt ein ausreichendes Steigerungspotenzial für die Holzproduktion hat, um eine Reduktion der Bewirtschaftungsintensität auf dem Rest der Fläche zu ermöglichen. Auch ist offen, wie die privaten Waldbesitzenden unter Wahrung des Prinzips der Freiwilligkeit in die Aushandlung von landschaftsbezogenen Zielen einbezogen werden können.

Vor dem Hintergrund dieser Schwierigkeiten gibt es bislang wenige Beispiele für TRIAD Forstwirtschaft, was eine empirisch gestützte Bewertung schwierig macht (Meyer 2013; Himes et al. 2022; Nagel et al. 2024). Die Intensivierungskomponente bei TRIAD ist zudem anfällig für Rebound Effekte. Eine Intensivierung erhöht unter Umständen die ökonomische Attraktivität der Landnutzung und bietet Landnutzenden einen Anreiz, eher mehr natürliche Habitate in Produktionsflächen umzuwandeln als weniger (García et al. 2020; Phelps et al. 2013). Schließlich muss geklärt werden, welches Maß der Intensivierung

eine nachhaltige Nutzung der Ökosysteme tatsächlich zulässt (z. B. Paul und Knoke 2015). In dieser Diskussion ist vor dem Hintergrund der Landnutzung in Deutschland oder Europa zudem der Ausgangspunkt der Flächen von Bedeutung, die für eine Intensivierung herangezogen werden könnten. Im Falle von bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen, würde, abgesehen von der Umwandlung naturschutzfachlich wertvoller Grünlandflächen, selbst eine intensive forstliche Bewirtschaftung eine ökologische Aufwertung darstellen. Allerdings könnte es dann zu Konflikten mit der Nahrungsmittelproduktion kommen.

Integrative Konzepte. Die zusätzliche Ausweisung strenger Schutzgebiete auf großen Flächen führt zwangsläufig zu starken Zielkonflikten (siehe Kapitel 3) und ist somit in der Regel nur auf begrenzten Flächen möglich. Cazzolla Gatti et al. (2023) ordnen beispielsweise in Europa rund 3,4 % der Fläche den Schutzgebietskategorien Ia (Strenge Naturreservat), Ib (Wildnisgebiet), und II (Nationalpark) der IUCN (International Union for Conservation of Nature) zu. Der Anteil von Naturschutzgebieten, Nationalparks, Kernzonen von Biosphärenreservaten und von Natura 2000 Gebieten an der deutschen Waldfläche wird dagegen mit 26,2% angegeben (Meyer et al. 2023). Bei geringen Flächenanteilen strenger Schutzgebiete ist der Schutz der Biodiversität allein über Reservate jedoch nicht ausreichend, sondern kann nur über eine zusätzliche, naturschutzverträgliche Bewirtschaftung der Matrixlandschaft, in welche die strengen Schutzgebiete eingebettet sind, effektiv erfolgen (Lindenmayer et al. 2006). Daher werden im Gegensatz zur räumlichen Segregation im integrativen Konzept für die Biodiversität wertvolle Habitate wie Waldbiotope oder kleine wertvolle Waldflächen auch außerhalb von Reservaten temporär oder dauerhaft von der forstwirtschaftlichen Nutzung ausgenommen. Somit werden Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität mit aktiver Waldbewirtschaftung zur Holzbereitstellung kombiniert. Dadurch können hochwertige Habitate auf größerer Fläche erhalten und Zielkonflikte durch die Ausweisung neuer großer Flächen-

schutzgebiete reduziert werden. Diese integrative Bewirtschaftung zur Verbesserung der Multifunktionalität lehnt sich oft an das „Land Sharing“ Konzept an (Runting et al. 2019). Hier versucht man durch Integration mehrerer Ziele auf derselben Fläche ein optimales Ergebnis zu erreichen. Dieses Prinzip wurde auf die Waldbewirtschaftung unter dem Namen „multiple service forestry“ übertragen.

Entwicklungsbedarf. Bei den vorgestellten Strategien handelt es sich um allgemeine Konzepte, die sich auf vielfältige Erfahrungen aus verschiedenen Teildisziplinen der Forstwissenschaft, Ökologie oder der Landnutzung stützen und die mehr oder weniger stark auf das Segregationsprinzip zurückgreifen um Zielkonflikte zu minimieren. Ihre Anwendung wird oft jedoch lediglich schematisch und wenig konkret dargestellt. Durch den Versuch der Verbindung von Elementen des „Land Sharing“ und des „Land Sparing“ gehen die verschiedenen Konzepte ineinander über. Es bietet sich in Zukunft an, die oft generischen Konzepte mit Hilfe von multikriteriellen Verfahren zur Entscheidungsunterstützung zu koppeln, um auch für Akteure, die weniger mit der Materie vertraut sind, nachvollziehbare Aussagen und Managementempfehlungen ableiten zu können. So ist beispielsweise von großer Bedeutung, wie viel Fläche welchen der vielfältigen Waldökosystemtypen bzw. Waldnutzungstypen und welcher der drei Zonen der TRIAD-Forstwirtschaft zugewiesen werden sollte. Zur Herleitung dieser strategischen Informationen existiert eine Reihe von Verfahren, auf die im folgenden Unterkapitel eingegangen wird. Entscheidend ist darüber hinaus, wer die konkrete Zonierung festlegt und inwieweit dadurch eventuell die herrschende Zuordnung von Verfügungsrechten infrage gestellt wird oder werden soll.

4.2.2 Modellgestützte Methoden zum Umgang mit Zielkonflikten

Neben Bewirtschaftungskonzepten, die auf Grundlage von Erfahrungen entwickelt wurden, gibt es mittlerweile zahlreiche alternative Methoden zur Berück-

sichtigung von multiplen Zielsetzungen im Rahmen von Szenario-Analysen (Temperli et al. 2020) oder für Optimierungen der Bewirtschaftung von Ökosystemen (Kaim et al. 2018). Diese Methoden erhöhen die Transparenz der Entscheidungsfindung und dienen der Entscheidungsunterstützung, ersetzen die Entscheidung und die Verantwortung für diese jedoch nicht.

Szenarioanalysen

Auf der Ebenen von Waldbeständen werden in Szenarioanalysen üblicherweise konkrete waldbauliche Behandlungsstrategien definiert. Die Szenarien ermöglichen meist basierend auf Wachstumssimulationen eine Bewertung von Bewirtschaftungsalternativen anhand verschiedener Indikatoren. Szenarioanalysen können nicht nur anhand verschiedener Zielkriterien durchgeführt werden, sondern auch anhand eines einheitlichen Bewertungsmaßes, meist Geldeinheiten. Sie sind nicht nur auf den Wald und seine Bewirtschaftung beschränkt, sondern können auch die weitere Verwendung von Holz umfassen (Bösch et al. 2017) oder die Transformation einer gesamten Volkswirtschaft zum Thema haben (Bösch et al. 2019).

Optimierungsmethoden

Alternativ zu Szenarioanalysen können die angestrebten Ziele und Präferenzen der Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen durch Optimierungen berücksichtigt werden, ohne die möglichen Lösungsvorschläge als eine beschränkte Menge konkreter vorab definierter Szenarien vorzugeben. Die dazu passende Bestandeszusammensetzung und Bewirtschaftung der Wälder können beispielsweise basierend auf einer mathematischen Programmierung gefunden werden und dann als Entscheidungshilfe dienen. Hieraus ergeben sich mögliche Szenarien der Waldbewirtschaftung als Ergebnis, nicht als Input der Optimierung. Auf eine ex ante Definition von Szenarien wird also in diesem Falle verzichtet.

Ein Beispiel für eine Optimierung auf der Bestandesebene findet sich bei Knoke et al. (2020b) (weiter Beispiele sind Assmuth und Tahvonen 2018; Tahvonen 2009 sowie Malo et al. 2021). Ergebnisse von Optimierungsmodellen sind allerdings wenig hilfreich, wenn die hinterlegten funktionalen Zusammenhänge die tatsächlichen Zusammenhänge gar nicht widerspiegeln. Dies kann passieren, wenn z. B. lineare anstelle von tatsächlich auftretenden polynomischen Zusammenhängen unterstellt werden. Die Optima der Realität können dann vom Modell gar nicht gefunden werden oder andersherum, wenn die Modelloptima in der Realität gar nicht optimal sind. Ähnliche Einschränkungen treffen alle Verfahren zur Entscheidungsunterstützung. Bei falschen Annahmen sind meistens die Ergebnisse ebenso unzutreffend. Es ist daher besonders wichtig, robuste Modellansätze zu verwenden, in denen die Unsicherheiten zu den Annahmen von vorneherein berücksichtigt werden. Beispiele für solche robusten Optimierungen werden im Folgenden vorgestellt.

Optimierung von Waldlandschaften. Eine Landschaft setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammen, z. B. aus unterschiedlichen Ökosystemen, aber auch aus Infrastrukturelementen und bebauten Bereichen (Turner 2005). Eine Waldlandschaft besteht dementsprechend aus verschiedenen Waldbestandestypen. Dabei bestimmen die von jedem Waldbestandestyp eingenommenen Flächenanteile die Bereitstellung von Wald-ÖSL der Waldlandschaft wesentlich mit. Die Zusammensetzung einer Waldlandschaft kann langfristig durch waldbauliche Maßnahmen gesteuert werden, meist im Rahmen der Verjüngung von Waldbeständen.

Als Beispiel für die Optimierung der Zusammensetzung einer Waldlandschaft kann eine Modellierungsstudie dienen, deren zentrales Ergebnis die Verschärfung von Zielkonflikten bei wachsenden Unsicherheiten ist (Knoke et al 2025). Die Studie macht deutlich, welchen Einfluss die Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Optimierung hat. So setzt sich in einem theoretischen, didaktisch berücksichtigten

Beispiel ein zukünftiger Wald auf homogenem Standort aus nur einem einzigen Bestandestyp zusammen, wenn lediglich eine ÖSL betrachtet wird und wenn Unsicherheiten ausgeblendet werden. So theoretisch dieses Beispiel ist, kann doch in der Realität eine Fokussierung auf nur einen Bestandestyp im Rahmen der auf die Holzbereitstellung ausgerichteten Forstwirtschaft in bestimmten Regionen Deutschlands über die letzten 200 Jahre beobachtet werden. Vielerorts wurden vorwiegend reine Fichten- oder Kiefernbestände angebaut (siehe z. B. Specker 2003). Die Berücksichtigung standörtlicher Heterogenität führt dagegen automatisch zu einer Diversifizierung der Baumarten und Bestandestypen, wenn immer die für den lokalen Standort am besten geeigneten Baumarten gewählt werden (Knoke et al. 2017). In den Optimierungen kann nun der Einfluss der Unsicherheit der zukünftigen ÖSL der einzelnen Bestandestypen berücksichtigt werden, indem ein akzeptables Ergebnis für zahlreiche mögliche Zukunftsszenarien gefordert wird und nicht nur für ein einziges erwartetes Zukunftsszenario. Aus dieser Anforderung ergibt sich auch bei Optimierung nur einer ÖSL und auf homogenem Standort eine empfehlenswerte Diversifizierung der Waldlandschaft. Es entsteht ein Portfolio aus verschiedenen Bestandestypen (z. B. Fuchs et al. 2024). Der Wunsch nach dem Schutz vor Unsicherheit ist somit auch im Wald ein wesentlicher Antrieb für die Empfehlung einer Diversifizierung auf Landschaftsebene.

Die Grundidee der hier beispielhaft aufgegriffenen Studie (Knoke et al. 2025) ist es, die zukünftige Waldzusammensetzung so zu verändern, dass jeweils die aktuell im ungünstigsten Fall erreichte Wald-ÖSL über viele mögliche Zukunftsszenarien hinweg verbessert wird. Dabei soll nicht ein wahrscheinliches Vorgehen von Waldbesitzenden vorhergesagt werden, sondern es sollen Vorschläge abgeleitet werden, die den Waldbesitzenden oder Entscheidungstragenden helfen, ihre Ziele besser und mit höherer Sicherheit zu erreichen. Die erwähnte Umorganisation der Waldzusammensetzung wird mit Hilfe einer

Optimierung so lange fortgesetzt, bis die Wald-ÖSL in keinem Zukunftsszenario mehr verbessert werden kann, ohne die ÖSL in einem anderen Zukunftsszenario zu verschlechtern.

Ähnlich wird bei mehreren wünschenswerten Wald-ÖSL die zukünftige Waldzusammensetzung so verändert, dass jeweils die aktuell am schlechtesten erreichte Wald-ÖSL unter Unsicherheit verbessert wird. Dabei ergeben sich prinzipiell sehr viele mögliche Waldzusammensetzungen, je nachdem, wie die einzelnen Ziele gewichtet werden, also welche Präferenzen die Waldbesitzenden haben. Um konkrete Empfehlungen ableiten zu können, wird folglich eine Zielgewichtung durch die Waldbesitzenden bzw. die Entscheidungstragenden benötigt. Die vorliegenden Publikationen umgehen allerdings meist die Problematik der Zielgewichtung, indem von einer Gleichgewichtung aller Ziele ausgegangen wird (z. B. Uhde et al 2017; Gregor et al 2022; Gregor et al 2024), was aber nicht der Realität entsprechen muss.

Für eine empirische Abschätzung von Zielpräferenzen gibt es strukturierte Verfahren wie z. B. den analytischen Hierarchie-Prozess nach Saaty (1987). Dieser wurde beispielsweise von Uhde et al. (2017) für die Unterstützung der zielorientierten Planung von Wiederaufforstungen auf Waldbrandflächen in Chile verwendet. Alternativ können die Präferenzen von Akteursgruppen und Entscheidungstragenden durch Abfrage von Rankings bestimmter Waldbestandestypen bezüglich ihrer Fähigkeit bestimmte Wald-ÖSL zu erbringen eruiert werden (siehe Chreptun et al. 2023). Empirisch ermittelte Ziel-Gewichtungen müssen jedoch vorsichtig in Planungen und waldpolitischen Rahmensetzungen eingesetzt werden, denn unzutreffende oder einseitige Gewichtungen können zu sehr verzerrten Optimierungsergebnissen führen (z. B. Knoke et al. 2020a). Die Ziel-Gewichtungen hängen von den Präferenzen der Waldbesitzenden ab, die heterogen sind und zeitlichen und räumlichen Variationen unterliegen (Heinonen et al. 2020). Orientierende empirische Studien zu den Zielpräferenzen wichtiger Akteure aber auch der

generellen Bevölkerung hinsichtlich der Bewirtschaftung der Wälder in öffentlichem Besitz wären allerdings von großem Interesse.

Liegen stark divergierende Zielpräferenzen für bestimmte Wald-ÖSL vor, lässt sich u. U. kein akzeptabler Kompromiss finden. Z. B. ist es denkbar, dass eine Akteurs-Gruppe dem Schutz der Biodiversität 100 % Gewicht beimisst, eine andere Gruppe dagegen die bereitstellenden ÖSL zu 100 % präferiert, um erwerbswirtschaftliche Zielsetzungen zu maximieren. In diesem Fall wären die Möglichkeiten für optimale Kompromisse sehr beschränkt. Multifunktionale Waldbewirtschaftung setzt folglich die Bereitschaft aller Akteure voraus, auch andere als die eigenen vorrangig verfolgten Ziele als berechtigt zu akzeptieren. In einer Waldlandschaft mit einer Vielzahl von Waldbesitzenden mit jeweils unterschiedlichen Zielsetzungen kann sich dagegen ein Kompromiss auf Landschaftsebene auch automatisch einstellen.

Wünschenswerte Zukunftsszenarien können beispielsweise auch basierend auf dem Nature-Futures-Framework entwickelt und einbezogen werden (Pereira et al. 2020). Dazu werden in einem Diskussionsprozess plurale wünschenswerte Zukunftsszenarien ermittelt, die dann gleichzeitig als wünschenswerte Zukunftsszenarien in landschaftlichen Optimierungen berücksichtigt werden können. Dabei sollten allerdings auch mögliche unerwünschte Entwicklungen nicht außer Acht bleiben, um eine Absicherung gegenüber Unsicherheit zu erreichen. Zudem ist es wichtig, dass die Beteiligten alle

Akteursgruppen mit berechtigten Interessen gut repräsentieren.

Mit einem konkreten Beispiel kann das Potenzial der landschaftlichen Diversifizierung veranschaulicht werden (Knoke et al. 2025). In Abbildung 4 wird der moderate Zielkonflikt zwischen der Förderung der Biodiversität und der Steigerung der Kohlenstoffsenkenleistung anhand von Optimierungen deutlich gemacht (Wechselwirkung Typ B). Hier markiert ein Landschaftsportfolio mit 25 % Eiche und 19 % Buche den linken Eckpunkt der Landschaftsportfolios, dort mit maximalem Schutz der Biodiversität. Beispielhaft wird hier der Biodiversitätsschutz anhand der Anzahl herbivorer Arten und einem Totholzindikator berücksichtigt, jedoch nicht anhand von forstwirtschaftlich ungenutzten Waldflächen. Die Eiche kann dabei stellvertretend für Baumarten mit hoher Klimatoleranz und sehr hoher Anzahl assoziierter Arten betrachtet werden.

Das erwähnte Eckpunkt Portfolio steht in diesem Beispiel für das Optimum zum Schutz der Biodiversität in bewirtschafteten Wäldern, bei nur geringer Kohlenstoffsenkenleistung. Die Kohlenstoffsenkenleistung kann bei moderater Reduktion der Biodiversitätsziele jedoch erheblich gesteigert werden. Dies zeigt beispielsweise die blaue Raute in Abbildung 4, die ein Landschaftsportfolio mit immer noch 23 % Eiche und einen Douglasien-Anteil von 21 % repräsentiert. Im Biodiversitätssportfolio am linken Eckpunkt hat die Douglasie dagegen nur 9 % Anteil. Der erhöhte Douglasien-Anteil¹⁵ erlaubt somit eine deutliche Steigerung der Kohlenstoffsenkenleistung bei dennoch hoher Biodiversität auf Landschafts-

¹⁵ Die Klimatoleranz der Douglasie wird auf manchen Standorten kritisch eingeschätzt, siehe z. B. Kölling und Mette (2022), so dass bei ihrem Anbau eine Mischung mit klimatoleranteren Baumarten ratsam ist. Beispielsweise werden derzeit Mischungen mit Edelkastanie erprobt. Über solche Mischungen liegen bislang jedoch nur wenig Erfahrungen vor. Die erwähnten Baumarten sollten daher als stellvertretend für Baumarten eines bestimmten Typus gesehen werden. So kann man beispielsweise die Douglasie als Repräsentantin sehr produktiver Baumarten sehen und die Eiche als Repräsentantin von Baumarten, die mit hoher Biodiversität und Klimatoleranz assoziiert werden.

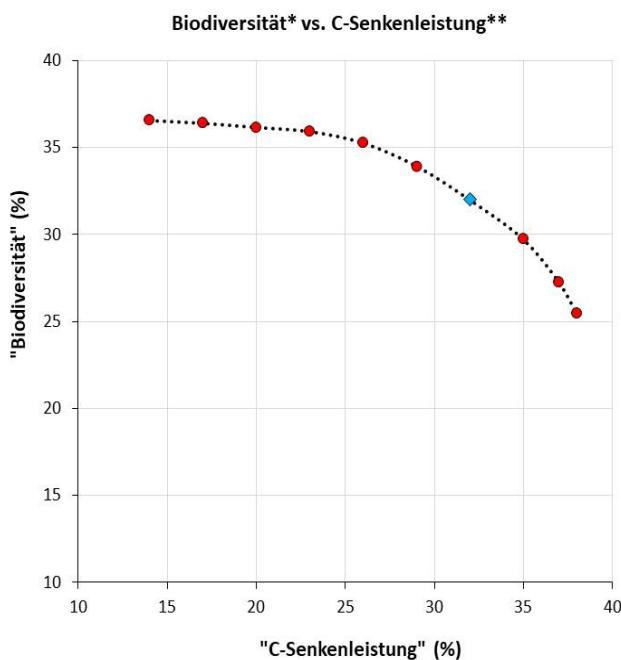


Abbildung 4: Beispiel für maximal mögliche Zielerreichung für Biodiversitätsindikatoren und Indikatoren für die Wald-Kohlenstoffsenke auf der Landschaftsebene. Die Prozentwerte zeigen an, wie hoch der Beitrag einer Landschaft aus verschiedenen Baumarten und Bestandestypen zu den ÖSL-Indikatoren unter erwarteten Unsicherheiten (z.B. Kalamitäten durch Wind und Borkenkäfer) mindestens ist. Null Prozent steht dabei für das Minimum und 100 % für das Maximum. Die blaue Raute markiert das Optimierungsergebnis bei einer 50 % zu 50 % Gewichtung der beiden Indikatorbündel. Basierend auf Ergebnissen von Knoke et al. (2025).

ebene. Der Einbezug multipler ÖSL verändert und erhöht die landschaftliche Diversifizierung gegenüber der reinen Diversifizierung von Risiken (Friedrich et al. 2021). Während beispielsweise ein empfehlenswertes erwerbswirtschaftliches Portfolio einer Waldlandschaft auch bei Berücksichtigung von hohen Ausfallrisiken bisher vorwiegend mit Nadelholz diversifiziert, erhöht sich bei mehreren Zielsetzungen z. B. durch Berücksichtigung des Schutzes der Biodiversität insbesondere der Eichenanteil aber auch generell der Laubholzanteil (Knoke et al. 2025). Sowohl die durch Unsicherheiten als auch die durch multiple ÖSL angetriebene Diversifizierung reduzieren die erwarteten Geldrückflüsse. Es entsteht so eine Prämie für multiple Wald-ÖSL und für Risikostreuung, welche derzeit meist durch die Waldbesitzenden getragen werden muss.

Der Wunsch nach Steigerung von vielfältigen gesellschaftlich wichtigen Wald-ÖSL kann somit eine monetäre Honorierung dieser zusätzlich erbrachten Wald-ÖSL erfordern. Will man auf Freiwilligkeit setzen, muss es für die Waldbesitzenden jedoch attraktiv sein, vielfältige Wald-ÖSL als Erweiterung der „Produktpalette“ in größerem Umfang bereit zu stellen, als das aktuell der Fall ist. Eine ähnliche Prämie entsteht durch die Diversifizierung zum Schutz gegen Unsicherheit. Diese Prämie lässt sich als Eigenvorsorge im Sinne einer von den Waldbesitzenden akzeptierten Risikoprämie interpretieren.

Europäische Waldportfolios. Mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens zur Berücksichtigung multipler Zielsetzungen und von

Klimaunsicherheiten haben Gregor et al. (2022) mögliche zukünftige Mischungen verschiedener großräumiger Waldbestandestypen in Europa entworfen und analysiert. Dabei wurden verschiedene Zielkriterien (Klimaregulation, Holzbereitstellung, lokale Kühlungseffekte, Wasserverfügbarkeit und Bereitstellung von Habitat) und verschiedene Klimaszenarien gleichzeitig berücksichtigt, um einen optimalen Kompromiss für die zukünftige Waldzusammensetzung zu finden. Aufgrund der deutlich sinkenden Holzbereitstellung des optimierten Szenarios ergibt sich die Frage, wie Europa bei steigender Ressourcennachfrage aber gleichzeitig fallender Holzbereitstellung ohne stark steigende Importe und/oder stark reduzierte Exporte auskommen kann. Steigende Importe sowie reduzierte Exporte können zu Umweltschäden in andere Länder betragen, wenn

diese die fehlenden europäischen Holzmengen basierend auf wenig nachhaltigen Bewirtschaftungspraktiken kompensieren (Bateman und Balmford 2023; Fischer et al. 2024). In Zukunft wird sorgfältig zu prüfen sein, wie relevant diese mögliche Konsequenz rückläufiger Holzbereitstellung aufgrund von zunehmender Beachtung anderer ÖSL innerhalb der EU ist.

Das Ausmaß dieses Zielkonflikts ist folglich noch unklar. Es muss jedoch in Erwägung gezogen werden, dass sich ein solcher Zielkonflikt nicht allein durch verbesserte multifunktionale Produktionssysteme der Forstwirtschaft auflösen lässt. Dem Optimierungspotenzial auf der Produktionsseite sind klare ökologische Grenzen gesetzt, die nicht beliebig verschoben werden können. Somit muss auch die Nachfrageseite einbezogen werden.

Fazit: Multifunktionale Bewirtschaftungsstrategien, die zu einer erheblichen Verminderung der mittelfristigen Holzbereitstellung und langfristigen Holzproduktion in Deutschland oder Europa führen, sollten auch die Frage beantworten, wie mit gleichbleibender oder steigender Holznachfrage umzugehen ist. Aus waldpolitischer Sicht müssten, will man solche Strategien ohne Verlagerungseffekte umsetzen, konsequenterweise mittel- bis langfristig realistische Strategien zur Senkung der Nachfrage nach Rohstoffen wie Holz (aber natürlich auch nach landwirtschaftlichen Produkten) mitgedacht werden, z. B. durch einen sparsameren Umgang mit diesen Rohstoffen und Produkten, wenn Multifunktionalität erfolgreich sein soll. Dies steht aus Sicht des WBW bislang jedoch weitgehend aus.

4.3 Weiterentwicklung der Waldfunktionskartierung zur Waldfunktionsplanung

In vielen Bundesländern wird eine Waldfunktionskartierung zur Erfassung und Sicherung der Erholungs- und Schutzfunktionen des Waldes eingesetzt (Projektgruppe Waldfunktionenkartierung der AG Forsteinrichtung 2015). Der WBW regt an, die

Waldfunktionskartierung zu einer umfassenderen Waldfunktionsplanung weiterzuentwickeln. Der Begriff „Waldfunktionsplanung“ wird bislang vor allem in Bayern und Rheinland-Pfalz benutzt. Im folgenden Kapitel geht es zunächst um inhaltliche Aspekte einer solchen Weiterentwicklung, während eine rechtliche Einschätzung der Waldfunktionskartierung in Kapitel 5 erfolgt.

Aus planerischer Sicht kann eine räumliche Differenzierung nach bestimmten Vorrangzielsetzungen im Wald dabei helfen, gezielte Empfehlungen zum Umgang mit Zielkonflikten abzuleiten und so die Effizienz der Waldbewirtschaftung zu erhöhen. Für eine Reihe von Wald-ÖSL ist beispielsweise die räumliche Lage des Waldes wichtig. Regulierende Leistungen wie Schutz vor Lawinen oder Überflutungen erfordern Wald bzw. bestimmte Waldstrukturen dort, wo diese Naturgefahren auftreten können. Ähnlich ist es bei soziokulturellen Leistungen, wie beispielsweise die Bereitstellung von Erholungsraum. Hier muss der Wald für die Erholungssuchenden gut erreichbar sein, so dass der Erholung in Wäldern vor allem in der Nähe von urbanen Bereichen Vorrang eingeräumt werden sollte. Dagegen ist es für andere Leistungen unerheblich, wo sich der Wald befindet, z. B. für die Kohlenstoffspeicherung.

