

Bericht

**des Ausschusses für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung**

Technikfolgenabschätzung (TA)

Naturgemäßer Waldumbau in Zeiten des Klimawandels

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses	4
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	22
2 Wald im Spannungsfeld von Schutz und Nutzung: Grundlagen und Rahmenbedingungen	25
2.1 Der deutsche Wald in Zahlen: Ergebnisse der Bundeswaldinventur	25
2.1.1 Zusammensetzung und Struktur	26
2.1.2 Bewirtschaftung.....	26
2.1.3 Besitzverhältnisse	26
2.2 Relevante gesetzliche Rahmenbedingungen.....	28
2.3 Waldschäden: Auswirkungen des Klimawandels.....	30
2.3.1 Fichte	33
2.3.2 Buche.....	33
2.3.3 Kiefer.....	33
2.3.4 Eiche.....	34
2.4 Wald im Klimawandel: gesellschaftliche Debatten und politische Strategien	34
2.4.1 Grundzüge der deutschen Walddebatte	34
2.4.2 Politische Strategien mit Waldbezug: Ziele und Zielkonflikte.....	35
2.5 Fazit.....	40

	Seite
3 Anforderungen an den naturnahen Waldumbau und resiliente Waldökosysteme	41
3.1 Naturnaher Waldumbau.....	41
3.1.1 Stand in Deutschland.....	42
3.1.2 Waldbauliche Konzepte und Verfahren.....	43
3.2 Eigenschaften resilienter Waldökosysteme	45
3.2.1 Genetische Vielfalt	46
3.2.2 Funktionelle Vielfalt.....	47
3.2.3 Intakter Waldboden	48
3.3 Baumarten für den Wald der Zukunft.....	50
3.3.1 Gebietsheimische alternative Baumarten.....	51
3.3.2 Fremde Herkünfte heimischer Baumarten.....	52
3.3.3 Nicht gebietsheimische und exotische Baumarten	53
3.4 Maßnahmen zur Begrenzung von Wildschäden und Waldbränden.....	55
3.4.1 Wildbestandsregulierung	55
3.4.2 Waldbrandprävention	58
3.5 Implikationen für das Waldmanagement.....	61
3.5.1 Integration oder Segregation?.....	61
3.5.2 Aktives oder passives Waldmanagement?.....	62
3.5.3 Aktive Aufforstung oder Naturverjüngung?.....	63
3.5.4 Schlussfolgerungen.....	64
3.6 Fazit	65
4 Technische Innovationen für Waldumbau und nachhaltiges Waldmanagement	67
4.1 Waldzustandsmonitoring	67
4.1.1 Überblick über bestehende Waldmonitoringnetzwerke.....	67
4.1.2 Perspektiven und Rahmenbedingungen.....	73
4.2 Forsttechnologische und maschinelle Ansätze	74
4.2.1 Stand der Technik und Herausforderungen	74
4.2.2 Technologische Innovationen.....	77
4.2.3 Perspektiven und Rahmenbedingungen.....	80
4.3 Biotischer Waldschutz.....	81
4.3.1 Aktueller Stand des Waldschutzes in Deutschland.....	81
4.3.2 Optionen für den biotischen Waldschutz.....	83
4.3.3 Perspektiven und Rahmenbedingungen.....	85
4.4 Genetisches Monitoring.....	86
4.4.1 Stand von Forschung und Anwendung.....	86
4.4.2 Beitrag zum Waldumbau	88
4.4.3 Perspektiven und Rahmenbedingungen.....	90

	Seite
5	Ökonomische Aspekte des naturnahen Waldumbaus 91
5.1	Hintergrund und Methodik 91
5.1.1	Wirtschaftliche Situation der Forstbetriebe 92
5.1.2	Herleitung der Beispielbetriebe 93
5.1.3	Beschreibung der drei Bewirtschaftungstypen 95
5.1.4	Einordnung und Diskussion der verwendeten Methodik..... 97
5.2	Ergebnisse der waldbaulichen und forstbetrieblichen Simulationen..... 99
5.2.1	Vergleich der Bewirtschaftungstypen für die vier Beispielbetriebe 99
5.2.2	Diskussion weiterer Ergebnisse 111
5.2.3	Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen..... 123
5.3	Forstliche Förderung..... 127
5.3.1	Zur Architektur der forstlichen Förderung 127
5.3.2	Überblick über existierende Förderprogramme 128
5.3.3	Konzepte zur Honorierung von Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen im Bereich Wald 133
5.4	Fazit 134
6	Resümee und Handlungsfelder 136
6.1	Forstliche Aspekte 136
6.1.1	Waldmanagement 137
6.1.2	Wildtiermanagement 138
6.2	Ökonomische Aspekte..... 139
6.2.1	Vergleich der Bewirtschaftungsverfahren 139
6.2.2	Förderstrategien und -maßnahmen 140
6.3	Technologische Aspekte..... 142
7	Literatur 144
7.1	In Auftrag gegebene Gutachten 144
7.2	Weitere Literatur..... 144
8	Anhang 164
8.1	Abbildungen 164
8.2	Tabellen 164
8.3	Kästen 165
8.4	Glossar..... 165

Vorwort des Ausschusses

Deutschland ist eines der walddreichsten Länder Europas. Die hiesigen Wälder haben eine große Bedeutung für die Holzproduktion, die Erhaltung der Biodiversität, für den Boden-, Grundwasser- und Gewässer- sowie den Klimaschutz. Allerdings leiden sie besonders unter den klimawandelbedingten Veränderungen. Insbesondere nicht standortgemäße Forsten (etwa manche Fichten- oder Kiefernreinbestände) sind sehr risikobehaftet, da sie anfällig für Schäden durch Insekten, Stürme oder Hitze- und Trockenperioden sind. Angesichts dessen besteht weitgehend Konsens, dass ein Umbau der deutschen Wälder zu naturnäheren Mischwäldern unumgänglich ist.

Der Waldumbau ist mit hohen Kosten verbunden, die viele Privatwaldbesitzende ohne staatliche Förderung nicht werden stemmen können. Von besonderer Relevanz für die forstliche Praxis ist die Frage, wie ein geeignetes Management eines naturnahen Waldbaus bzw. -umbaus zu gestalten ist. Ein naturnaher Waldumbau muss die ökosystemaren Zusammenhänge berücksichtigen, während es sich zugleich um einen dynamischen und durchaus ergebnisoffenen Prozess handelt. Die zukünftigen Veränderungen des Klimas sowie der Wuchsbedingungen müssen beim Waldmanagement und der Wiederbewaldung berücksichtigt werden, ohne genaues Wissen darüber, wo, wie und in welchem Umfang sich welche Veränderungen vollziehen werden.

Überdeutlich zeigt sich, dass der naturnahe Waldumbau ein sehr großes und komplexes Handlungsfeld ist, das teils konfligierende Ziele (Natur- und Artenschutz, Klimaschutz und -anpassung, nachhaltige Rohstoffnutzung etc.), verschiedene Handlungsebenen sowie Maßnahmenoptionen umfasst und ein langfristiges strategisches Vorgehen erfordert. Insgesamt hängt es maßgeblich von der Gestaltung der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab, ob der naturnahe Umbau der Wälder – der voraussichtlich eine Daueraufgabe darstellt – langfristig gelingt. Um eine positive Gesamtwirkung zu erzielen, müssen die Maßnahmen gut aufeinander abgestimmt sein.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das TAB beauftragt, ein TA-Projekt zum Thema »Naturgemäßer Waldumbau in Zeiten des Klimawandels« durchzuführen. Der vorliegende Bericht gibt einen breiten Überblick über die forstwissenschaftlichen, technischen, ökonomischen und rechtlichen Aspekte eines naturnahen Waldumbaus. Angesichts dessen Dringlichkeit und der damit einhergehenden finanziellen Anforderungen an die Forstwirtschaft werden die ökonomischen sowie forstbetrieblichen Aspekte besonders eingehend beleuchtet. Dies umfasst auch eine Analyse und Reflexion der aktuellen Förderarchitekturen und aufsetzender Förderstrategien auf Bundes- und Landesebene. Handlungsoptionen bzw. auch -notwendigkeiten werden aufgezeigt.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Arbeitsbericht eine umfangreiche und fundierte Informationsbasis für die parlamentarische Befassung mit diesem wichtigen umwelt-, forst- sowie wirtschaftspolitischen Thema.

Berlin, den 27. November 2024

Kai Gehring
Vorsitzender

Dr. Holger Becker
Berichtersteller

Lars Rohwer
Berichtersteller

Laura Kraft
Berichterstellerin

Prof. Dr. Stephan Seiter
Berichtersteller

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichtersteller

Christoph Kehl
Christoph Revermann

**Naturgemäßer Waldumbau
in Zeiten des Klimawandels**

Endbericht zum TA-Projekt

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Zusammenfassung

Wälder haben als komplexe Ökosysteme eine große Bedeutung nicht nur für die Holzproduktion, sondern insbesondere für die Erhaltung der Biodiversität, für den Boden-, Grundwasser- und Gewässerschutz sowie für den lokalen und globalen Klimaschutz. Allerdings leiden die Wälder in Deutschland schon seit einigen Jahren stark unter den klimawandelbedingten Umweltveränderungen, die die Selbstorganisationsfähigkeit der Waldökosysteme zunehmend herausfordern. Deshalb sind die Bewahrung bzw. Wiederherstellung der Resilienz von Waldökosystemen und zugleich die Gewährleistung einer nachhaltigen Holzproduktion zu zentralen Zielen der Waldbewirtschaftung in Deutschland geworden.

Wegen des vielfach schlechten Zustands der Wälder und damit es nicht zu einer noch weitergehenden Destabilisierung der Waldökosysteme kommt, wird von vielen Expert/innen aus den Forst- und Umweltwissenschaften sowie der Forstwirtschaft ein Umbau der Wälder zu naturnäheren Mischwäldern hin zu mehr Diversität und Diversifizierung für unumgänglich gehalten. Aber angesichts der unterschiedlichen Nutzungsinteressen sowie der hohen Kosten eines umfangreichen Waldumbaus sind die möglichen Wege einer zielführenden Umsetzung durchaus umstritten und unklar. Klar hingegen ist, dass der naturnahe Waldumbau ein sehr großes und komplexes Handlungsfeld ist, das unterschiedliche, teils konfligierende Ziele (Natur- und Artenschutz, Klimaschutz und -anpassung, nachhaltige Rohstoffnutzung etc.), verschiedene Handlungsebenen sowie Maßnahmenoptionen umfasst und ein langfristiges strategisches Vorgehen erfordert. Insgesamt hängt es maßgeblich von der Gestaltung der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab, ob und wie der naturnahe Umbau der Wälder, der voraussichtlich eine jahrzehntelange Daueraufgabe darstellt, langfristig gelingt.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit der Durchführung eines TA-Projekts »Naturgemäßer Waldumbau in Zeiten des Klimawandels« beauftragt. Entsprechend soll der vorliegende Bericht eine Analyse der forstwissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Aspekte für einen naturnahen Waldumbau inklusive regulativer Steuerungsmöglichkeiten bieten. Um dies leisten zu können, war eine inhaltliche Perspektive erforderlich, die z. B. nicht nur auf klimaresiliente(re) Baumarten, Pflanzungen und Pflegemaßnahmen, sondern auf Waldökosysteme als Ganzes fokussiert, da sich der Erfolg eines Waldumbaus letztlich an der Resilienz, Stabilität und Klimakompatibilität der resultierenden Ökosysteme bemessen muss. Der Bericht bietet schwerpunktmäßig einen Überblick des Wissensstands zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wälder in Deutschland sowie zu den vielfältigen Anforderungen an resiliente Waldökosysteme. Die als relevant erachteten Anpassungsprinzipien, wie Baumartenvielfalt, genetische Vielfalt, dauerwaldartige Bewirtschaftung des Waldes, Schutz des Bodens sowie Nutzung des Potenzials von Wäldern zur Selbstregulation, werden dezidiert erörtert. Es wird zudem ein Überblick zu den Anforderungen an die Schaffung und das Management klimaresilienter Waldökosysteme, zu innovativen Technologien für die naturnahe Waldbewirtschaftung sowie zu regulativen und ökonomischen Steuerungsmöglichkeiten für einen naturnahen Waldumbau geboten.

Grundlagen und Rahmenbedingungen

Deutschland gehört mit ca. 11,4 Mio. ha bewaldeter Fläche (entspricht einem Anteil von 32 %) zu den walddreieichsten Ländern Europas. Etwa ein Drittel der Wälder befindet sich im Besitz des Bundes und der Länder (Staatswald), ca. ein Fünftel besitzen Gemeinden, Städte und andere Körperschaften (Körperschaftswald), etwa die Hälfte ist in zumeist klein strukturiertem Privatbesitz. Diese Vielfalt und die heterogene Verteilung an Eigentumsstrukturen sind einer der Gründe für die regional sehr unterschiedliche Strukturierung der Wälder beispielsweise hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung, dem Mischverhältnis oder dem Holzvorrat, woraus unterschiedliche Zielstellungen bei der Waldbehandlung bzw. den Bewirtschaftungspraktiken folgen. So gelten etwa für Wälder in öffentlichem Eigentum – anders als für Privatwälder – gesetzlich festgelegte Gemeinwohl- und Naturschutzverpflichtungen.

Ohne die Einwirkung des Menschen wären große Gebiete Deutschlands von Urwald bedeckt. Dabei wären Laubwälder auf über 90 % der Fläche vorherrschend. Urwälder im Sinne eines ursprünglichen, unkultivierten Waldes sind in Deutschland schon lange nicht mehr vorhanden, was sich auch am überwiegenden Nadelholzanteil zeigt. Nur fünf Baumarten machen fast drei Viertel der Waldfläche aus: die gemeine Fichte, die Kiefer, die Rotbuche sowie die Trauben- und Stieleiche. Regional sind die Hauptbaumarten sehr unterschiedlich verteilt und sie treten in unterschiedlichen Mischverhältnissen auf. Während es sich bei Fichten- und Kiefernwäldern häufig noch um Reinbestände handelt, sind reine Buchen- oder Eichenwälder deutlich seltener anzutreffen. Der Großteil der Wälder ist nur bedingt oder gar nicht naturnah gestaltet.

Dass es sich beim deutschen Wald um eine von Menschenhand geformte Kulturlandschaft handelt, lässt sich auch an den gesetzlichen Bestimmungen ablesen, welche den Umgang mit ihm regulieren. Den gesetzlichen Rahmen hierfür definiert auf Bundesebene das Bundeswaldgesetz (BWaldG)¹. Im Bundeswaldgesetz ist das Bemühen des Gesetzgebers spürbar, ökologische, ökonomische und soziale Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung des Waldes in einen Interessenausgleich zu bringen. Von seinem Charakter her entspricht das Bundeswaldgesetz allerdings einem Rahmengesetz, das auf Detailregelungen weitgehend verzichtet und es in die Gesetzgebungskompetenz der Bundesländer stellt, in den jeweiligen Landeswaldgesetzen konkrete Normierungen zu erlassen. Somit liegt aktuell die hauptsächliche forstpolitische Gestaltungsmacht in Deutschland auf Landesebene, was einerseits den Vorteil hat, dass die Länder Regelungen erlassen können, die auf ihre spezifische Situation zugeschnitten sind. Andererseits kann sich die föderale Zersplitterung walddrechtlicher Vorschriften und Schutzniveaus unter Umständen auch nachteilig auswirken, gerade bei einer so großen und langfristigen Herausforderung wie dem klimaresilienten Umbau der Wälder, da einheitliche und übergreifende Lösungsstrategien unter diesen Rahmenbedingungen kaum umzusetzen sind. Auffällig ist, dass es hinsichtlich forstwirtschaftlicher Bewirtschaftungsstandards im Sinne einer guten fachlichen Praxis im Unterschied zur Landwirtschaft kaum bundeseinheitliche Vorschriften gibt, was einer der Gründe ist, wieso von einigen Stellen eine mögliche Novellierung des Bundeswaldgesetzes angesprochen wird.

Hinzu kommt, dass neben dem Waldrecht noch diverse andere Regelungsbereiche auf den Wald und seine Entwicklung Einfluss nehmen. Dazu gehören vor allem das Jagdwesen sowie der Naturschutz, die ebenfalls hauptsächlich in die Hoheit der Bundesländer fallen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen, die den Schutz und die Nutzung des Waldes regulieren und somit auch für den Waldumbau relevant sind, zeichnen sich also durch eine große Vielfalt aus, aber auch durch deutliche Heterogenität, die dem föderalen System Deutschlands geschuldet ist.

Waldschäden: Auswirkungen des Klimawandels

Gerade in den letzten Jahren hat sich der Zustand der Wälder deutlich verschlechtert. Verantwortlich dafür sind die extremen Dürre- und Hitzejahre seit 2018, die zusammen mit Stürmen und starkem Borkenkäferbefall zu großflächigen Schäden in Waldbeständen, insbesondere in Nadelholzreinbeständen, geführt haben. 2023 wiesen nur knapp 21 % der Bäume keine Kronenverlichtung auf und waren somit als gesund zu qualifizieren. Die verschiedenen Baumarten sind sehr unterschiedlich betroffen. Besonders geschädigt ist gemäß Waldzustandserhebung 2022 die Buche, gefolgt von Fichte, Eiche und Kiefer. Satellitendaten zeigen, dass auf über 500.000 ha Fläche Baumverluste zu verzeichnen sind, was ca. 5 % der gesamten Waldfläche in Deutschland entspricht. Regionale Schadensschwerpunkte liegen vor allem in den Mittelgebirgen.