Bisher wurden in Deutschland mit Hilfe von Waldfunktionskarten Bereiche des Waldes mit einem hohen sozialen Wert kartiert. Dabei handelt es sich um Waldbereiche mit besonders benötigten bzw. nachgefragten Vorrangfunktionen (Knoke et al. 2021b; Boncina et al. 2019), wie z. B. Erholungsmöglichkeiten. Vorrangfunktionen sind für öffentliche Wälder verbindlich, nicht jedoch für den privaten Wald. Hier kann auf Freiwilligkeit basierend z. B. mit Anreizsystemen auf die Verbesserung der Funktionserfüllung hingearbeitet werden. Die Methodik der Waldfunktionskartierung variiert zwischen den Bundesländern stark und eine Weiterentwicklung mit dem Ziel der verbesserten Berücksichtigung von Wald-ÖSL (Tiemann und Ring 2018) sowie einer Berücksichtigung möglicher Konse-

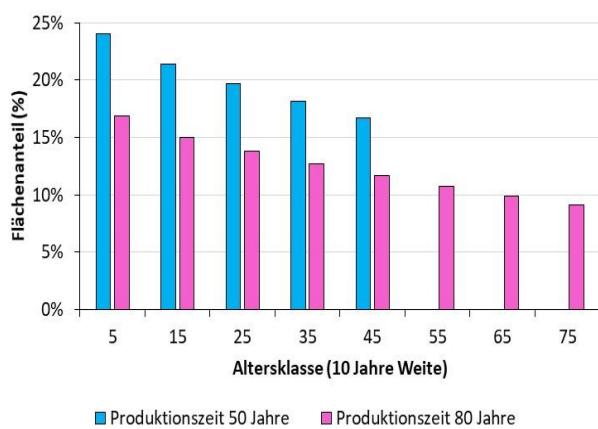


Abbildung 5: Gleichgewichtsverteilungen von Waldflächen auf Altersklassen bei unterschiedlichen Produktionszeiten. Die Verteilungen unterstellen eine Überlebenswahrscheinlichkeit der Bestände bis zum Alter 80 von 50%, was einem sehr starken Einfluss von Störungen durch Borkenkäfer, Wind und Dürre entspricht.

quenzen des Klimawandels fehlt bislang weitgehend. Aktuell enthalten die Waldfunktionskarten keine eigentlichen Planungselemente.

Die Verschärfung von Zielkonflikten aufgrund von wachsenden Unsicherheiten und zunehmenden gesellschaftlichen Ansprüchen unterstreicht die Notwendigkeit einer weiter entwickelten Waldfunktionsplanung. So könnten beispielsweise wünschenswerte zukünftige Waldzusammensetzungen zur Verbesserung der Bereitstellung bestimmter ÖSL berücksichtigt werden. Um dabei den Einfluss von Unsicherheiten auf ÖSL zu adressieren sind folgende Aspekte im Rahmen einer Waldfunktionsplanung zu beachten, die auch von der Waldstruktur abhängen: i) Widerstandsfähigkeit, ii) die Anpassungsfähigkeit und wünschenswerte Zusammensetzung sowie die iii) Resilienz von Waldbeständen und -landschaften. Darüber hinaus sollten iv) neue Möglichkeiten zur Verbesserung der räumlichen Planung genutzt werden.

Zu i) Widerstandsfähigkeit durch Einrichtung von Vorranggebieten zur Holzbereitstellung und -produktion stärken: Vor dem Hintergrund von zunehmenden Störungen der Wälder durch Naturereignisse (Patacca et al. 2023) könnten beispiels-

weise die forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten für mittelfristige Planungen zur Unterstützung der ÖSL „Bereitstellung der Ressource Holz“ und „Kohlenstoffspeicherung im Wald“ räumlich konkrete „Vulnerabilitätskarten“ anfertigen bzw. schon vorliegende Kartierungen nutzen, um besonders labile Waldbereiche zu identifizieren und kenntlich zu machen. In solchen Bereichen sollten beispielsweise keine Bestrebungen unterstützt werden, die Holzvorräte zur Anhebung des Kohlenstoffspeichers durch Nutzungsverzichte weiter zu steigern. Eher könnte hier eine verstärkte Nutzung von Holz für Bauzwecke und andere langlebige Produkte im Zuge des Waldumbaus unterstützt werden, weil der Kohlenstoff in solchen Produkten sicherer gespeichert wäre als in einem labilen Waldbestand. Dies sollte aber differenziert und vor allem zur Erzielung widerstandsfähiger Wälder erfolgen und nicht als pauschale Strategie zur „Holzmobilisierung“ dienen.

Nach der Ernte besonders labiler Waldbestände könnte auf solchen Flächen intensiveren Formen der Holzproduktion der Vorrang eingeräumt werden, z. B. basierend auf diversifizierten Nadelholzportfolios mit verkürzter Produktionszeit. Hier können und sollten natürlich auch Laubholzbeimischungen einbezogen werden, beispielsweise auch aus natürlich ankommenen Pionierbaumarten. Durch kürzere Produktionszeiten würden nicht nur die Risiken reduziert. Vielmehr bieten kürzere Produktionszeiten auch häufigere Gelegenheiten, um über die Verjüngungsphase weitere Anpassungen voranzutreiben, z. B. über die Verwendung eines genetisch besser angepassten Pflanzenmaterials oder die Verwendung neuer Mischungen. Als Nachteil haben solche Produktionskonzepte jedoch geringere Möglichkeiten zur Nutzung von Naturverjüngung und größere jährliche Verjüngungsflächen zu bewältigen als alternative Waldportfolios mit längeren Produktionszeiten. Aus der Abbildung 5 wird eine höhere Flächenausstattung solcher Waldportfolios mit sehr jungen Waldbeständen deutlich (siehe im Beispiel für Produktionszeit 50 Jahre). Diese jungen Waldflächen sind oft

pflegeintensiv und ihre künstliche Begründung ist teuer.

Zur Erstellung von Vulnerabilitätskarten gibt es mehrere Möglichkeiten (z. B. Suvanto et al. 2019 oder Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2019). Eine Möglichkeit besteht in der Nutzung von statistischen Funktionen zur Prognose der Störungswahrscheinlichkeit, wie sie beispielsweise von Brandl et al. (2020) publiziert wurden. Diese Funktionen erlauben Prognosen des ungeplanten Holzaufkommens anhand von Variablen wie Alter, Standort, Mischungsform und Klima, die für viele Inventuren (z. B. für die Bundeswaldinventur) erhoben werden. Rank und Gang (2021) haben solche Karten beispielhaft für den Universitätswald der Ludwig-Maximilians-Universität München bei Landshut angefertigt. Basierend auf räumlich konkreten Informationen zur Vulnerabilität können so potenzielle Synergien zwischen der Holzbereitstellung und der Optimierung der Klimaschutzwirkung unter Einbeziehung dauerhafter Holzprodukte besser genutzt werden.

Zu ii) Anpassungsfähigkeit durch verbesserte Waldzusammensetzungen erhöhen: Für strategische Planungen, also auf lange Sicht, könnten die forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten beispielsweise Methoden zur Ableitung wünschenswerter und anpassungsfähiger zukünftiger Waldportfolios für bestimmte Waldregionen testen und weiterentwickeln (z. B. Fuchs et al. 2024; Friedrich et al. 2021; Gregor et al. 2022). Hierbei können Ausfallrisiken für die betrachteten Bestandestypen mit einfließen, die nötigen Methoden hierzu liegen vor (Friedrich et al. 2021; Fuchs et al. 2024). Die neuen Methoden können zur Abgrenzung von Waldregionen mit besonderen Vorrangzielsetzungen unter Berücksichtigung der Standortbedingungen genutzt werden, z. B. für bestimmte Wuchsbezirke. Die heute weit verbreiteten Baumarteneignungskarten (z. B. Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg 2019) können weitere Zielkriterien liefern, welche in die Optimierungen einfließen. Eine wesentliche Inno-

vation der vorgeschlagenen neuen Karten zur Unterstützung der Waldökosystem- und Waldlandschaftsplanung besteht in der Berücksichtigung von gesellschaftlichen Zielen, Zielkonflikten und -synergien, welche die örtlich vorrangig nachgefragten Wald-ÖSL berücksichtigen, z. B. hinsichtlich der Bereitstellung von Erholungsmöglichkeiten (siehe auch iv). Die menschlichen Anforderungen und Ansprüche dürfen bei Empfehlungen zum wünschenswerten Waldaufbau nicht außer Acht bleiben.

In der Arbeit von Gregor et al (2022) sind beispielhaft solche Waldportfolios mit Hilfe mathematischer Optimierungen unter simultaner Beachtung verschiedener Klimaszenarien entworfen und als Tortendiagramme großräumigen Europäischen Regionen zugeordnet worden. Für die Waldökosystemplanung kann dies zukünftig auch kleinräumiger erfolgen. Dabei können Einschätzungen und Präferenzen von wichtigen Akteursgruppen einfließen (vgl. z. B. Chreptun et al 2023). Durch solche Ergänzungen kann der derzeit nachfrage- bzw. bedarfsoorientierten Waldfunktionsplanung ein mögliches optimiertes Angebot von ÖSL hinzugefügt werden, welches auch den Wald selbst und seine Struktur berücksichtigt. Die Portfolios können von Zeit zu Zeit erneuert werden und als eine wichtige Referenz zur Beurteilung der aktuellen Waldentwicklung verwendet werden, um langfristig Multifunktionalität und Effizienz in der Waldbewirtschaftung besser zu vereinen. Für den privaten Wald könnten solche Modellierungen als Dienstleistung durch Versuchs- und Forschungsanstalten sowie durch private Sachverständigenbüros angeboten werden, oder der innovationsinteressierte private Waldbesitz baut hier eigene Kapazitäten auf. Ein entsprechendes Lehr- und Weiterbildungsangebot für Sachverständige sollte diese Maßnahmen flankieren.

Zu iii) Resilienz durch Vorausverjüngung schaffen: Auch die Erholungsfähigkeit der zukünftigen Waldbestände nach starken Störungen (Nikinmaa et al. 2020; Knoke et al. 2023b) kann zukünftig in der Waldfunktionsplanung eine Rolle spielen. Resilienz

kann u. a. durch die Anwesenheit oder die Etablierung mehrerer Baumgenerationen in einem Bestand unterstützt werden (z. B. Knoke et al. 2023b). Starke Störungen betreffen oft die älteren Baumgenerationen. Sind auf derselben Fläche auch jüngere Baumgenerationen vorhanden, die weniger geschädigt werden, so können die Funktionen der durch Störungen ausgeschiedenen älteren Baumgenerationen rasch ersetzt werden. Entsprechend strukturierte ungleichaltrige Bestände können mit bestimmten Anteilen in die wünschenswerten Waldportfolios integriert werden (siehe Knoke et al. 2025). Ungleichaltrige Bestände können auch die Wirtschaftlichkeit erhöhen und die Anwesenheit von Vorverjüngung kann die Produktionszeiten nach Ernte des Altbestandes (s. o.) verkürzen. Ebenso können Mischungen von Baumarten, die sich in ihrer Vulnerabilität gegenüber unterschiedlichen Störungsarten unterscheiden, die Resilienz erhöhen, da nach einer Störung ein größerer Teil der Bäume überlebt und so zu einer schnelleren Erholung des Systems beiträgt. Auch der Erhalt von Samenbäumen, insbesondere von Pionierbaumarten, die sich nicht unter dem Schirm von Altbeständen vorverjüngen lassen, trägt zu einer raschen Wiederbewaldung nach Störungen bei.

Zu iv) räumliche Planung verbessern: Digitale Geländemodelle können die räumliche Ausweisung von Schutzwald verbessern (z. B., Projektgruppe Waldfunktionenkartierung der AG Forsteinrichtung 2015). Auch für die Ausweisung von Wäldern mit Vorrang der Erholung bieten sich neue Möglichkeiten. Ebenso können bestimmte Wald-ÖSL Themen von Waldfunktionskarten sein (FVA Baden-Württemberg 2022). Mit sozio-ökonomischen Choice Experimenten können die Präferenzen von Erholungssuchenden und damit eine Nachfrageperspektive in Abhängigkeit von bestimmten Attributen des Waldes und seiner Umgebung abgeleitet und mit Hilfe statistischer Nutzenfunktionen quantifiziert werden (z. B. Weller und Elsasser 2018; Müller et al. 2020). Solche Attribute können die Erreichbarkeit (Fahrtdistanz oder Fahrkosten), der Laubholzanteil, die

sichtbare Waldrandlänge, Parkmöglichkeiten oder die Nähe zur Küste oder zu Gewässern sein. Basierend auf diesen Attributen lassen sich Karten mit den Präferenzen der Erholungssuchenden anfertigen, die zur Ausweisung von Vorranggebieten für die Erholung genutzt werden können (siehe z. B. Termansen et al. 2013). Ebenso können räumliche Muster der Waldnutzung anhand der GPS-Daten von Mobiltelefonnutzern erstellt werden (Korpilo et al. 2017).

Fazit: Eine regionale Differenzierung von wünschenswerten Bestandestypen kann effizienzerhöhend sein, vor allem wenn sich die standörtlichen Produktionsmöglichkeiten und die Nachfrage nach ÖSL räumlich unterscheiden (Knoke et al. 2017). Verlangt man dagegen von jedem Wald oder sogar von jedem Waldbestand die Bereitstellung eines breiten Angebots an ÖSL, erreichen die einzelnen ÖSL eventuell nur relativ geringe Erfüllungsgrade (Knoke et al. 2025). Eine stärkere räumliche Differenzierung, etwa im Sinne einer TRIAD Forstwirtschaft oder einer differenzierten Landnutzung nach Haber (1990), führt dagegen zu einer räumlichen Spezialisierung der Waldtypen (sozusagen im Sinne einer „Arbeitsteilung“). Dabei kann es jedoch auf Teilflächen zu homogenisierten, labilen, wenig resilienten und kaum anpassungsfähigen Wäldern kommen. Eine Tendenz zur Bildung von Regionen mit homogenisiertem Waldaufbau wurde beispielsweise von Gregor et al. (2024) bereits in einer Simulation nachgewiesen, wenn sinkende Holzbereitstellung wegen ausgeweiteten Nutzungsverzichten durch intensivierte Forstwirtschaft kompensiert werden soll. Ein Kompromiss könnte in der Einrichtung der oben erwähnten Vorranggebiete für Holzbereitstellung und -produktion liegen.

4.4 Verlässlichere Bereitstellung von ÖSL kann Zielkonflikte mindern

Die Bewirtschaftung von Wald war lange Zeit von dem Bestreben nach Rationalisierung gekennzeichnet, um auf diesem Weg die Maximierung der Holzbereitstellung und -produktion und dabei eine möglichst

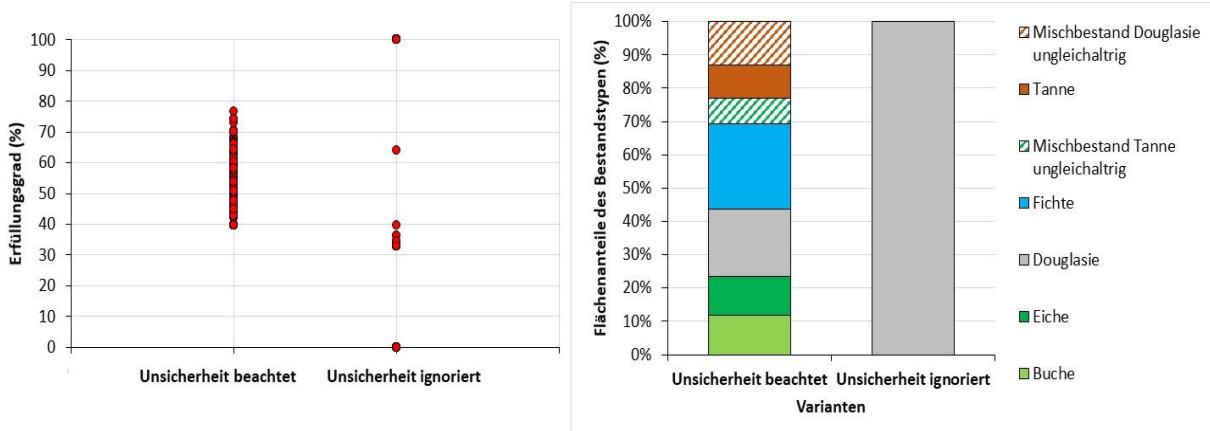


Abbildung 6: Simulierte Erfüllungsgrade bei Optimierung der Holzproduktion in einer Waldlandschaft mit und ohne Berücksichtigung von Unsicherheit (zum Optimierungsmodell siehe Knoke et al 2025).

hohe Effizienz zu erreichen. Die Verfolgung dieses Ziels hat in Deutschland zwar zu der erwünschten hohen Holzbereitstellung geführt, aber auch bereits vor etlichen Jahrzehnten auf großer Fläche Waldbestände hervorgerufen, die durch geringe Widerstandsfähigkeit, Resilienz und Anpassungsfähigkeit gekennzeichnet sind (Spiecker 2003; Seidl et al. 2017; Bolte et al. 2009). Durch die zeitlich weit auseinanderfallende Begründung und Hiebsreife der Waldbestände können heutige Waldbesitzende für die in solchen Beständen regelmäßig auftretenden verheerenden Schäden jedoch nicht verantwortlich gemacht werden. Landschaften mit vormals dichten reinen Nadelholzbeständen sind heute in Mitteleuropa oft durch Störungsflächen bisher kaum bekannten Ausmaßes gekennzeichnet. Durch das Prinzip der Holzproduktion und -bereitstellung in der zurückliegenden Waldbewirtschaftung wurden zwangsläufig regulierende ÖSL des Waldes weniger beachtet, da synergistische Wechselwirkungen zwischen Holzbereitstellung und anderen ÖSL nicht die Regel sind. Vor diesem Hintergrund haben in Deutschland bereits vor über 30 Jahren umfangreiche Waldumbauprogramme eingesetzt, um neben höherer Widerstandsfähigkeit, Resilienz und Anpassungsfähigkeit auch andere ÖSL als die Holzbereitstellung in Zukunft besser zu erreichen.

Der Waldumbau hin zu mehr Vielfältigkeit kann auch bei spezialisierten Zielsetzungen vorteilhaft sein,

nicht nur, wenn multiple Zielsetzungen zu erfüllen sind. Durch die damit einhergehende Diversifizierung von Waldbeständen und Waldlandschaften werden multiple Zielsetzungen implizit besser unterstützt als durch homogenisierte Wälder. Durch erzielte Risikominderungen kann ein möglicher Zielkonflikt zwischen heutigen und kommenden Generationen, die eventuell andere ÖSL als heute nachgefragt bevorzugen, positiv verändert werden. So ist in vielen Regionen eine flächige Übernahme vorhandener Fichtennaturverjüngung für die nächste Bestandesgeneration zwar kurzfristig die preiswerteste Lösung, man würde hierdurch aber erhebliche Unsicherheiten der Holzbereitstellung in die Zukunft verlagern. Dem kann schon heute durch sorgfältige Planung und Ergänzung vorhandener Naturverjüngung entgegengewirkt werden, die zu einer diversifizierten Waldzusammensetzung führt.

Die in der Vergangenheit oft erfolgte Fokussierung auf wenige Bestandestypen und Bewirtschaftungsvarianten mit einem vermuteten maximalen Durchschnittsergebnis führt dagegen tatsächlich zu großer Unsicherheit der möglichen Ergebnisse, insbesondere für einzelne Waldbestände. Der Einfluss einer Bewirtschaftung, die jegliche Unsicherheiten bei der Entscheidungsfindung ignoriert, kann beispielsweise durch eine Optimierungsanalyse reproduziert werden (Abbildung 6). Wollte man beispielsweise die Holzproduktion in einer Beispielbetrachtung für das

Tertiäre Hügelland im südlichen Bayern maximieren, ohne herrschende Unsicherheiten z. B. durch hohe Ausfallrisiken zu berücksichtigen, würde man bei Annahme homogener Standortsverhältnisse lediglich reine Douglasien-Bestände zum Anbau empfehlen, wie beispielsweise in Abbildung 6 demonstriert.

Eine „Douglasien-Strategie“ kann im besten Falle tatsächlich zu einer maximalen Holzproduktion führen. Wie bei allen anderen Baumarten kann es aber auch sein, dass in Zukunft aufgrund hoher Bestandesausfälle, z. B. wegen Befalls durch Schadorganismen, anstelle der maximalen lediglich eine minimale Holzproduktion erreicht wird. Ein ausgewogenes Waldportfolio, wie es die linke Säule im rechten Teil von Abbildung 6 skizziert, puffert diese Unsicherheit dagegen ab und garantiert einen Mindesterfüllungsgrad von 40 % für die Holzproduktion, egal welches der vielen einbezogenen Zukunftsszenarien eintritt.

Die direkte Berücksichtigung von Unsicherheit im Rahmen von Optimierungen ist vor diesem Hintergrund eine Möglichkeit, das Vorsichts- und Vorsorgeprinzip im Rahmen einer nachhaltigen Ressourcenutzung nachvollziehbar umzusetzen (Endres und Querner 2000). Die Anwendung des Vorsichtsprinzips durch Unsicherheitsberücksichtigung kann die Robustheit der Wälder und damit deren Funktionsfähigkeit hinsichtlich multipler ÖSL auch nach Störungen sichern.

Angewandt auf die Holzproduktion kann das Vorsichtsprinzip im Vergleich zum theoretisch maximal erwarteten Produktionspotenzial langfristig eventuell zu etwas weniger an durchschnittlicher Holzbereitstellung führen. Vor diesem Hintergrund scheint eine negative Korrelation zwischen Robustheit/Verlässlichkeit und maximaler durchschnittlicher Produktion zu bestehen. Aus dem Bereich der Biologie ist beispielsweise bekannt, dass Systeme, die unterhalb der maximalen Effizienz arbeiten, oft robuster sind (z. B. Maizel 2022). So können wir im Rahmen der Waldbewirtschaftung eine „Versicherungsprämie“ bewusst in Kauf nehmen, um gute über

zahlreiche denkbare Zukunftsszenarien zu gewährleisten, z. B. auch, wenn sich die Mortalitätsraten bei bestimmten Baumarten erhöhen sollten. In diesem Sinne führt der verantwortungsvolle Umgang mit Unsicherheit zum Prinzip „weniger ist mehr“.

Natürlich heißt das Streben nach Robustheit nicht, dass forstliche Entscheidungen zur Minimierung von Zielkonflikten und zur Nutzung von Synergien die positive Seite der Unsicherheit völlig ignorieren sollten. Neben den zukünftig potenziell schlechten Ergebnissen einer heutigen Entscheidung, die durch Risiken oder generell adverse Unsicherheiten verursacht werden, können sich aus Unsicherheit auch Chancen ergeben. Neue, aber im Moment unsichere Geschäftsfelder für Waldbesitzende sollten dringend erschlossen werden, z. B. die Vermarktung von ÖSL (z. B. Kindu et al. 2022b). Zudem sollten alternative Baumarten mit hohem Potenzial genauer untersucht werden, welche in Zukunft anbauwürdig werden, die heute jedoch noch ungeeignet sind (Wessely et al. 2024). Die gezielte Integration solcher Optionen in Optimierungsverfahren auf Landschaftsebene ist bislang jedoch weitgehend unerforscht.

Fazit: In Zukunft erscheint es vor dem Hintergrund des oben Gesagten ratsam, aufgrund des Vorsichts- und Vorsorgeprinzips nicht die maximal erhoffte Holzbereitstellung (oder ein Maximum für eine einzelne andere Wald-ÖSL) basierend auf unausgewogenen Waldportfolios und verbunden mit großen Unsicherheiten anzustreben, sondern langfristig vielfältige ÖSL ausreichend bereitzustellen. Einseitig zusammengesetzte Waldportfolios sind dagegen problematisch und auch dann kritisch zu betrachten, wenn sie regional begrenzt umgesetzt werden (vgl. Gregor et al. 2024).

5 Beeinflussung von Zielkonflikten und Synergien durch gesetzliche Regelungen

Gesetzliche Regelungen, die sich unmittelbar auf Zielkonflikte und Synergien auswirken, sind vor allem solche des Forst-, des Naturschutz-, des Wasser- und des Planungsrechts.

Forstrecht

Im Bereich des Forstrechts sind insbesondere die Waldfunktionskartierung sowie Vorgaben zur Waldbewirtschaftung (Kahlhiebsbeschränkungen, ordnungsgemäße Forstwirtschaft bzw. gute fachliche Praxis) relevant für den Umgang mit Zielkonflikten und die Ausnutzung von Synergien. Inhaltliche Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Waldfunktionskartierung hin zu einer umfassenden Waldfunktionsplanung wurden bereits unter 4.3 besprochen. Im Folgenden geht es um rechtliche Aspekte.

Waldfunktionskartierung (WFK). Die WFK ist in den einzelnen Bundesländern gesetzlich und inhaltlich unterschiedlich ausgestaltet. Aktuell dient sie vor allem dazu, die verschiedenen Waldfunktionen zu identifizieren und zu klassifizieren, potenzielle Ziel- und Nutzungskonflikte zu erkennen und abzustimmen sowie die Waldfunktionen für Entscheidungsprozesse und Genehmigungsverfahren zu nutzen.

Die so ausgerichtete WFK erscheint zwar grundsätzlich als zweckmäßig und geeignet, um Zielkonflikte und Synergien aufzuzeigen und zu transportieren. Da sie selbst keine rechtliche Verbindlichkeit besitzt und sie auch nicht zwingend in Planungen und Entscheidungen einzubinden ist, fehlt es ihr allerdings oft an hinreichender praktischer Wirksamkeit. Hinzu kommt, dass die bestehende WFK den Klimawandel i. d. R. noch nicht angemessen berücksichtigt.

Rechtliche Weiterentwicklungsvorschläge umfassen:

- Inhaltliche Ergänzung der WFK um Planungsaspekte, bzgl. Klimawandelanpassung und Schutz der Biodiversität (vgl. Kap. 4.3) sowie um

Vorrangflächen zur Wiederherstellung der Natur (SRU und Wissenschaftliche Beiräte 2023).

- Eine bessere Berücksichtigung der WFK im privaten Wald lässt sich durch eine in Zukunft konsequenter umzusetzende und als echte Governance-Innovation weiter entwickelte Honorierung der Wald-ÖSL begründen und könnte durch moderne Fernerkundungsmethoden, Monitoring sowie Modellierungen unterstützt werden.
- Maßnahmen, um eine stärkere Berücksichtigung der WFK sicherzustellen, z. B. bessere Berücksichtigung im Rahmen der Zertifizierung, spezielle Förderprogramme bzw. Priorisierung bei Förderprogrammen; im Einzelfall verbindliche Festlegung bzw. Sicherstellung wichtiger Waldfunktionen durch Rechtsverordnungen, z. B. als Waldschutzgebiete, Bannwälder oder Klimaschutzwälder. Erzeugung von verbindlicher Wirkung bei behördlichen Planungen und Maßnahmen für wichtige Waldfunktionen und zur Vermeidung von Zielkonflikten durch Integration in die Regionalpläne als Primär- oder Sekundärintegration.
- Ausweisung von Regionen mit Vorrang der Holzproduktion.

Vorgaben zur Waldbewirtschaftung. Auf Bundesebene gibt es aktuell keine unmittelbar verbindlichen waldgesetzlichen Bewirtschaftungsregeln, sondern lediglich rahmenrechtliche Vorschriften, welche von den Ländern umgesetzt und deutlich erweitert wurden. So enthalten nahezu alle Landeswaldgesetze mehr oder weniger verbindliche Kataloge, die die ordnungsgemäße Waldbewirtschaftung, bzw. die gute fachliche Praxis in der Waldbewirtschaftung, näher beschreiben und definieren. Mangels hinreichender Konkretisierung kommt diesen Katalogen jedoch keine verbindliche Wirkung zu. Anders verhält es sich regelmäßig bei den Vorschriften zur Beschränkung von Kahlhieben, zur Nutzung hiebsunreifer Bestände, zur Abwehr von Waldschäden sowie zu den Wiederaufforstungspflichten. Die vorstehend genann-

ten gesetzlichen Instrumente sind etabliert und haben sich über einen langen Zeitraum bewährt, um den Wald zu erhalten. Zur Steigerung der Multifunktionalität und Anpassungsfähigkeit der Wälder und zur Sicherstellung ihrer ökosystemaren Leistungsfähigkeit erscheint es jedoch angebracht, die bestehenden Regelungen angemessen weiterzuentwickeln. Einen grundlegenden Vorschlag hierzu hat der WBW bereits in seinem Positionspapier „Mehr als gute fachlich Praxis“ unterbreitet. Weitere Elemente, die Lenkungswirkung erzeugen und als Anknüpfungspunkte für konkrete Förderprogramme dienen können, wären v. a. Planungs- und Monitoringinstrumente auf betrieblicher Ebene durch ÖSL-Planung und -monitoring oder Klimawandel-Anpassungsplanung, die Implementierung betrieblicher Risikovorsorgeinstrumente sowie ein gesicherter Rechtsrahmen für Wälder, in denen zu Zwecken des Klimaschutzes (temporär) keine Holznutzung stattfindet, und die Zertifizierung der Kohlenstoffbindung durch Waldflächen. Diese Elemente ließen sich beispielsweise in die Forstbetriebsplanung im öffentlichen Wald integrieren.

Naturschutzrecht

Im Bereich des Naturschutzrechts wird die Bereitstellung von ÖSL durch Waldflächen v. a. durch die Ausweisung von Schutzgebieten maßgeblich beeinflusst, welche vor allem dem Schutz der Biodiversität dienen und insbesondere die Bewirtschaftung und Holzbereitstellung erschweren sowie die Zulässigkeit von Windenergieanlagen beschränken können. Da entsprechende Festsetzungen in das Grundrecht auf Eigentum eingreifen, sind sie nur im begrenzten Umfang zulässig und setzen u. a. voraus, dass die betroffenen Wälder aufgrund ihrer ökologischen Funktion, ihrer Lage oder auch wegen ihrer Schönheit schutzwürdig und -bedürftig sind (BVerfG, Beschl. v. 27.09.2022 - 1 BvR 2661/21). Demzufolge bleiben Steuerungsmöglichkeiten des Naturschutzrechts auf bestimmte, besonders schutzwürdige Kulissen beschränkt und sind nicht für alle Wälder funktional, um Zielkonflikte zu regeln.

Wasserrecht

Die unmittelbare Beeinflussung der Zielkonflikte zwischen unterschiedlichen ÖSL ist aus wasserrechtlicher Sicht vor allem durch die Festsetzung von Wasserschutz- und Überschwemmungsgebieten denkbar. Dahingehende Regelungen zielen auf den Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen sowie den Hochwasserschutz ab. Genau wie die nach Naturschutzrecht ausgewiesenen Gebiete, sind auch die Wasserschutz- und Überschwemmungsgebiete an bestimmte Gebietskulissen gebunden und ihre Steuerungswirkung damit nicht für alle Waldflächen wirksam.

Neben den nach Wasserrecht festgesetzten Schutzgebieten ist vor allem die Unterhaltung von Entwässerungsgräben in der Landschaft geeignet, erheblichen Einfluss auf die ÖSL der Wälder zu nehmen. Dahingehende Unterhaltungsmaßnahmen sind in vielen Bundesländern gesetzlich vorgeschrieben und werden von öffentlich-rechtlichen Gewässerpflegeverbänden durchgeführt. Während die damit verbundene, großflächige und nutzungsübergreifende Regulierung des Geländewasserhaushalts aus landwirtschaftlicher Perspektive in vielen Fällen sinnvoll erscheinen mag, kann sie für Waldflächen, deren Widerstandsfähigkeit und Leistungsvermögen hinsichtlich ÖSL, mit erheblichen Nachteilen verbunden sein und die hier diskutierten Zielkonflikte und Synergien beeinflussen. Die Auswirkungen der Unterhaltung der landwirtschaftlichen Entwässerungsinfrastruktur auf angrenzende Wälder sollten daher in Zukunft genauer analysiert und die Unterhaltungspflichten dementsprechend räumlich differenzierter gestaltet werden.

Regelungen mit mittelbarer Wirkung

Zusätzlich zu den vorstehend erläuterten Regelungen mit unmittelbarer Wirkung auf die vorliegend behandelten Zielkonflikte, gibt es zahlreiche Regelungen, die sich mittelbar auf diese auswirken können. Hervorzuheben sind diesbezüglich insbesondere

verdeckte Subventionen in Form von steuerrechtlichen Privilegien, die auf betrieblicher Ebene bestimmte Verhaltensweisen anreizen oder unterdrücken können. So können beispielsweise die steuerlichen Vergünstigungen für Holznutzungen infolge höherer Gewalt (§34b EStG) die Konsequenzen von Schäden durch Naturereignisse im Wald abschwächen. Dadurch können Anreize zur Risikominderung durch entsprechende waldbauliche Vorgehensweisen, z. B. Mischung und Ungleichaltrigkeit, oder Versicherungslösungen teilweise außer Kraft gesetzt werden. Es kann damit zu Anpassungsdefiziten kommen (Nürnberger et al. 2013), welche mit verminderten Wald-ÖSL einhergehen können (Knoke et al. 2020b).

Auf der anderen Seite könnten entsprechende steuer- oder gebührenrechtliche Privilegierungen aber auch dazu genutzt werden, um Anreize für die Bereitstellung bestimmter ÖSL zu schaffen oder die Akzeptanz diesbezüglicher Vorgaben zu steigern, so z. B. durch die Befreiung von Abgaben und Beiträgen für Wälder ohne Holznutzung oder besondere Abschreibungsmöglichkeiten für diese.

6 Waldpolitische Empfehlungen

Dieses Gutachten des WBW geht von einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz der Multifunktionalität des Waldes aus. Was dies konkret bedeutet, ist oft jedoch unklar, denn viele Ziele und Ansprüche können nicht gleichzeitig auf einer begrenzten Fläche und in vollem Umfang erfüllt werden. Konflikte, aber auch Synergien sind somit immanent. Die steigende Nachfrage nach dem Rohstoff Holz auf der einen sowie der zunehmende Einfluss von Störungen und Kalamitäten auf der anderen Seite verstärken Zielkonflikte und schränken Synergien ein. Ihre systematische Analyse liefert daher wichtige Informationen für zukünftige waldpolitische Rahmensetzungen, Richtlinien und Konzeption von Waldstrategien, für den Entwurf von Förderungskonzepten der Ressorts sowie für zukünftige Arbeitsschwerpunkte der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten zur Minderung von Zielkonflikten und Nutzung von Synergien.

Gerade für den Zielkonflikt der Nutzung der Ressource Holz ist ein Einbezug über den Wald hinausgehender Ziele und Auswirkungen für eine umfängliche Betrachtung nicht zu unterschätzen. Die Analyse von Zielkonflikten und Synergien dient dabei der Versachlichung der Diskussionen um die Erfüllung unterschiedlicher ÖSL. Die zahlreichen Zielkonflikte insbesondere zwischen mit der Holzbereitstellung verbundenen Zielen und dem Schutz der Biodiversität, aber auch mögliche Synergien, z. B. zwischen Schutz der Wasserqualität und Schutz der Biodiversität in älteren Wäldern, müssen in Zukunft besser quantifiziert, gesellschaftlich thematisiert und breiter diskutiert werden. Dabei sollten Wege für einen sparsameren Umgang mit den Waldressourcen besser genutzt werden. Widerstandsfähigkeit, Resilienz und Anpassungsfähigkeit der zukünftigen Waldbestände sollten nicht zugunsten einer lediglich unter optimistischen Annahmen möglichen Maximierung der Holzbereitstellung oder einer anderen ÖSL wie z. B. der Kohlenstoffspeicherung im Wald riskiert

werden. Die Einschätzung und Berücksichtigung von Risiken und Unsicherheiten gewinnt somit an Bedeutung, um realistische Vorstellungen über die tatsächlich mögliche Bereitstellung einzelner Wald-ÖSL zu erlangen. Das Gutachten des WBW kommt vor diesem Hintergrund zu folgenden Feststellungen und konkreten Empfehlungen:

Der Umgang mit Zielkonflikten und Synergien wird zur Grundlage der Waldpolitik

1. *Eine systematische Analyse von Zielkonflikten sollte zukünftig waldpolitischen Rahmensetzungen, Waldstrategien, Förderkonzepten und Abstimmungen zwischen verschiedenen Ressorts auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene vorausgehen.* Die Art und die Stärke von Zielkonflikten und Synergien geben wichtige Hinweise zu Verbesserungspotenzialen für die Bereitstellung von Wald-ÖSL. Aufbauend auf einer gründlichen Analyse von Zielkonflikten und Synergien können Prioritäten für die Bewirtschaftung des Waldes abgeleitet werden. Dies kann die Einbeziehung verschiedener Akteursgruppen auf den genannten politischen Ebenen erfordern.
2. *Die möglichen Folgen waldpolitischer Maßnahmen wie Gesetze, Richtlinien und Förderprogramme sind durch die waldpolitischen Akteure zur Vermeidung unerwünschter Effekte und zur Sicherung der erwünschten Priorisierung von Zielsetzungen vor allem im öffentlichen Wald differenzierter als bisher und schon im Vorfeld zu bewerten.* Dabei sind Auswirkungen z. B. durch Veränderungen bei der inländischen Holzbereitstellung auf die Waldbewirtschaftung in anderen Ländern genauso zu beachten wie die wünschenswerte Diversifizierung der Waldbewirtschaftung.

Zielkonflikte identifizieren und mindern

3. *Zielkonflikte könnten durch räumlich differenzierte Planung der Holzbereitstellung im Rahmen einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung reduziert werden. Eine Fokussierung auf die Holzbereitstellung beeinträchtigt eine Reihe anderer*

Wald-ÖSL. Dadurch wird beispielsweise die Förderung einer von Menschen ungestörten Entwicklung alter Wälder behindert („Old Growth“ Wälder), welche eine wichtige Möglichkeit zum Schutz der Biodiversität darstellen. Solche Zielkonflikte könnten durch räumlich differenzierte Planung der Holzbereitstellung im Rahmen einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung reduziert werden, ohne dabei die wichtige ökonomische Bedeutung gut erschlossener und nachhaltig nutzbarer Bestände oder Bestandesteile aus dem Blick zu verlieren.

4. *Aufgrund einer zu erwartenden steigenden Nachfrage nach Holz und dem wegen des Klimawandels langfristig sinkenden und mit großen Risiken behaftetes Nutzungspotenzial der Wälder sollte umgekehrt die Ausweisung von Totalreservaten ebenso evidenzbasiert und räumlich differenziert erfolgen. Mittels transparenter Entscheidungskriterien, wie z. B. im Rahmen einer systematischen Schutzgebietsplanung, kann auch hier die Effizienz erhöht werden, um die Bereitstellung der Ressource Holz nicht mehr als nötig zu beeinträchtigen.* Da viele Schutzgebietsverordnungen noch aus einer Zeit stammen, als man von einer Konstanz der Umweltbedingungen ausgegangen ist, besteht darüber hinaus vor dem Hintergrund des rasanten Klimawandels die Gefahr, dass sich bestehende Festsetzungen abträglich auf die Klimaschutzfunktion der Wälder sowie weitere ÖSL auswirken können. Vor diesem Hintergrund erscheint es erforderlich, Schutzziele, konkrete Schutzmaßnahmen und Gebietskulissen zu überprüfen, diese erforderlichenfalls neu abzuwagen und anzupassen, wobei auch die Bewertung der in diesem Gutachten behandelten Zielkonflikte neu zu justieren ist. Ähnlich wie bei den naturschutzrechtlichen Schutzgebieten erscheint auch bei den Wasserschutz- und Überschwemmungsgebieten eine Überprüfung der Festsetzungen und erforderlichenfalls deren Aktualisierung angezeigt. Ziel sollte

hierbei sein, qualitativ hochwertige Schutzgebiete zu identifizieren, die auch im Klimawandel mit hoher Wahrscheinlichkeit noch ihren Schutzzweck erfüllen können, und naturschutzfachlich bzw. wasserwirtschaftlich weniger wertvolle Gebiete eher für produktive Waldbewirtschaftung zu nutzen, oder für andere Wald-ÖSL, die weniger kompatibel sind mit strengen Schutzbestimmungen.

5. *Bei der Analyse von Zielkonflikten und Synergien sind lokale, regionale und überregionale Effekte, so genannte Verlagerungseffekte in Drittländer, zu berücksichtigen. Lokale oder regionale Einstellung bzw. Reduktion der Holznutzung könnten in Deutschland zwar zu höherer Biodiversität und/oder höherer Kohlenstoffspeicherung führen, negative Umweltwirkungen könnten dadurch aber in andere Regionen ausgelagert werden.* Bei gleichbleibendem Konsum sind erhöhte Importe oder verringerte Exporte notwendig, um den Bedarf an Holzprodukten zu decken. Dies würde in anderen Regionen zu erhöhten Holzeinschlägen eventuell in sensibleren Gebieten mit größeren Biodiversitätsverlusten, verringerten Kohlenstoffspeichern und höheren Treibhausgasemissionen durch verlagerte Produktion führen. Eine Analyse über die räumlichen Systemgrenzen hinweg mit einer Folgenabschätzung von möglichen Leakage-Effekten ist somit unabdingbar.
6. *Auch innerhalb der Holznutzung kommt es zu Nutzungskonkurrenzen um die zur Verfügung stehenden Rohholzsortimente.* Dabei sollten insbesondere die stoffliche Holznutzung in langlebigen Holzprodukten, wie sie vorrangig im Bausektor vorkommen, sowie eine möglichst lang andauernde Kaskadennutzung gefördert werden. Nur nicht stofflich verwertbare Waldhölzer und Industrieresthölzer sollten energetisch genutzt werden. Alt- und Resthölzer sollten vermehrt in die Rohstoffnutzung einbezogen werden.
7. *Zur Unterstützung der Identifikation und Minderung von Zielkonflikten und der Realisierung von Synergien können für die Forst-*

planung innovative Optimierungs- und Szenario-Analyseverfahren unter Berücksichtigung von Unsicherheiten eingesetzt werden. Die in diesem Gutachten des WBW enthaltenen Anregungen können durch Forstliche Versuchs- und Forsch-

ungsanstalten aufgegriffen und weiterentwickelt werden. Dies erhöht die Transparenz und Vermittelbarkeit von Planungsentscheidungen insbesondere im öffentlichen Wald. Dieses Gutachten des WBW enthält hierzu zahlreiche Anregungen

Box 8. Eine maximale Erfüllung aller Ansprüche und Wünsche ist nicht möglich

In einer idealen Welt könnten die vorstehend besprochenen Zielkonflikte durch den Staat als wohlwollenden Planer unter zwei Voraussetzungen (annähernd) aufgelöst werden: Erstens, der Staat kennt die Bewertung der einzelnen ÖSL durch die Gesellschaft und trifft darauf aufbauend eine aus wohlfahrtsökonomischer Sicht optimale Zuweisung von Verfügungsrechten. Und zweitens, der Staat kompensiert diejenigen, die Nutzeneinbußen hinnehmen müssen und stellt sie damit kompensiert nicht schlechter als vor der wohlfahrtsoptimalen Anpassung der Verfügungsrechte.

Dieser wohlfahrtsökonomische Ansatz ist jedoch aus vielerlei Gründen praktisch kaum umsetzbar. Ein wesentliches Hindernis stellt die Tatsache dar, dass es schwierig ist, den Nutzen verschiedener ÖSL in eine vergleichbare Einheit, z. B. in Geldeinheiten umzurechnen. Auch ist es problematisch, individuelle Nutzen gegeneinander aufzurechnen. Dies wäre aber Voraussetzung für die nutzengleiche Kompensation: Alle ÖSL müssten in Kompensationseinheiten umgerechnet werden und somit austauschbar gemacht werden. Dabei ist zum einen die Frage, ob Austauschbarkeit immer erwünscht ist. Zudem ist der Staat nicht allwissend. Er kann unmöglich die Präferenzen und Bewertungen aller Bürgerinnen und Bürger kennen, das ist auch vor dem Hintergrund vielfältiger Zukunftsunsicherheiten ausgeschlossen. Grundsätzlich gilt auch, dass ÖSL immer nur so weit getauscht und damit bewertet werden sollten, wie sie den Menschen die Lebensgrundlage nicht entziehen. Schließlich müssten die Kompensationen immer akzeptabel sein, was sicherlich in vielen Situationen nicht der Fall sein dürfte.

Vor diesem Hintergrund stellen die vorstehend genannten Lösungsansätze wie Szenarioanalyse, Modellierung, Multifunktionalität auf größerer Fläche durch räumliche Differenzierung, Berücksichtigung von Unsicherheiten und Ausnutzung von Synergien wichtige Instrumente für eine verbesserte Entscheidungsfindung im Sinne von tragfähigen Kompromissen dar. Akteursforen zur Verbesserung des gegenseitigen Verständnisses können die individuellen Bewertungen im Vorfeld beeinflussen und im Idealfall einen Ausgleich vereinfachen.

Ohne den Eingriff des Staates sind diese Lösungsansätze aber nicht ausreichend, um annähernd perfekte Lösungen zu erreichen. Grund dafür ist, dass die meisten ÖSL öffentliche Güter sind. Eine pauschale Zuweisung von Verfügungsrechten und das Vertrauen auf individuelle Vereinbarungen scheiden aus. Der Anreiz zum Trittbrettfahren steht einer optimalen Versorgung mit Ökosystemleistungen entgegen.

Damit ergibt sich als wichtige Schlussfolgerung dieses Gutachtens, dass eine Bereitstellung von Wald-ÖSL zur maximalen Zufriedenheit aller unerreichbar ist. Eine vollständige Auflösung von Zielkonflikten ist nicht möglich. Dennoch existieren Möglichkeiten, das Auffinden akzeptabler Kompromisse zu unterstützen. Solche Möglichkeiten zeigt der WBW mit seinem Gutachten anhand waldpolitisch interessanter Möglichkeiten zur Verbesserung der nachhaltigen Bereitstellung multipler Wald-ÖSL als essenzielle Beiträge zu einem guten Leben der Menschen sowie zur Minderung von Zielkonflikten und zur Förderung von Synergien auf.

Differenzierte Lösungen finden und gesetzliche Regelungen verbessern

8. Es gibt keine universelle Art der Waldbewirtschaftung („One-Size-Fits-All“), mit der Zielkonflikte vollständig aufgelöst werden können. In einer Werte-pluralen Gesellschaft stellen Zielkonflikte eine dauerhafte, systemimmanente Herausforderung der Waldbewirtschaftung dar. Die mitunter empfohlene, einzig richtige Art der Waldbewirtschaftung oder Nichtbewirtschaftung ist somit unseriös, denn Waldbewirtschaftung wird sich regelmäßig an gesellschaftlichen und privaten Zielen und Ansprüchen orientieren, die vielfältig sind, einem zeitlichen Wandel unterliegen und somit spezifische Antworten erfordern. Grundsätzlich ist daher auch eine Moralisierung von Sachfragen, die zu einer Einengung von Handlungsoptionen führt, einer Güterabwägung und umfassenden Darstellung und Differenzierung von Zielen auf der Landschaftsebene abträglich. Probleme, die aus monofunktionaler und riskanter Bewirtschaftung erwachsen, sind in Zukunft besser aufzuzeigen. Die Vielfalt von Waldstrukturen, Zusammensetzungen und Bewirtschaftungsverfahren sind unter Berücksichtigung von deren Wirkungen über die Waldgrenze hinaus zu fördern und nicht einzuschränken.
9. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Relevanz vielfältiger Zielsetzungen kann eine räumliche und zeitliche Priorisierung von Zielen für den öffentlichen Wald helfen, den gesellschaftlichen Nutzen der Waldbewirtschaftung durch geeignete Bewirtschaftungsstrategien zu erhöhen. Ziel-Priorisierungen können dann durch geeignete Förderinstrumente zumindest teilweise auch für den privaten Waldbesitz verstärkt werden, allerdings unter Wahrung des Vorrangs der Freiwilligkeit. Hier sollten Anreize durch Honorierungsmodelle für die Erreichung bestimmter Ziele einer Entschädigung für die Einschränkung der Bewirtschaftungsflexibilität vorgezogen werden.
10. Durch die Berücksichtigung von Unsicherheit bei Nutzung geeigneter Optimierungsverfahren ergibt sich in der forstlichen Planung automatisch eine empfehlenswerte Diversifizierung der langfristigen Zusammensetzung von Waldlandschaften, auch bei Fokus auf nur eine Wald-ÖSL. Risikodiversifizierung unterstützt implizit multiple Zielsetzungen besser als eine spezialisierte Landschaft. Mögliche Zielkonflikte, die durch Hinzunahme weiterer Wald-ÖSL entstehen, fallen somit geringer aus als in Landschaften, in denen keine Risikodiversifizierung erfolgt ist. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei forstlichen Planungen wäre somit bereits ein wichtiger Schritt in Richtung multifunktionaler und risikobewusster Waldwirtschaft.
11. Hemmnisse für Diversifizierung und Risikovorsorge durch Waldbesitzende sind abzubauen, entsprechende waldbauliche Freiheiten für Waldbesitzende müssen gezielt erhalten und geschaffen werden.
12. Anreize für die Bereitstellung von Wald-ÖSL und zur Risikodiversifizierung werden insbesondere dort gebraucht, wo es große Zielkonflikte mit der Holzbereitstellung gibt, die bislang fast die gesamte finanzielle Basis der Waldbewirtschaftung bildet. Sowohl privatwirtschaftliche Honorierungen, wie z. B. Prämien für wasserschutzgemäße Bewirtschaftung im Trinkwasserschutzgebiet, als auch staatliche Honorierung der Bereitstellung der Wald-ÖSL sollten daher weiter ausgebaut werden, um Kompromisse hinsichtlich dieser Zielkonflikte für die Betroffenen akzeptabler zu machen. Ein konzeptionelles Umdenken weg von der Entschädigung und hin zur Honorierung der Bereitstellung von regulierenden Wald-ÖSL kann dabei akzeptable Lösungen unterstützen und Anreize setzen.
13. Die Ausweisung von Vorranggebieten zur Umsetzung bestimmter Ziele - für den privaten und kommunalen Wald auf freiwilliger Basis - kann hilfreich sein und zur Effizienzsteigerung beitragen.

gen. Multifunktionalität ist somit vor allem eine Frage der räumlichen und zeitlichen Skalen der Zielverfolgung sowie der Schwerpunktsetzung im Einzelfall. Z. B. können Bereiche mit hoher Priorität für die Holzbereitstellung im Rahmen einer erweiterten Waldfunktionsplanung ausgewiesen werden, deren Bewirtschaftung die Holzbereitstellung in den Vordergrund stellt, dabei jedoch die Anpassungsfähigkeit der Wälder beachtet. Dies kann eventuell auch temporär erfolgen, insbesondere bei heute sehr labilen Waldstrukturen. Zeitlich kann beispielsweise die Nutzung labiler Waldbestände zur Bereitstellung von Bauholz im Zuge des Waldumbaus priorisiert werden. Nach erfolgreichem Waldumbau kann dann auch anderen Wald-ÖSL Vorrang gegeben werden. Dazu sollte die Waldfunktionskartierung zu einer umfassenderen Waldfunktionsplanung entwickelt werden. Sie kann so als Teil einer forstlichen Rahmenplanung zur Minderung räumlicher und zeitlicher Zielkonflikte dienen und mit Hilfe neuer Verfahren modernisiert und regelmäßig fortgeschrieben werden. Zur Stärkung der Waldfunktionsplanung sollte diese einerseits im Wege der Primär- oder Sekundärintegration in die Regionalplanung aufgenommen und andererseits verbindlich in die Forsteinrichtung in öffentlichen Wäldern integriert werden. Die Wirkung der Waldfunktionsplanung kann durch flankierende Anreizsysteme unterstützt werden, z. B. durch Förderung, gestufte oder verstärkte Honorierung von ÖSL oder durch Generierung von Umweltzertifikaten.

14. *Eine Minderung von Zielkonflikten erfordert Dialogprozesse.* Geeignete Instrumente und Prozesse zur Abstimmung der waldbelastischen Ziele mit den relevanten Akteuren sind, ergänzend zu den schon existierenden Instrumenten, auf verschiedenen politischen Entscheidungsebenen zu entwickeln und zu etablieren, um das Bewusstsein für Zielkonflikte zu stärken und diese künftig zu mindern. Die Förderung von Problembewusstsein und partizipativer Bedarfsklärung kann geeignet sein, um Akzeptanz zu erhöhen und sektorale Konflikte gemeinsam zu lösen, z. B. durch die Einrichtung von Akteursforen auf verschiedenen Ebenen, vor allem auf lokaler Ebene.
15. *Konsequenzen eines bewussteren Umgangs mit Zielkonflikten und Synergien können durch Monitoring & Entwicklung von Bewertungsinstrumenten ex-post festgestellt bzw. durch Politikfolgenabschätzungen ex-ante analysiert werden.* Dies umfasst auch soziales Monitoring, faktenbasierte Wissensvermittlung, Kommunikation und Diskussion über Wahrnehmung zur Zielerreichung, in Ergänzung zur Messung.