Weltweit zeigt sich für verschiedene Waldökosysteme, dass die durch Dürre- und Hitzestress bedingte Baummortalität zunimmt. Der fortschreitende Klimawandel gilt als einer der maßgeblichen Treiber dieser Entwicklung. Er hat Auswirkungen auf Häufigkeit und Intensität von waldschädigenden Extremereignissen wie Dürren, Stürme oder Hitze, auch wenn die konkreten klimawandelbedingten Effekte – umso mehr in ihrer räumlichen Verteilung – aufgrund der natürlichen Variabilität des Wetters schwierig zuzuordnen und noch schwieriger zu prognostizieren sind. Abzusehen ist jedoch, dass die zu beobachtenden klimatischen Veränderungen zu tendenziell weiter steigenden Maximaltemperaturen, abnehmenden Jahresniederschlägen und längeren Hitze- und Dürreperioden führen, wodurch biotische und abiotische Risiken für die an das gemäßigte Klima angepassten Wälder Deutschlands und Mitteleuropas massiv zunehmen. Wie sich diese verändernden Störungsregime auf Waldökosysteme konkret auswirken, ist hingegen kaum genau vorherzusagen. Zum einen hängt dies von den zukünftigen waldbaulichen und klimapolitischen Anpassungsmaßnahmen ab. Zum anderen wird die Vulnerabilität der Wälder vom Zusammenspiel vieler Faktoren bestimmt, wie z. B. der Empfindlichkeit der Baumarten, der Stärke der Wetterextreme sowie der kleinräumigen Standortbedingungen und Bewirtschaftungsweisen.

Gesellschaftliche Debatten und politische Zielkonflikte

Forstwirtschaft und Waldpolitik bewegen sich in Deutschland in einem zunehmend dynamischen gesellschaftspolitischen Umfeld, in dem Sorgen um die Zukunft des Waldes, unterschiedliche Interessen und wissenschaftliche Unsicherheiten aufeinanderprallen. Dieses hochpolarisierte Diskursumfeld ist dabei nicht neu, sondern prägt schon seit vielen Jahren die gesellschaftlichen Debatten im Waldbereich. Eine der zentralen Konfliktlinien in den aktuellen Diskursen zum Waldumbau bezieht sich auf die Frage, in welchem Umfang Wälder nachhaltig genutzt bzw. geschützt werden sollten. Auf der einen Seite gibt es etliche Stimmen der Naturschutzvertretung, die das

¹ Bundeswaldgesetz (BWaldG) vom 2.5.1975, zuletzt am 10.8.2021 geändert

bedrohte Ökosystem Wald unter einen sehr weitreichenden Schutz stellen wollen, um dem Wald zu ermöglichen, über Selbstregulationsprozesse wieder zu einer stabilen Entwicklung zu kommen und so seine Resistenz und Resilienz zu erhöhen. Auch der Begriff Waldumbau, der eine gezielte und sinnvolle Steuerung der Waldentwicklung impliziert, wird in diesem Zusammenhang teilweise kritisch gesehen. Als Konsequenz wird eine Abkehr von der intensiv betriebenen Forstwirtschaft in Richtung einer ökologisch verträglicheren Waldbewirtschaftung gefordert.

Auf der anderen Seite stehen die Belange der Forst- und Holzwirtschaft (Cluster Forst und Holz) mit einem jährlichen Umsatz von ca. 187 Mrd. Euro und etwa 1 Mio. Beschäftigten. Die Befürchtung von Waldbesitzerverbänden und der Holzwirtschaft lautet, dass die Herausnahme von Flächen aus der Waldbewirtschaftung und ein weiterer Rückgang der Nadelholzfläche aufgrund des Waldumbaus zu einer Verknappung des Holzangebots führen. Betont wird in diesem Zusammenhang, dass gerade die verstärkte stoffliche Holznutzung, insbesondere der Holzbau, von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele ist, da dadurch klimaschädliche Materialien substituiert werden können. Schließlich wird auch darauf hingewiesen, dass die Wälder in Deutschland ganz überwiegend Kulturlandschaften darstellen, die seit Jahrhunderten vom Menschen genutzt und verändert wurden.

Die virulenten Ziel- und Interessenskonflikte im Spannungsfeld schutz- und nutzungsorientierter Ansätze spiegeln sich auch in den relevanten Politikstrategien wider. Zwar gehören die naturnahe Waldbewirtschaftung sowie der Umbau von reinen Nadelwäldern zu stabileren und artenreicheren Mischwäldern seit Jahren zu den festen forstpolitischen Zielen in Deutschland. Das übergeordnete Ziel der aktuellen »Waldstrategie 2050« von 2021 lautet, die Wälder in Deutschland mit ihren vielfältigen Ökosystemleistungen für den einzelnen Menschen und die Gesellschaft, die Natur sowie die Wirtschaft zu erhalten und an die sich ändernden klimatischen Bedingungen anzupassen. Das zugrunde liegende Leitbild sieht eine integrative Bewirtschaftung vor, sodass Stabilität, biologische Vielfalt, Produktivität und die vielfältigen Schutzleistungen der Wälder sowie ihre Erlebbarkeit zum Wohl der gesamten Gesellschaft nachhaltig gewährleistet sind. In den fachspezifischen, gesellschaftlichen und politischen Reaktionen auf die »Waldstrategie 2050« manifestierten sich jedoch wieder die bekannten Konfliktlinien der Walddebatte.

Darüber hinaus haben zahlreiche weitere Strategien aus anderen Politikbereichen beträchtliche Auswirkungen auf den Wald und die Forstwirtschaft: Zu nennen sind insbesondere die Naturschutz- und Biodiversitäts- sowie die Klima- und Energiepolitik. Die in den verschiedenen Programmen, Strategien oder Maßnahmenkatalogen formulierten Ziele – Förderung der Forstwirtschaft, Schutz von Wäldern oder Ankurbelung der Holznutzung – sind bei genauerer Betrachtung äußerst konfliktträchtig. Während die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt etwa eine Ausweitung der Schutzbemühungen und der naturnahen Waldwirtschaft vorsieht, gehört die verstärkte Holzverwendung in energetischer sowie stofflicher Hinsicht zu wichtigen klima- und energiepolitischen Zielsetzungen in Deutschland. Insgesamt umfasst die politische Förderlandschaft mit Waldbezug derzeit eine Vielfalt an Strategien, die auf unterschiedlichen Ebenen und meist sektoral ansetzen und unzureichend oder gar nicht aufeinander bezogen sind. Das macht es schwierig, Wirkungen konkret zuzuordnen oder Lenkungenfunktionen erkennen zu können, und erschwert ein langfristiges, strategisches Vorgehen. Heterogene Eigentumsstrukturen und Bewirtschaftungsgrößen, föderale Rahmenbedingungen sowie unterschiedliche Nutzungsinteressen und teils begrenzte finanzielle Handlungsmöglichkeiten der Waldbesitzenden stellen zusätzliche Herausforderungen dar.

Anforderungen an den naturnahen Waldumbau und resiliente Waldökosysteme

Deutschlands Wälder durchliefen in den vergangenen Jahrhunderten mehrere Phasen der Transformation. Während das Verhältnis von Laub- und Nadelholz um 1300 (bei einer damals insgesamt deutlich geringeren Bewaldung als heute) noch bei ca. 70 zu 30 % lag, betrug es Anfang des 20. Jahrhunderts 30 zu 70 %. Seit einigen Jahrzehnten findet – vor allem im öffentlich-staatlichen Wald – ein (ökologischer) Waldumbau wieder in die umgekehrte Richtung statt. Die einförmigen, naturfernen Nadelwälder werden in vielfältigere, strukturierte Mischwälder mit einer höheren ökologischen Qualität und Stabilität umgebaut. Im Privatwald ist diese Entwicklung am wenigsten weit vorangeschritten.

Zwar hat sich die Baumartenmischung in den letzten 10 Jahren ein wenig verstärkt, insgesamt gesehen konzentriert sich der Waldumbau jedoch zumeist auf Reinbestände der Fichte und Kiefer und ist zudem von 2002 bis 2012 eher langsam vorangekommen. Der Anteil der Fichtenbestände mit hohem bis sehr hohem klimawandel- und waldbaubedingtem Schadensrisiko ist in diesem Zeitraum kaum zurückgegangen. Nach Berechnungen des Thünen-Institutes für Waldökosysteme müssten in Deutschland etwa 2,2 Mio. ha Fichtenwälder sowie 620.000 ha Buchenwälder dringend zu Mischwäldern umgebaut werden, dazu kommen mindestens 400.000 ha Schadflächen, die aktuell zur Wiederbewaldung anstehen. Um diesen Waldumbaubedarf bis etwa 2050 zu bewältigen, müssten jährlich knapp 100.000 ha Wald angepasst werden. Zwischen 2000 und 2017 wurden in Deutschland jährlich aber

nur etwa 22.000 ha Wald umgebaut (über alle Waldbesitzarten). Das bedeutet, dass der naturnahe Waldbau zukünftig erheblich beschleunigt werden muss.

Waldbauliche Konzepte

Für die Erhöhung der Alters- und Strukturdiversität von Wäldern und damit auch für deren Klimawandelanpassung ist die Wahl eines passenden Waldbausystems die entscheidende Steuerungsgröße. Ein Waldbausystem umfasst alle Maßnahmen, die auf Bestandesebene von der Verjüngung über die Pflege bis zur Ernte der Bäume stattfinden. Unterschiedliche Waldbausysteme folgen dabei unterschiedlichen Konzepten.

Die nach wie vor häufigste Betriebsart in Deutschland – besonders im Privatwald – ist die Altersklassenwaldwirtschaft, die sich hauptsächlich an betriebswirtschaftlichen Kriterien orientiert. Einschichtige Altersklassenwälder machen etwa die Hälfte der Waldfläche aus. Die Altersklassenwaldwirtschaft erfolgt zumeist mit schnell wachsenden Baumarten, wozu primär Nadelhölzer gehören. Annähernd gleichaltrige Baumbestände mit einer sehr geringen Anzahl von Baumarten werden in einem Zyklus von Pflanzung, Pflege, Ernte (Kahlschlag) und erneuter Pflanzung bewirtschaftet. Ertragsstarke Baumarten werden gepflegt, ertragsschwache durch verschiedene Maßnahmen ertüchtigt oder entfernt und Freiflächen schnell wieder aufgeforstet. Düngung, Unkrautbekämpfung und Schutzmaßnahmen gegen Insekten oder Wild werden als zwingend notwendig erachtet. Es erfolgen regelmäßige intensive Durchforstungen zur Negativauslese von Bäumen. Totholz wird in der Regel vollständig entfernt. Der Altersklassenwald ist besonders maschinen- und rationalisierungsfreundlich und die Waldnutzung kann somit auch technisch optimiert durchgeführt werden. Auch aus diesem Grund ist er bisher in der forstlichen Betriebspraxis sehr beliebt.

Daneben haben sich in den letzten Jahrzehnten aber auch alternative Bewirtschaftungsformen etabliert, welche die Überführung von gleichaltrigen Reinbeständen (zum Teil mit naturferner Baumartenzusammensetzung) in strukturierte, möglichst ungleichaltrige Mischwälder zum Ziel haben. Die naturnahe Waldwirtschaft entstand im 19. Jahrhundert in Mitteleuropa und wurde insbesondere in bäuerlichen Privatwaldbetrieben in den Mittelgebirgen Süddeutschlands und in den Alpen als Plenterwaldbewirtschaftung betrieben. Naturnah nimmt dabei Bezug auf die Ähnlichkeit der angestrebten Wälder mit der Baumartenzusammensetzung der natürlichen Waldgesellschaft und auf die Nutzung natürlicher Prozesse wie Naturverjüngung.

Zu den Spielarten der naturnahen Waldwirtschaft gehört zum einen das Dauerwaldkonzept. Hier sollen standortgerechte, an der natürlichen Waldgesellschaft orientierte Wälder entstehen. Klassische Forstschutzmaßnahmen bleiben auf ein geringes Maß beschränkt. Das Dauerwaldkonzept hat in den vergangenen Jahren immer mehr Anhänger unter Waldbesitzenden und Forstbediensteten gefunden. Zum anderen wird u. a. im Lübecker Stadtwald eine prozessschutzorientierte Waldwirtschaft betrieben, die die natürliche Vielfalt und zieloffene Entwicklung des Waldes im Fokus hat. Die Zusammensetzung der Baumarten und die Altersstruktur bleiben hier weitgehend der Natur überlassen, eingeschlagen werden nur einzelne reife Bäume. Sowohl prozessschutzorientierte Waldwirtschaft als auch Dauerwaldwirtschaft streben eine kontinuierliche Verjüngung der Bestände an und ermöglichen Ungleichaltrigkeit und strukturreiche Mischbestände.

Merkmale resilienter Waldökosysteme

Wälder sind komplexe Ökosysteme, d. h. sich ergebnisoffen entwickelnde Gefüge aus Mikroorganismen, Pilzen, Pflanzen und Tieren. Das Ökosystemkonzept ist die wichtigste Grundlage für ein erfolgreiches Waldmanagement, weil es die verschiedenen Teilsysteme des Waldes und seine Funktionen als Ganzes im Blick hat. Es ermöglicht ein Verständnis für den Wald als komplexes System und seiner Selbstorganisation einschließlich der Möglichkeit, sich dynamisch an Umweltveränderungen anzupassen. Ökosysteme sind aufgrund der häufig nicht linearen Interaktionen in ihrem Verhalten nicht oder nur schwer vorhersehbar. Aufgrund ihrer Komplexität können sie lange in einem stabilen Zustand verweilen, bei starken Störungen von außen (z. B. Feuer) jedoch Kippunkte überschreiten und neue Systemzustände einnehmen (z. B. Übergang von Wald zu Grassteppe). Die Resilienz von Waldökosystemen ist angesichts der beschleunigten Umweltveränderungen zu einem zentralen Ziel der Waldbewirtschaftung in Deutschland geworden. So hat ein resilientes Waldökosystem die Fähigkeit, nach einer Störung hinsichtlich seiner zentralen Ökosystemfunktionen wieder zum Status vor der Störung zurückzukehren. Es ist aber auch in der Lage, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Resistenz hingegen bezeichnet die Kapazität eines Ökosystems, Störungen zu absorbieren, ohne sich wesentlich zu ändern.

Welche grundsätzlichen Eigenschaften ein Waldökosystem haben sollte, um als stabil (resistent und resilient) zu gelten, ist weder einfach noch eindeutig zu beschreiben. Stabilität hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, je nach betrachtetem Störungsfaktor (Feuer oder Sturmwurf) und je nach Waldökosystem (Wälder der gemäßigten

Zone oder Tropenwälder). Zudem ist es entscheidend, auf welcher Skalenebene (im Waldbestand oder auf Landschaftsebene) Stabilität betrachtet wird. Klar ist, dass Monokulturen, eine starke Zerschneidung von Wäldern, übermäßige Stoffeinträge oder die Bodenverdichtung die Ökosystemintegrität der Wälder gefährden. Umgekehrt zeichnet sich ab, dass Waldökosysteme mit viel Biomasse und reich an Nährstoffen sowie vielfältige Waldökosysteme (in Bezug auf den gesamten Artenreichtum) eine höhere Stabilität aufweisen als solche ohne diese Eigenschaften. Entsprechend zählen genetische Vielfalt, Baumartenvielfalt, Schutz des Bodens sowie Nutzung des Potenzials von Wäldern zur Selbstregulation zu den als zentral erachteten Anpassungsprinzipien. Als Schlüsselprozess zur Entwicklung von resilienten Wäldern wird die Waldverjüngung angesehen, mit dem Ziel, vielfältige Waldökosysteme zu etablieren. Diese können Stressereignisse und Störungen besser absorbieren, wodurch Waldökosystemleistungen langfristig gesichert werden. Eine wichtige Voraussetzung, damit der Waldumbau zu klimaresilienten Wäldern gelingen kann, sind nach allgemeiner Experteneinschätzung zudem habitatangepasste Wildbestände.

Implikationen für das Waldmanagement

Von besonderer Relevanz für die forstliche Praxis ist die Frage, wie ein geeignetes Management eines naturnahen Waldbaus bzw. -umbaus zu gestalten ist. Ein naturnaher Waldumbau muss die ökosystemaren Zusammenhänge berücksichtigen, während es sich zugleich um einen dynamischen und durchaus ergebnisoffenen, stetig vorstangehenden Prozess handelt. Das alles zusammen führt zu Unsicherheiten hinsichtlich einer zielführenden klimaresilienten Bewirtschaftung der Wälder. Deutlich zeigt sich, dass Forstwirtschaft durch den Klimawandel risikoreicher wird. Die zukünftigen Veränderungen des Klimas sowie der Wuchsbedingungen müssen beim Waldmanagement und der Wiederbewaldung berücksichtigt werden, ohne genaues Wissen darüber, wo, wie und in welchem Umfang sich welche Veränderungen vollziehen werden. Waldumbau und Anpassung an den Klimawandel werden dadurch zu einer kontinuierlichen Herausforderung.

Ob dabei ein grundlegender Paradigmenwechsel erforderlich ist, vor allem die großflächige Stilllegung von Waldflächen, ist eine der zentralen Streitfragen in der Walddebatte. Dabei geht es um die grundsätzliche, für die waldbauliche Praxis sehr komplexe Fragestellung, ob eher ein aktives oder ein passives Waldmanagement für die Erreichung der angestrebten waldbaulichen Ziele zuträglich ist. Insgesamt deutet vieles darauf hin, dass eine aktive Waldbewirtschaftung, sofern sie in nachhaltiger Weise vorgenommen wird, den Waldumbau zu klimastabileren Wäldern wesentlich unterstützen kann. Eine schonende Holznutzung trägt zur Waldpflege bei und kann den Aufbau strukturreicher Mischwälder erleichtern, zu verminderter Konkurrenz zwischen den Bäumen führen und daher ein zentrales Anliegen im Bereich der Anpassung von Wäldern an den Klimawandel begünstigen. Außerdem lassen sich so erwünschte regulierende und unterstützende Ökosystemleistungen (wie Schutz vor Naturgefahren und Erholung) sichern. Biodiversitätsschutz lässt sich mit einer sinnvollen Mischung von genutzten Wäldern und ungenutzten Waldschutzgebieten gewährleisten.

Wälder haben in Deutschland immer noch eine gute Selbstregulationsfähigkeit: Nach Wald entsteht überwiegend wieder Wald. Zur Wiederbewaldung der umfangreichen Kahlfelder in Deutschland erscheint es deshalb sinnvoll, verstärkt natürliche Prozesse wie Naturverjüngung zu nutzen und Elemente des Vorbestandes wie Habitatbäume und auch Totholz weitgehend zu belassen. Doch vor allem bei ungünstigen Voraussetzungen – fehlendes Naturverjüngungspotenzial, Vergrasung, zu hohe Wildbestände – sind Aufforstungsmaßnahmen zu erwägen. Ein besonderes Augenmerk ist auf die möglichst geringe Beeinträchtigung des Waldbodens zu legen, denn ein funktionsfähiger Waldboden wird unter Klimawandelbedingungen immer mehr zum unverzichtbaren Wasser- und auch Kohlenstoffspeicher. Eine Beschränkung der Befahrung bei Maschineneinsatz auf Rückelinien sowie die Humusverbesserung durch Beimischung von Laubbäumen in Nadelwäldern sind dabei essenziell.

Aktuell diskutiert wird das adaptive Management als ein effektives Konzept im Bereich des Managements natürlicher Ressourcen unter Unsicherheit. Ziel ist es, die Unsicherheit bezüglich des Verhaltens von Waldökosystemen durch einen stetigen Zugewinn an Wissen, z. B. über Monitoring oder Forschung, kontinuierlich zu verringern. Adaptives Management wird als iterativer Prozess in kurzen Zeitabständen verstanden. Insbesondere wird die Einbindung von relevanten Stakeholdern und die Definition gangbarer Managementalternativen empfohlen. In der iterativen Managementphase werden basierend auf dem aktuellen Verständnis des Ökosystems und seiner prognostizierten Entwicklung Maßnahmen zur Umsetzung identifiziert und durch ein geeignetes Monitoring überprüft. Eine wichtige Weiterentwicklung von adaptiven Managementmodellen in der waldbezogenen Forschung stellt die Integration des Risikos bzw. der Unsicherheit in Entscheidungsmodelle dar. Damit lassen sich z. B. ökonomisch optimale Baumartenmischungen unter Einbeziehung von Unsicherheit modellieren.

Technische Innovationen zur Unterstützung des Waldumbaus

In diesem Bericht wird ein Überblick über technische Innovationen gegeben, die für den Waldumbau eine wichtige Rolle spielen. Dazu gehören Schlüsseltechnologien, die für das Waldmonitoring relevant sind, außerdem maschinelle Ansätze in der Waldbewirtschaftung, Möglichkeiten im Bereich des biotischen Waldschutzes sowie schließlich das genetische Monitoring, das für die Entwicklung klimaresilienterer und stresstoleranterer Wälder wichtige Informationen bereitstellen kann.

Waldmonitoring

Neuartige Monitoringansätze und -methoden können wertvolle Informationen über den Umbauerfolg generieren, bei der Umsetzungskontrolle helfen und eine objektive Vergleichsgrundlage schaffen. Bei den Monitoringtechnologien herrscht eine starke Dynamik und relativ viele Akteure, nicht nur aus den Forstwissenschaften, sondern auch aus der Geografie und den Ingenieurwissenschaften, leisten hier wichtige Forschungs- und Entwicklungsbeiträge. Etliche Sensorplattformen stehen für Monitoringzwecke zur Verfügung: von satellitengestützten Systemen über bemannte Flugsysteme bis hin zu Drohnen. Darüber hinaus werden (vor allem im Laserscanningbereich) fahrzeug- und personengetragene Sensorplattformen bodengestützt (terrestrisch) eingesetzt. Sensorplattformen und Sensoren lassen sich nahezu beliebig kombinieren. Die Kombinationsmöglichkeiten sind nur durch die Nutzlast der Trägerplattform begrenzt. Drei Schlüsseltechnologien gelten als Innovationstreiber mit Relevanz für den Waldumbau:

- Multispektrale Sensoren auf Drohnen und Satelliten bieten innovative Möglichkeiten für die Erfassung von Stressfaktoren und Schädlingen, aber auch für die kostengünstige und flexible Erfassung von einzelnen Bäumen und Waldstrukturen insgesamt. Eine frühzeitige Identifizierung von Pflanzenstress (Hitze, Trockenheit etc.) ist wichtig, um gestresste Bestände prioritär im notwendigen Waldumbau behandeln zu können.
- Laserscanner stellen boden- und luftgestützt wichtige Daten zur Baum- und Waldstruktur zur Verfügung und spielen bei der Präzisionsinventur und der strukturellen Weiterentwicklung der Forstwirtschaft sowie beim naturnahen Waldumbau eine signifikante Rolle. Durch die Möglichkeit, Kronen- und Stamminformationen zu jedem individuellen Baum zu erfassen, sind die Anwendungen des Laserscannings ein Schlüssel zur Entwicklung einzelbaumgesteuerter Managementverfahren.
- Von großer Bedeutung sind auch moderne Algorithmen zur Mustererkennung aus Bildern und dreidimensionalen Punktwolken von Laserscannern mittels maschinellen Lernens. Wohl sind viele Algorithmen mittlerweile positiv auf ihre Anwendung hin getestet, aber noch nicht ausreichend robust für einen automatischen praktischen Einsatz. Besonders die benötigten forstspezifischen Adaptionen und Softwarelösungen befinden sich vielfach noch in der Entwicklungsphase. Zumindest bereits in Forschungsprojekten gelangt sind die Kombination unterschiedlicher Sensoren und die Auswertung mit KI-Methoden, was speziell in der Früherkennung von Kalamitäten einen wichtigen Beitrag leisten könnte.

In langfristigen Monitoringnetzwerken und auf langfristig angelegten Versuchsflächen kommen derzeit in Deutschland noch wenige neue Technologien zum Einsatz. Wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung vielversprechender Verfahren bzw. Technologien sowie mögliche Anwendungshürden betreffen vor allem wirtschaftlich-infrastrukturelle und rechtliche Aspekte. So erschweren zurzeit die gesetzlichen Restriktionen für einen autonomen Flug außer Sicht den Drohneneinsatz im Wald. Eine lückenlose Beobachtung der Drohne durch den Drohnenpiloten kann nur sehr aufwendig (z. B. durch Hebebühnen) sichergestellt werden. Eine wirtschaftlich-infrastrukturelle Hürde sind die unzureichende Verfügbarkeit bzw. die relativ hohen Kosten von mit staatlichen Mitteln erhobenen Daten (Kataster-, Satelliten-/Drohnen- und Wetterdaten sowie hieraus abgeleitete Oberflächenmodelle) zum Zweck des Waldmonitorings. Oft müssen Daten teuer bei Vermessungsämtern oder intermediären Dienstleistern gekauft werden.

Neue maschinelle Ansätze

Der Waldumbau hin zu naturnahen, klimaresilienteren Waldökosystemen umfasst Pflege-, Durchforstungs- und Nutzungseingriffe, die aufgrund veränderter Anforderungen neue maschinelle Ansätze erforderlich machen. So ist die aus den Nadelholzdominierten skandinavischen Ländern eingeführte Kurzholzerntetechnik mit Harvester und Forwarder vor allem mit Nadelholz kompatibel und für Laubholzreiche Mischwälder weniger geeignet. Laubbäume lassen sich aufgrund der höheren Holzdichte und umfangreicheren Kronen schwerer manipulieren und erfordern deswegen größere Kraftreserven für eine sichere Fällung. Dauerwälder erfordern eine andere Bewirtschaftung und den Einsatz anderer Technologien als die üblichen schlagweisen Wälder. Hervorzuheben ist die

Notwendigkeit bodenschonender Arbeiten, der Schutz des verbleibenden Baumbestandes und der bestehenden Verjüngung, die Verringerung des fossilen Kraftstoffverbrauchs sowie eine Minimierung der Kosten.

In der Waldbewirtschaftung zeichnen sich im Wesentlichen drei Handlungspfade ab, die helfen können, die vielfältigen Herausforderungen im Waldumbau, in der Bewältigung von Störungen im Wald wie auch in der regulären Bewirtschaftung naturnaher, gemischter Wälder zu meistern:

- Zielführend ist zunächst das zielgerichtete Adaptieren und *Weiterentwickeln bestehender maschinenbautechnischer Komponenten* speziell für mitteleuropäische laubholzreiche Waldsituationen. Der Kostendruck ist bei gering produktiven, motormanuellen Arbeitsverfahren besonders hoch, voll- oder teilmechanisierte Verfahren erweisen sich hier in der Regel als vorteilhafter. Insofern ist das zielgerichtete Anpassen von Harvesterkomponenten – etwa ein optimierter Harvesterkopf für Laub- wie Nadelholz, ein anwendungsverbesserter Kranarm sowie innovative Raupen mit geringem Bodendruck – an typische Eingriffssituationen in Mischwäldern ein sinnvoller Ansatz.
- Fortschritte in Sensorik und IT ermöglichen es, vermehrt *Assistenzsysteme zur Unterstützung der Maschinenbedienung* zu etablieren. Diese Entwicklungen scheinen erfolgversprechend, da hierdurch die Produktivität erhöht werden kann, zugleich aber auch Aspekte eines maschinen- und vor allem auch umweltschonenden Arbeitens realisiert werden können. Entsprechende Assistenzsysteme sind dabei in diversen Einsatzphasen vorstellbar: angefangen von der Kulturbegründung (Pflanzmaschinen) über Durchforstungen bis hin zu jedwedem Holzernteeingriffen (Harvester, Forwarder). Speziell in diesem Themenfeld scheint eine gezielte finanzielle und strukturelle Förderung hilfreich, um nötige Kompetenzen der Forschung aus unterschiedlichen Disziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Forstwissenschaften etc.) von Hochschulen mit in der Praxis arbeitenden Firmen umsetzungsnah zusammenzubringen.
- Ein dritter Aspekt ist die verstärkte *Digitalisierung der Wertschöpfungskette sowie der forstfachlichen Prozesse*. Durch eine digitalisierte Planung und Dokumentation der forstlichen Aktivitäten etwa lässt sich eine Kooperation entlang der Holzerntekette mit den vielen beteiligten Akteuren sehr viel besser in allen Dimensionen zusammenführen. Ebenso ist das Überwinden forstpolitischer Hemmnisse (Struktur Nachteile bei Klein- und Kleinstwaldbesitzenden sowie Bündelung auf der Abnehmerseite zu tendenzmäßig größeren Holzverwertern) dadurch sehr viel leichter möglich. Insofern wäre auch hier eine stärkere Förderung von Forschungsvorhaben und Implementierungsbestrebungen sinnvoll.

Letztlich hängen Entwicklungen im Bereich Forstmaschinen von Innovationen in Grundlagentechnologien ab, die meist von der akademischen Forschung bereitgestellt werden, sowie von entsprechend positionierten Firmen, die diese Technologien in marktrelevante Produkte umzusetzen vermögen. Damit die Innovationen in der Praxis auch ankommen, braucht es gut ausgerüstete Betriebe mit entsprechend ausgebildeten Mitarbeiter/innen.

Biotischer Waldschutz

Die Disziplin Waldschutz befasst sich mit den abiotischen und biotischen Risikofaktoren, die auf solitäre Gehölze, Waldbestände oder das gesamte Ökosystem Wald einwirken, sowie mit der Datenerhebung und -verarbeitung (Monitoring und Prognose), der Beratung und ggf. Durchführung von prophylaktischen und therapeutischen Maßnahmen. In den vergangenen Jahren haben, bedingt durch die Auswirkungen des Klimawandels, die Herausforderungen des Waldschutzes enorm zugenommen. Festzustellen ist einerseits eine verminderte Vitalität und damit Stabilität insgesamt der Wirte (Bäume, Ökosysteme), während andererseits Schadorganismen durch veränderte Wirt-Parasit-Beziehungen sowie das Auftreten neuer Arten ein größeres Schädigungspotenzial aufweisen. Gleichzeitig haben zunehmende Restriktionen (vor allem Präparat- und Wirkstoffanzahl, Anwendungs- und Zulassungsbeschränkungen) sowie marktorientierte Entscheidungen der Hersteller zu einer deutlichen Reduktion der Wahlmöglichkeiten bei den Präparaten und Optionen im Pflanzenschutz geführt. So nimmt die Zahl der für eine Anwendung im Wald zugelassenen chemischen Pflanzenschutzmittel seit vielen Jahren stetig ab. Im Zusammenwirken mit oft langwierigen Genehmigungsverfahren führt dies dazu, dass mitunter nur noch ein einziges Präparat (mit ggf. hoher Umweltbelastung) zur Verfügung steht.

Der biologische Waldschutz kann die Erreichung der Ziele eines naturnahen Waldumbaus durch den Einsatz von natürlich vorkommenden, spezifischen Gegenspielern von Schadorganismen oder entomopathogenen (sich u. a. von Insekten ernährenden) Mikroorganismen zur Kontrolle bzw. Regulation der Populationsdichte forstlicher Schadorganismen unterstützen. Dies kann durch die Einführung und langfristige Etablierung oder durch die Unterstützung bereits vorhandener Gegenspieler (z. B. räuberische und parasitoide Insekten oder Entomopathogene) erfolgen. Eine weitere Option ist die kurzfristige Ausbringung einer großen Zahl oder die Erhöhung der Anzahl

vorhandener mikrobieller Antagonisten (Überschwemmungstaktik). Vorteilhaft ist, dass die eingesetzten Organismen oft schon in der Population des Schadorganismus vorhanden und somit nicht systemfremd sind. Entscheidend ist die hohe Spezifität, zum Teil für nur eine einzige Schadinsektenart oder wenige Arten einer Artengruppe, sodass Nichtzielorganismen nicht oder nur wenig beeinflusst werden. Im vorliegenden Bericht werden bereits eingeführter Methoden des biologischen Waldschutzes (Einsatz von Makroorganismen sowie von Mikroorganismen und Nematoden) vorgestellt und ihre Anwendungsperspektiven für Deutschland skizziert.

Der Überblick zeigt, dass selektiv wirkende biologische Pflanzenschutzmittel, die als Alternative für den integrierten Waldschutz infrage kommen, derzeit nicht in ausreichender Anwendungsbreite zur Verfügung stehen oder nicht kurzfristig erhältlich sind. Die Gründe hierfür sind etwa ein langwieriger und kostenintensiver Entwicklungs- und Zulassungsvorlauf, mangelnde Attraktivität für entwickelnde Unternehmen aufgrund eines durch die hohe Spezifität sehr begrenzten Absatzmarkts sowie das Fehlen staatlicher Förderung. Um die Resilienz der Wälder für die Zukunft nachhaltig und umweltschonend zu erhöhen und einen guten Gesundheitszustand dauerhaft zu etablieren, wären die präventiven Möglichkeiten deutlich intensiver auszuschöpfen bzw. zu optimieren sowie die Weiterentwicklung biologischer und biotechnischer Verfahren voranzutreiben. Sinnvoll erscheint eine Stärkung anwendungsbezogener Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich des biologischen Waldschutzes durch ein nationales Förderprogramm, zudem der Aufbau von Forschungs- und Produktionsstätten für Produkte des biologischen Waldschutzes, insbesondere im Hinblick auf zu erwartende invasive Schadorganismen.

Genetisches Monitoring

Für das Überleben von Baumpopulationen und ihre Anpassungsfähigkeit an sich wandelnde Umweltbedingungen sind vielfältige genetische Ressourcen in ihrer Gesamtheit elementar wichtig. Genetisches Monitoring ist ein Forschungsfeld, das die Untersuchung dieser Ressourcen zum Ziel hat. Die Überprüfung der genetischen Kontrolle von phänotypischen Merkmalen, wie z. B. der Toleranz gegenüber abiotischen und biotischen Stressfaktoren, ist aufgrund der hohen Komplexität der genetischen Steuerung sehr aufwendig, schafft jedoch die notwendigen Voraussetzungen für die Früherkennung von Merkmalen im forstlichen Vermehrungsgut, die für Anpassung, Überleben oder Wuchsleistung bedeutsam sind. Dabei lassen sich auch Risiken infolge von genetischer Erosion (Genverluste) oder von Inzucht erkennen.

Eine wichtige Aufgabe des forstgenetischen Versuchswesens sind Herkunftsversuche. Sie haben den Zweck, die Eignung unterschiedlicher Herkünfte heimischer sowie alternativer Baumarten im Hinblick auf den Klimawandel zu untersuchen. Daneben geht es aber auch um spezielle Maßnahmen der Forstpflanzenzüchtung, wie z. B. Anlage von Samenplantagen, Prüfung der resultierenden Bäume sowie Resistenzzüchtung (gegen Krankheiten, Trockenheit, Hitze etc.). Aus den Ergebnissen dieser Feldversuche werden für den gesamten Forstbereich Anbauempfehlungen abgeleitet. Ausgewählte Versuchsflächen dienen auch der Erhaltung forstlicher Genressourcen. Herkunftsversuche sind fast ausnahmslos auf die gegenwärtigen Umweltbedingungen abgestimmt. Sie erfüllen wichtige Aufgaben, weil beispielsweise die Verwendung gebietsfremder Baumarten wie Edelkastanie, Zerr-, und Flaumeiche ohne Testungen im hiesigen Anbaubereich riskant wäre. Dennoch bedarf es zusätzlicher Versuchsanlagen an anderen Standorten, um vor allem einheimische Baumarten unter Umweltbedingungen testen zu können, die für sie in den nächsten Jahrzehnten (oder weit darüber hinaus) maßgeblich sein werden. Solche Translokationsversuche mindern das Risiko einer unzureichenden Anpassungsfähigkeit künftiger Waldgenerationen.