7 Anhang

7.1 Anhang „Einsatz von Pflanzenschutzmitteln“

Wechselwirkungen mit dem Schutz des Klimas. Die Verhinderung von Blatt- resp. Nadelverlust durch blattfressende Insekten mit Hilfe von PSM ist Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der Fotosyntheseleistung, daneben verändern Fraßereignisse CO₂- und N₂O-Emissionen (Grüning et al. 2018; Popkin 2019). Die Fotosynthese ist nicht nur der grundlegende Prozess für die Überlebensfähigkeit (Bereitstellung chemischer Energie, Zucker, Abwehrstoffe, Wassertransport) der Pflanzen, sondern ermöglicht auch eine Vielzahl von Ökosystemleistungen (Kohlenstoffspeicherung, Sauerstofffreisetzung, Transpiration/Kühlung, Interaktion zum Biom etc.) (Körner 2003). Darüber hinaus puffert das „Blätterdach“ Hitzeextreme über die Schattenwirkung, reguliert so das standörtlichen Mikroklima und wirkt auf das Regionalklima. Bei flächigem Absterben von Beständen ist auf Grund des langen Entwicklungszeitraumes erst nach Jahrzehnten wieder mit einem geschlossenen Waldbestand zu rechnen.

Wechselwirkungen mit dem Schutz der Biodiversität. Die Gefährdung von Teilen des faunistischen Arteninventars durch den Einsatz von PSM ist das zentrale Konfliktthema. Zunächst profitieren die Fraßfeinde von Phytophagen (Antagonisten) kurzfristig vom großen Nahrungsangebot an blattfressenden Insekten (Reike und Möller 2018). Sterben Bäume in Folge des Insektenfraßes ab, werden die Waldstruktur und damit die Lebensraumeignung für bestimmte Waldarten langfristig beeinflusst. Nicht nur holzzersetzende Organismen profitieren vom hohen Anfall an Totholz.

Die Verwendung von PSM-Mitteln führt in einem kurzen Zeitfenster je nach Selektivität des Mittels zum Abtöten von Phytophagen und von Nichtzielorganismen. Dies kann kurzfristig die Artenzusammensetzung und die Abundanz von Nichtzielorganismen negativ beeinflussen. Andererseits werden bei Blatt- bzw. Nadelverlust Nahrungsketten

über Monate bis Jahre unterbrochen (u. a. Bell und Whitmore 1997; Wanner et al. 2005; Barron und Patterson 2008; Manderino et al. 2014). Auswirkungen auf Singvögel, die alleinig PSM-Einsätzen zugeordnet werden sind bisher nicht belegt (Sopuck et al. 2002; Sedlaczek und Menge 2019).

Langfristige Effekte von PSM-Einsätzen auf die Biodiversität in Wäldern sind in der wissenschaftlichen Literatur nicht benannt. Sehr unterschiedliche Lebensweisen und Entwicklungszyklen sowie ein schneller Abbau der PSM in der Baumkrone führten bei Betrachtung aller Arten zu einer geringen Betroffenheit in der gesamten Lebensgemeinschaft (Stähler et al. 2018). Die Insektengemeinschaft kann sich so auf natürliche Weise regenerieren und sowohl Insektenzahl als auch Artzusammensetzung bleiben langfristig erhalten. Auf der Ökosystemebene bleibt das Kronendach für die Stabilisierung des Waldklima erhalten.

Bei einem Verzicht auf PSM-Einsätze sind die Auswirkungen von massivem Blatt- und Baumverlusten für die Biodiversität ebenfalls mit direkten und indirekten Effekten sehr komplex und für das Arteninventar eines Ökosystems keineswegs folgenlos (Günther et al. 2024; Sedlaczek und Menge 2019). Höhere Temperaturen durch Verlust der Baumkronen können Offenlandarten und andere wärmeliebende Arten zu Lasten von schatten- und feuchteliebende Waldarten sowie in den Baumkronen lebende Arten fördern; das heißt die Anzahl typischer Waldarten geht zurück und einige an den Wald angepasste Arten verschwinden. Mit dem Absterben von Bäumen nimmt der Offenlandcharakter von Wäldern zu, ggf. einhergehend mit einem Verlust der Habitateignung für bestimmte Waldarten.

Wechselwirkungen mit Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Die Auswirkungen des Verzichts bzw. des Einsatzes von PSM auf die Erholungsfunktion von Wäldern lässt sich aufgrund unterschiedlicher Ziele und Wünsche von Waldbesuchenden nicht generalisieren.

Bei einem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist das Betreten des Waldes kurzfristig (maximal 2 Tage) verboten, um jedes Risiko für Waldbesuchende auszuschließen. Danach kann der Wald wieder uneingeschränkt betreten werden. Durch den Einsatz von PSM bleibt das gewohnte Waldbild erhalten.

Im Zuge des Gesundheitsschutzes können Regulierungsmaßnahmen notwendig werden, wenn Insektenarten, wie Prozessions- und Kiefernspinner durch ihre Behaarung allergische bzw. toxische Reaktionen hervorrufen, die ggf. mehrere Jahre anhalten. In diesem Fall wird die Erholungsfunktion des Waldes stark eingeschränkt, wenn die Raupen dieser Arten nicht mit einem Insektizid behandelt werden.

Wechselwirkungen mit dem Schutz vor weiteren Naturgefahren. Insbesondere Nadeln haben eine wichtige Filterfunktion gegenüber Luftschadstoffen und Feinstaub. Laubblätter reduzieren die Lärmbelastung entlang von Straßen und im urbanen Raum. Fraßbedingter Verlust der Assimilationsorgane reduziert folglich diese Filterfunktion, die vor allem in Schutzwäldern (z. B. zur Abschirmung von Emissionen) zielgerichtet genutzt wird (Laverne und Kellogg 2019).

Durch das massenhafte Absterben von Bäumen würden auch andere Schutzfunktionen, z. B. Schutz vor Bodenerosion, Hangstabilisierung usw. verloren gehen, während die Humuszersetzung, Tiefenverlagerung/Leaching von Nährstoffen zunehmen.

Wechselwirkungen mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Die biochemische Synthese von Lignin und Zellulose ist unmittelbar an die Fotosyntheseleistung (s. o.) gebunden. Aufgrund der Langfristigkeit der Holzproduktion im Lebenszyklus von Bäumen würden temporäre Wachstumsreduktionen keinen Einsatz von PSM rechtfertigen, solange das Überleben von Beständen nicht direkt oder indirekt durch Folgeschäden (z. B. Pracht- und Borkenkäfer oder pilzlichen Schaderregern) gefährdet ist. Bei geringeren Fraßintensitäten und günstigen Witterungsbedingungen ist eine Regeneration der Bäume

sehr wahrscheinlich. Für Kiefern ist der tolerable Nadelverlust gut untersucht (Wenk und Möller 2013). Allerdings sind die Fotosyntheseprodukte nicht nur der Ausgangsstoff für die Holzbildung, sondern auch für die Synthese aller anderen Komponenten zur Abwehr von Stressfaktoren. Damit führen Fraßschäden zu einer deutlichen Schwächung der Bäume gegenüber Folgeschäden (u. a. Delb 1996; Schafellner und Möller 2019). Am Beispiel von Massenvermehrungen in Kiefernbeständen wurde die ökonomischen Folgen von Fraß bzw. PSM-Einsatz für Waldbesitzende untersucht (Maaß und Kehlenbeck 2024).

Wechselwirkungen mit der Bereitstellung anderer Waldprodukte. Die aktuell zugelassenen Pflanzenschutzmittel (Wirkstoffe sind auch in der Landwirtschaft zugelassen) sind auf Pilzen, essbaren Pflanzen und Beeren, wenn, dann nur kurz nach der Applikation nachweisbar und die Konzentration liegt weit unter den zugelassenen Grenzwerten. Zur größtmöglichen Sicherheit dürfen essbare Waldprodukte trotzdem erst drei Wochen nach PSM-Anwendung wieder gesammelt werden.

Ein Sonderfall nimmt die Produktion von Saatgut in zugelassenen Saatguterntebeständen ein. Samen und Früchte sichern die künftige Waldgeneration im Zuge der natürlichen und künstlichen Verjüngung. Verschiedene Baumarten blühen und fruktifizieren in der reproduktiven Lebensphase nur wenige Male innerhalb eines Jahrzehnts. Saatgut ist daher bei einer Reihe von Baumarten ein knappes Gut und bedarf besonderer Waldbehandlungen, einschließlich des Schutzes des Reproduktionsvermögens. Da das Reproduktionsvermögen u. a. an die Vitalität der Bäume auch vor einem Fraßereignis gebunden ist, kann der Vitalitätserhalt je nach vorrangiger Zielsetzung der Waldbewirtschaftung in den Vordergrund gestellt werden und damit auch den Einsatz von PSM bereits bei geringeren Risiken rechtfertigen.

Regelungen zum Einsatz von PSM. Der Einsatz von chemischen oder biologischen Pflanzenschutzmitteln zum Erhalt von Waldbeständen und deren ÖSL als

„*ultima ratio*“ unterliegt einem komplizierten Abwägungsprozess nach ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten, der in kürzester Zeit in einer besonders anfälligen Phase der Insektenentwicklung getroffen werden muss.

Die Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen, insbesondere von Zulassung und Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in Deutschland ist durch die europäische Verordnung (EG) 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln geregelt. Die EU-Richtlinie 2009/128/EG gibt den Aktionsrahmen für die nachhaltige Verwendung von Pflanzenschutzmitteln vor. Sie ist damit Grundlage des entsprechenden Nationalen Aktionsplans. Darin wird ein hohes Schutzniveau für Mensch, Tier und Naturhaushalt, einschließlich der Oberflächengewässer und des Grundwassers festgeschrieben.

Gesamtbewertung des Konfliktpotenzials und Lösungsansätze zur Konfliktminderung:

- langfristig Mischbestände begründen, die das Risiko mindern (zumindest für monophage Insekten),

- die gesamtgesellschaftlichen Folgen, insbesondere im Hinblick auf die Ökosystemleistung Klimaschutz, müssen faktenbasiert bewertet werden,
- Entwicklung einer Vielfalt selektiv wirkender PSM, die Nichtzielorganismen kaum gefährden, was angesichts der aktuellen Zulassungssituation im Forst langfristig aussichtslos erscheint,
- Statistik zur Anwendung/Ablehnung von PSM-Einsätzen und deren Folgen,
- mittelfristig wird das Problem bleiben: Wege zur Lösung des Konflikts notwendig.

Der Einsatz von PSM sollte nicht kategorisch ausgeschlossen werden, wenn hierdurch ökologisch und ökonomisch wertvolle Waldökosysteme erhalten werden können. Die Risiken für die Waldbesitzenden sind sehr hoch, die Kosten für Monitoring und PSM-Einsatz sind dagegen relativ niedrig im Vergleich zu den wirtschaftlichen Verlusten bei Kahlfraßereignissen, insbesondere für mittelalte Kiefernforsten (Maaß und Kehlenbeck 2024).

7.2 Anhang „Holzbereitstellung“

Zielkonflikte im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Holz entstehen nicht nur mit anderen Wald-ÖSL (siehe Kap. 3.2), sondern auch innerhalb der Holzbereitstellung selbst, da die einzelnen zur Verfügung stehenden Holzsortimente (Waldholz, Industrierestholz, Gebrauchtholz) für verschiedene Nutzungen (z. B. Vollholz, Holzwerkstoffe, energetische Nutzung, Bioraffinerie) geeignet sind und sich hieraus Konkurrenzen ergeben. Weiterhin ergeben sich möglicherweise Marktverschiebungen oder Zielkonflikte, wenn bisher energetisch genutztes Holz stofflich verwendet werden soll oder umgekehrt, da jeweils andere Materialien als Ersatz zur weiteren Deckung des Bedarfs eingesetzt und deren Klima- und andere Umweltwirkungen hinzugerechnet werden müssten (Weber-Blaschke und Friedrich 2015).

Wechselwirkung mit der Kohlenstoffspeicherung im Wald bzw. dem Klimaschutz. In einem gesteigerten Einsatz von Holz für den Bau von Wohnungen wird eine effiziente Klimaschutzmaßnahme gesehen (Churkina et al. 2020). Die Verwendung von Holz im Bausektor hängt jedoch von der Nachfrage in diesem Segment ab (z. B. welche Wohnungsmarktprognosen oder politischen Ziele verwendet werden). Hier spielt die Befriedigung der gesellschaftlichen Nachfrage (z. B. nach Wohnraum) eine entscheidende Rolle. Diese Nachfrage liegt außerhalb des Einflussbereichs der Waldbewirtschaftung. Deshalb sollte das Ziel sein, den eingesetzten Holzrohstoff möglichst ressourcen-effizient zu verwenden (Hafner und Schäfer 2017), um möglichst viel Nutzen (z. B. Wohnraum) mit dem eingesetzten Material bei minimalen Treibhausgas-emissionen zu erzeugen.

Zur Ermittlung eines realistischen Treibhausgasminderungspotentials einer möglicherweise gesteigerten stofflichen Holznutzung zur Materialsubstitution im Wohnungsneubau kann die Wohnungsmarktprognose 2030 des Baureorts über den künftigen Wohnungs-neubaubedarf als Referenzszenario definiert werden. D. h. bei den modellierten Alternativszenarien, die

von einer Steigerung der Holzbauquoten bis 2030 ausgehen, kann nur dort von einer gesteigerten Holzbauquote ausgegangen werden, wo dies auch mit der prognostizierten und stark voneinander abweichenden Wohnflächennachfrage auf kommunaler Ebene vereinbar ist. Basierend auf diesen Kernnahmen kamen Rüter und Hafner (2021) zu folgenden Ergebnissen: In einem der alternativen Holzverwendungsszenarien (55/15 steigend) wurde ein Entwicklungspfad beschrieben, der von einer kontinuierlichen Steigerung der Holzbauquote im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser auf 55 % und im Bereich der Mehrfamilienhäuser auf 15 % bis 2030 ausgeht. Im Ergebnis wurde hierfür ein deutschlandweites Treibhausgaseinsparpotential in Höhe von 1,43 Mio. t CO₂-Äqu. pro Jahr ermittelt, das sich aus dem biogenen Kohlenstoffspeichereffekt in den zusätzlich verwendeten Holzbauprodukten in Höhe von 0,65 Mio. t CO₂-Äqu. und deren Treibhausgas-substitutionseffekt in Höhe von 0,78 Mio. t CO₂-Äqu. zusammensetzt. Davon abzuziehen ist die mit dem Mehrbedarf an Rohholz (1,9 Mio. m³/Jahr) einhergehende Reduktion des prognostizierten CO₂-Senken-effektes im Wald, so dass sich über den gesamten Szenarienzeitraum (2016 bis 2030) ein Minderungs-beitrag in Höhe von 6,48 Mio. t CO₂-Äqu. aufsummiert (Hafner und Rüter 2018; Rüter und Hafner 2021). Allein 2023 wurden in Deutschland 674 Mio. t CO₂-Äqu. emittiert (Statista 2023). Der mögliche Beitrag der CO₂-Bindung im Wohngebäudebau zur Gesamt-Klimabilanz darf folglich nicht überschätzt werden.

Die energetische Holznutzung ist für alle Teile eines Baumes möglich, die C-Speicherung durch die zeitnahe Energienutzung aber vernachlässigbar, da das zuvor im Holz gespeicherte CO₂ nach kurzer Lagerung des Energieholzes zur Trocknung wieder emittiert wird. Bei Annahme der biogenen Kohlenstoffneutralität (es entweicht genauso viel biogenes CO₂ wie zuvor aufgenommen wurde) weist die Holzenergie geringere fossile Treibhausgas-emissionen über den Lebensweg auf als fossile

Energieträger, so dass fossil-basierte Treibhausgase durch Energiesubstitution eingespart werden können. Insbesondere bei Betrachtung einzelner Waldbestände sind hier jedoch auch zeitliche Aspekte zu beachten, weil es wichtig ist, wann CO₂ gebunden und wann es emittiert wird. Weil soziale Kosten als Barwert aller zukünftig erwarteten Schäden einer heute emittierten Tonne CO₂ kalkuliert werden, hat vor allem die zeitnahe Bindung von CO₂ einen hohen sozialen ökonomischen Wert (Knoke et al. 2023a). Die CO₂ Akkumulation während der Lebenszeit eines Baumes trägt zur Minderung von Schäden durch den Klimawandel bei, auch wenn die Bindung nur temporär ist, weil das Holz nach der Ernte energetisch genutzt wird. Soziale Kosten des CO₂, z. B. durch gesundheitliche Schäden oder Schäden an der Infrastruktur, werden während der Speicherdauer des Kohlenstoffs vermieden. Somit hat auch temporäre Speicherung in später energetisch genutztem Holz immer einen positiven sozialen Wert.

Für die Holzverwertung in Bioraffinerien ist wie bei der energetischen Nutzung kein besonderer Waldbau notwendig, da sich innovative Verfahren von Aufschlüssen verschiedener Holzarten, z. B. für Buche, die keine besonderen Qualitäten aufweisen müssen, in Entwicklung befinden. Auch die Verwertung von Alt-holz in Bioraffinerien wird gerade erprobt. Durch die vielfältigen Optionen der Produktgewinnung in Bioraffinerien ist aber unklar, welche Endprodukte tatsächlich entstehen und wie langlebig diese sind, also in welchem Maße diese Produkte längerfristig Kohlenstoff speichern. Bioraffinerien nutzen zwar stofflich-herseits Biomasse anstelle von fossilen Rohstoffen als Ausgangsstoffe, die Aufschluss- und Herstellungsverfahren benötigen aber viel Energie. Lignin, das bei Aufschlussverfahren mit Fokus auf Cellulose als Reststoff mit der sogenannten Schwarzlauge angefallen ist, wurde bisher intern als Brennstoff verwendet und der Energieüberschuss verkauft. Da Lignin ein wertvoller Ausgangsstoff z. B. für Phenole ist, wurden neue Verfahren entwickelt, um Lignin in reinerer Form zu gewinnen. Dadurch fällt aber Lignin

als Energiequelle weg. Bei Ersatz durch fossile Energieträger hätte das entsprechend Einfluss auf die Klimabilanz. Bioraffinerien müssen daher auf erneuerbare Energie setzen sowohl bei der Eigenenergieerzeugung als auch bei der externen Stromversorgung und als integrierte Bioproduktwerke CO₂ neutrale Energieautarkie anstreben.

Die Klimawirkungen von Wald und Holznutzung hängen somit sowohl vom Waldspeicher, Holzproduktespeicher als auch von der Material- und Energiesubstitution ab, die sich gegenseitig beeinflussen. Ob es sich um einen Zielkonflikt, neutrale Ziele oder sogar eine Synergie handelt, hängt somit sehr vom Blickwinkel der Betrachtung ab. Selbst wenn die Betrachtung allein auf den Waldspeicher beschränkt wird, entsteht ein moderater aber kein starker Zielkonflikt (Typ B), zumindest unter der Voraussetzung, dass ein kluger Waldumbau gelingt.

Wechselwirkungen mit dem Schutz der Biodiversität. Die Anreicherung von Laubwäldern mit ertragssstarken Nadelbäumen zur Steigerung der Holzbe- reitstellung, wie Fichte oder Douglasie, ist ein weiteres Konfliktfeld zwischen Naturschutz und Holznutzung. Ein wichtiges Kennzeichen von aus Naturschutzsicht wünschenswerten Wäldern ist neben dem lebenden Holzvorrat und dem Totholzangebot in unseren Breiten auch die Dominanz von Laubbäumen. Die bisher vorliegenden Studien deuten auf überproportional starke Effekte der Nadelholzbeimischung auf die Lebensgemeinschaften hin (Leidinger et al. 2021), sodass sich bereits ab geringen Mischungsanteilen Zielkonflikte ergeben können.

Der Schutz der Biodiversität auf Störungsflächen könnte dagegen vermutlich gut in die zukünftige Waldbewirtschaftung integriert werden (z. B. Aszalós et al. 2022), insbesondere wenn es sich um lichte Waldtypen handelt. Hieraus würde sich nur ein moderater Zielkonflikt (Typ B) ergeben.

Wechselwirkungen mit der Erholung, Gesundheit, Sport und dem Tourismus. Durch eine Steigerung der Bereitstellung der Ressource Holz werden Erholung,

Gesundheit, Sport und Tourismus im Allgemeinen nicht stark beeinträchtigt. Eine aktuelle Befragung für Deutschland legt nahe, dass die Erholungsstörung durch Forstwirtschaft von den Waldbesuchenden als gering eingestuft wird (Elsasser 2024). Dieses Ergebnis deutet für die Holzproduktion und die Erholungsmöglichkeiten auf fallweise neutrale Ziele hin (Typ A).

Allerdings konnten Sing et al. (2018) am Beispiel von Großbritannien einen negativen Einfluss der Bewirtschaftungsintensität auf die Erholungsfunktion und die Gesundheit finden. Der mit hoher Bereitstellung der Ressource Holz oft verbundene Maschineneinsatz kann die positiven Wirkungen der Erholung im Wald beeinträchtigen. Erholung im Wald bringt grundsätzlich positive gesundheitliche Effekte durch körperliche Aktivität, soziale Interaktion und mentale

Erholung mit sich (Sing et al. 2018). Von Bäumen abgegebene volatile organische Substanzen können dabei das Immunsystem und die Gesundheit fördern (Muro et al. 2023). Dieser Effekt wird beim „Waldbaden“ genutzt. Positive Wirkungen des Waldbadens konnten auch in kommerziell bewirtschafteten stadtnahen Wäldern gemessen werden (Korcz et al. 2021). Durch Steigerung der Bereitstellung der Ressource Holz können auch die ohnehin schon existierenden Konflikte bei steigender Nutzung von Wäldern von Sportlern und Sportlerinnen (z. B. Mountainbiking) und Touristen (Wilkes-Allemann et al. 2015) weiter verschärft werden. Durch gute Bewirtschaftungsplanung und Kommunikation können die überwiegend moderaten Zielkonflikte (Typ B) jedoch minimiert werden.

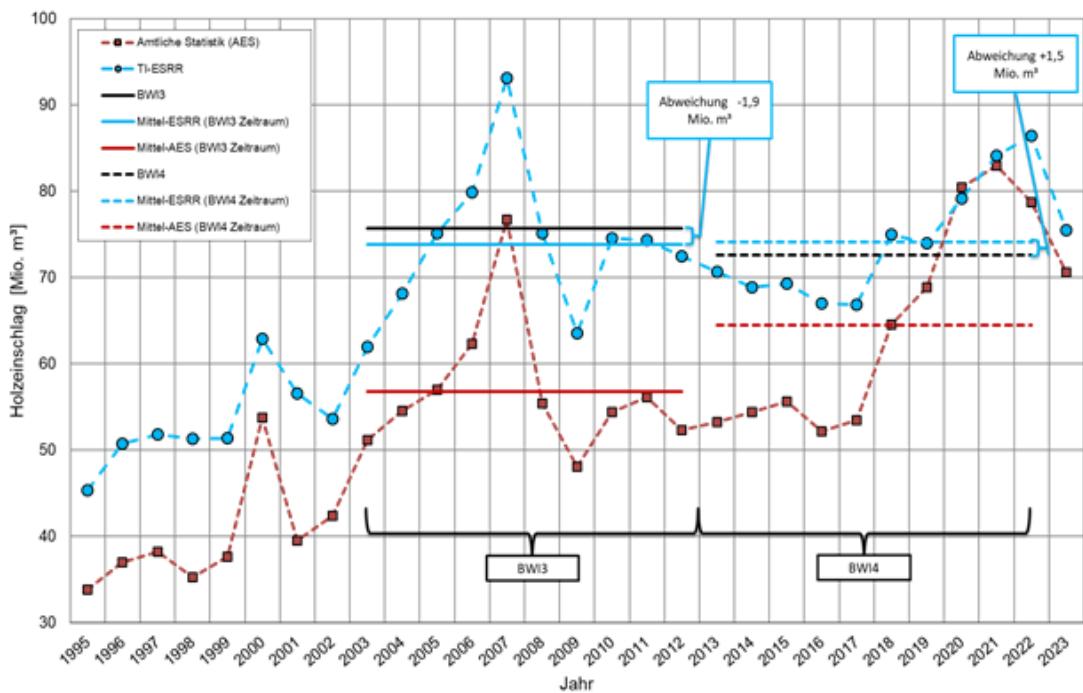


Abbildung A1: Holzeinschlag der deutschen Forstwirtschaft nach unterschiedlichen Datenquellen in den Jahren 1995 bis 2023. Quellen: Jochem et al. (2025) auf Grundlage von Statistisches Bundesamt (Holzeinschlagsstatistik; Code: 41261), Thünen-Einschlagsrückrechnung 2023 (Jochem et al., 2024) Bundeswaldinventur 2012 & 2022 (Thünen-Institut)

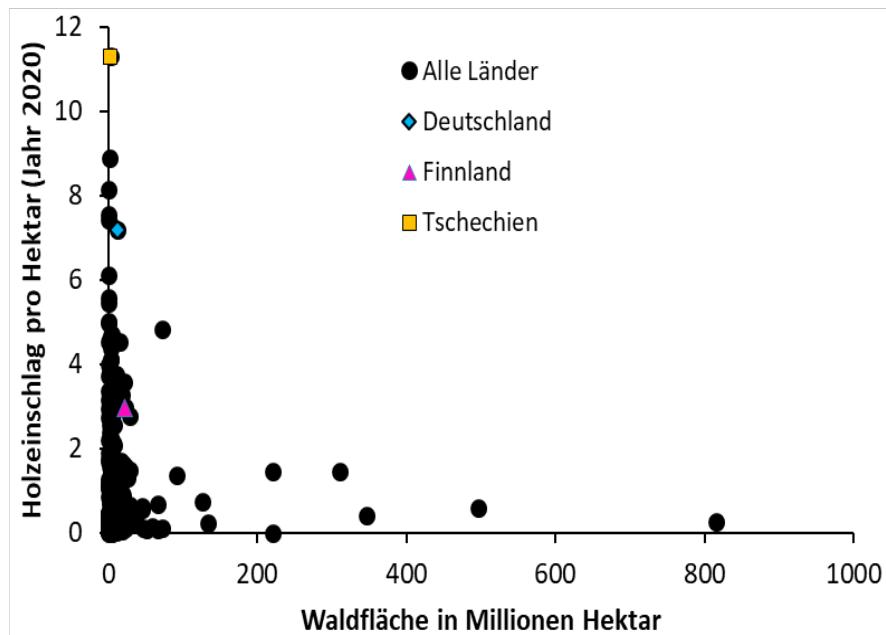


Abbildung A2: Einschlag von Rundholz pro Hektar im Jahr 2020 nach Angaben von FAO (Food and Agriculture Organization of the UN): <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

7.3 Anhang „Kohlenstoffspeicher im Wald“

Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Die Erhöhung des Kohlenstoffspeichers im Wald kann zumindest zeitweise mit einer verminderten Holzbereitstellung einhergehen, wodurch den Waldbesitzenden Opportunitätskosten entstehen (Kindu et al. 2022a). Diese Opportunitätskosten werden in der Diskussion um Kohlenstoffemissionszertifikate, die Forstbetriebe generieren könnten, meist vergessen oder unterschätzt. Dabei darf auch die steigende Ausfallwahrscheinlichkeit von Waldbeständen mit zunehmenden Holz- und Kohlenstoffspeichern nicht ausgeklammert werden, denn das Störungsrisiko nimmt in dichten Beständen und mit der Baumhöhe und dem Bestandesalter zu (Schelhaas et al. 2003; Gardiner 2021).