Obwohl genetische Parameter wichtige Kriterien für alle infrage kommenden Maßnahmen im Waldumbau liefern und die Erkennung und Vermeidung von Risiken unterstützen können, wurde genetisches Monitoring bisher nur in einzelnen Bereichen und in sehr unterschiedlicher Intensität gefördert (zumeist als sporadische Fördermaßnahmen). Aufgaben des genetischen Monitorings sind insbesondere die Entwicklung und die Nutzung molekulargenetischer Marker, die an der Ausprägung von Toleranzen gegenüber klimabedingten Stresseinwirkungen beteiligt sind. Verbundprojekte konzentrieren sich auf die häufigsten Baumarten. Defizitär beforscht werden hingegen seltene Arten, die jedoch künftig an Bedeutung gewinnen könnten. Auch fehlen Studien zu Mischbeständen. Erforderlich wäre die Bündelung der bisherigen Erkenntnisse, die Rückschlüsse darüber erbringen könnte, welcher Teil der molekulargenetischen Informationen auch über Artgrenzen hinweg wirksam ist. Das ist die Voraussetzung, um grundlegende Prozesse der genetischen Steuerung von Toleranz gegenüber Umwelteinwirkungen zu erkennen und mittels genetischen Monitorings für die Überprüfung von Populationen und als Auslesekriterium zu nutzen. Notwendig wären dafür eine bessere Koordination der Grundlagenforschung im Bereich der Entwicklung von molekulargenetischen Markern sowie eine deutlich verbesserte Forschungsförderung für molekulargenetische Analysen.

Dass das große Potenzial dieses Forschungs- und Entwicklungsgebiets bislang nicht voll ausgeschöpft wird, ist auch daran erkennbar, dass im Forstvermehrungsgutgesetz² bislang keinerlei genetische Kriterien verankert sind. Somit fehlen Gewährleistungen hinsichtlich der genetischen Qualität des Vermehrungsgutes. Für den (naturnahen, klimaresilienten) Waldumbau wäre jedoch eine angemessene Einbindung genetischer Erkenntnisse dringend erforderlich.

Ökonomische Aspekte

Das zentrale Ziel des Waldumbaus ist die Herstellung naturnäherer Waldökosysteme. Die Diversifizierung der Bestockungszusammensetzung ist jedoch mit Aufwendungen, z. B. in Zusammenhang mit Voranbauten, verbunden und hat Mindererträge aufgrund von Hiebsunreife-Verlusten zur Folge. Für den vorliegenden Bericht wurden daher die ökonomischen Implikationen eines naturnahen Waldumbaus anhand von Simulationen beleuchtet, die mögliche Pfade des naturnahen Waldumbaus sowie seine kurzfristigen und langfristigen Auswirkungen auf die Einkommenssituation von Forstbetrieben aufzeigen. Ziel war es, die forstbetrieblichen und waldbaulichen Auswirkungen von prozessschutzbasierter Waldwirtschaft (PSW), Dauerwaldbewirtschaftung (DWW) und Altersklassenwaldbewirtschaftung (AKW) für verschiedene Beispielbetriebe zu vergleichen. Um die Vielfalt der Forstbetriebe in Deutschland (Wuchsregionen, Eigentumsart, Eigentumsgröße) in gewissem Maße abzubilden, wurden für die Simulationen vier fiktive Forstbetriebe definiert – ein staatlicher Forstbetrieb in der Wuchsregion Nord mit 5.000 ha, ein kommunaler Betrieb im Osten mit 1.000 ha und jeweils ein privater Forstbetrieb im Süden (1.000 ha) und im Westen (300 ha).

Ergebnisse der waldbaulichen und forstbetrieblichen Simulationen

Für die Beispielbetriebe und die drei Bewirtschaftungstypen wurden jeweils unterschiedliche Forsteinrichtungszeiträume (10 und 50 Jahre) mittels der Forstware-Fachdatenbank »fe-db« simuliert. Die waldbaulichen Kalkulationen in Forstware stützen sich auf forstwissenschaftliche Grundlagendaten, etwa Ertragstafeln. Die Planungs- bzw. Simulationsergebnisse wurden anschließend in den Kalkulator von Sturm/Kaiser (1999) integriert, ein excel-basiertes ökonomisches Kalkulationstool, das die drei Bewirtschaftungstypen z. B. hinsichtlich ihrer Kulturkosten und Pflegemaßnahmen unterscheidet. Mithilfe dieses Kalkulationstools wurden die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen abgeschätzt. Die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Waldumbaupläne:* Der dringlichste Bedarf an Waldumbau besteht für 2,87 Mio. ha (entspricht 28 % der gesamten deutschen Waldfläche). Kurzfristig werden den Simulationen zufolge in der DWW in den meisten Regionen die größten Waldflächen umgebaut, gefolgt von der PSW. Das gilt im Mittel auch langfristig.
- *Baumartenzusammensetzung:* Im Zuge von PSW verändert sich die Bestockung zugunsten von Laubbaumarten mit Abstand am schnellsten.
- *Holzvorräte:* Die PSW ist beim Aufbau des Gesamtvorrats, des Laubholzvorrats und des Starkholzvorrats den anderen Bewirtschaftungsweisen in praktisch allen simulierten Fällen überlegen. Bei der AKW ist die Vorratsentwicklung in mehreren Regionen negativ und insgesamt am schwächsten. Die DWW nimmt eine Mittelstellung ein.
- *Holzerntemengen:* Über den Zeitraum von 50 Jahren wird in der DWW am meisten geerntet. Die AKW liegt knapp vor der PSW.
- *Holzerlöse:* Kurzfristig erzielt die AKW in der Mehrzahl der Simulationen die höchsten Holzerlöse, langfristig die DWW. In der PSW sind die Holzerlöse über alle Zeiträume hinweg am geringsten, entsprechend den reduzierten Erntemengen. Allerdings schrumpft der Unterschied mit der Zeit, weil das erlösintensive Starkholz am meisten zulegt.
- *Holzerntekosten:* Die PSW ist die mit Abstand kostengünstigste Bewirtschaftungsart. In den ersten Jahren ist die AKW überall am teuersten, später fallweise dann die DWW.
- *Erntekostenfreie Erlöse:* Die Erlöse abzüglich Erntekosten fallen kurzfristig bei der AKW am höchsten aus und langfristig bei der DWW. Die PSW ist der AKW langfristig überlegen.
- *Betriebskosten:* Die Betriebskosten (welche die Erntekosten einschließen) sind in der PSW in allen Regionen kurz- sowie langfristig am niedrigsten, gefolgt von den Betriebskosten innerhalb der DWW.
- *Betriebsergebnisse:* Kurzfristig variieren die Betriebskosten im Vergleich der Regionen stark. Langfristig und im Überschlagsmittel erbringt die PSW die besten Betriebsergebnisse. Bei weiter steigenden Lohn- und

² Forstvermehrungsgutgesetz (FoVG) vom 22.5.2002, zuletzt am 31.8.2015 geändert

Kraftstoffkosten verändern sich die Betriebsergebnisse in der AKW am stärksten negativ, während sie sich bei der PSW am stabilsten verhalten.

Zwar sind mit solchen Simulationen zwangsläufig größere Unsicherheiten verbunden. Der Vergleich mit ähnlichen Analysen und betriebsökonomischen Langzeiterhebungen lässt die Ergebnisse – zumindest von der Tendenz her – aber durchaus plausibel erscheinen. Obwohl geeignete Betriebsvergleiche selten sind, deutet die vorliegende Studienlage darauf hin, dass der naturnahe Waldumbau mittels AKW am teuersten würde. Das bedeutet, dass auch das notwendige Fördervolumen für einen solchen Waldumbau bei der DWW und der PSW deutlich kleiner ausfällt bzw. sich mit demselben Umfang an Mitteln ein größerer Effekt erzielen lässt.

Forstliche Förderung

Die Ausgangssituation für eine naturnahe Waldbewirtschaftung unter Beachtung der Anpassungsfähigkeit des Waldes an den Klimawandel ist in Deutschland sehr unterschiedlich je nach walddeschiedlicher Prägung, standörtlichen Voraussetzungen und Waldeigentumsart. Während seit längerem naturnah wirtschaftende Betriebe bereits eine hohe Baumarten- und Strukturvielfalt und damit gute Voraussetzungen für die Anpassung an den Klimawandel aufweisen, haben andere Betriebe (insbesondere im Privatwald) immer noch größere Waldteile, die von einer risikoprägen Altersklassenwaldwirtschaft mit Reinbeständen (hauptsächlich Fichte und Kiefer) gekennzeichnet sind. Letztere stehen heute – da von den extremen Schadereignissen der vergangenen Jahre besonders betroffen – vor gewaltigen Herausforderungen beim naturnahen Waldumbau und bei der Wiederbewaldung von Kalamitätsflächen.

Laut Schätzungen könnten sich die Gesamtkosten für den Waldumbau in Deutschland bis 2050 auf 14 bis 43 Mrd. Euro belaufen. Auch wenn es sich dabei nur um grobe Angaben handeln kann, macht diese Summe die riesige finanzielle Herausforderung deutlich, vor der die Forstbetriebe in den nächsten Jahren und Jahrzehnten stehen. Klar ist, dass viele Privatwaldbesitzende diese Aufgabe ohne staatliche Förderung nicht werden stemmen können. Einer zielgerichteten staatlichen Förderung des Waldumbaus (und begleitender forstlicher Beratung), basierend auf einer fundierten Einschätzung zu den Vor- und Nachteilen verschiedener Bewirtschaftungskonzepte, kommt für den langfristigen Erfolg des Waldumbaus deshalb eine Schlüsselrolle zu.

In Zusammenhang mit der Klimaanpassung von Wäldern spielt vor allem das Instrument der direkten Förderung, d. h. die Förderung konkreter Maßnahmen über forstliche Förderprogramme, eine zentrale forstpolitische Rolle. Sie ist allerdings im Vergleich zur Landwirtschaft mit einem fünfzigfach niedrigeren Finanzvolumen ausgestattet. Adressiert werden insbesondere Besitzende von Privat- und Körperschaftswald oder forst- und holzwirtschaftliche Unternehmen und Zusammenschlüsse – im staatlichen Wald hat die Förderung eine untergeordnete Bedeutung. Diese direkte forstliche Förderung soll dazu beitragen, einen gewissen Ausgleich zwischen den Interessen der Allgemeinheit am Wald und den Belangen der Waldbesitzenden zu erreichen.

Schon seit Anfang der 1990er Jahre fördert der Bund gemeinsam mit den Ländern Maßnahmen des Waldumbaus – hauptsächlich über die Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK). Die GAK ist in Deutschland das Hauptinstrument für eine leistungsfähige, auf künftige Anforderungen ausgerichtete und wettbewerbsfähige Land- und Forstwirtschaft und bildet den inhaltlichen und finanziellen Kern vieler Länderprogramme. Daneben gibt es weitere Förderprogramme, deren Zielstellung, Finanzvolumen und Förderbedingungen teils sehr unterschiedlich sind. Hervorzuheben ist das vom BMEL 2022 eingerichtete Programm »Klimaangepasstes Waldmanagement«, das seit 2024 aus dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) finanziert wird (FNR o. J.). Mit dem Programm führt das BMEL eine langfristige Förderung für die klimaangepasste Waldbewirtschaftung ein, mit der zusätzlich Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen finanziert werden sollen.

Der Überblick über die Maßnahmen zur forstlichen Förderung im vorliegenden Bericht macht deutlich, dass die Förderlandschaft sehr komplex und kleinteilig ausgestaltet ist. Evaluationen der Programme liegen kaum vor. Somit ist auch eine klare Zuordnung der Maßnahmen zu waldbaulichen Wirkungen kaum möglich, was jedoch für eine langfristige Politikgestaltung im Bereich Waldumbau äußerst wichtig wäre. Angesichts der riesigen finanziellen Herausforderung, die der Waldumbau insbesondere für die Kleinwaldbesitzenden mit sich bringt, lässt sich daraus der Schluss ableiten, dass bestehende Programme und Maßnahmen der forstlichen Förderung umfassend und in ihrem Bezug zueinander evaluiert werden sollten, um Synergien, Schwachstellen und Widersprüche zu identifizieren.

Handlungsfelder

Seit einigen Jahren leiden die Wälder besonders stark unter klimawandelbedingten Veränderungen. Angesichts ihres schlechten Zustands und um eine mögliche fortschreitende Destabilisierung der Waldökosysteme zu verhindern, ist ein Umbau der Wälder zu naturnäheren, strukturreicheren, vielfältigeren und stabileren Mischwäldern unumgänglich. Doch angesichts unterschiedlicher Nutzungsinteressen sowie hoher Kosten eines umfangreichen Waldumbaus sind die möglichen Wege einer zielführenden Umsetzung umstritten.

Klar ist, dass der naturnahe Waldumbau ein sehr großes und komplexes Handlungsfeld darstellt, das unterschiedliche, teils konfligierende Ziele (Natur- und Artenschutz, Klimaschutz und -anpassung, nachhaltige Rohstoffnutzung, Erholungsfunktionen etc.), verschiedene Handlungsebenen sowie Maßnahmenoptionen umfasst und ein langfristiges, strategisches Vorgehen erfordert. Heterogene Eigentumsstrukturen und Bewirtschaftungsgrößen wie auch unterschiedliche Nutzungsinteressen und teils begrenzte finanzielle Handlungsmöglichkeiten der Eigentümer/innen sind zusätzliche Herausforderungen. Ob und wie der naturnahe Umbau der Wälder – der eine Daueraufgabe ist – langfristig gelingt, hängt zum einen vom richtigen forstlichen Management, zum anderen von der Gestaltung der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab.

Wald- und Wildtiermanagement

Eine zentrale, aber auch kontrovers diskutierte Fragestellung für die forstliche Praxis des naturnahen Waldumbaus lautet, ob für die Erreichung der angestrebten waldbaulichen Ziele ein aktives Waldmanagement zwingend erforderlich ist. Nach der vorliegenden forstwissenschaftlichen Evidenz scheint ein grundlegender Paradigmenwechsel, wie etwa die großflächige und gänzliche Herausnahme von Wäldern aus der forstlichen Nutzung oder umgekehrt eine Abkehr vom bereits eingeleiteten naturnahen Waldumbau, in der Waldbewirtschaftung nicht notwendig (oder ggf. auch kontraproduktiv). Genutzte bzw. gepflegte Wälder können häufig ebenso stabil, vielfältig und unter Einbeziehung des Holzproduktespeichers und der Substitutionseffekte fast so kohlenstoffreich sein wie ungenutzte Wälder, sofern die Bewirtschaftung naturschutzgerecht und nachhaltig (im Sinne ihrer gesamten Ökosystemleistungen) erfolgt. Hier haben sich Konzepte der naturnahen Waldbewirtschaftung (Dauerwald, Prozessschutzwald) bewährt. Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Leitprinzipien für das Waldmanagement formulieren:

- *Sicherung der Waldökosystemresilienz*: Stärkung der allgemeinen Störungsresistenz und -resilienz sowie der Anpassungsfähigkeit der Wälder durch artenreiche Ökosysteme sowie eine bestandes- und bodenschonende Bewirtschaftung.
- *Funktionelle Vielfalt durch angepasste Baumartenwahl*: Gewährleistung von idealerweise mindestens drei, besser vier standorts- und klimawandelangepassten Baumarten (auch Nadelbäume) in stabiler Mischung.
- *Natur- und Vorausverjüngung*: Verzicht auf großflächige oder kahlschlagsartige Verjüngung, stattdessen Anwendung von langfristigen Naturverjüngungsverfahren zur Entwicklung von vertikal strukturieren Dauer-mischwäldern. Bei Erfordernis Ergänzung der Verjüngung durch Saat oder Pflanzung.
- *Bodenschutz*: Beschränkung der Befahrung (vor allem von empfindlichen) Böden auf Rückelinien, Bodenschonung durch Minimierung der Bodenbearbeitung auf das absolut Notwendige.
- *Partielle Segregation*: In einem integrativen Ansatz zum Biodiversitätserhalt auf Landschaftsebene sollten unterschiedlich intensiv genutzte Wälder ebenso wie ungenutzte vorkommen.

Beim naturnahen Waldumbau und der Anpassung des Waldes an den Klimawandel sind Entscheidungen und Maßnahmen zu treffen, für die nicht immer eine vollständige wissenschaftliche Evidenz gegeben ist. Angesichts zahlreicher, praxisrelevanter Forschungsfragen mit Bezug zum Waldmanagement ist das *adaptive Management* ein vielversprechender Ansatz. Zweck ist es, die Unsicherheit bezüglich des Verhaltens von Waldökosystemen durch einen stetigen Zugewinn an Wissen (z. B. über Monitoring oder Forschung) iterativ zu verringern. Zusätzlich wird die Beteiligung relevanter Stakeholder empfohlen, um tragfähige Managemententscheidungen zu ermöglichen. Dabei sollte es mit Blick auf einen tatsächlichen Wandel in der Waldwirtschaft darum gehen, sozial-ökologisch tragfähige und innovative Lösungen gemeinsam gesellschaftlich auszuhandeln. Dafür bietet sich die Einrichtung von *Waldreallaboren* an. In großflächigen Versuchen auf Landschaftsebene könnten verschiedene Bewirtschaftungsvarianten in ihren Auswirkungen auf Ökosystemleistungen (z. B. Biodiversität, Kohlenstoffspeicherung) miteinander verglichen werden.

Der Waldumbau zu klimaresilienten Wäldern und vor allem die Wiederbewaldung großer Schadflächen können letztlich nur gelingen, wenn habitatangepasste Wildbestände vorherrschen. Dabei liegen die heutigen Probleme meistens nicht an fehlenden technischen Lösungen, sondern an den unterschiedlichen Interessenlagen von Forstwirtschaft und Jagd. Im Sinne des notwendigen Waldumbaus ist eine Entschärfung dieses Wald-Wild-Konflikts erforderlich. Dafür werden Moderator/innen und Mediator/innen in Person universitär qualifizierter Wildbiolog/innen benötigt, und zwar auf allen Ebenen der zuständigen Verwaltungen.

Förderstrategien, Förderstrukturen und Fördermaßnahmen

Die Förderung der Forstwirtschaft ist Intention zahlreicher Programme in Deutschland auf Bundes- und Länderebene. Die Förderstruktur ist sehr komplex und in der konkreten Maßnahmenausgestaltung unübersichtlich und kleinteilig. Sie reicht von konkreten Förderlinien für spezifische Akteure aus der Wissenschaft, der forstlichen und holzwirtschaftlichen Praxis bis hin zu kleinteiliger Unterstützung von Privatwaldbesitzenden. Insgesamt ist zu konstatieren, dass die forstliche Förderung neben einer ausreichenden finanziellen Ausstattung grundlegend einer klaren politischen Zielsetzung und Ausrichtung bedarf. Ziel sollte eine kohärente Gesamtpolitik sein, in der die zentralen Ziele der einzelnen Strategien und der darauf aufsetzenden Fördermaßnahmen danach ausgerichtet sind, die Nachhaltigkeits- bzw. Gemeinwohlorientierung der Waldnutzung, den Schutz der Biologischen Vielfalt und wichtige Klimaschutzziele nicht zu gefährden. Im Einzelnen bieten sich die folgenden Handlungsoptionen:

- Bestehende Programme und Maßnahmen der forstlichen Förderung sollten umfassend und in ihrem Bezug aufeinander evaluiert werden, um Synergien und Widersprüche sowie Stellschrauben für eine zukunftsfähige Umgestaltung der forstlichen Förderung für einen naturnahen Waldumbau zu identifizieren.
- Notwendig wäre ein langfristig angelegtes und finanziell ausreichend ausgestattetes Förderprogramm für einen ökologischen bzw. ökosystembasierten Waldumbau, welches die Umwandlung in naturnahe Wälder möglichst unbürokratisch, jedoch anhand klarer und überprüfbarer Kriterien honoriert und für eine Beschleunigung der Waldumbauaktivitäten sorgt. Das neue Förderprogramm »Klimaangepasstes Waldmanagement« hat viele Synergien mit den Zielen des naturnahen Waldumbaus. Dementsprechend böte es sich an, ein neues Modul, das noch strengere Anforderungen beinhaltet, in dieses Förderprogramm zu integrieren. Dies hätte den Vorteil, dass die Antragstellung sowie die behördliche Betreuung erleichtert und effizienter gestaltet werden könnten.
- Die großen waldwirtschaftlichen Herausforderungen sind ohne eine qualitativ hochwertige forstliche Beratung nicht zu bewältigen. Die Betreuung und Beratung vor allem von Kleinwaldbesitzenden sollten intensiviert und stärker auf die Herausforderungen und (normativen) Ziele des naturnahen Waldumbaus ausgerichtet werden. Insgesamt erscheint eine vielfältigere Beratungslandschaft wünschenswert, die inhaltlich eine größere Bandbreite an Perspektiven abdeckt.

Implementierung innovativer Technologien

Die Unterstützung des naturnahen Waldumbaus durch innovative Technologien und notwendige strukturelle Innovationen stößt bislang noch an etliche Grenzen. Diese sind zum Teil durch mangelnde technische Lösungen bedingt. Wohl stellen etwa moderne Sensorik, Batterietechnik, Robotik, Signalverarbeitung mit KI und Informationstechnik Technologien dar, die häufig in anderen Bereichen entwickelt wurden und die Entwicklung der forstlichen Innovationstechnologie sowie deren Einsatz potenziell befruchten und beschleunigen können, dies oft aber noch nicht zielführend oder in ausreichendem Maße tun. Dementsprechend werden in Teilbereichen Defizite deutlich. So fehlt es z. B. vor allem an forstspezifischer Anwendungssoftware, um innovative Technologien effektiv beim Waldumbau zum Einsatz zu bringen und in integrierte Gesamtsysteme einbinden zu können. Auch die mangelhafte Integration verschiedener Technologien scheint ein Hemmschuh zu sein.

Grundsätzlich hängen Entwicklungen und Implementierungen neuer Technologien im Bereich Forst zunächst einmal von Innovationen in Grundlagentechnologien ab, die meist von der akademischen Forschung bereitgestellt werden, sowie von entsprechend positionierten Firmen, die diese Technologien in marktrelevante Produkte umzusetzen vermögen. Die Ausstattung und Qualität der deutschen Hochschulen und Forschungsinstitutionen, die alle relevanten Felder vom Maschinenbau über Elektrotechnik, Informatik bis hin zu Forstwissenschaften abdecken, ist prinzipiell als gut einzuschätzen. Um forstspezifische Entwicklungen voranzubringen, braucht es jedoch verstärkt interdisziplinäre Kooperationen (insbesondere zwischen Maschinenbau, Informatik und Forstwissenschaft).

Erforderlich ist zudem eine marktnahe Forschungsförderung, die neben Hochschulen auch private Firmen in die Entwicklungsprojekte einbezieht. Sinnvoll wäre, die Fähigkeiten und Möglichkeiten, die verschiedene Akteure im Kontext des notwendigen klimaresilienten Umbaus der Wälder und Forsten zu bieten haben, stärker zu bündeln. Hierfür bietet sich die Bildung standortübergreifender Cluster zu bestimmten Innovationsthemen an, um die verschiedenen Forschungsakteure, aber auch private Firmen und Praxisakteure gezielt miteinander zu vernetzen und für die Entwicklung praxisnaher Lösungen zusammenzubringen.

Technologieübergreifend ist festzustellen, dass bestimmte typische Hemmnisse die Implementierung innovativer Technologien im Forstbereich behindern. Dazu gehören gesetzliche sowie institutionelle Hürden, aber auch strukturelle Barrieren. Zu den rechtlichen und organisatorischen Hürden zählen beispielsweise die noch geltenden Einschränkungen bei Drohnenflügen außer Sicht. Problematisch ist auch die mangelnde Verfügbarkeit von Daten. So behandeln etwa insbesondere die Vermessungsämter vieler Bundesländer ihre mit öffentlichen Mitteln erhobenen Daten (z. B. Laserscanningbefliegungen) proprietär und verlangen Bereitstellungsgebühren für ihre Produkte. Außerdem stellt die Waldbesitzstruktur ein gewisses Hemmnis bei der Adaption neuer Technologien dar, weil viele kleine Privatwaldbesitzende finanziell kaum zu Technologieinvestitionen fähig sind. Insbesondere die kleineren Waldbesitzenden sind dadurch größtenteils von Innovationen ausgeschlossen. Dieses Manko könnte durch staatliche Unterstützung und die verstärkte Einbindung von Forstbetriebsgemeinschaften abgemildert werden.

1 Einleitung

Wälder haben als komplexe Ökosysteme eine große Bedeutung für die Erhaltung der Biodiversität sowie für den Boden-, Grundwasser- und Gewässerschutz und auch für den lokalen und globalen Klimaschutz. Auch stellen vor allem naturnahe Wälder eine bedeutende Senke für Treibhausgase dar. In den öffentlichen Wäldern sollen zudem die Schutz- und Erholungsfunktionen sogar Vorrang vor der forstwirtschaftlichen Nutzung haben. In der Realität stehen die nicht kommerziellen Funktionen der Wälder jedoch häufig hinten an – nicht nur in Privatwäldern. Denn die Nachfrage nach Holz als Rohstoff für Baumaterial, Papier- und Verpackungsprodukte, Möbel oder als Energiequelle steigt stetig und bedeutet einen verstärkten Zielkonflikt zwischen Holznutzung und Ökosystemleistungen sowie Funktionalität von Waldökosystemen.

Seit einigen Jahren leiden die Wälder besonders stark unter den klimawandelbedingten Veränderungen, die die Selbstorganisationsfähigkeit der Waldökosysteme herausfordert. Besonders nicht standortgemäße Reinbestände (z. B. Fichten- und Kiefernforsten) sind ökologisch und auch ökonomisch sehr risikobehaftet, da sie anfälliger für Schäden durch Insekten, Stürme oder Waldbrände sind. Angesichts ihres schlechten Zustands und damit es nicht zu einer möglicherweise noch weitergehenden Destabilisierung der Waldökosysteme kommt, halten viele – dies zum Teil schon seit Jahrzehnten – einen Umbau der Wälder zu naturnäheren Mischwäldern hin zu mehr Diversität und Diversifizierung (Baumartenzusammensetzung, Struktureichtum, Standortangepasstheit, Funktionsvielfalt, vielfältige Bewirtschaftungsverfahren etc.) für unumgänglich. Vielfach besteht auch Konsens in der Ansicht, dass die dauerhafte verlässliche Bereitstellung von Ökosystemleistungen durch widerstandsfähige, resiliente und anpassungsfähige (stabile) Wälder absolut wünschenswert ist. Aber angesichts der unterschiedlichen Nutzungsinteressen sowie der (vermutlich) sehr hohen Kosten eines umfangreichen Waldumbaus sind die möglichen Wege einer zielführenden Umsetzung durchaus umstritten und unklar.

Das betrifft insbesondere die Fragen, wie der naturnahe Waldumbau in den notwendigen großen Dimensionen angemessen gefördert werden kann und wie die Waldbesitzenden dabei sinnvoll und zielführend zu unterstützen sind. Häufig entbrennen Auseinandersetzungen zwischen den verschiedenen Stakeholdern, Forstpraktiker/innen und Forscher/innen. Argumentiert wird betriebsökonomisch (Existenzbedrohung, Risikostreuung und -vorsorge) mit dem Verweis auf unterschiedliche wissenschaftliche Quellen oder mit dem Verweis auf rechtliche Regelungen bzw. politische Rahmensetzungen. Die Zusammensetzung der Akteure, die inhaltlich konträre Positionen vertreten, bleibt dabei seit Jahren ähnlich und verweist somit auch auf eine lange Beharrlichkeit an Konflikten (Welle et al. 2022, S. 21 f.).

Grundsätzlich ist der Schutz der Wälder und die Förderung der Forstwirtschaft das Ziel zahlreicher Strategien bzw. Initiativen der Europäischen Union und Deutschlands (Bund und Länder). Die daraus resultierenden und teilweise sehr komplexen Maßnahmen haben beträchtliche Auswirkungen auf den Wald und die Forstwirtschaft. Vor diesem Hintergrund ist es auch nicht verwunderlich, dass die vielen verschiedenen Programme, Strategien und Maßnahmen zum Waldumbau, seiner Förderung und Finanzierung sowie Flankierung durch Rahmensetzungen und Regulierungen von den wald- bzw. waldwirtschaftsrelevanten Akteuren jeweils ganz unterschiedlich hinsichtlich ihrer Sinnhaftigkeit bewertet werden. Jede Strategie provoziert eine Reihe an Stellungnahmen der verschiedenen Stakeholder und relevanten Akteursgruppen, die somit die grundsätzlichen Konflikte um die gesellschaftliche Bedeutung von Forst- und Holzwirtschaft deutlich machen. All dies ist auch Ausdruck dafür, dass die Frage eines sinnvollen (und nachhaltigkeitsorientierten) naturnahen Waldumbaus und seiner angemessenen Förderung höchst umstritten ist (Welle et al. 2022, S. 28 f.).

Klar hingegen ist, dass der naturnahe Waldumbau ein sehr großes und komplexes Handlungsfeld ist, das unterschiedliche, teils konfligierende Ziele (Natur- und Artenschutz, Klimaschutz und -anpassung, nachhaltige Rohstoffnutzung etc.), verschiedene Handlungsebenen sowie Maßnahmenoptionen umfasst und ein langfristiges, strategisches Vorgehen erfordert. Heterogene Eigentumsstrukturen und Bewirtschaftungsgrößen wie auch unterschiedliche Nutzungsinteressen und teils begrenzte finanzielle Handlungsmöglichkeiten der Eigentümer/innen sind zusätzliche Herausforderungen. Insgesamt hängt es maßgeblich von der Gestaltung der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab, ob der naturnahe Umbau der Wälder, der voraussichtlich eine Daueraufgabe darstellt, langfristig gelingt.

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das TAB mit der Durchführung eines TA-Projekts »Naturgemäßer Waldumbau in Zeiten des Klimawandels« beauftragt. Entsprechend soll der vorliegende Bericht eine Analyse der forstwissenschaftlichen, technischen, ökonomischen und rechtlichen Aspekte für einen naturnahen Waldumbau inklusive regulativer Steuerungsmöglichkeiten bieten. Um dies leisten zu können, ist eine inhaltliche

Perspektive erforderlich, die nicht nur auf klimaresiliente Baumarten, sondern auch auf Waldökosysteme fokussiert, da sich der Erfolg eines Waldumbaus letztlich an der Stabilität und Klimaresilienz der resultierenden Ökosysteme bemessen muss.

Berichtsstruktur

Der vorliegende Bericht bietet schwerpunktmäßig einen Überblick zum Wissensstand hinsichtlich der Anforderungen an den naturnahen Waldumbau und resiliente Waldökosysteme, zum Stand sowie den Perspektiven innovativer Technologien, welche den Waldumbau und ein nachhaltiges Waldmanagement unterstützen können, sowie zu ökonomischen und forstbetrieblichen Aspekten einer naturnahen Waldbewirtschaftung.

Kapitel 2 – Wald im Spannungsfeld von Nutzung und Schutz: Grundlagen und Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden nach einem kurzen Überblick über einige Zahlen und Fakten zum deutschen Wald (Kap. 2.1) wesentliche Grundlagen und Voraussetzungen erläutert, die für den Waldumbau aktuell relevant sind. Dazu gehören zum einen wichtige rechtliche Bestimmungen (Kap. 2.2), zum anderen eine Bilanzierung der klimawandelbedingten Waldschäden inklusive einer Einordnung der maßgeblichen Störereignisse in Kapitel 2.3, schließlich aber auch ein Überblick über die in Deutschland besonders polarisiert geführte Debatte rund um die Frage, wie wirtschaftliche und ökologische Belange sinnvoll in Einklang zu bringen sind. Die sich dabei offenbarenden Zielkonflikte und Interessensgegensätze schlagen sich auch in politischen Strategien nieder, wie in Kapitel 2.4 gezeigt wird.

Kapitel 3 – Anforderungen an den naturnahen Waldumbau und resiliente Waldökosysteme

Zunächst wird in Kapitel 3.1 ein Überblick zum Stand des naturnahen Waldumbaus in Deutschland gegeben sowie die unterschiedlichen waldbaulichen Konzepte und Verfahren vorgestellt, die darauf abzielen, einen optimal strukturierten, nachhaltig funktionsfähigen Zustand der vom Menschen genutzten Wälder zu erreichen. Die Eigenschaften resilienter Waldökosysteme sowie zentrale Aspekte zu Anpassungserfordernissen werden in Kapitel 3.2 näher beleuchtet, während sich Kapitel 3.3 mit den Arealstabilitäten der wichtigsten Baumarten in Deutschland sowie möglichen Baumarten für den Wald der Zukunft befasst. Der aktuelle Stand der Forschung zur Vermeidung von Wildschäden im Wald sowie zur Waldbrandprävention werden in Kapitel 3.4 dargestellt. Anknüpfend an die vorherigen Kapitel diskutiert das Kapitel 3.5 resümierend und perspektivisch die Implikationen für ein zielführendes Waldmanagement, orientiert an der Idee einer Multifunktionalität von Wäldern und einem ganzheitlichen Ökosystemmanagement. Das Kapitel schließt mit einem Fazit (Kap. 3.6).

Kapitel 4 – Technische Innovationen für Waldumbau und nachhaltiges Waldmanagement

In diesem Kapitel werden innovative Technologien besprochen, die für den Waldumbau eine wichtige Rolle spielen. In Kapitel 4.1 werden Schlüsseltechnologien beleuchtet, die für das Waldmonitoring relevant sind. Kapitel 4.2 befasst sich mit neuen maschinellen Ansätzen in der Waldbewirtschaftung, Fortschritten in den Bereichen von Sensorik und IT sowie mit der sich verstärkenden Digitalisierung der Wertschöpfungsketten bzw. der forstfachlichen Prozesse. In Kapitel 4.3 werden die neuen Möglichkeiten im Bereich des biotischen Waldschutzes beschrieben und in Kapitel 4.4 schließlich die Funktionen und Möglichkeiten analysiert, die ein genetisches Monitoring für die Entwicklung klimaresilienterer und stresstoleranterer Wälder bereitstellen kann. Zunächst wird jeweils der Stand der Technik erläutert, sodann werden mögliche Technologieperspektiven und einige Rahmenbedingungen aufgezeigt.

Kapitel 5 – Ökonomische Aspekte des naturnahen Waldumbaus

Im Kontext der Dringlichkeit eines naturnahen Waldumbaus und der damit einhergehenden Anforderungen an die Forstwirtschaft werden in diesem Kapitel die ökonomischen sowie forstbetrieblichen Aspekte eines naturgemäßen Waldbaus beleuchtet werden. Besprochen und eingeordnet werden die Ergebnisse von Simulationen, welche für den vorliegenden Bericht durchgeführt wurden und die waldbaulichen und forstbetrieblichen Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsverfahren kurz- sowie langfristig miteinander vergleichen. In Kapitel 5.1 werden Hintergrund und Methodik beschrieben und eingeordnet. Dazu gehört zunächst ein knapper Überblick über die aktuelle betriebswirtschaftliche Situation der Forstbetriebe. Zudem enthält Kapitel 5.1 eine Darstellung der Datenverwendung sowie die Beschreibung des methodischen Vorgehens, wie die Herleitung der Beispielbetriebe und eine Beschreibung der verschiedenen Bewirtschaftungsansätze (Altersklassenwaldwirtschaft, Dauerwaldbewirtschaftung sowie prozessschutzorientierte Waldwirtschaft). Darauf aufbauend erfolgen in Kapitel 5.2

eine Darstellung und Diskussion der waldbaulichen und forstbetrieblichen Simulationsergebnisse, aufgeschlüsselt für die verschiedenen Beispielbetriebe und Bewirtschaftungsformen. Hierfür werden die Auswirkungen für einen (kurzfristigen) 10-jährigen sowie für einen (langfristigen) 50-jährigen Zeitraum aufgezeigt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen verglichen und ihre Aussagekraft eingeordnet. Kapitel 5.3 schließlich bietet eine dezidierte Analyse und Bewertung bestehender direkter und indirekter nationaler und EU-weiter Förderinstrumente auf Grundlage der relevanten politischen Programme und Strategien sowie eine Diskussion innovativer Förderansätze unter Berücksichtigung von Anreizsystemen für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen.