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität. Anhebungen des Kohlenstoffspeichers im Wald müssen nicht unbedingt zu einem starken Konflikt mit dem Schutz der Biodiversität führen (vgl. Meyer et al. 2023). Eine beispielhafte Zielkonfliktanalyse ergab einen moderaten Konflikt zwischen beiden Zielen (Typ B, Abbildung 4). Eine deutliche Steigerung des Kohlenstoffspeichers und der Speicherrate waren bei nur geringer Abnahme der Biodiversitätskriterien auf der Landschaftsebene möglich (Knoke et al. 2025).

Hohe Laubholzanteile, die viel Kohlenstoff speichern, unterstützen auch den Schutz der Biodiversität. Mäkelä et al. (2023) analysierten beispielsweise den Einfluss von Waldbewirtschaftungsstrategien auf den Kohlenstoffspeicher und auf Biodiversitätsindikatoren (Habitat-Eignungsindex, Totholz und Birkenholzvolumen). In ihrer Studie konnten Mäkelä et al. (2023) keinen Einfluss der Kohlenstoffspeicherhöhe und der Kohlenstoffflüsse auf die Biodiversitätsindikatoren finden, was auf fallweise neutrale Ziele hindeutet (Wechselwirkung Typ A).

Allerdings kommt eine Steigerung des Kohlenstoffspeichers im Wald nicht allen Arten zugute (Sabatini et al. 2019). Zwischen der Verbesserung des Biodiversitätsschutzes und der Quantität und Qualität der Wasserspende sowie dem Wasserrückhalt sind überwiegend keine Konflikte zu erwarten. Viele Naturschutzmaßnahmen dienen im Gegenteil unmittelbar auch den Zielen der Wasserwirtschaft.

Ein hoher Kohlenstoffspeicher profitiert von einer Minimierung von Störungsflächen, welche jedoch oft eine hohe Biodiversität aufweisen (Thom und Seidl 2016). Die Steigerung des Waldkohlenstoffspeichers kann lokal, z. B. in lichten Wäldern, somit zu einem starken Zielkonflikt (Typ C) mit dem Schutz der Biodiversität auf Störungsflächen führen.

7.4 Anhang „Schutz der Biodiversität“

Eine hohe Biodiversität wird oft als Voraussetzung für alle ÖSL gesehen, die Wälder für die menschliche Gesellschaft bereitstellen (Maes et al. 2016). Dennoch treten auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen Konflikte zwischen der Verbesserung des Biodiversitätsschutzes und bestimmten ÖSL auf (Paul et al. 2020). Es ist beispielsweise kaum möglich zu beziffern, inwieweit die Verbesserung des Biodiversitätsschutzes langfristig dazu beiträgt, die Produktivität der Wälder aufrecht zu erhalten. Die zeitlich variierenden Effekte sowie die Komplexität der ökologischen Zusammenhänge erschweren eine verallgemeinerbare und unmittelbare Abwägung der konkurrierenden Belange. So können beispielsweise die Auswirkungen der Baumartenzusammensetzung in Waldbeständen auf die Biodiversität nicht generalisiert werden, weil die verschiedene Artengruppen unterschiedlich auf die Beimischung bestimmter Baumarten reagieren und sich die Effekte auf der Bestandesebene von denjenigen auf der Landschaftsebene (Gamma-Diversität) unterscheiden (Leidinger et al. 2021). Bereits geringe Anteile von Mischbaumarten haben einen erkennbaren Effekt. Die Beimischung in Buchenbeständen erhöhte die Artendiversität auf der Landschaftsebene (Gammadiversität) jedoch fast immer.

Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Die mit der EU-Biodiversitätsstrategie verbundene Aufgabe der forstlichen Nutzung auf bestimmten Flächen wird voraussichtlich zu einem Rückgang der Holzbereitstellung führen (Gregor et al. 2022). Gegenwärtig ist jedoch noch nicht zu erkennen, dass die in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegene Fläche von Schutzgebieten im deutschen Wald zu einer Verringerung des Holzeinschlags geführt hat (Meyer et al. 2023). So ist bei stetig

steigender Schutzgebietsfläche der Holzeinschlag ist zwischen 1995 und 2022 von 45 Mio m³ auf rund 75 Mio m³ je Jahr angestiegen (Abbildung A1). Der Flächenanteil von Naturschutzgebieten und Nationalparken ist beispielsweise in Deutschland zwischen 2000 und 2020 von 3,2% auf 4,6% gestiegen (Abbildung A3). Bezogen auf die Waldfläche wird ein Anteil strenger Schutzgebiete, welche die Kategorien Naturschutzgebiete, Nationalparks, Kernzonen von Biosphärenreservaten sowie FFH-Gebiete umfassen, von 26,6 % angegeben (Meyer et al. 2023). Ein starker Anstieg ist vor allem bei den Natura-2000 Gebieten zu verzeichnen (FFH- und Vogelschutzgebiete). Bei der Interpretation des Holzeinschlags ist allerdings zu beachten, dass unplanmäßige jährliche Holznutzungen, vor allem ausgelöst durch Borkenkäferbefall, Dürre und Windwürfe seit 2018 oft die 30-Millionen-Kubikmeter-Marke überschritten haben (Köhl und Knoke 2024). Der ungewollt hohe Holzeinschlag erklärt zumindest zum Teil den Anstieg der Holznutzungen und damit die zunächst überraschende Tatsache, dass rückläufige Holznutzungen derzeit nicht nachweisbar sind. Es wird aber auch deutlich, dass eine nähere Betrachtung der Schutzziele und ihres Konfliktpotenzials erforderlich ist.

Mehr Schutzgebiete mit natürlicher Waldentwicklung auszuweisen ist dadurch motiviert, dass nach gängiger Lehrmeinung (Leuschner und Ellenberg 2017) Mitteleuropa natürlicherweise überwiegend von reifen geschlossenen Laubwäldern mit hohen lebenden und toten Holzvorräten bedeckt wäre, die dem Leitbild von Old-Growth entsprechen (Wirth et al. 2009). Die kontrastierende Vorstellung einer natürlicherweise durch große Herbivoren halboffen gestalteten Waldlandschaft (Geiser 1992; Vera 2000), hat sich hingegen mehrheitlich nicht durchgesetzt (Zoller und Haas 1995).

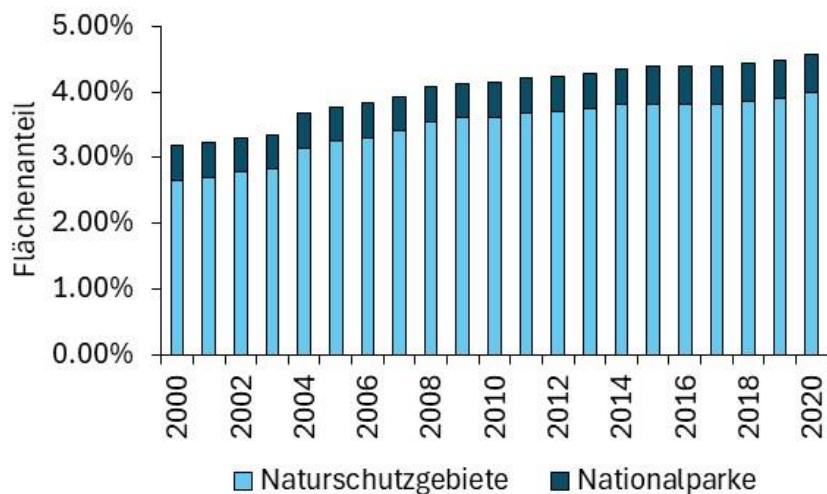


Abbildung A3: Entwicklung des Flächenanteils an der Gesamtfläche von Naturschutzgebieten und Nationalparken nach Angaben des Bundesamtes für Naturschutz. Abgelesen aus Abbildung BD-R-3: Protected areas, <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/climate-impacts-adaptation/impacts-of-climate-change/monitoring-report-2019/indicators-of-climate-change-impacts-adaptation/cluster-biodiversity/bd-r-3-protected-areas>.

Der Aufbau und die Erhaltung hoher Holzvorräte gehen zwangsläufig mit einem Verzicht auf Holznutzung einher. Dabei kann der Verzicht auf Holznutzung um langfristig alte, naturnahe Wälder (Old-Growth Wälder) mit ungestörter Waldentwicklungen zu erzielen sehr hohe Opportunitätskosten nach sich ziehen (Knoke und Moog 2005). Ältere, aber aktuell noch nicht sehr alte Wälder, welche Potenzial zur Entwicklung von Old-Growth Wäldern mit sich bringen, bergen in der Regel auch ökonomisch interessante Holznutzungspotenziale. Ein Verzicht auf die Nutzung reifer Hölzer ist dabei wesentlich teurer als der Holznutzungsverzicht in jüngeren Beständen. Hier besteht also ein unmittelbarer Zielkonflikt, der jedoch vor allem durch eine räumliche Differenzierung der Nutzungs-intensität gemildert werden kann. Die wichtigsten Instrumente hierfür sind, a) die Intensität der Holz-nutzung auf den wirtschaftlich weniger attraktiven Standorten bis hin zu ihrer dauerhaften Einstellung zu verringern, und b) die kleinräumige Integration von Old-Growth Elementen, wie Habitatbäume und Totholz, in den Wirtschaftswald (Retention: siehe Bauhus et al. 2009;

Gustafsson et al. 2020). Vor allem Option b) kann weitere Konflikte mit einer rentablen Holz-nutzung nach sich ziehen, wie z. B. ein erhöhter Aufwand für die Gewährleistung der Verkehrs- und Arbeitssicherheit oder die Markierung von Habitat-bäumen. Das Ausmaß, in dem sich Rententionskonzepte wirtschaftlich nachteilig auswirken, ist neben der räumlichen Verteilung der Waldbestände auch sehr stark von den quantitativen Zielvorgaben und der Holzqualität des Habitatbaum- und Totholzangebotes abhängig (Härtl und Knoke 2019). So ermittelten Niedermann-Meier et al. (2010) in einem Schweizer Forstbetrieb bereits ab zwei Habitatbäumen je Hektar signifikante finanzielle Einbußen. Die Bedeutung der Totholzqualität (Zersetzungsgrade, Baumart, Dimension, Totholztyp, Mikroklima) für die Biodiversität wurde in zahlreichen Studien gezeigt (Schuck et al. 2005; Lettenmaier et al. 2022). Die qualitative Optimierung des Totholzangebotes bietet daher eine Chance, vergleichbare Schutzwirkungen mit verringelter Totholzmenge zu erzielen. Im Unterschied zu Maßnahmen, die auf den Schutz alter, naturnaher Wälder zielen, stehen Schutz-

konzepte für lichte Wälder (Jotz et al. 2017) der Holznutzung weniger stark entgegen. Mit Ausweitung lichter Wälder sind im Gegenteil kurzfristig eher größere Holzentsnahmen verbunden, langfristig ist allerdings mit rückläufigen Nutzungsmöglichkeiten zu rechnen. Konflikte entstehen vor allem im Hinblick auf die Baumartenwahl, weil die naturschutzkonforme Zielbestockung überwiegend standortheimische, weniger ertragsstarke Laubbäume vorsieht (Typ B).

Wechselwirkung mit der Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Bei Ausweitung von Naturschutzmaßnahmen auf der einen Seite und sportliche Aktivitäten auf der anderen Seite entstehen Konflikte in erster Linie durch eine eingeschränkte Zugänglichkeit der entsprechenden Waldgebiete, sei es durch Betretungsverbote oder den Rückbau des Wegenetzes. Eine hohe Akzeptanz für Einschränkungen der Zugänglichkeit ist jedoch erreichbar, wenn die Gründe für Naturschutzmaßnahmen transparent und verständlich sind (Müller 2002). Wie sich Wälder und Waldlandschaften im Hinblick auf ihren Wert für Erholung und Tourismus unterscheiden, kann nicht genau bestimmt werden. Die ästhetischen Präferenzen für Landschaftsbilder - und damit der Wert für Erholung und Tourismus - sind je nach individuellem Heimatbezug sehr unterschiedlich. Positiv wird offenbar einerseits das bewertet, was vertraut ist (Kühne 2018). Andererseits üben als unbekannt erlebte Landschaften aus touristischer Perspektive eine große Anziehungskraft aus.

Wechselwirkung mit Aspekten des Wasserhaushaltes. Der flächenhafte Schutz von Waldgebieten und einzelne Naturschutzmaßnahmen beeinflussen in sehr unterschiedlichem Maße die Steuergrößen des Landschaftswasserhaushalts. Bei den folgenden Änderungen des Managementregimes sind signifikante Effekte auf Wasserspende, -qualität und -rückhalt zu erwarten:

- a) Renaturierung von Quellen, Fließgewässern, Mooren und Feuchtlebensräumen
- b) Wechsel der Baumartenzusammensetzung

- c) Fehlende Ernte und Durchforstung von Waldbeständen
- d) Rückbau oder ausgesetzte Nutzung und Anlage von Erschließungslinien und Waldwegen sowie Entwässerungseinrichtungen
- e) Verzicht auf Räumung, Bodenbearbeitung und aktive Wiederbewaldung von Störungsflächen

Renaturierungsmaßnahmen führen zu einer verstärkten Wasserretention im Wald und sind damit ein unmittelbarer Beitrag zur Verbesserung des Wasserrückhalts. Zudem resultieren daraus eine Erhöhung der Tiefenversickerung und damit auch der Grundwasserneubildung unter Wald. Da sich das unter Wald gebildete Grundwasser i. d. R. durch besonders geringere Anteile an Gift- und Fremdstoffen auszeichnet, dienen Renaturierungsmaßnahmen auch der Verbesserung der Wasserqualität.

In die gleiche Richtung wirkt der Umbau von Nadelwäldern in Laubwälder. Die für den mitteleuropäischen Raum vorliegenden Untersuchungen stimmen darin überein, dass Laubwälder aufgrund ihrer geringeren Interzeptionsverluste erheblich höhere Versickerungs- und damit Grundwasserneubildungsraten als Nadelwälder aufweisen (Benecke 1984; Müller 2002). In Buchenwäldern wurden zudem deutlich geringere Nitratgehalte im Sickerwasser als in Fichtenwäldern festgestellt. Ein Bestockungswechsel von immergrünen Nadelbäumen in Richtung Laubbäumen dürfte daher oft zu einer höheren Grundwasserneubildung, einer verbesserten Wasserqualität und einem verstärkten Wasserrückhalt führen.

Wird die Holznutzung in Schutzgebieten eingeschränkt oder vollständig ausgesetzt, so erhöht sich nach den Ergebnissen der Naturwaldforschung in Laubwäldern zunächst der Dichtschluss der Waldbestände (Meyer et al. 2021). Zudem wird hierdurch langfristig der Anteil alter Wälder zunehmen. Durch verstärkten Dichtschluss und größere Bestandeshöhen älterer Bestände dürften Interzeption und Bestandestranspiration zu- und die Tiefenversickerung abnehmen (Ellerbrok et al. 2022). Inwieweit diese

Effekte zu spürbaren Veränderungen von Wasserspende, -qualität und -rückhalt führen, ist bisher nicht untersucht. Auf Licht angewiesene Arten können bei Anhebung der Holz- und Kohlenstoffvorräte zurückgehen. In ungleichaltrigen Beständen ist es beispielsweise lichtbedürftigen Baumarten wie Bergahorn kaum möglich aufzuwachsen, obwohl sie zahlreich in der Verjüngung vorkommen (Klopčič et al. 2015). Ungleichaltrige Bestände sind besonders gut für den Aufbau hoher Waldkohlenstoffspeicher geeignet (Hernández-Alonso et al. 2023).

Erschließungslinien und Waldwege können den Oberflächenabfluss in Waldlandschaften signifikant erhöhen (Schüler 2023, 2024). Daher haben wiederum alle Naturschutzmaßnahmen, die das Erschließungsnetz aktiv reduzieren bzw. zu einem Aussetzen von Erhaltungsmaßnahmen führen, positive Wirkungen auf Wasserspende, -qualität und -rückhalt. Hier existiert allerdings Konfliktpotenzial mit der Waldbrandüberwachung- und -bekämpfung.

Insgesamt bilden die Wechselwirkungen zwischen einer Steigerung des Schutzes der Biodiversität und dem Wasserhaushalt eine synergistische Beziehung (Typ D).

Wechselwirkung mit der Nutzung der Windkraft. Ein verbesserter Schutz der Biodiversität kann die Nutzung von Wäldern für Windkraftanlagen in verschiedener Hinsicht einschränken, da zwischen den beiden Zielen unmittelbare Konflikte bestehen (Bundesamt für Naturschutz 2011). Vor allem Vögel und Fledermäuse werden durch Windkraftanlagen unmittelbar getötet und/oder aus ihrem näheren Umfeld verdrängt.

7.5 Anhang „Erholung, Sport, Gesundheit, Tourismus“

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität. Insbesondere Mountainbiking, Skilaufen und Felsklettern können für bestimmte, nicht selten prominente Tierarten, wie Auerhuhn (Ski-Langlauf), Wanderfalke oder Uhu (Felsklettern), eine gravierende Störung darstellen. Es gibt zahlreiche Beispiele für Konflikte, aber auch für erfolgreiche Kompromisslösungen zwischen Artenschutzbelangen und sportlicher Betätigung in der freien Landschaft. In den meisten Fällen werden die für den Naturschutz prioritären Bereiche gesperrt und als Ausgleich Alternativen in räumlicher Nähe angeboten. In dem regelmäßig aufwändigen und konfliktreichen Aushandlungsprozess ist es oft für den Erfolg entscheidend, dass arbeitsfähige Interessenvertretungen der Nutzergruppen und wechselseitiges Verständnis für die Belange der jeweils anderen Seite vorhanden sind. Zur Problemlösung kann auch die Information über die zu schützenden Arten wesentlich beitragen, um die Akzeptanz für Einschränkungen und damit die Einhaltung der Schutzregelungen zu gewährleisten (Konflikt-Typ B).

Wechselwirkung mit der Wasserspende. Klassische Erholungslandschaften weisen einen lichten Charakter auf. Besucher schätzen den Wechsel von Licht und Schatten, kleinere Freiflächen und den Ausblick. Sehr dichte, junge, geschlossene (Nadel)waldbestände sind weniger gut geeignet. Insofern lässt sich die „ästhetische“ Gestaltung von Wald sehr gut mit den Vorstellungen von guten Trinkwassergebieten in Einklang bringen (Typ D).

Wechselwirkung mit der Wasserqualität. Wenn man von extremen Situationen absieht, bei denen Erholungsnutzung wegen menschlicher oder tierischer Exkremeante bzw. der Stickstoffemissionen des Freizeitverkehrs zu einer Veränderung der Bodenchemie führt, ist eher keine Beeinflussung zu erwarten.

Diskutiert wird freilich auch, ob die „letzte Ruhe im Wald“ die Wasserqualität negativ beeinflusst, weil

auch aus menschlicher Asche Schwermetalle ausgeschwemmt werden könnten. Insgesamt kann jedoch von neutralen Zielen ausgegangen werden (Typ A).

Wechselwirkung mit dem Wasserrückhalt. Die meiste Infrastruktur im Wald wird für den Forstbetrieb angelegt, nicht für die Freizeitnutzung. Insofern sind zwar z. B. Erosionsprozesse und ungeplanter Abfluss von Wasser im Einzelfall auch durch die Erholungsnutzung von Wegen beeinflusst (vor allem mit dem Fahrrad, ggf. Fußgänger). Die Dimension tritt aber deutlich hinter die Auswirkungen der Verfolgung von betrieblichen Zielsetzungen zurück. Auch hier ist insgesamt von neutralen Zielen auszugehen (Typ A).

Wechselwirkung mit der Nutzung der Windkraft. Windkraftplanung kann sowohl durch die von touristischen Zielen beeinflusste Landschafts- oder Schutzgebietsplanung beeinflusst sein als auch mittelbar durch die private Erholungsnutzung, die zu politischem Engagement gegen Windkraftanlagen führen kann. Eine unmittelbare Beeinflussung der Windkraftnutzung durch den Erholungsverkehr selbst scheint ausgeschlossen (Typ A).

7.6 Anhang „Schutz vor Naturgefahren“

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität. Die Unterstützung der Schutzfunktion mit Hilfe strukturreicher Waldaufbauformen setzt intakte Wälder voraus. Dies bedeutet die Vermeidung von Zerfallsphasen und ist oft verbunden mit schattigen Verhältnissen im Bestand. Daraus können sich Widersprüche zum Schutz der Biodiversität durch alte, naturnahe Wälder ergeben (Typ B).

Wechselwirkung mit Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Strukturreiche Mischbestände sind ideale Schutzwälder und werden oft von Erholungssuchenden sehr geschätzt. Allerdings macht ein Wechsel zwischen ungleichaltrigen und gleichaltrigen Bestandestypen eine Waldlandschaft oft noch attraktiver für Erholungssuchende (Filyushkina et al. 2017). Ein Konflikt zwischen der Erfüllung der Schutz- und der Erholungsfunktion (sowie der Gesundheits-, Sport- und Tourismusfunktion) wird aber nicht gesehen (Typ A).

Wechselwirkung mit der Wasserspende. Generell reduzieren Wälder die Wasserspende (Acreman et al. 2021), wobei diese unter Laubholz höher ist als unter

Nadelholz. In Lawinenschutzwäldern wird jedoch ein möglichst hoher Anteil an immergrünen Baumarten angestrebt, die eine hohe Interzeption und eine geringere Wasserspende mit sich bringen (Typ B).

Wechselwirkung mit der Wasserqualität. In Schutzwäldern wird auf Ernteverfahren im Kahlschlag sowie auf großflächige Begründung neuer Waldgenerationen mit Bodenbearbeitung und Chemieeinsatz verzichtet. Solche Maßnahmen würden zu einer Beeinträchtigung der Wasserqualität unter Wald führen (Shah et al. 2022). Der Schutz vor Naturgefahren und der Schutz der Wasserqualität bilden weitgehend komplementäre Ziele (Typ D).

Wechselwirkung mit dem Wasserrückhalt. Wasserrückhalt ist eine regulierende ÖSL. Der Wald vermindert den Oberflächenabfluss und kann Hochwassermengen dämpfen (Barth und Döll 2016). Acreman et al. (2021) fanden in einer Literaturanalyse in 2/3 aller Arbeiten Belege für steigende Hochwassermengen bei Waldverlust. Ein idealer Schutzwald zur Reduktion von Schneebewegungen bezieht dabei den (teilweisen) Schutz vor Überflutungen mit ein. Es wird eine eher synergistische Wechselwirkung gesehen (Typ D).

7.7 Anhang „Spende, Qualität und Rückhalt des Wassers“

Steigerung der Wasserspende

Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Eine Steigerung der Wasserspende durch die Verminderung von Wasserverlusten durch Interzeption und Evapotranspiration kann erreicht werden durch geringere Bestandesdichte und eine Erhöhung des Laubbaumanteils. Beide Maßnahmen können langfristig zur Erhöhung der Vitalität der Bestände beitragen und damit auch die zukünftige Holznutzung unterstützen. Kurz- und mittelfristig ist durch diese Maßnahmen aber mit Einbußen bei der Holznutzung zu rechnen. Ähnliches gilt für die Verstärkung von Drainagen im Wald. Diese würden kurzfristig und ohne den Klimawandel dazu führen, dass die Wuchsigkeit von Wäldern mit hoch anstehendem Grundwasser sich verbessert, und es wären Synergien zwischen Holznutzung und Erhöhung der Wasserspende zu erwarten. Angesichts zunehmender Häufigkeit von Trockenperioden wird jedoch die gezielte Entwässerung solcher Standorte die Wahrscheinlichkeit von Trockenschäden und assoziierten Schädlingskalamitäten deutlich erhöhen. Damit kommt es zu Konflikten zwischen der Optimierung der Holznutzung und der Wasserspende (Typ B).

Wechselwirkung mit der Kohlenstoffspeicherung im Wald. Wenn die Wasserspende erhöht werden soll, geht das oft einher mit einer reduzierten Biomasseproduktion - denn je Einheit produzierter Biomasse wird eine gewisse Menge Wasser verbraucht. Weniger Biomasse bedeutet gleichzeitig weniger C-Speicher. Eine Erhöhung der Wasserspende erfordert somit oft eine Verminderung der Kohlenstoffspeicherung (Wechselwirkung Typ B).

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität. Für den Fall des Schutzes der Biodiversität mit Hilfe offener, lichter Waldstrukturen lässt sich die Wasserspende nicht mehr über eine Optimierung des Bestandesniederschlags bzw. eine Minimierung der Interzeption durch verringerte Bestockungsdichte steigern,

denn die Wälder sind ja schon licht. Es liegt also keine Synergie vor. Allerdings wird die Wasserspende durch die weitere Auflichtung oder durch eine Erhöhung des Anteils von lichten Wäldern nicht beeinträchtigt. Es liegen neutrale Ziele vor (Wechselwirkung Typ A). Die Verminderung der Bestandesdichte sowie die Anhebung des Laubbaumanteils zur Erhöhung der Wasserspende fördern in der Regel auch die Biodiversität auf den jeweiligen Flächen. Konflikte sind dagegen bei der Drainage von Beständen zu erwarten. Diese würde die kurzfristige Wasserspende erhöhen, aber dem Schutz der Biodiversität entgegenwirken da der Lebensraum für seltene Pflanzen, die an Grundwassernahe Standorte angepasst sind, verändert wird. Je nach gewählter Maßnahme zur Erhöhung der Wasserspende, kann es also zu Konflikten oder Synergien mit dem Schutz der Biodiversität kommen.

Wechselwirkung mit Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Die Drainage von Wäldern zur Erhöhung der Wasserspende kann die Vermehrung von Stechmücken verhindern und damit die Gesundheit der Erholungssuchenden fördern. Für Erholungssuchende sind jedoch in der Regel naturnahe Waldökosysteme attraktiver als drainierte Standorte. Daher ist mit Konflikten zwischen dem Schutz der Erholungsfunktion und der Erhöhung der Wasserspende durch Drainage zu rechnen. Auch hier ist aber entscheidend, welche Maßnahme zur Erhöhung der Wasserspende gewählt wird. Durch die Verringerung der Bestandesdichte, die Erhöhung der strukturellen Diversität und des Laubbaumanteils können zugleich Wasserspende und Erholungsfunktion erhöht werden (Typ D).