Kapitel 6 – Resümee und Handlungsfelder

Zunächst erfolgt in Kapitel 6.1 eine Gesamteinschätzung zum aktuellen Stand und zu den Vorhaben des naturnahen Waldumbaus sowie eine Diskussion, wie ein zielführendes Wald(umbau)- und Wildmanagement zu gestalten und zu implementieren wäre, inklusive der notwendig erscheinenden Maßnahmen und zugehörigen Handlungsoptionen. Daran anknüpfend erfolgt eine Diskussion der ökonomischen Dimensionen des Waldumbaus (Kap. 6.2). Dazu werden erst resümierend diejenigen politischen Strategien auf Bundes- und Länderebene diskutiert, die einen relevanten Einfluss auf die aktuelle und zukünftige Gestaltung der Waldwirtschaft und des Waldumbaus haben. Anschließend erfolgen eine Analyse und eine Reflexion der aktuellen Förderarchitekturen und aufsetzender Förderstrategien im Kontext des Waldumbaus auf Bundes- und Landesebene. Diesbezügliche Handlungsoptionen bzw. auch -notwendigkeiten werden aufgezeigt. Das Kapitel endet mit einer Diskussion technologischer Aspekte, sprich der Möglichkeiten verschiedener innovativer Technologien, den naturnahen Waldumbau zu unterstützen. Die diesbezüglich zum Teil bestehenden gesetzlichen, aber auch betrieblichen Hürden und strukturbedingten Barrieren, die dem Einsatz neuer Technologien im Wege stehen, werden diskutiert und Handlungsmöglichkeiten zu deren Überwindung aufgezeigt.

Zusammenarbeit mit Gutachtern und Danksagung

Im Rahmen des TAB-Projekts wurden drei Gutachten vergeben, deren Ergebnisse neben substanziellen eigenen Recherchen in die Berichtserstellung eingeflossen sind:

- Anforderungen an den naturnahen Waldumbau aus forstwissenschaftlicher Sicht. Prof. Dr. Peter Spathelf, Mühlenbeck
- Technische Innovationen für Waldumbau und nachhaltiges Waldmanagement. Dr. Stefan Seifert, Prof. Dr. Thomas Seifert, Scientes Mondium UG, Altomünster; Prof. Dr. Martin Ziesak, Simon Bayer, IFOS GmbH, Arnsberg; Prof. Dr. Andreas König, Prof. Dr. Gerhard Müller-Starck, TU München; Prof. Dr. Jörg Schumacher, Prof. Dr. Andreas Linde, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung, Eberswalde
- Ökonomische Aspekte des naturnahen Waldumbaus. Dr. Torsten Welle, Dr. Stefan Kreft, Knut Sturm, Stadtwald Lübeck; Dr. Christine Katz, diversu e. V., Lüneburg

Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials sowie dessen Zusammenführung mit Informationen aus eigenen Analysen liegt bei den Verfassern dieses Berichts, Dr. Christoph Kehl und Dr. Christoph Revermann.

Den Verfasser/innen der Gutachten sowie allen an der Erstellung der Gutachten beteiligten Expert/innen sei für ihr großes Engagement, ihre Kooperation im Projekt und ihre Diskussionsbereitschaft sehr herzlich gedankt. Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Somidh Saha (ITAS) für die engagierte inhaltliche Begleitung des Projekts und wertvolle Diskussionsbeiträge. Ein herzlicher Dank geht schließlich auch an Carmen Dienhardt und Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die Aufbereitung der Abbildungen und Tabellen sowie die Durchsicht des Manuskripts und das Endlayout.

2 Wald im Spannungsfeld von Schutz und Nutzung: Grundlagen und Rahmenbedingungen

Deutschland gehört mit ca. 11,4 Mio. ha bewaldeter Fläche (entspricht einem Anteil von 32%) zu den walddreieichsten Ländern Europas (BMEL 2014, S. 10). Die Beziehung der Deutschen zum Wald reicht jedoch deutlich tiefer, als es diese Zahl auszudrücken vermag. Mindestens seit der Romantik, also etwa ab Ende des 18. Jahrhunderts, spielt der Wald in der deutschen Dichtung und Malerei eine herausgehobene Rolle und ist seither ein wichtiger Teil der nationalen kulturellen Identität (Arens 2011). Deutschland ist nicht zuletzt das Land, in dem die modernen Forstwissenschaften begründet wurden. 1734/1735 wurde an der Universität Jena die erste forstwissenschaftliche Ausbildung ins Leben gerufen (DFV 2016), 21 Jahre nachdem der Freiburger Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz (von Carlowitz 2013) das Werk »Sylvicultura oeconomica« veröffentlicht hatte. Es gilt als erstes forstwirtschaftliches Standardwerk und als Ursprung des Nachhaltigkeitsbegriffs.

Von Carlowitz entwickelte die Idee einer nachhaltigen forstlichen Nutzung des Waldes, als er die damals völlig unregulierte Abholzung in seiner sächsischen Heimatregion beobachtete, ausgelöst durch eine Energiekrise und die starke Nachfrage nach Holz. Weitgehend entwaldete Landschaften waren insbesondere für das mittelalterliche Deutschland – um 1300 waren nur noch ca. 20% der Fläche bewaldet –, aber auch noch zu Zeiten von Carlowitz³, durchaus typisch (Mutke/Quandt 2018). Die klimatischen Bedingungen spielten dabei eine wichtige Rolle, denn Mitteleuropa war zwischen dem 9. und 13. Jahrhundert durch eine Warmzeit mit starkem Bevölkerungswachstum, anschließend vom 15. bis in das 19. Jahrhundert hinein durch ein relativ kühles Klima geprägt (Kleine Eiszeit), was beides einen erhöhten Bedarf nach Holz mit sich brachte. Aus dieser Notlage heraus wurde im Übergang zum 19. Jahrhundert hauptsächlich aus ökonomischen Erwägungen heraus mit geregelter Forstwirtschaft begonnen, nicht zuletzt basierend auf den Erkenntnissen von (von Carlowitz 2013). Dieser Paradigmenwechsel beinhaltete die Überführung von lichten Niederwäldern in dichtere Hochwälder durch die konsequente Trennung von Weide und Wald sowie die systematische Aufforstung mit schnell wachsenden Fichten- und Kiefernbeständen, die bis heute die »Brotbäume« der deutschen Forstwirtschaft bilden (Knapp 2021, S. 24 f.). Auch die ersten Forstverwaltungen wurden damals gegründet. Der Zweite Weltkrieg führte dann zu erneuten Kahlschlägen, denen mit großflächigen Aufforstungen nach Kriegsende begegnet wurde. Auch dabei waren Nadelbaumbestände das primäre Mittel der Wahl (BMEL 2014, S. 18).

Gerade Fichten- und Kiefernbestände leiden jedoch besonders stark unter den klimawandelbedingten Veränderungen. Damit es nicht zu einer weiteren Verschlechterung des Zustands der Wälder bzw. Forsten kommt und langfristig zu einer vielleicht völligen Destabilisierung der jetzigen Waldökosysteme, scheint für viele ein Wald(um)bau hin zu naturnäheren Mischwäldern, zu mehr Diversität und Diversifizierung von Wäldern (Artenzusammensetzung, Struktureichtum, Standortausprägungen, Funktionsvielfalt, vielfältige Bewirtschaftungsverfahren etc.) unumgänglich. Aber angesichts der unterschiedlichen Nutzungsinteressen sowie der auch zu erwartenden sehr hohen Kosten sind die möglichen Wege einer zielführenden Umsetzung durchaus umstritten und werden zudem durch etliche Rahmenbedingungen (gesetzliche Vorgaben, Besitzverhältnisse und wirtschaftliche Interessen, Impact des Klimawandels etc.) bedingt.

Im Folgenden werden nach einem kurzen Überblick über Zahlen und Fakten zum deutschen Wald (Kap. 2.1) wesentliche Grundlagen und Voraussetzungen erläutert, die für den Waldumbau aktuell relevant sind. Dazu gehören rechtliche Bestimmungen (Kap. 2.2) sowie eine Bilanzierung der klimawandelbedingten Waldschäden (inklusive Einordnung der maßgeblichen Störereignisse; Kap. 2.3), schließlich aber auch ein Überblick über die in Deutschland besonders polarisiert geführte Debatte rund um die Frage, wie wirtschaftliche und ökologische Belange sinnvoll in Einklang zu bringen sind. Die sich dabei offenbarenden Zielkonflikte und Interessensgegensätze schlagen sich auch in politischen Strategien nieder, wie in Kapitel 2.4 gezeigt wird.

2.1 Der deutsche Wald in Zahlen: Ergebnisse der Bundeswaldinventur

Die Geschichte des deutschen Waldes³ widerspiegelt in geradezu typischer Weise die menschliche Nutzungsgeschichte, die eng mit der Klimageschichte verweben ist. Ohne die Einwirkung des Menschen wären große Gebiete Deutschlands von Urwald bedeckt. Dabei wären Laubwälder auf über 90% der Fläche vorherrschend (Mutke/Quandt 2018). Buchenwälder würden 75% und Eichenwälder 17% der Waldfläche ausmachen (BMEL 2014, S. 22). Struktur und Zusammensetzung der heutigen Wälder in Deutschland weichen deutlich von dieser

³ Zu sprechen wäre eigentlich richtiger von Waldökosystemen, die nicht nur aus Baumbeständen bestehen, sondern komplexe und sich beständig entwickelnde Gefüge aus Böden, Humusschichten, Mikroorganismen, Pilzen, Pflanzen und Tieren darstellen (Kap. 3.2). Wälder als komplexe Systeme siehe auch Filotas et al. 2014; Konzepte zur systemischen Waldwirtschaft z. B. Bode 2019.

potenziell natürlichen Vegetation ab, wie die Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur von 2012 belegen, deren wesentliche Ergebnisse im Folgenden kurz zusammengefasst werden (zum Folgenden BMEL 2014).⁴

2.1.1 Zusammensetzung und Struktur

Der Laubbaumanteil beträgt 43 % des Holzbodens⁵, der Nadelholzanteil entsprechend 57 %. Insgesamt wurden in der Bundeswaldinventur 51 Baumarten erfasst, wobei 5 Baumarten fast drei Viertel (73 %) der Waldfläche ausmachen: die gemeine Fichte (25 %), die Kiefer (23 %), die Rotbuche (15 %) sowie die Trauben- und Stieleiche (10 %).⁶ Regional sind die Hauptbaumarten sehr unterschiedlich verteilt (Abb. 2.1) und sie treten auch in unterschiedlichem Mischverhältnis auf. Während es sich bei Fichten- und Kiefernwäldern häufig noch um Reinbestände handelt (auf 29 % bzw. 43 % der Fläche), sind reine Buchen- oder Eichenwälder deutlich seltener anzutreffen. Insgesamt nehmen Mischwälder, die aus zwei oder mehr Baumarten bestehen (mit jeweils mindestens 10 % Flächenanteil), 76 % der Waldfläche Deutschlands ein.

2.1.2 Bewirtschaftung

Urwälder im Sinne eines ursprünglichen, unkultivierten Waldes sind in Deutschland schon lange nicht mehr vorhanden. Etwa zwei Drittel des deutschen Waldes fallen unter zumindest eine der folgenden Schutzgebietskategorie, wobei die meisten dieser Kategorien eine Bewirtschaftung zulassen: »Streng geschützte« Waldgebiete sowie »besonders geschützte Biotop« sind mit Bewirtschaftungseinschränkungen verbunden, während in »geschützten Biotopen« Maßnahmen verboten sind, die zu einer erheblichen Verschlechterung des ökologischen Zustandes führen (iDiv 2013, S. 25 f.). Die Ausweisung als Naturschutzgebiet zieht teils einschränkende Regelungen für die Forstwirtschaft nach sich. Nur ein kleiner Teil des Waldes steht unter Totalschutz und enthält komplett nutzungs-freie Waldflächen. Größeren Ausmaßes finden diese sich nur in einigen wenigen Nationalparks wie dem Bayerischen Wald oder dem Hainich. Gemäß einem Forschungsprojekt der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) kann sich der Wald in Deutschland auf 2,8 % der gesamten Waldfläche Deutschlands natürlich, das heißt ohne direkte Einflussnahme des Menschen entwickeln (BfN/ NW-FVA 2019). Der hohe Nutzungsgrad widerspiegelt sich auch in der Altersstruktur des Waldes sowie der Naturnähe der Baumartenzusammensetzung. Im Durchschnitt ist der Wald 77 Jahre alt, knapp ein Viertel (24 %) ist älter als 100 Jahre.⁷ Wälder, deren Baumartenzusammensetzung der natürlichen Waldgesellschaft⁸ nahe oder sehr nahe kommt, machen 36 % aus. Der Rest umfasst entsprechend Wälder, die nur bedingt oder gar nicht naturnah gestaltet sind.

2.1.3 Besitzverhältnisse

Etwa ein Drittel der Wälder befindet sich im Besitz des Bundes und der Länder (Staatswald), ca. ein Fünftel besitzen Gemeinden, Städte und andere Körperschaften (Körperschaftswald), etwa die Hälfte ist in Privatbesitz.⁹ Regional sind die verschiedenen Besitzarten sehr unterschiedlich verteilt. So reicht der Anteil des Privatwaldes von 24 % in Hessen bis 67 % in Nordrhein-Westfalen, wobei er in den dünner besiedelten ländlichen Regionen überwiegt. Er ist zumeist klein strukturiert. Betriebe mit weniger als 20 ha machen etwa die Hälfte aus. Nur 13 % des Privatwaldes gehören zu Betrieben mit einer Größe über 1.000 ha. Der Staatswald wiederum geht häufig auf ehemals landesherrliche Wälder und säkularisierten Klosterbesitz zurück, sein Anteil liegt zwischen 17 % in Nordrhein-Westfalen und 50 % in Mecklenburg-Vorpommern. Der Körperschaftswald, der in Rheinland-Pfalz einen Anteil von 46 %, in Brandenburg jedoch nur 7 % ausmacht, ist besonders in dicht besiedelten Großstadtreionen

⁴ Aktuellere Daten liegen nicht vor. Die 4. BWI startete 2021, die Ergebnisse werden voraussichtlich Ende 2024 veröffentlicht (KIWUH o. J.).

⁵ Holzboden umfasst die dauernd zur Holzproduktion bestimmte Fläche, auch Gräben, Leitungstrassen, Blößen sowie Wege und Schneisen unter 5 m Breite, so diese den Zusammenhang der Bestockung nicht wesentlich unterbricht (DFV o. J.b).

⁶ 11 Baumarten nehmen ca. 90 % des Holzbodens ein. Neben den oben genannten Baumarten die gemeine Birke, gemeine Esche, Schwarzerle, europäische Lärche, Douglasie und Bergahorn. Die übrigen 40 Baumarten teilen sich die restlichen 10 % des Holzbodens. Trotz ihrer geringen Flächenverbreitung leisten sie wichtige Beiträge für Vielfalt, Stabilität, Bodenpflege und Holzherzeugung.

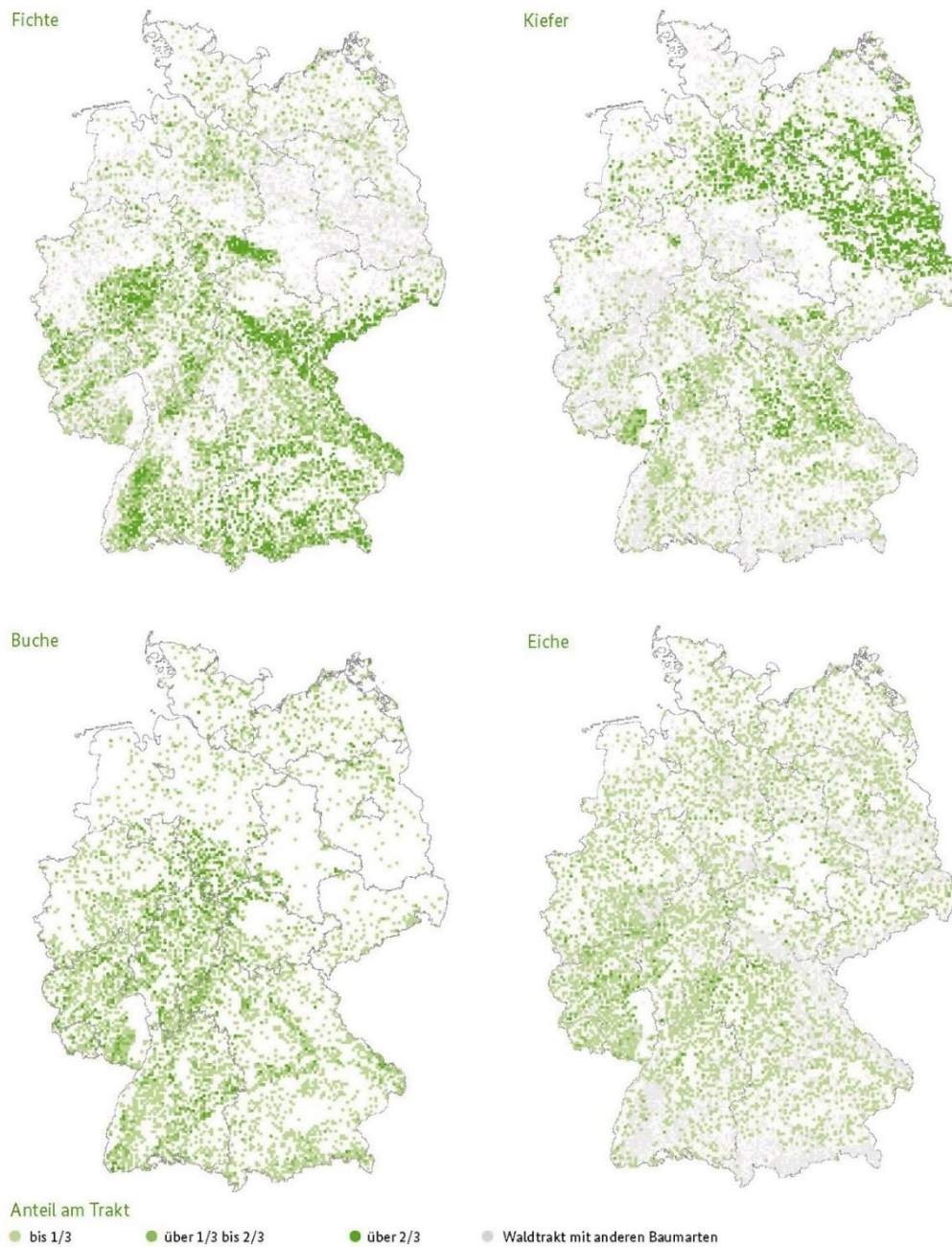
⁷ Fichten und Buchen können in Mitteleuropa mindestens 300, Tannen bis 600 und Linden, Eichen und Eiben sogar bis zu 1.000 Jahre und älter werden (LWF o. J.b).