Steigerung der Wasserqualität

Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Für die Wasserqualität ist es oft günstiger, den Nadelbaumanteil zu senken. Damit wird der Auskämmeffekt der Baumkronen für Schadstoffe vermindert und der pH-Wert der Böden steigt an. Beides wirkt sich positiv auf die Gewässerqualität aus. In Regionen, in denen die Holznutzung vor allem von Nadelwäldern abhängt, wirken sich Maßnahmen zur

Erhöhung der Wasserqualität negativ auf die Holznutzung aus (Typ B).

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität. Maßnahmen, die zur Erhöhung der Gewässerqualität beitragen, sollten in der Regel auch den Schutz der Biodiversität unterstützen (Typ D).

Wechselwirkung mit Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Hohe Laubholzanteile gehen mit guter Qualität des Wassers in Oberflächengewässern sowie im Grundwasser einher, was auch die Attraktivität der Wälder für Erholungssuchende steigert. Auch für Gesundheit, Sport und Tourismus ist eine Verbesserung der Gewässerqualität förderlich (Typ D).

Steigerung des Wasserrückhalts

Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Langfristig wird die Steigerung des Wasserrückhalts die Vitalität der Bestände und damit auch die Holznutzung begünstigen (Typ D). Wie für die Wasserspende beschrieben, wird aber die Erhöhung des Wasserrückhalts durch die Erhöhung des Laub-

anteils und ggf. auch durch die Verminderung der Bestandesdichte sowie durch Einschränkungen bzw. Erschwernisse bei der Holzernte und Bringung durch höhere Bodenfeuchte zu eingeschränkter Holznutzung, aber vermutlich auch zu höherer Widerstandsfähigkeit der Bestände führen.

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität. Die Steigerung des Wasserrückhaltes hat positive Wirkungen auf den Schutz der Biodiversität. Längere Trockenphasen können dadurch besser überdauert werden (Typ D). Vernässte Kleinstandorte können sich zusätzlich zu Hotspots der Biodiversität entwickeln.

Wechselwirkung mit Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Eine Erhöhung der Wasserretention und damit Vitalität der Wälder steigert deren Attraktivität für Erholungssuchende. Auch für Gesundheit, Sport und Tourismus ist eine Erhöhung der Vitalität der Wälder sowie deren Resilienz förderlich (Typ D).

7.8 Anhang „Windkraft über Wald“

Wechselwirkung mit der Bereitstellung der Ressource Holz. Windkraftanlagen im Wald haben aufgrund ihres geringen Flächenanspruchs vernachlässigbare Auswirkungen auf die Holzproduktion des Waldes (Zabel et al. 2018) (Typ A). Laut der Fachagentur Windenergie an Land e. V. (FA Wind 2023) müssen für die Errichtung dauerhaft 0,46 ha pro Windenergieanlage (WEA) für die gesamte Betriebszeit der Anlage in eine andere Nutzungsform umgewandelt und ein Teil davon für Wartungsarbeiten frei von Baumbestand gehalten werden (dauerhafte Waldumwandlung). Hier von entfallen 0,05 ha auf die Versiegelung für das Fundament. An anderer Stelle müssen Ausgleichsmaßnahmen, z. B. durch Neupflanzungen oder Waldumbaumaßnahmen, für den Natureingriff geschaffen werden. Ein ähnlicher Umfang muss während der Bauphase für die Zuwegung, für Lagerflächen sowie für Arbeits- und Montagetätigkeiten baumfrei sein, was zu einem zusätzlichen Holzeinschlag während der Bauphase führt. Diese Flächen sind nach Abschluss der Arbeiten wieder aufzuforsten (temporäre Waldumwandlung). Die Nutzung von Schadflächen zur Errichtung von WEA wird grundsätzlich als sinnvoll angesehen, da sie bereits baumfrei sind und zusätzliche Fällungen vermieden werden und die wirtschaftlichen Verluste der Waldbesitzenden z. T. damit ausgeglichen werden können – allerdings sollte dabei der lokale Kontext berücksichtigt werden (Lehmann et al. 2024). Nach Außerbetriebnahme der WEA ist für den Rückbau der Anlage erneut mit temporären Eingriffen zu rechnen.

Wechselwirkung mit der Kohlenstoffspeicherung im Wald. Die Ökobilanz von WEA ist ausgesprochen gut. Die Einsparung von CO₂ durch WEA liegt um einen Faktor von mehr als 1.000 höher, als die durch die dafür notwendige Beeinträchtigung von Wald verlorene CO₂-Aufnahme (UBA 2021a, 2021b) (Typ D). Nicht berücksichtigt ist, dass dieser gerodete Wald im Zuge von Ausgleichsmaßnahmen an anderer Stelle wieder aufgeforstet werden muss.

Wechselwirkung mit dem Schutz der Biodiversität.

Mittlerweile liegen zwar zahlreiche Studien vor, die das Ausmaß der Konflikte zwischen dem Ausbau der Windenergie und Natur- und Artenschutzbelangen quantifizieren (wenige jedoch für Wald). Allerdings macht die Ableitung von Effektstärken bis heute Schwierigkeiten, sodass erhebliche Unsicherheiten darüber bestehen, ob Schutzgüter erheblich beeinträchtigt werden.

Untersuchungen zum Einfluss von WEA auf Vogelbestände deuten auf starke Beeinträchtigungen hin. Bellebaum et al. (2013) konnten am Beispiel Brandenburgs zeigen, dass die zusätzliche Mortalität durch einen zunehmenden Bestand von WEA die Stabilität des Bestandes des Rotmilans gefährden kann. Auch Grünkorn et al. (2016) gehen davon aus, dass der Ausbau von WEA wahrscheinlich negative Auswirkungen auf die Mäusebussard- und Rotmilanbestände in Deutschland hat. Katzenberger und Sudfeldt (2019) konnten einen negativen Effekt der Dichte von Windkraftanlagen auf die Veränderung der Rotmilandichte nachweisen, der allerdings mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,081 keine statistische Erklärungskraft hatte.

Rehling et al. (2023) stellten einen Verdrängungseffekt von Windenergieanlagen auf häufige Waldvögel fest, der nicht von der Distanz zu den Anlagen, sondern der Rotorgröße abhing. Sie schließen auf einen möglicherweise indirekten Effekt auf der Populationsebene, betonen jedoch, dass die Wirkung von Windenergieanlagen gegenüber der Habitatqualität in den Hintergrund tritt.

Kollisionsgefahr besteht vor allem für große Vögel mit geringer Manövrierfähigkeit, während kleinere Vögel durch die Sogwirkung der Turbinen zu Boden geschleudert werden können. Vergleiche der Singvogelzönosen von Windparkflächen mit entfernten Referenzflächen ergaben allerdings keine Hinweise auf Änderungen der Siedlungsdichte oder der Artenzusammensetzung (Reichenbach et al. 2015). Eine Studie zu der Auswirkung von WEA auf die akustische Aktivität ausgewählter Waldvogelarten

fand heraus, dass die akustische Aktivität mit der Entfernung zur WEA anstieg (Reichenbach et al. 2023). Ungeklärt bleibt in der Studie, ob es sich um eine physische oder akustische Absenz oder aber um eine akustische Maskierung der Vogelrufe durch die Geräusche der WEA handelt. Ellerbrok et al. (2023) fanden heraus, dass waldbewohnende Fledermäuse in Turbinenlichtungen tendenziell zur Nahrungssuche aktiver waren als über geschlossenen Waldbeständen, womit ein erhöhtes Risiko zur Kollision entsteht. Laut Dietz et al. (2024) sind vor allem die im freien Luftraum jagenden Arten Abendsegler, Kleinabendsegler und Rauhautfledermaus sowie die Zwergefledermaus betroffen. Wald-Fledermäuse können durch Windenergieanlagen lokal über Distanzen von mehreren 100 m verdrängt werden (Ellerbrok et al. 2022; Ellerbrok et al. 2023). Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt in strukturreichen Wäldern. Hinsichtlich der Bedeutung von Schlagopfern für die Stabilität der Populationen von Fledermäusen werden bereits derzeit erhebliche Beeinträchtigungen angenommen (Mathgen et al. 2024; Melber et al. 2023). Aufgrund unzureichender Informationen über Populationsparameter sind aber nach wie vor keine seriösen Berechnungen zu den Auswirkungen einer erhöhten Mortalität durch Windkraftanlagen möglich (Dietz et al. 2024). Durch präventives Abschalten der Anlage kann das Risiko reduziert werden. Eine Kombination von flächen- und anlagenbezogenen Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen kann negative Auswirkungen auf Biodiversität gezielt reduzieren (Lehmann et al. 2024).

Die Wechselwirkungen zwischen einer Steigerung des Schutzes der Biodiversität und dem Ausbau der Windkraft bilden so insgesamt einen starken Zielkonflikt (Typ C).

Unmittelbare Kompromisslösungen für einen Zielkonflikt zwischen Windenergieausbau und Naturschutz sind in erster Linie die Wahl von Standorten außerhalb von naturschutzfachlich sensiblen Bereichen (Ausschluss von Schutzgebieten und anderen naturschutzfachlich wertvollen Waldgebieten, z. B.

historisch alter Wald in Niedersachsen) sowie technische Ansätze beim Betrieb bestehender Anlagen, insbesondere temporär einsetzende Abschalteinrichtungen möglich. Darüber hinaus sind Biotop verbessende Maßnahmen in Form von Artenhilfsprogrammen geplant (Melber et al. 2023). Die naturschutzrechtlich verpflichtenden Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen (Soppa 2022) stellen zwar eine Kompensation auf einem abstrakten Niveau in Form allgemein gehaltener Schutzgüter dar, sie wirken sich jedoch nicht notwendigerweise positiv auf die Bestände der besonders geschützten Arten aus (Lehmann et al. 2024).

Die rechtliche Verpflichtung zum ökologischen Ausgleich der Flächeninanspruchnahme bei Inbetriebnahme einer WEA kann jedoch auch positive Wirkungen auf die Biodiversität im Wald haben. Gemäß den Vorgaben werden beispielsweise an anderer Stelle der Waldumbau beschleunigt, die Strukturvielfalt erhöht, ein Nutzungsverzicht veranlasst, Alt- und Totholz gefördert oder künstliche Nisthilfen installiert. Zusätzlich zum Ausgleich für die Inanspruchnahme der Waldfläche sind im Rahmen der Eingriffsregelung nach Naturschutzrecht und entsprechend der Regelungen des speziellen Arten- schutzes Maßnahmen umzusetzen, welche oft ebenso der Erhöhung der Arten- und Strukturvielfalt im Wald zugutekommen (FA Wind 2023).

Ende 2022 hat die EU eine Notfallverordnung zum beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien beschlossen, die zunächst bis Mitte 2025 gilt. Deutschland hat mit der Verabschiedung des Windflächenenergiebedarfsgesetzes Flächenbeitragswerte der Bundesländer bis 2027 bzw. 2032 festgelegt und mit der Änderung des Erneuerbaren Energie Gesetzes die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen als vorrangigen Belang in Schutzgüter- abwägungen eingeführt.

Wechselwirkung mit Erholung, Gesundheit, Sport und Tourismus. Besonders exponierte Lagen wie Kuppen oder Waldränder werden von WEA beeinträchtigt. Durch akustische und optische Wirkungen (Schatten-

wurf, Schallemissionen, Hinderniskennzeichnungen, Befeuerung) sowie durch Störung im Rahmen von Baumaßnahmen und Wartung werden die Möglichkeiten der Erholung und der Naturerfahrung in Wäldern eingeschränkt. Schatteneffekte sowie die aerodynamischen und mechanischen Geräusche werden besonders als Beeinträchtigung für die Menschen hervorgehoben (Enevoldsen 2016). Die Veränderung des Landschaftsbildes sowie die genannte Störung können auch negative Auswirkungen für den Tourismus der Region mit sich bringen.

Wechselwirkung mit dem Schutz vor Naturgefahren. Durch die Rodung und Teilversiegelung beim Bau von WEA kann es lokal zu einer reduzierten Dämpfung von Hochwasserspitzen und vermehrter Erosion kommen. Da der Flächenverbrauch innerhalb der Landschaft relativ gering ist wird auf Landschaftsebene mit keinen Auswirkungen auf den Schutz vor Naturgefahren gerechnet (Typ A).

Wechselwirkungen mit dem Wasserhaushalt. 70 % der Wassergewinnungsgebiete in Deutschland liegen im Wald, die Wasserqualität ist dort besser als anderswo in der Landschaft. Die Installation von WEA wird auf-

grund ihres geringen Flächenanspruchs voraussichtlich keine negativen Auswirkungen auf die Wasserspende und Wasserqualität des Waldes auf der Landschaftsebene haben (Typ A). Kleinräumig kann es aber durch die Rodung rund um die WEA und durch die temporäre Auflichtung entlang der Zuwegung zu Veränderung des Waldmikroklimas (Redding et al. 2003) und des Wasser- und Nährstoffkreislaufs kommen (Fisher und Binkley 2012; Ranger et al. 2008; Palviainen et al. 2022). Studien zeigen, dass vor allem die Nitratkonzentrationen unterhalb der Kahlenschlagflächen für mehrere Jahre nach der Maßnahme ansteigen sowie der Oberflächenabfluss und Erosion zunahmen (Rusanen et al. 2004; Rosén et al. 1996). Der Grundwasserspiegel zeigte hingegen keine signifikanten Änderungen (Mannerkoski et al. 2005; Špulák et al. 2022).

Für den Betrieb von Windkraftanlagen werden je nach Anlage Getriebe- und Hydrauliköle, Schmiermittel, Kühlmittel und Öltransformatoren verwendet, es sind damit Anlagen mit wassergefährdenden Stoffen. Der Bau von WEA ist daher zum Schutz der Wasserqualität in Wasserschutzzonen 1 und 2 nicht erlaubt.

8 Literatur

- Acreman M., Smith A., Charters L. et al. 2021. Evidence for the effectiveness of nature-based solutions to water issues in Africa. *Environmental Research Letters* 16/6: 63007.
- Ammer, C., Vor, T., Knoke, T. et al. 2010. Der Wald-Wild-Konflikt: Analyse und Lösungsansätze vor dem Hintergrund rechtlicher, ökologischer und ökonomischer Zusammenhänge. *Göttinger Forstwissenschaften* 5. Göttingen: Univ.-Verl.
- Ammer, U. 1975. Naherholung und Naturschutz. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 94/1: 234–239.
- Anderson, A. K., Waller, J. S., Thornton D. H. 2023. Partial COVID-19 closure of a national park reveals negative influence of low-impact recreation on wildlife spatiotemporal ecology. *Scientific Reports* 13/1: 687.
- Anshelm, J., Simon, H. 2016. Power production and environmental opinions – Environmentally motivated resistance to wind power in Sweden. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57: 1545–1555.
- Assmuth, A., Tahvonen, O. 2018. Optimal carbon storage in even- and uneven-aged forestry. *Forest Policy and Economics* 87: 93–100.
- Aszalós, R., Thom, D., Aakala, T. et al. 2022. Natural disturbance regimes as a guide for sustainable forest management in Europe. *Ecological Applications* a publication of the Ecological Society of America 32/5: e2596.
- Augustynczik, A. L., Hartig F., Minunno F., et al. 2017. Productivity of *Fagus sylvatica* under climate change – A Bayesian analysis of risk and uncertainty using the model 3-PG. *Forest Ecology and Management* 401: 192–206.
- Balmford, A., Ball T.S., Balmford B. et al. 2025. Time to fix the biodiversity leak. *Science* (New York, N.Y.) 387/6735: 720–722.
- Barbaro, L., Assandri, G., Brambilla, M. et al. 2021. Organic management and landscape heterogeneity combine to sustain multifunctional bird communities in European vineyards. *Journal of Applied Ecology* 58/6: 1261–1271.
- Barberà, S., Coelho, D. 2022. Compromising on compromise rules. *The RAND Journal of Economics* 53/1: 95–112.
- Barron, E. S., Patterson, W. A. 2008. Monitoring the effects of gypsy moth defoliation on forest stand dynamics on Cape Cod, Massachusetts: Sampling intervals and appropriate interpretations. *Forest Ecology and Management* 256/12: 2092–2100.
- Barth, N.-C., Döll, P. 2016. Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach. *Ecosystem Services* 21: 39–52.
- Bastit, F., Brunette, M., Montagné-Huck, C. 2023. Pests, wind and fire: A multi-hazard risk review for natural disturbances in forests. *Ecological Economics* 205/107702.
- Bateman, I., Balmford, A. 2023. Current conservation policies risk accelerating biodiversity loss. *Nature* 618/7966: 671–674.
- Bauhus, J., Puettmann, K., Messier, C. 2009. Silviculture for old-growth attributes. *Forest Ecology and Management* 258/4: 525–537.
- Bauhus, J., Pyttel, P. 2015. *Routledge Handbook of Forest Ecology*: 75–90.
- Bauhus, J., van der Meer, P., Kanninen, M. (Hrsg.). 2010. *Ecosystem goods and services from plantation forests*. The Earthscan forest library. London: Earthscan.
- Becker, M., Spatz T., Rösner S. et al. 2024. Rotmilane und Windkraft. *Naturschutz und Landschaftsplanung* (NuL) 56/10: 26–33.
- Becker, M., Spatz T., Rösner S. et al. 2025. Ergänzung zum Artikel „Rotmilane und Windkraft“, 2025. <https://www.nul-online.de/themen/landschafts-und-umweltplanung/article-8089497-201982/ergaenzung-zum-artikel-rotmilane-und-windkraft-.html> (abgerufen 27.05.2025).
- Bell, J., Whitmore, R. 1997. Bird Populations and Habitat in *Bacillus Thuringiensis* and Dimilin-Treated and Untreated Areas of Hardwood Forest. *American Midland Naturalist* 137: 239–250.
- Bellebaum, J., Korner-Nievergelt, F., Dürr, T. et al. 2013. Wind turbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. *Journal for Nature Conservation* 21/6: 394–400.
- Benecke, P. 1984. Der Wasserumsatz eines Buchen- und eines Fichtenwaldökosystems im Hochsolling. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt* 77. Frankfurt am Main: Sauerländer.

- Berendes, K.-H., Bräsicke, N., Hartmann, H. 2025. Waldschutzmaßnahmen mit Pflanzenschutzmitteln beschränken sich auf notwenige Anwendungen. *Journal für Kulturpflanzen*, im Druck.
- Bingham, L. R., van Kleunen, L., Kolisnyk, B. et al. 2024. Comment on 'In complexity we trust: learning from the socialist calculation debate for ecosystem management'. *Environmental Research Letters* 19/1: 18002.
- Bittner, S., Talkner, U., Krämer, I. et al. 2010. Modeling stand water budgets of mixed temperate broad-leaved forest stands by considering variations in species specific drought response. *Agricultural and Forest Meteorology* 150/10: 1347–1357.
- Blattert, C., Mönkkönen, M., Burgas, D. et al. 2023. Climate targets in European timber-producing countries conflict with goals on forest ecosystem services and biodiversity. *Communications Earth & Environment* 4/1: 1–12.
- BMEL. 2014. Wald in Deutschland - Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/bundeswaldinventur.html> (abgerufen 01.01.2024).
- BMEL. 2016. Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre: Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052.
- BMEL. 2021a. Waldbericht der Bundesregierung 2021. Bonn.
- BMEL. 2021b. Waldstrategie 2050: Nachhaltige Waldbewirtschaftung - Herausforderungen und Chancen für Mensch, Natur und Klima.
- BMEL. 2024. Der deutsche Wald in Zahlen: Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur.
- BMU. 2023. Die Nationale Strategie (2007), 03.09.2023. <https://www.bfn.de/die-nationale-strategie-2007> (abgerufen 12.10.2024).
- Bödeker, K., Jordan-Fragstein, C., Vor, T. et al. 2023. Abrupt height growth setbacks show overbrowsing of tree saplings, which can be reduced by raising deer harvest. *Scientific Reports* 13/1: 12021.
- Böhn, D. 2021. National park in Germany: Let nature be nature – But which nature? *International Journal of Geoheritage and Parks* 9/1: 30–35.
- Bolte, A., Ammer, C., Löf, M. et al. 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24/6: 473–482.
- Bonacker, T. 2009. Konflikttheorien. In: *Handbuch soziologische Theorien*. Herausgegeben von G. Kneer, M. Schroer. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. 179–197.
- Bončina, A., Simončič, T., Rosset, C. 2019. Assessment of the concept of forest functions in Central European forestry. *Environmental Science & Policy* 99: 123–135.
- Borrass, L., Kleinschmit, D., Winkel, G. 2017. The "German model" of integrative multifunctional forest management—Analysing the emergence and political evolution of a forest management concept. *Forest Policy and Economics* 77: 16–23.
- Bösch, M., Elsasser, P., Rock, J. et al. 2017. Costs and carbon sequestration potential of alternative forest management measures in Germany. *Forest Policy and Economics* 78: 88–97.
- Bösch, M., Elsasser, P., Rock, J. et al. 2019. Extent and costs of forest-based climate change mitigation in Germany: accounting for substitution. *Carbon Management* 10/2: 127–134.
- Brandl, S., Paul, C., Knoke, T. et al. 2020. The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. *Forest Ecology and Management* 458: 117652.
- Brokerhoff, E. G., Jactel, H., Parrotta, J. A. et al. 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation* 17/5: 925–951.
- Brown, T. 2021. The response to COVID-19: Occupational resilience and the resilience of daily occupations in action. *Australian Occupational Therapy Journal* 68/2: 103–105.
- Bundesamt für Naturschutz. 2011. Windkraft über Wald - Positionspapier des Bundesamtes für Naturschutz. Positionspapier: 1–8.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 2016. Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2020. Nationale Bioökonomiestrategie. Berlin: Zarbock GmbH & Co. KG.

- Caicoya, A. T. et al. 2023. Sectoral policies as drivers of forest management and ecosystems services: A case study in Bavaria, Germany. *Land Use Policy* 130: 106673.
- Camarasa, C., Mata, É., Navarro, J.P. et al. 2022. A global comparison of building decarbonization scenarios by 2050 towards 1.5–2 °C targets. *Nature Communications* 13/1: 3077.
- Cassman, K. G., Grassini, P. 2020. A global perspective on sustainable intensification research. *Nature Sustainability* 3/4: 262–268.
- Cazzolla Gatti, R., Zannini, P., Piovesan, G. et al. 2023. Analysing the distribution of strictly protected areas toward the EU2030 target. *Biodiversity and Conservation* 32/10: 3157–3174.
- Cerullo, G., Barlow J., Betts, M. et al. 2023. The global impact of EU forest protection policies. *Science* (New York, N.Y.) 381/6659: 740.
- Cesaro, L. (Hrsg.). 2008. The multifunctional role of forests - policies, methods and case studies. EFI proceedings 55. Joensuu: European Forest Institute.
- Chakraborty, D., Ciceu, A., Ballian, D. et al. 2024. Assisted tree migration can preserve the European forest carbon sink under climate change. *Nature Climate Change* 14/8: 845–852.
- Chreptun, C., Ficko, A., Gosling, E. et al. 2023. Optimizing forest landscape composition for multiple ecosystem services based on uncertain stakeholder preferences. *The Science of The Total Environment* 857/Pt 3: 159393.
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C.P. et al. 2020. Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* 3/4: 269–276.
- Cubbage, F., Harou, P., Sills, E. 2007. Policy instruments to enhance multi-functional forest management. *Forest Policy and Economics* 9/7: 833–851.
- Dahrendorf, R. 1996. Zu einer Theorie des sozialen Konflikts. In: Konflikttheorien. Herausgegeben von T. Bonacker. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. 279–295.
- DeCanio, S. J., Manski, C. F., Sanstad, A. H. 2022. Minimax-regret climate policy with deep uncertainty in climate modeling and intergenerational discounting. *Ecological Economics* 201: 107552.
- Del Campo, A. D., Otsuki, K., Serengil, Y. et al 2022. A global synthesis on the effects of thinning on hydrological processes: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management* 519: 120324.
- Delb, H. 1996. Untersuchung der Folgeschäden nach Fraß durch Schwammspinner (*Lymantria dispar*) im Bienwald 1993/94 - Konzept und erste Ergebnisse. Massenvermehrungen von Forstschnitterlingen. Erkenntnisse, Erfahrungen und Bewertungen zu den jüngsten Kalamintätsereignissen. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt/322: 52–64.
- Demant, L. 2022. Concepts, objectives and values in German forest conservation – a comparative analysis, an assessment of practicability and future prospects. Dissertation Universität Göttingen.
- Deng, X., Li, Z., Gibson, J. 2016. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management. *Journal of Geographical Sciences* 26/7: 953–968.
- Derks, J., Winkel, G., Strieck, J. et al. 2023. Visitor frequencies and attitudes towards urban forests and their management, before and during the COVID-19 lockdown. A mixed methods case study in Bonn, Germany. *Ecosystems and People* 19/1: 2195021.
- Di Fulvio, F., Snäll, T., Lauri, P. et al. 2025. Impact of the EU biodiversity strategy for 2030 on the EU wood-based bioeconomy. *Global Environmental Change* 92: 102986.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M. et al. 2018. Assessing nature's contributions to people. *Science* (New York, N.Y.) 359/6373: 270–272.
- Dieter, M. 2010. Application of an opportunity cost approach to support policy decisions on the use of forests in Germany. *Forestry Ideas* 16: 36–43.
- Dieter, M. et al. 2020. Abschätzung möglicher Verlagerungseffekte durch Umsetzung der EU-KOM-Vorschläge zur EU-Biodiversitätsstrategie auf Forstwirtschaft und Wälder in Drittstaaten. Thünen Working Paper Bd. 159a.
- Dietz, M., A. Fritzsche, A. Johst, et al. 2024. Diskussionspapier: Fachempfehlung für eine bundesweite Signifikanzschwelle für Fledermäuse und Windenergieanlagen. 682 Auflage. Bundesamt für Naturschutz.
- Dög, M., B. Seintsch, L. Rosenkranz. 2016. Belastungen der deutschen Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes. *Landbauforschung - applied agricultural and forestry research*/66: 71–92.
- Donini, V., L. Corlatti, F. Ferretti, et al. 2024. Browsing intensity as an index of ungulate density across multiple spatial scales. *Ecological Indicators* 163: 112131.

- Ek, K., L. Persson. 2014. Wind farms — Where and how to place them? A choice experiment approach to measure consumer preferences for characteristics of wind farm establishments in Sweden. *Ecological Economics* 105: 193–203.
- Ellerbrok, J. S., Delius, A., Peter, F. et al. 2022. Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites. *Journal of Applied Ecology* 59/10: 2497–2506.
- Ellerbrok, J. S., Farwig, N., Peter, F. et al. 2023. Forest gaps around wind turbines attract bat species with high collision risk. *Biological Conservation* 288: 110347.
- Ellison, D., Pokorný, J., Wild, M. 2024. Even cooler insights: On the power of forests to (water the Earth and) cool the planet. *Global Change Biology* 30/2: e17195.
- Elomina, J., Püzl, H. 2021. How are forests framed? An analysis of EU forest policy. *Forest Policy and Economics* 127: 102448.
- Elsasser, P. 2024. Monetary forest recreation values over several decades: A CVM replication experiment. In *Vorbereitung*.
- Elsasser, P., Weller, P. 2013. Aktuelle und potentielle Erholungsleistung der Wälder in Deutschland: monetärer Nutzen der Erholung im Wald aus Sicht der Bevölkerung. *Allg Forst Jagdzeitg* 184: 84–96.
- Endres, A., Querner, I. 2000. Die Ökonomie natürlicher Ressourcen. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer.
- Enevoldsen, P. 2016. Onshore wind energy in Northern European forests: Reviewing the risks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1251–1262.
- Erdozain, M., Alberdi, I., Aszalós, R. et al. 2025. The Evolution of Forest Restoration in Europe: A Synthesis for a Step Forward Based on National Expert Knowledge. *Current Forestry Reports* 11/1.
- Ermisch, N., Seintsch, B., Englert, H. 2015. Anteil des Holzertrages am Gesamtertrag der TBN-Betriebe. *AFZ Der Wald* 70: 14–16.
- Estoque, R.C., Dasgupta, R., Winkler, K. et al. 2022. Spatiotemporal pattern of global forest change over the past 60 years and the forest transition theory. *Environmental Research Letters* 17/8: 84022.
- European Commission. 2021. Biodiversity strategy for 2030. https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en (abgerufen 30.12.2023).
- European Community. 1993. Resolution H1: General Guidelines for the Sustainable Management of Forests in Europe. https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2022/01/MC_helsinki_resolutionH1.pdf (abgerufen 29.08.2023).
- European Union. 2018. Regulation (EU) 2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU. European Commission, Brüssel, Belgium. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550> (abgerufen 30.12.2023).
- European Union. 2021. New EU Forest Strategy for 2030. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, COM(2021) 572 final, European Commission, Brüssel, Belgium. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0557> (abgerufen 30.12.2023).
- Ezquerro, M., L. Diaz-Balteiro, M. Pardos. 2023. Implications of forest management on the conservation of protected areas: A new proposal in Central Spain. *Forest Ecology and Management* 548: 121428.
- FA Wind. 2017. Windenergie im Wald – Good Practice/Dezember.
- FA Wind. 2023. Kompaktwissen Windenergie im Wald/August.
- FA Wind (Hrsg.). 2024. Entwicklung der Windenergienutzung im Wald - Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Forstflächen in den Bundesländern. Berlin.
- Fernandes, P. M. 2013. Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning* 110: 175–182.
- Fernow, B. E. 1911. A brief history of Forestry: In Europe, the United States and other countries (classic reprint). Revised and enlarged edition. Toronto: FORGOTTEN BOOKS, Toronto University Press.

- Filyushkina, A., Agimass, F., Lundhede, T. et al. 2017. Preferences for variation in forest characteristics: Does diversity between stands matter? *Ecological Economics* 140: 22–29.
- Fischer, R., Zhunussova, E., Günter, S. et al. 2024. Leakage of biodiversity risks under the European Union Biodiversity Strategy 2030. *Conservation biology the journal of the Society for Conservation Biology* 38/3: e14235.
- Fisher, B., R. K. Turner, P. Morling. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 68/3: 643–653.
- Fisher, R. F., D. Binkley. 2012. *Ecology and Management of Forest Soils*. Wiley.
- Food and Agriculture Organization of the UN. FAO. 2023. Towards more resilient and diverse planted forests. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the UN. 2024. *The State of the World's Forests 2024*. FAO.
- Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg. 2019. Karten Klimafolgenforschung. <https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/klimakarten> (abgerufen 20.04.2024).
- Franklin, S. L., R. S. Pindyck. 2018. Tropical Forests, Tipping Points, and the Social Cost of Deforestation. *Ecological Economics* 153: 161–171.
- Frei, B., Queiroz, C., Chaplin-Kramer, B. et al. 2020. A brighter future: Complementary goals of diversity and multifunctionality to build resilient agricultural landscapes. *Global Food Security* 26: 100407.
- Freuler, B. W. 2008. Management von Freizeitaktivitäten Interventionen zur Beeinflussung von sozialen und ökologischen Nutzungskonflikten im Outdoorbereich, University of Zurich.
- Friedrich, S., Hilmers, T., Chreptun, C. et al. 2021. The cost of risk management and multifunctionality in forestry: a simulation approach for a case study area in Southeast Germany. *European Journal of Forest Research* 140/5: 1127–1146.
- Fuchs, J. M., Husmann, K., Schick, J. et al. 2024. Severe and frequent extreme weather events undermine economic adaptation gains of tree-species diversification. *Scientific Reports* 14/1: 2140.
- FVA Baden-Württemberg. 2022. Urbane Waldwirtschaft. <https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/urbane-waldwirtschaft> (abgerufen 27.05.2025).
- Gang, B., L. Bingham, E. Gosling, et al. 2024. Assessing the suitability of under-represented tree species for multifunctional forest management—an example using economic return and biodiversity indicators. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 97/2: 255–266.
- García, V. R., F. Gaspart, T. Kastner, et al. 2020. Agricultural intensification and land use change: assessing country-level induced intensification, land sparing and rebound effect. *Environmental Research Letters* 15/8: 85007.
- Gardiner, B. 2021. Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests. *Journal of Forest Research* 26/4: 248–266.
- Garibaldi, L.A., Zermoglio, P.F., Jobbágy, E.G. et al. 2023. How to design multifunctional landscapes? *Journal of Applied Ecology* 60/12: 2521–2527.
- Gehrmann, J. 2013. Schwermetalle in Waldböden. In: *Waldböden: Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz*. Herausgegeben von E. Leitgeb, R. Reiter, M. Englisch, P. Schad, K.-H. Feger. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 315–332.
- Geiser, R. 1992. Auch ohne Homo sapiens wäre Mitteleuropa von Natur aus eine halboffene Weidelandchaft. *Laufener Seminarbeiträge* 2: 22–34.
- Giergiczny, M., Czajkowski, M., Żylicz, T. et al. 2015. Choice experiment assessment of public preferences for forest structural attributes. *Ecological Economics* 119: 8–23.
- Gingrich, S., Lauk, C., Niedertscheider, M. et al. 2019. Hidden emissions of forest transitions: a socio-ecological reading of forest change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 38: 14–21.
- Glück, P. 2000. Theoretical perspectives for enhancing biological diversity in forest ecosystems in Europe. *Forest Policy and Economics* 1/3-4: 195–207.
- Graefe, A., Thapa, B. 2004. Conflict in natural resource recreation.
- Grass, I., Kubitz, C., Krishna, V.V. et al. 2020. Trade-offs between multifunctionality and profit in tropical smallholder landscapes. *Nature Communications* 11/1: 1186.

- Gregor, K., Knoke, T., Krause, A. et al. 2022. Trade-Offs for Climate-Smart Forestry in Europe Under Uncertain Future Climate. *Earth's Future* 10/9: e2022EF002796.
- Gregor, K., Reyer, C.P., Nagel, T.A. et al. 2024. Reconciling the EU forest, biodiversity, and climate strategies. *Global Change Biology* 30/8: e17431.
- Grüning, M. M., Germeshausen, F., Thies, C. et al. 2018. Increased Forest Soil CO₂ and N₂O Emissions During Insect Infestation. *Forests* 9/10: 612.
- Grünkorn, T., Blew, J., Coppack, T. et al. 2016. Ermittlung der Kollisionsraten von (Greif)Vögeln und Schaffung planungsbezogener Grundlagen für die Prognose und Bewertung des Kollisionsrisikos durch Windenergieanlagen (PROGRESS).
- Günther, K., Möller, K., Kaplick, J. et al. 2024. Die Auswirkungen von Insektizidanwendungen bzw. Kahlfraß durch nadelfressende Insekten auf die Käfer-Lebensgemeinschaft (Coleoptera) in Kiefernwäldern. *Journal für Kulturpflanzen*.
- Gustafsson, L., Bauhus, J., Asbeck, T. et al. 2020. Retention as an integrated biodiversity conservation approach for continuous-cover forestry in Europe. *Ambio* 49/1: 85–97.
- Haber, W. 1990. Basic concepts of landscape ecology and their application in land management. *Physiol. Ecol. Japan* 27: 131–146.
- Hafner, A., Rüter, S. 2018. Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings—An exemplary study for residential buildings in Germany. *Wood and Fiber Science* 50/Special: 139–154.
- Hafner, A., Schäfer, S. 2017. Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. *Journal of Cleaner Production* 167: 630–642.
- Harrington, L. J., C.-F. Schleussner, F. E. L. Otto. 2021. Quantifying uncertainty in aggregated climate change risk assessments. *Nature Communications* 12/1: 7140.
- Härtl, F., Knoke, T. 2014. The influence of the oil price on timber supply. *Forest Policy and Economics* 39: 32–42.
- Härtl, F., Knoke, T. 2019. Coarse Woody Debris Management with Ambiguous Chance Constrained Robust Optimization. *Forests* 10/6: 504.
- Härtl, F. H., Höllerl, S., Knoke, T. 2017. A new way of carbon accounting emphasises the crucial role of sustainable timber use for successful carbon mitigation strategies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 22/8: 1163–1192.
- Hasler, N., Williams, C.A., Denney, V.C. et al. 2024. Accounting for albedo change to identify climate-positive tree cover restoration. *Nature Communications* 15/1: 2275.
- Heinonen, T., Pukkala, T., Asikainen, A. 2020. Variation in forest landowners' management preferences reduces timber supply from Finnish forests. *Annals of Forest Science* 77/2: 1562.
- Hellström, E., Reunala, A. 1995. Forestry conflicts from the 1950's to 1983: A review of a comparative study between USA, Germany, France, Sweden, Finland and Norway. 1. publ. Research report / European Forest Institute 3. Joensuu: European Forest Institute.
- Hernández-Alonso, H., Madrigal-González, J., Tornos-Estupiña, L. et al. 2023. Tree-size heterogeneity modulates the forest age-dependent carbon density in biomass and top soil stocks on Mediterranean woodlands. *Plant and Soil* 486/1-2: 361–373.
- Hetemäki, L., D'Amato, D., Giurca, A. et al. 2024. Synergies and trade-offs in the European forest bioeconomy research: State of the art and the way forward. *Forest Policy and Economics* 163: 103204.
- Hildebrandt, M. 1997. Die Bedeutung der Schneeheide-Kiefernwälder als Schutzwald. In: *Schutz von Schneeheide-Kiefernwäldern: Grundlagen, Ziele, Maßnahmen*. Herausgegeben von Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege. Laufen. 57–64.
- Hilf, R. B., Röhrig, F. 2007. *Der Wald und das Weidwerk in Geschichte und Gegenwart*. Sonderausgabe; Reprint der 1. Auflage 1938 (Der Wald) und 1933 (Das Weidwerk), Akademische Verlagsgesellschaft Athenaion, Potsdam. Dortmund: Humanitas Buchverlag.
- Hilmers, T., Biber, P., Knoke, T. et al. 2020. Assessing transformation scenarios from pure Norway spruce to mixed uneven-aged forests in mountain areas. *European Journal of Forest Research* 87/1–2: 267.
- Himes, A., Betts, M., Messier, C. et al. 2022. Perspectives: Thirty years of triad forestry, a critical clarification of theory and recommendations for implementation and testing. *Forest Ecology and Management* 510: 120103.

- Holmes, G. D. 1975. History of forestry and forest management. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 271/911: 69–80.
- Holzer, D., Bödeker, K., Rammer, W. et al. 2024. Evaluating dynamic tree-species-shifting and height development caused by ungulate browsing in forest regeneration using a process-based modeling approach. *Ecological Modelling* 493: 110741.
- Hölzl, R. 2010. Historicizing Sustainability: German Scientific Forestry in the Eighteenth and Nineteenth Centuries. *Science as Culture* 19/4: 431–460.
- Horne, P., Boxall, P. C., Adamowicz, W. L. 2005. Multiple-use management of forest recreation sites: a spatially explicit choice experiment. *Forest Ecology and Management* 207/1-2: 189–199.
- Jacob, G. R., Schreyer, R. 1980. Conflict in Outdoor Recreation: A Theoretical Perspective. *Journal of Leisure Research* 12/4: 368–380.
- Jarisch, I., Bödeker, K., Bingham, L. R. et al. 2022. The influence of discounting ecosystem services in robust multi-objective optimization – An application to a forestry-avocado land-use portfolio. *Forest Policy and Economics* 141: 102761.
- Jochem, D., Weimar, H., Bösch, M. et al. 2015. Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *European Journal of Forest Research* 134/5: 869–888.
- Johnston, C. M., van Kooten, C. G. 2015. Back to the past: Burning wood to save the globe. *Ecological Economics* 120: 185–193.
- Jotz, S., Konold, W., Suchomel, C. et al. 2017. *Lichte Wälder und biologische Vielfalt*, 2017.
- Kaim, A., Cord, A. F., Volk, M. 2018. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling & Software* 105: 79–93.
- Katzenberger, J., Sudfeldt, C. 2019. Rotmilan und Windkraft: Negativer Zusammenhang zwischen WKA-Dichte und Bestandstrends. *Der Falke - Journal für Vogelbeobachter* 11: 12–15.
- Kaul, C. 2021. Windkraft – Wie auch Waldbesitzer vom Wind profitieren können. https://www.digitalmagazin.de/marken/afz-derwald/hauptheft/2021-7/forstbetrieb/016_windkraft-wie-auch-waldbesitzer-vom-wind-profitieren-koennen (abgerufen 07.02.2025).
- Kenter, J. O., Reed, M. S., Fazey, I. 2016. The Deliberative Value Formation model. *Ecosystem Services* 21: 194–207.
- Kindu, M., Bingham, L.R., Borges, J.G.. et al. 2022a. Opportunity Costs of In Situ Carbon Storage Derived by Multiple-Objective Stand-Level Optimization—Results from Case Studies in Portugal and Germany. *Land* 11/11: 2085.
- Kindu, M., Le Mai, T. N., Bingham, L. R. et al. 2022b. Auctioning approaches for ecosystem services - Evidence and applications. *The Science of The Total Environment* 853: 158534.
- Kleinschmit, D., Böcher, M., Giessen, L. 2009. Discourse and expertise in forest and environmental governance — An overview. *Forest Policy and Economics* 11/5-6: 309–312.
- Klopčič, M., Simončič, T., Bončina, A. 2015. Comparison of regeneration and recruitment of shade-tolerant and light-demanding tree species in mixed uneven-aged forests: experiences from the Dinaric region. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 88/5: 552–563.
- Knapp, N., Wellbrock, N., Bielefeldt, J. et al. 2024. From single trees to country-wide maps: Modeling mortality rates in Germany based on the Crown Condition Survey. *Forest Ecology and Management* 568: 122081.
- Knoke, T., Paul, C., Hildebrandt, P. et al. 2016. Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. *Nature Communications* 7/1: 11877.
- Knoke, T., Paul, C., Rammig, A. et al. 2020a. Accounting for multiple ecosystem services in a simulation of land-use decisions: Does it reduce tropical deforestation? *Global Change Biology* 26/4: 2403–2420.
- Knoke, T., Kindu, M., Jarisch, I. et al. 2020b. How considering multiple criteria, uncertainty scenarios and biological interactions may influence the optimal silvicultural strategy for a mixed forest. *Forest Policy and Economics* 118: 102239.
- Knoke, T., Gosling, E., Reith, E. et al. 2022. Confronting sustainable intensification with uncertainty and extreme values on smallholder tropical farms. *Sustainability Science* 17: 1977–1994.
- Knoke, T., P. Biber, T. Schula, et al. 2025. Minimising the relative regret of future forest landscape compositions: The role of close-to-nature stand types. *Forest Policy and Economics* 171: 103410.

- Knoke, T., E. Gosling, D. Thom, et al. 2021a. Economic losses from natural disturbances in Norway spruce forests – A quantification using Monte-Carlo simulations. *Ecological Economics* 185: 107046.
- Knoke, T., Hanley, N., Roman-Cuesta, R. M. et al. 2023a. Trends in tropical forest loss and the social value of emission reductions. *Nature Sustainability* 6: 1373–1384.
- Knoke, T., Holzer, D., Fibich, J. 2024. Beschränkung waldbaulicher Handlungsspielräume durch Rehwildverbiss. *AFZ/Der Wald* 17: 30–32.
- Knoke, T., Kindu, M., Schneider, T. et al. 2021b. Inventory of Forest Attributes to Support the Integration of Non-provisioning Ecosystem Services and Biodiversity into Forest Planning—from Collecting Data to Providing Information. *Current Forestry Reports* 7/1: 38–58.
- Knoke, T., Messerer, K., Paul, C. 2017. The Role of Economic Diversification in Forest Ecosystem Management. *Current Forestry Reports* 3/2: 93–106.
- Knoke, T., Moog, M. 2005. Timber harvesting versus forest reserves—producer prices for open-use areas in German beech forests (*Fagus sylvatica* L.). *Ecological Economics* 52/1: 97–110.
- Knoke, T., Paul, C., Gosling, E., et al. 2023b. Assessing the Economic Resilience of Different Management Systems to Severe Forest Disturbance. *Environmental and Resource Economics* 84/2: 343–381.
- Knoke, T., Pluszczyk, N. 2001. On economic consequences of transformation of a spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) dominated stand from regular into irregular age structure. *Forest Ecology and Management* 151/1-3: 163–179.
- Koch, O., de Avila, A. L., Heinen, H. et al. 2022. Retreat of Major European Tree Species Distribution under Climate Change—Minor Natives to the Rescue? *Sustainability* 14/9: 5213.
- Köhl, M., Knoke, T. 2024. Forstwirtschaftlich produzierte Biomasse. In: *Energie aus Biomasse: Ressourcen und Bereitstellung*. Herausgegeben von M. Kaltschmitt, K. Stampfer. 4th ed. 2024. *Energie aus Biomasse*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg. 143–194.
- Kölling, C., Mette, T. 2022. Wälder im Klimawandel – Neues Klima erfordert neue Baumarten. In: *Wald in der Vielfalt möglicher Perspektiven*. Herausgegeben von K. Berr, C. Jenal. *Raum Fragen: Stadt – Region – Landschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 145–158.
- Konijnendijk, C. C., Randrup, T. B. 2004. Urban Forestry. *Encyclopedia of Forest Sciences* Chapter: *Landscape Planning* Publisher: Elsevier Sciences Editors: Burley J., Evans J., Youngquist J.A.
- Korcz, N., Janeczko, E., Bielinis, E. et al. 2021. Influence of Informal Education in the Forest Stand Redevelopment Area on the Psychological Restoration of Working Adults. *Forests* 12/8: 993.
- Körner, C. 2003. Slow in, Rapid out—Carbon Flux Studies and Kyoto Targets. *Science* (New York, N.Y.) 300/5623: 1242–1243.
- Korpilo, S., Virtanen, T., Lehvävirta, S. 2017. Smartphone GPS tracking—Inexpensive and efficient data collection on recreational movement. *Landscape and Urban Planning* 157: 608–617.
- Köthke, M., Lippe, M., Elsasser, P. 2023. Comparing the former EU TR and upcoming EUDR: Some implications for private sector and authorities. *Forest Policy and Economics* 157: 103079.
- Krüger, K., Senf, C., Hagge, J. et al. 2025. Setting aside areas for conservation does not increase disturbances in temperate forests. *Journal of Applied Ecology*. Doi: 10.1111/1365-2664.70036.
- Krumm, F., Bollmann, K., Brang, P. et al. 2020. Context and solutions for integrating nature conservation into forest management: an overview. In: *How to balance forestry and biodiversity conservation: A view across Europe*. Herausgegeben von F. Krumm, A. Schuck, A. Rigling. Birmensdorf: European Forest Institute (EFI). 10–25.
- Kühne, O. 2018. Der doppelte Landschaftswandel – Physische Räume, soziale Deutungen, Bewertungen. *Nachrichten der ARL*, 2018: 14–17.
- Küster, H. 1998. *Geschichte des Waldes: Von der Urzeit bis zur Gegenwart*. München: Verlag C.H.Beck.

- Laverne, R. J., W. A. Kellogg. 2019. Loss of urban forest canopy and the effects on neighborhood soundscapes. *Urban Ecosystems* 22/2: 249–270.
- Lawrence, J., M. Haasnoot, R. Lempert. 2020. Climate change: making decisions in the face of deep uncertainty. *Nature* 580/7804: 456.
- Lehmann, P., J. S. Ellerbrok, N. Farwig, et al. 2024. Windenergienutzung im Wald: Auswirkungen auf den Artenschutz und regulatorische Lösungsansätze. *Natur und Landschaft* 99/11: 521–531.
- Leidinger, J., Blaschke, M., Ehrhardt, M. et al. 2021. Shifting tree species composition affects biodiversity of multiple taxa in Central European forests. *Forest Ecology and Management* 498: 119552.
- Lettenmaier, L., Seibold, S., Bässler, C. et al. 2022. Beetle diversity is higher in sunny forests due to higher microclimatic heterogeneity in deadwood. *Oecologia* 198/3: 825–834.
- Leuschner, C., Ellenberg, H. 2017. Ecology of Central European Forests. Cham: Springer International Publishing.
- Lindenmayer, D. B., Franklin, J. F., Fischer, J. 2006. General management principles and a checklist of strategies to guide forest biodiversity conservation. *Biological Conservation* 131/3: 433–445.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S. et al. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259/4: 698–709.
- Luyssaert, S., Marie, G., Valade, A. et al. 2018. Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature* 562/7726: 259–262.
- Lyons-White, J., Pollard, E. H., Catalano, A. S. et al. 2020. Rethinking zero deforestation beyond 2020 to more equitably and effectively conserve tropical forests. *One Earth* 3/6: 714–726.
- Maaß, O., Kehlenbeck, H. 2024. Cost–Benefit Analysis of Monitoring Insect Pests and Aerial Spraying of Insecticides: The Case of Protecting Pine Forests against *Dendrolimus pini* in Brandenburg (Germany). *Forests* 15/1: 104.
- Maes, J., Liquete, C., Teller, A. et al. 2016. An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Ecosystem Services* 17: 14–23.
- Maizel, A. 2022. Komplexität und Diversität – Robustheit in biologischen Systemen. 115–121 Seiten / Forum Marsilius-Kolleg, Bd. 22 Nr. 2 (2022): Jahresbericht 2021/22.
- Mäkelä, A., Minunno, F., Kujala, H. et al. 2023. Effect of forest management choices on carbon sequestration and biodiversity at national scale. *Ambio* 52/11: 1737–1756.
- Malo, P., Tahvonen, O., Suominen, A. et al. 2021. Reinforcement learning in optimizing forest management. *Canadian Journal of Forest Research* 51/10: 1393–1409.
- Manderino, R., Crist, T. O., Haynes, K. J. 2014. Lepidoptera-specific insecticide used to suppress gypsy moth outbreaks may benefit non-target forest Lepidoptera. *Agricultural and Forest Entomology* 16/4: 359–368.
- Mann, C., Loft, L., Hernández-Morcillo, M. et al. 2022. Governance Innovations for forest ecosystem service provision - Insights from an EU-wide survey. *Environmental Science & Policy* 132: 282–295.
- Mannerkoski, H., Finér, L., Piirainen, S. et al. 2005. Effect of clear-cutting and site preparation on the level and quality of groundwater in some headwater catchments in eastern Finland. *Forest Ecology and Management* 220/1–3: 107–117.
- Mantel, K. 1990. Wald und Forst in der Geschichte: Ein Lehr- und Handbuch. Alfeld, Hannover: Schaper.
- Maringer, J., Stelzer, A.-S., Paul, C. et al. 2021. Ninety-five years of observed disturbance-based tree mortality modeled with climate-sensitive accelerated failure time models. *European Journal of Forest Research* 140/1: 255–272.
- Marques, M., Juerges, N., Borges, J. G. 2020. Appraisal framework for actor interest and power analysis in forest management - Insights from Northern Portugal. *Forest Policy and Economics* 111: 102049.
- Martynova, M., Sultanova, R., Khanov, D. et al. 2021. Forest Management Based on the Principles of Multifunctional Forest Use. *Journal of Sustainable Forestry* 40/1: 32–46.
- Mathgen, X., Fritzsche, A., Arnold, A. et al. 2024. Zeitenwende im Artenschutz – Aktuelle Gesetzesänderung versus wissenschaftliche Evidenzen beim Fledermausschutz und dem Ausbau der Windenergienutzung – Deutsche Fledermauswarte. *Nyctalus*, 2024: 182–202.

- Mayer, A. L., Kauppi, P. E., Angelstam, P. K. et al. 2005. Ecology. Importing timber, exporting ecological impact. *Science* (New York, N.Y.) 308/5720: 359–360.
- Mayer, M., Müller, M., Woltering, M. et al. 2010. The economic impact of tourism in six German national parks. *Landscape and Urban Planning* 97/2: 73–82.
- Mayer, M., Woltering, M. 2018. Assessing and valuing the recreational ecosystem services of Germany's national parks using travel cost models. *Ecosystem Services* 31: 371–386.
- Melber, M., Hermanns, U., Voigt, C.C. et al. 2023. Fledermausschutz an Windenergieanlagen - Aktueller Stand und Herausforderungen. *Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL)* 55/3: 30–37.
- Messier, C., Bauhus, J., Sousa-Silva, R. et al. 2022. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters* 15/1.
- Meusburger, K., Trotsiuk, V., Schmidt-Walter, P. et al. 2022. Soil-plant interactions modulated water availability of Swiss forests during the 2015 and 2018 droughts. *Global Change Biology* 28/20: 5928–5944.
- Meyer, P. 2013. Biodiversität in Wäldern AFZ/Der Wald 68/7: 29–31.
- Meyer, P., Lindner, M., Bauhus, J. et al. 2023. Zum Umgang mit alten, naturnahen Laubwäldern in Deutschland im Spannungsfeld zwischen Biodiversitätsschutz, Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel.
- Meyer, P., Nagel, R., Feldmann, E. 2021. Limited sink but large storage: Biomass dynamics in naturally developing beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* *Quercus petraea*) forests of north-western Germany. *Journal of Ecology* 109/10: 3602–3616.
- Meyfroidt, P., Börner, J., Garrett, R. et al. 2020. Focus on leakage and spillovers: informing land-use governance in a tele-coupled world. *Environmental Research Letters* 15/9: 90202.
- Moczek, N., Dworschak, U., Klar, C. 2025. Besucherverhalten im Nationalpark Berchtesgaden - Auswirkungen von Social Media. *Natur und Landschaft*, 04.03.2025: 492–499.
- Mohr, J., Thom, D., Hasenauer, H. et al. 2024. Are uneven-aged forests in Central Europe less affected by natural disturbances than even-aged forests? *Forest Ecology and Management* 559: 121816.
- Möller, K., Heinrich, F. (Hrsg.). 2016. Pflanzenschutz im Wald. In: *Pflanzenschutz im Gartenbau*, S. 485–498. Eugen Ulmer.
- Mose, I., Weixlbaumer, N. 2003. Großschutzgebiete als Motoren einer nachhaltigen Regionalentwicklung? Erfahrungen mit ausgewählten Schutzgebieten in Europa.
- Motta, R., Haudemand, J.-C. 2000. Protective Forests and Silvicultural Stability. *Mountain Research and Development* 20/2: 180–187.
- Mueller, J. M. 2015. Synopsis des internationalen Kenntnisstandes zum Einfluss der Windenergie auf Fledermäuse und Vögel und Spezifizierung für die Schweiz/291061: 183.
- Müller, A., Olschewski, R., Unterberger, C., et al. 2020. The valuation of forest ecosystem services as a tool for management planning - A choice experiment. *Journal of Environmental Management* 271: 111008.
- Müller, J. 2002. Wasserhaushalt von Kiefern- und Buchen-Reinbeständen und von Kiefern- und Buchen-Mischbeständen im nordostdeutschen Tiefland. Funktionen des Waldes und Aufgaben der Forstwirtschaft in Verbindung mit dem Landschaftswasserhaushalt 15.
- Muro, A., Mateo, C., Parrado, E. et al. 2023. Forest bathing and hiking benefits for mental health during the COVID-19 pandemic in Mediterranean regions. *European Journal of Forest Research* 142/2: 415–426.
- Nabuurs, G.-J., Lindner, M., Verkerk, P.J. et al. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3/9: 792–796.
- Nagel, T.A., Rodríguez-Recio, M., Aakala, T. et al. 2025. Can triad forestry reconcile Europe's biodiversity and forestry strategies? A critical evaluation of forest zoning. *Ambio* 54: 632–641.
- Niedermann-Meier, S., Mordini, M., Büttler, R. et al. 2010. Habitatbäume im Wirtschaftswald: ökologisches Potenzial und finanzielle Folgen für den Betrieb. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 161/10: 391–400.
- Nikinmaa, L., Lindner, M., Cantarello, E.. et al. 2020. Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. *Current Forestry Reports* 6/2: 61–80.
- Noisilainen, D., Mola-Yudego, B. 2022. Characteristics and emerging patterns of forest conflicts in Europe - What can they tell us? *Forest Policy and Economics* 136: 102671.