⁸ Als natürliche Waldgesellschaft wird das Artgefüge bezeichnet, das sich ohne menschliche Eingriffe unter das sich unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen (Höhenlage, Hangrichtung, Klima, Bodenaufbau etc.) entwickeln würde (Spathelf 2022, S. 11).

⁹ Definiert sind die Besitzarten in § 3 Bundeswaldgesetz. Demnach befindet sich Staatswald im Alleineigentum des Bundes, eines Landes oder einer Anstalt oder Stiftung des öffentlichen Rechts. Als Körperschaftswald hingegen wird jener Wald bezeichnet, der sich im Alleineigentum der Gemeinden, der Gemeinde- oder Zweckverbände sowie sonstiger Körperschaften des öffentlichen Rechts befindet. Alles, was nicht unter die Definition von Staats- oder Körperschaftswald fällt, wird als Privatwald bezeichnet. Dazu gehören nicht nur all jene Waldflächen, die sich in privater Hand befinden, also natürlichen oder juristischen Personen gehören, sondern auch weitere Spezialfälle (wie Wald im Eigentum von zwei Gemeinden; Vorfelder 2022, S. 38).

stark vertreten. Diese Vielfalt und die heterogene Verteilung an Eigentumsstrukturen sind einer der Gründe für die regional sehr unterschiedliche Strukturierung der Wälder beispielsweise hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung, dem Mischverhältnis oder dem Holzvorrat, da daraus unterschiedliche Zielstellungen bei der Waldbehandlung bzw. Bewirtschaftungspraktiken folgen. So gelten etwa für Wälder in öffentlichem Eigentum – anders als für Privatwälder – gesetzlich festgelegte Gemeinwohl- und Naturschutzverpflichtungen (§2 Abs. 4 BNatSchG¹⁰).

Abbildung 2.1 Verbreitung von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche in Deutschland



Quelle: BMEL 2014, S. 13

¹⁰ Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) vom 29.7.2009, zuletzt am 8.12.2022 geändert

2.2 Relevante gesetzliche Rahmenbedingungen

Dass es sich beim deutschen Wald um eine von Menschenhand geformte Kulturlandschaft handelt, lässt sich auch an den gesetzlichen Bestimmungen ablesen, welche den Umgang mit ihm regulieren. Den gesetzlichen Rahmen hierfür definiert auf Bundesebene das Bundeswaldgesetz. Bereits im Namen bringt es das Spannungsfeld von Schutz und Nutzung zum Ausdruck, was sich am Beispiel der Wälder in besonderer Deutlichkeit artikuliert. In § 1 Bundeswaldgesetz sind die drei Ziele des Gesetzes definiert, die dieses Spannungsfeld weiter ausbuchstabieren:

- *Erhaltung der Multifunktionalität:* Hingewiesen wird auf die sehr unterschiedlichen und vielfältigen Funktionen des Waldes. Erhaltenswert sei dieser nicht nur »wegen seines wirtschaftlichen Nutzens«, sondern auch wegen »seiner Bedeutung für die Umwelt, insbesondere für die dauernde Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, das Klima, den Wasserhaushalt, die Reinhaltung der Luft, die Bodenfruchtbarkeit, das Landschaftsbild, die Agrar- und Infrastruktur und die Erholung der Bevölkerung (Schutz- und Erholungsfunktion)«. Alle wichtigen Ökosystemleistungen¹¹ des Waldes sind damit angesprochen, und die deutsche Forstwirtschaft somit auf das Leitbild der Multifunktionalität des Waldes und die Integration von Schutz-, Nutz- und Erholungsaspekten verpflichtet (iDiv 2013, S. 23). Diese vielfältigen Funktionen des Waldes lassen sich nur langfristig erhalten, wenn dessen ordnungsgemäße Bewirtschaftung nachhaltig gesichert wird, was entsprechend zu den primären Gesetzeszielen gehört.
- *Interessenausgleich zwischen Allgemeinheit und Waldbesitzenden:* Aufgrund der beschriebenen vielfältigen Bedeutung des Waldes für die Umwelt und Allgemeinheit kommt Waldbesitzenden eine besondere Verantwortung zu. Sie können insofern nicht über ihr Eigentum frei und nach Belieben verfügen, sondern sind an diverse Vorgaben gebunden (zu Eigentumsfragen siehe Vorfelder 2022, S. 37 ff.). Dies betrifft vor allem die Erhaltung des Waldes, der im Bundeswaldgesetz (§§ 5 bis 13) ein eigenes Kapitel gewidmet ist. So darf der Wald »nur mit Genehmigung der nach Landesrecht zuständigen Behörde gerodet und in eine andere Nutzungsart umgewandelt werden (Umwandlung)«, wobei hierbei »die Rechte, Pflichten und wirtschaftlichen Interessen des Waldbesitzers sowie die Belange der Allgemeinheit gegeneinander und untereinander abzuwägen« sind (§ 9 Abs. 1 BWaldG). Liegt die Erhaltung des Waldes überwiegend im öffentlichen Interesse, darf er nicht umgewandelt werden. Weiterhin gibt es eine Verpflichtung, den Wald ordnungsgemäß und nachhaltig zu bewirtschaften, was u. a. beinhaltet, »kahlgeschlagene Waldflächen oder verlichtete Waldbestände in angemessener Frist wieder aufzuforsten« (§ 11 Abs. 1 BWaldG). Das Bundeswaldgesetz konkretisiert zudem genauer die verschiedenen Eigentumsarten (Staatswald, Körperschaftswald sowie Privatwald) und definiert, was im Sinne des Gesetzes genau als Wald zu gelten hat – nämlich »jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche« sowie auch »kahlgeschlagene oder verlichtete Grundflächen, Waldwege« sowie weitere mit dem Wald verbundene und ihm dienende Flächen (§ 2 Abs. 1 BWaldG).
- *Förderung der Forstwirtschaft:* Um sicherzustellen, dass insbesondere die privaten Waldeigentümer ihren gesetzlichen Pflichten nachkommen und die »Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen des Waldes« nachhaltig sichern, ist die öffentliche Förderung der Forstwirtschaft als wichtiges forstpolitisches Ziel im Bundeswaldgesetz festgeschrieben. Gerade angesichts der großflächigen Waldschäden (Kap. 2.3) und der erforderlichen Anstrengungen zur Klimawandelanpassung spielt die öffentliche Förderung eine zunehmend wichtige Rolle (WBW 2021, S. 59; vertiefend dazu Kap. 5.3). Die Rahmenbedingungen hierfür sind in § 41 Bundeswaldgesetz dargelegt. Demzufolge soll die Förderung »insbesondere auf die Sicherung der allgemeinen Bedingungen für die Wirtschaftlichkeit von Investitionen zur Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung des Waldes gerichtet sein«. Weiter heißt es, dass »die Forstwirtschaft unter Berücksichtigung ihrer naturbedingten und wirtschaftlichen Besonderheiten mit Mitteln der Wirtschafts-, Verkehrs-, Agrar-, Sozial- und Steuerpolitik in den Stand zu setzen [ist], den Wald unter wirtschaftlich angemessenen Bedingungen zu nutzen und zu erhalten«. Das aktuell wichtigste und auch gesetzlich hervorgehobene Instrument hierbei ist die Förderung im Rahmen der GAK, an der sich der Bund finanziell beteiligt.

Im Bundeswaldgesetz ist das Bemühen des Gesetzgebers spürbar, ökologische, ökonomische und soziale Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung des Waldes in einen Interessenausgleich zu bringen. Allerdings stammt das Gesetz von 1975 und wurde zwar mehrfach angepasst, aber bislang noch nicht grundlegend novelliert, obwohl unterschiedliche Bundesregierungen seit der Jahrtausendwende immer wieder Pläne in diese Richtung entwickelt haben (NABU 2008, S. 16). Von seinem Charakter entspricht das Bundeswaldgesetz einem Rahmengesetz, das

¹¹ Als Ökosystemleistungen werden die vielfältigen Nutzenaspekte von Ökosystemen bezeichnet (TAB 2014). Dazu zählen Versorgungs- (z. B. Holzproduktion), Regulierungs- (z. B. Klimaschutzbeitrag durch CO₂-Bindung), kulturelle (z. B. Tourismus, Erholung) sowie unterstützende Leistungen (z. B. Sauerstoffproduktion). Ein grafischer Überblick über alle Waldleistungen ist zu finden in FNR (2021a).

auf Detailregelungen weitgehend verzichtet und es in die Gesetzgebungskompetenz der Bundesländer stellt, in den jeweiligen Landeswaldgesetzen konkrete Normierungen zu erlassen. Zwar hat der Bund seit der Föderalismusreform von 2007 gemäß der konkurrierenden Gesetzgebung (Art. 72 Abs. 1 Grundgesetz¹²) grundsätzlich die Möglichkeit, seine Gesetzgebungskompetenz vorrangig wahrzunehmen (Vorfelder 2022, S. 21 ff.),¹³ jedoch machte er im Waldrecht bis heute davon keinen Gebrauch. Die weitere Entwicklung bleibt abzuwarten, da die Ampelregierung in ihrem Koalitionsvertrag ankündigte, das Bundeswaldgesetz novellieren zu wollen und bereits entsprechende Schritte eingeleitet hat (SPD et al. 2021, S. 31; UFZ 2023).

Bereits seit vielen Jahren ist umstritten, ob das Bundeswaldgesetz noch zeitgemäß ist. Besonders vonseiten der Naturschutzverbände wird kritisiert, dass im Gesetz z. B. keinerlei Konkretisierung einer guten forstlichen Praxis bzw. ordnungsgemäßen Forstwirtschaft vorzufinden ist (§ 11 Abs. 1 BWaldG). Entsprechend wird eine Modernisierung der gesetzlichen Bestimmungen gefordert (BUND 2010; NABU 2008, S. 52). Regelungen zur ordnungsgemäßen Forstwirtschaft bzw. guten fachlichen Praxis definieren die gesetzlich geltenden Mindeststandards der Bewirtschaftung (iDiv 2013, S. 24 f.; WBW 2022). Da es hierzu keine bundeseinheitlich verbindlichen Vorgaben gibt, obliegt die Konkretisierung den Bundesländern (WBW 2021, S. 58 f.), was sehr unterschiedliche Ergebnisse hervorbrachte. Somit liegt aktuell die hauptsächliche forstpolitische Gestaltungsmacht in Deutschland auf Landesebene, was einerseits den Vorteil hat, dass diese Regelungen erlassen können, die auf ihre spezifische Situation zugeschnitten sind. Andererseits kann sich die föderale Zersplitterung walddrechtlicher Vorschriften und Schutzniveaus unter Umständen auch nachteilig auswirken – gerade bei einer so großen und langfristigen Herausforderung wie dem klimaresilienten Umbau der Wälder –, da einheitliche und übergreifende Lösungsstrategien unter diesen Rahmenbedingungen kaum umzusetzen sind.

Hinzu kommt, dass neben dem Waldrecht noch diverse andere Regelungsbereiche auf den Wald und seine Entwicklung Einfluss nehmen. Dazu gehören vor allem das Jagdwesen sowie der Naturschutz. Mit Ausnahme dreier Bereiche – den allgemeinen Grundsätzen des Naturschutzes inklusive Landschaftsplanung, Eingriffsregelung, Schutzgebiete, dem Artenschutz und dem Meeresnaturschutz – wurde den Bundesländern im Zuge der Föderalismusreform für beide Bereiche eine Abweichungskompetenz eingeräumt (Art. 72 Abs. 3 GG), sodass sie also eigene Regelungen erlassen können:

- *Naturschutz*: Die wichtigste Rechtsgrundlage ist das Bundesnaturschutzgesetz, das letztmalig 2009 neu gefasst wurde und 2010 in Kraft trat (TAB 2014, S. 93 f.). Zu seinen zentralen Zielsetzungen gehört der Schutz der biologischen Vielfalt, daneben sollen auch »die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts einschließlich der Regenerationsfähigkeit und nachhaltigen Nutzungsfähigkeit der Naturgüter« sowie »die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft« dauerhaft gesichert werden (§ 1 BNatSchG).¹⁴ Konkret für den Wald schreibt es als Zielsetzung vor, naturnahe Wälder aufzubauen und diese ohne Kahlschläge nachhaltig zu bewirtschaften sowie einen hinreichenden Anteil standortheimischer Forstpflanzen einzuhalten (§ 5 Abs. 3 BNatSchG). Die Begriffe »nachhaltig« und »hinreichend« werden jedoch nicht weiter definiert (dazu und zum Folgenden iDiv 2013, S. 24). Vermeidbare Eingriffe in den bestehenden Naturhaushalt, die eine erhebliche Beeinträchtigung nach sich ziehen, sind zu vermeiden; unvermeidbare Eingriffe müssen im Rahmen der Eingriffsregelung (§§ 13 ff. BNatSchG), durch Realmaßnahmen oder Ersatzzahlungen kompensiert werden. Festgehalten wird (§ 14 Abs. 2 BNatSchG), dass die forstwirtschaftliche Nutzung nicht als Eingriff zu werten ist, wenn sie mit den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege vereinbar ist. Maßstab hierfür sind die eher unscharfen Vorgaben des § 5 Abs. 3 Bundesnaturschutzgesetz (Aufbau naturnaher Wälder, Verzicht auf Kahlschläge, hinreichender Anteil standortheimischer Forstpflanzen). Im Unterschied zur landwirtschaftlichen Nutzung wird der Begriff der guten fachlichen Praxis für die Forstwirtschaft im Bundesnaturschutzgesetz nicht weiter spezifiziert.
- *Jagdwesen*: Mit Blick auf den Waldumbau kommt der Regulierung des Wildbestandes durch Jagd eine zentrale Bedeutung zu. Vor allem Rehe, aber auch Rothirsch, Gams und Damhirsch verursachen durch Verbiss Schäden an Jungpflanzen und können so den Aufbau naturnaher Mischwälder massiv behindern (siehe dazu im Detail Kap. 3.4.1). In den Jagdgesetzen des Bundes und der Länder ist geregelt, wer welche Wildtierarten in welchen Gebieten wann und wie bejagen darf. Mit der Befugnis zur Jagd ist laut Bundesjagdgesetz (BJagdG)¹⁵ auch die Pflicht zur Hege verbunden. Sie dient dem Zweck, einen den landschaftlichen und lan-

¹² Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23.5.1949, zuletzt am 19.12.2022 geändert

¹³ Ausnahme: Naturschutz und Landeserhalt

¹⁴ Für Wälder im öffentlichen Eigentum, insbesondere den Staatswald, gelten dabei besondere Verpflichtungen, die bei der Bewirtschaftung zu berücksichtigen sind (§ 2 BNatSchG).

¹⁵ Bundesjagdgesetz (BJagdG) vom 29.11.1952, zuletzt am 19.6.2020 geändert

deskulturellen Verhältnissen angepassten artenreichen und gesunden Wildbestand sowie dessen Lebensgrundlagen zu erhalten (§ 2 Abs. 2 BJagdG). Dabei sind Beeinträchtigungen einer ordnungsgemäßen land-, forst- und fischereiwirtschaftlichen Nutzung, insbesondere Wildschäden, möglichst zu vermeiden. Um dies sicherzustellen, enthalten die Jagdgesetze auch Regelungen zur Wildschadensverhütung. So kann die zuständige Jagdbehörde anordnen, dass der Jagd ausübende unabhängig von den Schonzeiten innerhalb einer bestimmten Frist in bestimmtem Umfang den Wildbestand zu verringern hat, wenn dies mit Rücksicht auf die Interessen der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft und die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege notwendig ist (§ 27 Abs. 1 BJagdG). Wie das Bundeswaldgesetz gibt auch das Bundesjagdgesetz nur sehr allgemeine Rahmenbedingungen vor, sodass die vorrangige Gesetzgebungskompetenz bei den Ländern liegt. Die konkreten Regelungen sind deutschlandweit folglich sehr unterschiedlich ausgestaltet. Und wie auch beim Bundeswaldgesetz mahnen Naturschutzverbände auch beim Bundesjagdgesetz bereits seit Längerem eine Novellierung an, da das seit 1952 kaum veränderte Regelwerk zu wenig auf die Anforderungen einer nachhaltigen Waldwirtschaft ausgerichtet sei (NABU 2008, 2013). Eine Novellierung, die u. a. darauf abzielte, eine »Naturverjüngung des Waldes im Wesentlichen ohne Schutzmaßnahmen« zu ermöglichen (BMEL 2020a), scheiterte 2021 im Bundesrat.

Weitere relevante gesetzliche Regelungen, die als regulative Instrumente im Waldbereich wirken, an dieser Stelle jedoch nicht weiter ausgeführt werden sollen, sind das Forstvermehrungsgutgesetz (Kap. 4.4), das Forstschäden-Ausgleichsgesetz¹⁶, die Wasserhaushaltsgesetze von Bund und Ländern, das Pflanzenschutzrecht (dazu Kap. 4.3) und die Bodenschutzgesetze (WBW 2021, S. 60 ff.). Die rechtlichen Rahmenbedingungen, die Schutz und Nutzung des Waldes regulieren und somit auch für den Waldumbau relevant sind, zeichnen sich also einerseits durch eine große Vielfalt aus, andererseits aber auch durch deutliche Heterogenität, die dem föderalen System Deutschlands geschuldet ist. Auffällig ist, dass es hinsichtlich forstwirtschaftlicher Bewirtschaftungsstandards im Sinne einer guten fachlichen Praxis im Unterschied zur Landwirtschaft kaum bundeseinheitliche Vorschriften gibt, was einer der Gründe ist, wieso immer wieder eine Novellierung des Bundeswaldgesetzes gefordert wird.