- Nürnberger, K., Hahn, A., Jörg, R. et al. 2013. Unerwünschte Effekte der Einkommensteuergesetzgebung auf die Wahl waldbaulicher Alternativen: Eine Simulationsstudie aus der Sicht eines risikomeidenden Entscheiders. *AgEcon search*.
- O'Hara, K. 2006. Multiaged forest stands for protection forests: Concepts and applications. *For. Snow Landsc. Res.* 80: 45–55.
- oeko.de. 2024. Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts. <https://www.oeko.de/publikation/kurzstudie-zur-modellierung-der-thg-bilanz-der-lebenden-baeume-im-mit-massnahmen-szenario-mms-des-projektionsberichts/> (abgerufen 20.10.2024).
- Olander, L.P., Johnston, R.J., Tallis, H. et al. 2018. Benefit relevant indicators: Ecosystem services measures that link ecological and social outcomes. *Ecological Indicators* 85: 1262–1272.
- Ortiz-Urbina, E., Diaz-Balteiro, L., Pardos, M. et al. 2022. Representative Group Decision-Making in Forest Management: A Compromise Approach. *Forests* 13/4: 606.
- Palviainen, M., Peltomaa, E., Laurén, A. et al. 2022. Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland under different forest harvesting intensities. *The Science of The Total Environment* 806/Pt 4: 150919.
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M.E. et al. 2023. Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology* 29/5: 1359–1376.
- Paul, C., Hanley, N., Meyer, S. T. et al. 2020. On the functional relationship between biodiversity and economic value. *Science Advances* 6/5: eaax7712.
- Paul, C., Knoke, T. 2015. Between land sharing and land sparing – what role remains for forest management and conservation? *International Forestry Review* 17/2: 210–230.
- Peng, L., Searchinger, T. D., Zions, J. et al. 2023. The carbon costs of global wood harvests. *Nature* 620: 110–115.
- Pereira, L.M., Davies, K.K., Belder, E. den. et al. 2020. Developing multiscale and integrative nature–people scenarios using the Nature Futures Framework. *People and Nature* 2/4: 1172–1195.
- Petercord, R. 2015. Pflanzenschutz mit Luftfahrzeugen. *AFZ-Der Wald - Allgemeine Forstzeitschrift* 8: 11–16.
- Peters, A., Ruess, R., Heurich, M. 2022. Welche Auswirkungen haben Erholungsaktivitäten auf Verhalten, Physiologie und Demografie von Wildtieren? - Ergebnisse einer vergleichenden Literaturstudie. *Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL)* 55/1: 24–35.
- Phalan, B., Onial, M., Balmford, A., et al. 2011. Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science (New York, N.Y.)* 333/6047: 1289–1291.
- Phelps, J., Carrasco, L. R., Webb, E. L. et al. 2013. Agricultural intensification escalates future conservation costs. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110/19: 7601–7606.
- Piechocki, R., Eser, U., Potthast, T. et al. 2003. Biodiversität - Symbolbegriff für einen Wandel im Selbstverständnis von Natur- und Umweltschutz. *Natur und Landschaft* 78: 30–33.
- Pohjanmies, T., Eyyvindson, K., Triviño, M. et al. 2021. Forest multifunctionality is not resilient to intensive forestry. *European Journal of Forest Research* 140/3: 537–549.
- Polasky, S., Carpenter, S. R., Folke, C. et al. 2011. Decision-making under great uncertainty: environmental management in an era of global change. *Trends in Ecology & Evolution* 26/8: 398–404.
- Popkin, G. 2019. How much can forests fight climate change? *Nature* 565/7739: 280–282.
- Price, M., Price, C. 2006. Creaming the best, or creatively transforming? Might felling the biggest trees first be a win–win strategy? *Forest Ecology and Management* 224/3: 297–303.
- Prietz, J., Bachmann, S. 2012. Changes in soil organic C and N stocks after forest transformation from Norway spruce and Scots pine into Douglas fir, Douglas fir/spruce, or European beech stands at different sites in Southern Germany. *Forest Ecology and Management* 269: 134–148.
- Prins, K., Köhl, M., Linser, S. 2023. Is the concept of sustainable forest management still fit for purpose? *Forest Policy and Economics* 157: 103072.
- Projektgruppe Waldfunktionenkartierung der AG Forsteinrichtung (Hrsg.). 2015. Leitfaden zur Kartierung der Schutz- und Erholungsfunktionen des Waldes: Waldfunktionenkartierung; (WFK). Freiburg: FVA.
- Puettmann, K. J. 2009. *A Critique of Silviculture: Managing for Complexity*. Washington: Island Press.

- Pukall, K. 2014. Mögliche Entwicklungslinien für das Bundeswaldgesetz. *Natur und Recht* 36/3: 171–176.
- Radkau, J. 2018. Holz: Wie ein Naturstoff Geschichte schreibt. Überarbeitete, erweiterte und aktualisierte Fassung. *Stoffgeschichten* Band 3. München: oekom verlag.
- Ramík, J., Vlach, M. 2002. Pareto-optimality of compromise decisions. *Fuzzy Sets and Systems* 129/1: 119–127.
- Randon, M., Bonenfant, C., Michallet, J. et al. 2020. Population responses of roe deer to the recolonization of the French Vercors by wolves. *Population Ecology* 62/2: 244–257.
- Ranger, J., Bonnaud, P., Bouriaud, O. et al. 2008. Effects of the clear-cutting of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) plantation on chemical soil fertility. *Annals of Forest Science* 65/3: 303.
- Rank, E., Gang, B. 2021. Überlebenschancen der Hauptbaumarten im Uniwald Landshut. *AFZ-Der Wald - Allgemeine Forstzeitschrift*: 16–19.
- Redding, T. E., Hope, G. D., Fortin, M.-J. et al. 2003. Spacial patterns of soil temperature and moisture across subalpine forest-clearcut edges in the southern interior of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science* 83/1: 121–130.
- Regelmann, C., Rosenkranz, L., Seintsch, B. et al. 2023. Economic Evaluation of Different Implementation Variants and Categories of the EU Biodiversity Strategy 2030 Using Forestry in Germany as a Case Study. *Forests* 14/6: 1173.
- Rehling, F., Delius, A., Ellerbrok, J. et al. 2023. Wind turbines in managed forests partially displace common birds. *Journal of Environmental Management* 328: 116968.
- Reichenbach, M., Brinkman, R., Kohnen, A. et al. 2015. Bau- und Betriebsmonitoring von Windenergieanlagen im Wald- Abschlussbericht 30.11.2015.
- Reichenbach, M., Reers, H., Günther, F. et al. 2023. Auswirkungen von WEA auf die akustische Aktivität ausgewählter Waldvogelarten: Untersuchungen zu Verdrängungseffekten mittels automatisierter Erfassung Ergebnisse des F+E-Vorhabens: Optimierung des Planungs- und Genehmigungsprozesses von Windenergieanlagen im Wald hinsichtlich Berücksichtigung von Artenschutzbelangen (Avifauna) (FKZ 3517 86 0400). BfN-Schriften 643. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.
- Reike, H.-P., Möller, K. 2018. Neufunde und Seltenheiten in Brandenburgischen Kiefernforsten. *Entomologische Nachrichten und Berichte*, 2018: 121–126. https://www.zobodat.at/publikation_articles.php?id=442295.
- Reyer, C. P. O., Flechsig, M., Lasch-Born, P., van Oijen, M. 2016. Integrating parameter uncertainty of a process-based model in assessments of climate change effects on forest productivity. *Climatic Change* 137/3-4: 395–409.
- Rodríguez, J.P., Beard, J.T., Bennett, E.M. et al. 2006. Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services. *Ecology and Society* 11/1.
- Rosén, K., Aronson, J.-A., Eriksson, H. M. 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 83/3: 237–244.
- Runting, R.K., Ruslandi, R., Griscom, B.W. et al. 2019. Larger gains from improved management over sparing-sharing for tropical forests. *Nature Sustainability* 2/1: 53–61.
- Rusanen, K., Finer, L., Antikainen, M., et al. 2004. The effect of forest cutting on the quality of groundwater in large aquifers in Finland. *Boreal Environment Research. Monographs* 9/3: 253–261.
- Rüter, S. 2023. Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung. Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- Rüter, S., Hafner, A. 2021. Verwendung von Holz in Gebäuden als Beitrag zum Klimaschutz. In: *Klimaschutz und Energiewende in Deutschland*. Herausgegeben von U. Sahling. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 1–13.
- Ryan, M. G., Phillips, N., Bond, B. J. 2006. The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant, Cell & Environment* 29/3: 367–381.
- Saaty, R. W. 1987. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling* 9/3-5: 161–176.
- Sabatini, F.M., Andrade, R.B. de, Paillet, Y. et al. 2019. Trade-offs between carbon stocks and biodiversity in European temperate forests. *Global Change Biology* 25/2: 536–548.
- Salliou, N., Stritih, A. 2023. In complexity we trust: learning from the socialist calculation debate for ecosystem management. *Environmental Research Letters* 18/5: 51001.

- Schafellner, C., Möller, K. 2019. Blatt- und nadelfressende Insekten. In: *Störungsökologie*. Herausgegeben von Wohlgemuth T., Jentsch A., Seidl R. UTB-Reihe. Bern: Haupt Verlag. 212–235.
- Schall, P., Gossner, M.M., Heinrichs, S. et al. 2018. The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests. *Journal of Applied Ecology* 55/1: 267–278.
- Schall, P., Heinrichs, S., Ammer, C. et al. 2020. Can multi-taxa diversity in European beech forest landscapes be increased by combining different management systems? *Journal of Applied Ecology* 57/7: 1363–1375.
- Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Schuck, A. 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9/11: 1620–1633.
- Schellnhuber, H.-J., Widera, B., Kutnar, A. et al. 2022. Horizon Europe and new European Bauhaus NEXUS report: Conclusions of the High-Level Workshop on ‘Research and Innovation for the New European Bauhaus’, jointly organised by DG Research and Innovation and the Joint Research Centre. Brussel: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation.
- Scherzinger, W. 1996. Naturschutz im Wald: Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung. Praktischer Naturschutz. Stuttgart: Ulmer.
- Schier, F., Iost, S., Seitsch, B. et al. 2022. Assessment of Possible Production Leakage from Implementing the EU Biodiversity Strategy on Forest Product Markets. *Forests* 13/8: 1225.
- Schmidt, M., Hanewinkel, M., Kändler, G. et al. 2010. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage — experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* 40/8: 1636–1652.
- Schmithüsen, F. J., Sasse, V., Thoroe, C. 2007. Public policy impacts on European forest sector development.
- Schraml, U. 2008. Erholungsnutzung des Waldes: In Waldnutzung in Deutschland (S. 143–160). Göttingen: Universitätsverlag.
- Schuck, A., Meyer, P., Menke, N. et al. 2005. Forest biodiversity indicator: Dead wood – A proposed approach towards operationalising the MCPFE indicator. In: *Monitoring and indicators of forest biodiversity in Europe - from ideas to operationality*. Herausgegeben von M. Marchetti. EFI proceedings 51. Joensuu: European Forest Institute. 49–77.
- Schüler, G. 2023. Wassermanagement im Wald, Teil 1. AFZ/Der Wald, 2023: 42–45.
- Schüler, G. 2024. Wassermanagement im Wald, Teil 2. AFZ/Der Wald, 2024: 12–15.
- Schulze, E.D., Sierra, C.A., Egenolf, V. et al. 2020. The climate change mitigation effect of bioenergy from sustainably managed forests in Central Europe. *GCB Bioenergy* 12/3: 186–197.
- Schuster, E., Bulling, L., Köppel, J. 2015. Consolidating the State of Knowledge: A Synoptical Review of Wind Energy’s Wildlife Effects. *Environmental Management* 56/2: 300–331.
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P. et al. 2020. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 375/1794: 20190120.
- Sedlaczek, M., Menge, A. 2019. Sind Höhlenbrüter in Brandenburger Kiefernwäldern gefährdet? *Naturmagazin*/3.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M. et al. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7/6: 395–402.
- Senf, C., Seidl, R., Knoke, T. et al. 2025. Taylor's law predicts unprecedented pulses of forest disturbance under global change. *Nature Communications* 16/1: 6133.
- Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K. et al. 2022. The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management* 522: 120397.
- Sharma, A., Bohn, K., Jose, S. et al. 2016. Even-Aged vs. Uneven-Aged Silviculture: Implications for Multifunctional Management of Southern Pine Ecosystems. *Forests* 7/12: 86.
- Sing, L., Metzger, M. J., Paterson, J. S. et al. 2018. A review of the effects of forest management intensity on ecosystem services for northern European temperate forests with a focus on the UK. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 91/2: 151–164.

- Sohn, J. A., Saha, S., Bauhus, J. 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 380: 261–273.
- Soppa, R. 2022. Gelungenes Beispiel für Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen. *AFZ Der Wald*, 2022: 20–23.
- Sopuck, L., Ovaska, K., Whittington, B. 2002. Responses of songbirds to aerial spraying of the microbial insecticide *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* (FORAY 48B) on Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21/8: 1664–1672.
- Sorge, S., Mann, C., Schleyer, C. et al. 2022. Understanding dynamics of forest ecosystem services governance: A socio-ecological-technical-analytical framework. *Ecosystem Services* 55: 101427.
- Specker, H. 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe—temperate zone. *Journal of Environmental Management* 67/1: 55–65.
- Špulák, O., D. Kacálek, Z. Ráček, et al. 2022. The Impact of Clear-Cutting on the Volume and Chemistry of Water at a Sandy Nutrient-Poor Pine Site. *Forests* 13/8: 1226.
- SRU und Wissenschaftliche Beiräte. 2023. Umwelt und Gesundheit konsequent zusammendenken: Sondergutachten. Berlin: Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU).
- Stähler, M., N. Bräsicke, K. Möller. 2018. Zur Umweltwirkung von Pflanzenschutzmitteln in Wäldern. 61. Deutsche Pflanzenschutztagung. Hohenheim.
- Statista. 2023. Statistiken zu Treibhausgas- und CO₂-Emissionen. Statista, 25.09.2023. <https://de.statista.com/themen/2442/treibhausgas-emissionen/#topicOverview> (abgerufen 20.04.2024).
- Storch, F., G. Kändler, J. Bauhus. 2019. Assessing the influence of harvesting intensities on structural diversity of forests in south-west Germany. *Forest Ecosystems* 6/1.
- Stürck, J., P. H. Verburg. 2017. Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change. *Landscape Ecology* 32/3: 481–500.
- Suvanto, S., M. Peltoniemi, S. Tuominen, et al. 2019. High-resolution mapping of forest vulnerability to wind for disturbance-aware forestry. *Forest Ecology and Management* 453: 117619.
- Tahvonen, O. 2009. Optimal choice between even- and uneven-aged forestry. *Natural Resource Modeling* 22/2: 289–321.
- Taylor, C., D. B. Lindenmayer. 2021. Stakeholder engagement in a Forest Stewardship Council Controlled Wood assessment. *Environmental Science & Policy* 120: 204–212.
- Temperli, C., C. Blattert, G. Stadelmann, et al. 2020. Trade-offs between ecosystem service provision and the predisposition to disturbances: a NFI-based scenario analysis. *Forest Ecosystems* 7/1: 1–17.
- Termansen, M., C. J. McClean, F. S. Jensen. 2013. Modelling and mapping spatial heterogeneity in forest recreation services. *Ecological Economics* 92: 48–57.
- Thom, D., R. Seidl. 2016. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews* 91/3: 760–781.
- Tiemann, A., Ring, I. 2018. Challenges and Opportunities of Aligning Forest Function Mapping and the Ecosystem Service Concept in Germany. *Forests* 9/11: 691.
- Timm, S., Dieter, M., Fischer, R. et al. 2022. Konsequenzen der »EU-Biodiversitätsstrategie 2030« für Wald und Forstwirtschaft in Deutschland. LWF Materialien.
- Turkelboom, F., Leone, M., Jacobs, S. et al. 2018. When we cannot have it all: Ecosystem services trade-offs in the context of spatial planning. *Ecosystem Services* 29: 566–578.
- Turner, M. G. 2005. Landscape Ecology: What Is the State of the Science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 36/1: 319–344.
- UBA. 2021a. Themenpapier | Ökobilanz der Windenergie an Land: Was sind Ökobilanzen und wie berechnet man sie? Wie steht es um die Ökobilanz von Windenergieanlagen an Land ab? Umweltbundesamt/März.
- UBA. 2021b. Themenpapier: Windenergie im Wald: Warum werden in Deutschland Windenergieanlagen auch auf Waldflächen errichtet? Welche Konflikte können dabei entstehen? Und worauf muss die Kommune dabei achten? Umweltbundesamt.
- Uhde, B., Heinrichs, S., Stiehl, C. R. et al. 2017. Bringing ecosystem services into forest planning – Can we optimize the composition of Chilean forests based on expert knowledge? *Forest Ecology and Management* 404: 126–140.

- van der Plas, F., Manning, P., Soliveres, S. et al. 2016. Biotic homogenization can decrease landscape-scale forest multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113/13: 3557–3562.
- van der Plas, F., Allan, E., Fischer, M. et al. 2019. Towards the development of general rules describing landscape heterogeneity–multifunctionality relationships. *Journal of Applied Ecology* 56/1: 168–179.
- van Dijk, A.I., Gash, J.H., van Gorsel, E. et al. 2015. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215: 402–415.
- van Kooten, G. C. 2023. Determining optimal forest rotation ages and carbon offset credits: Accounting for post-harvest carbon storehouses. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie* 71/2: 255–272.
- Vera, F. W. M. 2000. *Grazing ecology and forest history*. UK: CABI Publishing.
- Vertessy, R. A., Hatton, T. J., Benyon, R. G. et al. 1996. Long-term growth and water balance predictions for a mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forest catchment subject to clear-felling and regeneration. *Tree Physiology* 16/1_2: 221–232.
- Wald – Sport, Erholung, Gesundheit. 2023. Vereinfachung der Rechtslage zum Betretungsrecht des Waldes: Impulse und Empfehlungen der Bundesplattform. Leistungen der Waldwirtschaft für Sport, Erholung und Gesundheit und deren Finanzierungsmöglichkeiten (2019). Berlin.
- Walentowski, H., Falk, W., Mette, T. et al. 2014. Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: a case study in southern Germany. *Annals of Forest Research* 60/1.
- Wanner, M., Wiesener, C., Otto, L., Xylander, W. E. R. 2005. Short-term effects of a nun moth suppression programme (*Lymantria monacha*), (Lepidoptera: Lymantriidae) on epigaeic non-target arthropods. *Journal of Pest Science* 78/1: 7–11.
- WBW. 2025. Die Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung: Orientierungshilfe in einer kontroversen Debatte: Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates für Waldbiologie (WBW). Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH).
- WBW und WBGR. 2020. Wege zu einem effizienten Waldnaturschutz in Deutschland. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Sonderheft 228, Januar 2020.
- Weber-Blaschke, G., Friedrich, S. 2015. Stoffliche oder energetische Holznutzung? Auswirkungen einer Verschiebung der Holznutzung auf ökologische, soziale und ökonomische Indikatoren. AFZ-Der Wald - Allgemeine Forstzeitschrift/23: 23–25.
- Weinbrenner, H., Breithut, J., Hebermehl, W. et al. 2021. “The Forest Has Become Our New Living Room” – The Critical Importance of Urban Forests During the COVID-19 Pandemic. *Frontiers in Forests and Global Change* 4.
- Weis, W., Ahrends, B., Böhner, J. et al. (Hrsg.). 2023. Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel (WHH-KW): Abschlussveröffentlichung zum Forschungsprojekt, Teilprojekte 01, 02, 03, 04. Forstliche Forschungsberichte München Nr. 224 (2023). Freising: Zentrum Wald Forst Holz Weihenstephan.
- Weller, P., Elsasser, P. 2018. Preferences for forest structural attributes in Germany – Evidence from a choice experiment. *Forest Policy and Economics* 93: 1–9.
- Wenk, M., Möller, K. 2013. Prognose Bestandesgefährdung-Bedeutet Kahlfraß das Todesurteil für Kiefernbestände? Eberswalder Schriftenreihe Band 51: 9–14.
- Wessely, J., Essl, F., Fiedler, K. et al. 2024. A climate-induced tree species bottleneck for forest management in Europe. *Nature Ecology & Evolution* 8/6: 1109–1117.
- Wilkes-Allemann, J., Pütz, M., Hirschi, C. et al. 2015. Conflict situations and response strategies in urban forests in Switzerland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30/3: 204–216.
- Wilpert, K. v., Zirlewagen, D., Kohler, M. 2000. To What Extent Can Silviculture Enhance Sustainability of Forest Sites under the Immission Regime in Central Europe? *Water, Air, & Soil Pollution* 122/1/2: 105–120.
- Winkel, G. 2006. Waldnaturschutzpolitik in Deutschland: Bestandsaufnahme, Analysen und Entwurf einer Story-Line. Remagen-Oberwinter: Kessel.
- Winkel, G., Blondet, M., Borrass, L. et al. 2015. The implementation of Natura 2000 in forests: A trans- and interdisciplinary assessment of challenges and choices. *Environmental Science & Policy* 52: 23–32.

- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M. et al. 2021. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature communications* 12/1: 2501.
- Winter, C., Müller, S., Kattenborn, T. et al. 2025. Forest Dieback in Drinking Water Protection Areas—A Hidden Threat to Water Quality. *Earth's Future* 13/4.
- Wirth, C., Messier, C., Bergeron, Y. et al. 2009. Old-Growth Forest Definitions: a Pragmatic View. In: *Old-Growth Forests*. Herausgegeben von C. Wirth, G. Gleixner, M. Heimann. Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 11–33.
- Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik. 2018. Erhöhung der stofflichen Nutzung von Holz in Gebäuden im Einklang mit der Rohstoffverfügbarkeit: – Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates Waldpolitik –.
- Wiswede, G. 1998. Soziologie: Grundlagen und Perspektiven für den wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Bereich. 3., neubearb. Aufl. Landsberg am Lech: mi Verl. Moderne Industrie.
- Wolterding, M. 2011. Tourismus und Regionalentwicklung in deutschen Nationalparken: Regionalwirtschaftliche Wirkungsanalyse des Tourismus als Schwerpunkt eines sozioökonomischen Monitoringsystems: Doctoral Thesis, Universität Würzburg.
- Wunderlich, A. C., Salak, B., Hegetschweiler, K. T. et al. 2024. How the COVID-19 pandemic changed forest visits in Switzerland: Is there a back to normal? *Landscape and Urban Planning* 249: 105126.
- Zabel, A., Schulz, T., Lieberherr, E. 2018. Grüne Wirtschaft: eine Annäherung an mögliche Zielkonflikte und Synergien im Wald. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 169/3: 143–149.
- Zimmermann, L., Raspe, S., Schulz, C. et al. 2008. Wasserverbrauch von Wäldern. *LWF aktuell* 66: 16–20.
- Zoller, H., Haas, J. N. 1995. War Mitteleuropa ursprünglich eine halboffene Weidelandschaft oder von geschlossenen Wäldern bedeckt? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 1995: 321–354.
- Zundel, R., Schwartz, E. 1996. 50 Jahre Forstpolitik in Deutschland: (1945 bis 1994). Repr. d. Ausg. 1996. Berichte über Landwirtschaft Sonderheft N.F., 211. Remagen-Oberwinter: Kess

Prompt der Titelseite für DALL·E 3: „Bitte erstelle ein Coverfoto für ein wissenschaftliches Gutachten, welches folgende Punkte beinhalten sollte: im oberen Dritt. Szene: Realistische Darstellung eines Mischwaldes mit natürlichen, frischen und erdigen Farbtönen (Olivgrün, Moosgrün, Braun, dunkles Beige). Im Hintergrund läuft quer durch den Wald ein eleganter, leicht schimmernder Bach in Kielwasserform, eine stilisierte Welle aus Blau und Weiß, die sich geschwungen zwischen den Bäumen hindurchzieht. Im Hintergrund: Hinter dem Wald steht ein Windrad auf einer leichten Erhöhung/Hügel, dezent am Horizont. Im Waldhintergrund ist ein Wolf und ein Reh (etwas voneinander entfernt), ein Specht und eine Fledermaus sind in den Bäumen zu sehen (Größen bedenken). Es fliegt ein Greifvogel durch den Hintergrund, mit Abstand zum Windrad. Im Vordergrund: Holzernte liegt gestapelt am Wegesrand, zufriedene Wanderer laufen vorbei. Lichtstimmung: Weiches, natürliches Licht, das die Szene seriös, aber einladend wirken lässt. Stil: Realistischer digitaler Zeichenstil, eine Synthese aus Illustration, Infografik und Coverdesign. Keine fotorealistische Darstellung.“