2.3 Waldschäden: Auswirkungen des Klimawandels

Der beschleunigte Klimawandel bedroht zunehmend die Integrität der Waldökosysteme in Deutschland. Gerade in den letzten Jahren hat sich der Zustand der Wälder deutlich verschlechtert. Verantwortlich dafür sind die extremen Dürrejahre seit 2018, die zusammen mit Stürmen und Borkenkäferbefall zu großflächigen Schäden in Waldbeständen geführt haben. Für 2023 stellt sich die Situation wie folgt dar:

- Laut Waldzustandserhebung¹⁷ 2022 weisen – über alle Baumarten hinweg – nur knapp 21 % der Bäume keinerlei Kronenverlichtung¹⁸ auf und sind als gesund zu qualifizieren (BMEL 2023a). Der Anteil der Bäume mit deutlicher Kronenverlichtung liegt bei 35 % und ist damit seit 2020 leicht zurückgegangen (2020: 37 %; 2022: 35 %), aber immer noch hoch (2017: 23 %). Die verschiedenen Baumarten sind sehr unterschiedlich betroffen: Besonders geschädigt ist die Buche (45 % deutlich; 21 % ohne), gefolgt von Fichte (40 % mit deutlicher Kronenverlichtung; 24 % ohne Verlichtung), Eiche (40 % deutlich; 19 % ohne) und Kiefer (28 % deutliche; 13 % ohne). Die Bäume mit deutlicher Kronenverlichtung lagen bis 2017 im Durchschnitt im Bereich von 20 bis 25 %, eine sprunghafte Zunahme auf Werte von über 35 % ist 2019 und 2020 erfolgt, wobei ältere Bäume vulnerabler und letztlich stärker geschädigt sind als jüngere (Spathelf 2022, S. 19).
- Mit der Kronenverlichtung korrespondiert die Absterberate der Bäume und schließlich das Ausmaß des Schadholtzfalls. Zwischen 2003 und 2017 lag der Schadholtzanteil am Gesamtschlag etwa bei 10 bis 20 % und schnell während der Dürren zwischen 2018 und 2020 auf eine Rekordhöhe von über 70 % hoch (Spathelf 2022, S. 19f.; Spathelf et al. 2022). Die zwischen 2018 und 2022 angefallene Schadholtzmenge beträgt 222 Mio. Festmeter (Stand: 30.3.2022), davon entfallen 204 Mio. Festmeter auf Nadel- und 18 Mio. Festmeter auf Laubhölzer (BMEL 2023d). Laut Satellitendaten sind auf rund 500.000 ha Fläche Baumverluste zu verzeichnen (Stand: April 2021), was fast 5 % der gesamten Waldfläche entspricht (DLR 2022). Regionale Schadensschwerpunkte liegen vor allem in den Mittelgebirgen (Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Niedersachsen, Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt).

¹⁶ Forstschäden-Ausgleichsgesetz (ForstSchAusglG) vom 29.8.1969, zuletzt am 10.8.2021 geändert

¹⁷ In der seit 1984 jährlich durchgeführten Waldzustandserhebung (WZE) wird die Kronenverlichtung als Vitalitätsindikator nach Baumarten getrennt erfasst.

¹⁸ Anhand Stichprobenpunkten wird der Kronenzustand der Waldbäume beurteilt, wobei die Verlichtung der Baumkronen im Vergleich zu einer voll belaubten bzw. benadelten Krone festgestellt wird (BMEL 2023a, S. 8). Je nach Grad der Verlichtung erfolgt eine Zuordnung zu Schadstufen: ohne Kronenverlichtung (0 bis 10 % Verlust der Blattmasse), schwache Kronenverlichtung (11 bis 25 %), deutliche Kronenverlichtung (26 bis 99 %).

- 2022 brannten europaweit großflächig die Wälder. In Portugal am stärksten, wo ca. 1,1 % der Waldfläche betroffen waren (EK o. J.). Deutschland war zwar weniger stark tangiert, jedoch waren häufige und schwere Waldbrände zu verzeichnen. Mit 4.293 ha lag die Brandfläche 2022 etwa um einen Faktor 10 über dem langjährigen Jahresmittel von 417 ha.

Die beschriebenen Waldschäden haben vielfältige Ursachen. Man unterscheidet abiotische (z. B. Temperatur, Trockenheit, Feuer, Sturm) und biotische (z. B. Insektenbefall) Faktoren (Spathelf 2022, S. 12). Eine wichtige Rolle spielen Extremwetterereignisse wie Hitze, Dürre, Sturm und Spätfrost, die zu großflächigen Kalamitäten führen können. Hinzu kommen verstärkende Faktoren wie Insektenfraß oder Pilzbefall, die dann letztlich Ursache für die letale Schwächung des Baumes sind (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 18). In der Regel setzt also ein Komplex aus schwächenden, auslösenden und verstärkenden Faktoren ein Krankheitsgeschehen in Gang und führt graduell zum Tod des Baumes (Brandl/Falk 2019). Schwächende Faktoren, wie veränderte klimatische Bedingungen, Grundwasserabsenkung, mangelhafte Nährstoffversorgung oder die genetische Veranlagung, wirken über längere Zeit und verringern nach und nach die Vitalität von Bäumen. Auslösende Faktoren haben hingegen einen unmittelbaren Einfluss auf die Vitalfunktionen des Baumes und führen z. B. zu starken Zuwachsvverlusten; dazu gehören Insektenfraß, Frost, Trockenstress oder Stürme. Im Vergleich zu den eher langsamen Wachstumsprozessen von Bäumen geschieht deren Mortalität häufig abrupt, obwohl Wälder für eine gewisse Zeit durchaus Resistenz gegenüber Stressoren zeigen können, ehe dann die mehrfache Überschreitung von kritischen Schwellenwerten zu Störungen und entsprechend schwerwiegenden Folgen für die Ökosystementwicklung führt (Itter et al. 2016). So verursachte die extreme Dürre 2018 in Europa ein noch nie dagewesenes Ausmaß an Waldschäden und dürfte langfristige Auswirkungen auf die Waldstruktur haben, so das Ergebnis einer Studie auf Basis von Satellitendaten (Senf/Seidl 2021).

Weltweit zeigt sich für verschiedene Waldökosysteme, dass die durch Dürre- und Hitzestress bedingte Baum mortalität zunimmt (Allen et al. 2010; Wilkes Center o. J.). Der fortschreitende Klimawandel gilt als einer der maßgeblichen Treiber dieser Entwicklung. Er hat Auswirkungen auf Häufigkeit und Intensität von waldschädigenden Extremereignissen wie Dürren, Stürme oder Hitze (IPCC 2012, S. 111 ff.), auch wenn die konkreten klimawandelbedingten Effekte – umso mehr in ihrer räumlichen Verteilung – aufgrund der natürlichen Variabilität des Wetters schwierig zuzuordnen und noch schwieriger zu prognostizieren sind. Laut einer Auswertung des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik lässt sich der Wissensstand hinsichtlich zu beobachtender Trends und wahrscheinlicher Zukunftsprojektionen für die vier wichtigsten waldschädigenden Extremwetterereignisse wie folgt zusammenfassen (WBW 2021, S. 12 ff.):

- *Dürre*: Die extreme Dürre 2018 ist für Deutschland historisch einmalig und deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit maßgeblich durch den Klimawandel bedingt, wie sich aus meteorologischen Daten ablesen lässt (DWD 2020, S. 42 f.). Auch in einer umfangreichen dendroökologischen Studie wurde gezeigt, dass die rezenten Trockenjahre ab 2015 seit über 2.100 Jahren einmalig in ihrer Intensität sind (Büntgen et al. 2021). Bereits seit 1990 hat deutschlandweit die Intensität des Wassermangels zugenommen, wie Modellierungen auf Basis von Daten aus der Bodenzustandserhebung II zeigen. Jahre mit ausreichender Bodenwasserverfügbarkeit treten seither nur noch sporadisch auf (Puhlmann et al. 2017).¹⁹ Zu erwarten ist, dass sich diese Problematik zukünftig mit fortschreitendem Klimawandel verstärkt und extreme Dürrejahre wie 2018 deutlich häufiger auftreten.
- *Hitze*: Die Häufigkeit von Hitzetagen (≥ 30 °C) hat sich seit 1950 verdreifacht (DKK et al. 2020, S. 14). Das Auftreten neuer Hitzeextreme und intensiverer Hitzewellen in Zukunft wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD2020, S. 43) als sehr wahrscheinlich eingeschätzt. Damit steigt auch die Wahrscheinlichkeit längerer Trockenzeiten, vor allem im Nordosten Deutschlands.
- *Stürme* sind für mehr als die Hälfte der abiotisch verursachten Schadholzmenge in Europa von 1950 bis 2000 verantwortlich (Albrecht et al. 2008). Inwiefern der Klimawandel bereits zu häufigeren und stärkeren Stürmen führte, lässt sich allerdings noch nicht klar nachweisen. In der Zukunft nehmen über der Nordsee und Nordwestdeutschland Starkwindereignisse und starke Böen wahrscheinlich zu. Für andere Gebiete Deutschlands sind keine sicheren Prognosen möglich.
- *Spätfrost*: Mit steigenden Temperaturen kann sich der Vegetationsbeginn früher ins Jahr verschieben, wodurch sich das Risiko von Spätfrost (Frost, der nach Beginn der Vegetationsperiode auftritt) und damit Frostschäden erhöht. Neuere Studien weisen darauf hin, dass Frosttage und -schäden in den letzten Jahren zunahm (Liu et al. 2018). Prognosen für die Zukunft sind aufgrund der inhärenten Modellunsicherheiten

¹⁹ Flächendeckende Informationen zum aktuellen Bodenfeuchtezustand sowie auch im Zeitverlauf seit 1952 liefert der Dürremonitor des UFZ (o. J.)

unsicher, gleichwohl zeigen Untersuchungen im Ergebnis, dass das Risiko von Spätfrostschäden zunehmen könnte.

Trotz der Schwierigkeit, einzelne Wetterereignisse kausal dem Klimawandel zuzuordnen, steht Folgendes weitgehend außer Frage: Die zu beobachtenden klimatischen Veränderungen führen zu tendenziell weiter steigenden Maximaltemperaturen, abnehmenden Jahresniederschlägen und längeren Hitze- und Dürreperioden, wodurch biotische und abiotische Risiken für die an das gemäßigte Klima angepassten Wälder Deutschlands und Mitteleuropas zunehmen (Anderegg et al. 2022; Forzieri et al. 2022; WBW 2021, S. 24 ff). Wie sich diese verändernden Störungsregime auf Waldökosysteme konkret auswirken, ist hingegen kaum genau vorherzusagen. Zum einen hängt dies von den zukünftigen waldbaulichen und klimapolitischen Anpassungsmaßnahmen ab, zum anderen wird die Vulnerabilität der Wälder vom Zusammenspiel mehrerer Faktoren bestimmt wie der »Empfindlichkeit der Baumarten, der Stärke der Wetterextreme sowie der kleinräumigen Standortbedingungen« (Ibisch 2019, S. 10). Bereits Trockenstress ist z. B. sehr unterschiedlich in seiner Wirkung, je nach Baumart (Laubbäume, Nadelbäume) und Alter der Bäume (Jungpflanzen, alte Bäume), nach Jahreszeit des Auftretens (Frühjahr oder Sommer) oder nach Intensität (Häufigkeit der Aufeinanderfolge) (Sanders et al. 2019; Spathelf 2022, S. 18).

Tabelle 2.1 Modellierte Überlebensraten verschiedener Baumarten 2000, 2050 und 2070

Baumartengruppe	Bestände*	mittleres Alter	Überlebensrate		
			2000	2050	2070
Fichte	15.225	68	0,75	0,7	0,68
Buche	13.229	84	0,85	0,82	0,81
Kiefer	13.115	74	0,8	0,76	0,73
Eiche	9.274	84	0,83	0,79	0,76
Douglasie	1.257	47	0,9	0,86	0,83
Tanne	1.314	94	0,83	0,8	0,79

* Als Bestand wird in der Forstwirtschaft ein Waldteil bezeichnet, der sich hinsichtlich Struktur, Alter und/oder Baumart(en) gleicht und von benachbarten Beständen unterscheidet.

Quelle: Bender et al. 2019, S. 18

Die Mortalitätsrisiken und Überlebensraten verschiedener Baumarten und Baumalter lassen sich auf Grundlage von Waldinventuren und Klimaprojektionen grob abschätzen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 18 f.). Untersuchungen im Projekt »Überlebenszeit-Wald-Klimawandel – SURVIVAL-KW« (Laufzeit: 2016–2019; LWF o. J.a) ergaben Überlebenswahrscheinlichkeiten für die Gegenwart (Jahr 2000) der Hauptbaumarten zwischen 75 % (Fichte) und 90 % (Douglasie), wobei jüngere Bestände generell besser abschnitten (Bender et al. 2019).²⁰ Auch die Buche scheint der Fichte deutlich überlegen, weist also für die prognostizierten Klimabedingungen höhere Überlebensraten auf (Tab. 2.1). Als mortalitätsverstärkende Ursachen wurden bei beiden Baumarten steigende Sommertemperaturen identifiziert. Mischung mit anderen Baumarten hingegen reduziert das Mortalitätsrisiko bei beiden Baumarten (siehe auch Brandl/Falk 2019). Die Modellierungen geben auch Hinweise darauf, dass die Überlebenswahrscheinlichkeiten für alle Baumarten bis 2070 klimabedingt weiter abnehmen werden und je nach Wuchsgebiet in Deutschland differieren. So sind vor allem die Fichtenbestände in ihren Hauptverbreitungsgebieten in Süddeutschland gefährdet.

Im Folgenden werden für die vier wichtigsten Baumarten Deutschlands die Vulnerabilität gegenüber klimawandelbedingten Störungen und die daraus erwachsenden Risiken kurz zusammengefasst.

²⁰ Die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeiten (mögliche annehmbare Werte zwischen 0 und 100 %) erfolgte anhand von Daten der Bundeswaldinventur, nach Baumarten getrennt und für die zwei Prognosezeitpunkte 2050 und 2070. Mit Klimaszenarien und einem Überlebensmodell wurden die Überlebenswahrscheinlichkeiten prognostiziert (für methodische Details Bender et al. (2019, S. 18 ff.).

2.3.1 Fichte

Die Fichte (*Picea abies*) ist u. a. aufgrund ihres raschen Wachstums in Deutschland von großer forstwirtschaftlicher Bedeutung und weit über ihr natürliches Verbreitungsgebiet, das sich auf die Alpen und teilweise die Mittelgebirge beschränkt, hinaus anzutreffen. Der Baum ist allerdings sehr wasserbedürftig und außerdem anfällig gegenüber Schädlingen (FNR 2020a, S. 43). Die heißen und trockenen Jahre von 2018 bis 2020 zeigten, dass insbesondere Fichtenwälder extrem stark durch Trockenstress und den sich daran anschließenden Borkenkäferbefall geschädigt wurden (BMEL 2021b; dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 20). Die Ausbreitung der Schadinsekten (vor allem Buchdrucker und Kupferstecher) wurde durch höhere Sommerwärme stark befördert und führte zu mehrfachen Generationszyklen. Kalamitätsverstärkend war das durch Windwurf und -bruch entstehende Brutmaterial. Modellierungen des Thünen-Institutes gehen von einem weiteren Absinken der Überlebensraten von Fichtenbeständen in Deutschland bis 2050 aus (Bender et al. 2019). Dabei steigt die Mortalitätsrate mit zunehmender Sommertemperatur und sinkt mit höheren Niederschlägen und in Mischung der Fichte mit anderen Baumarten (Brandl/Falk 2019). Insbesondere Wälder mit führender Baumart Fichte in Lagen unterhalb von 600 m über NN sind kurz- bis mittelfristig einem hohen Mortalitätsrisiko ausgesetzt. Bolte et al. (2021b) veranschlagen die Fläche dieser gefährdeten Fichtenbestände auf über 2,2 Mio. ha, mit entsprechenden Vorräten an verwertbarem Holz von 880 Mio. m³. Eine Folge der Baum mortalität ist die Entstehung von Schadholz. Schätzungen gehen davon aus, dass etwa 15 % der Fichtenvorräte allein von 2018 bis 2020 in Deutschland verloren gingen (BMEL 2021b, S. 27). Zudem wird das Fichtenschadholz (verpilzt, stamm trocken) in geringwertige Holzsortimente sortiert, mit Preisabschlägen von bis zu 80 % im Vergleich zu Holz mit B-Qualität.

2.3.2 Buche

Ohne einen menschlichen Einfluss wäre Deutschland heute fast ausschließlich mit Buchen- oder Buchenmischwäldern bedeckt. Die Rotbuche (*Fagus sylvaticus*) ist relativ anspruchslos und konkurrenzstark, jedoch anfällig gegenüber Trockenheit und Spätfrost (FNR 2020a, S. 24). Seit einigen Jahren steigen die Schäden in Buchenwäldern deshalb klimawandelbedingt stark an, obwohl viele der Bestände im Kerngebiet der natürlichen Verbreitung dieser Baumart liegen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 20). In diesem Zusammenhang ist auch vom Buchensterben die Rede (DFV o. J.a). Auch nicht mehr genutzte Wälder wie die Kernzone im Nationalpark Hainich, die Heiligen Hallen in Mecklenburg-Vorpommern oder Naturwaldreservate im Steigerwald zählen zu den Schadgebieten. Leuschner (2020) rekapituliert in einer umfangreichen Arbeit die möglichen Vulnerabilitätsfaktoren der Buche wie Hitzeempfindlichkeit der Rinde, Rückgang der Feinwurzeln und Mykorrhizierung²¹ sowie Schwächen in der Wasserleitungsfunktion. Insbesondere Buchenbestände auf flachgründigen Standorten mit einer geringen nutzbaren Boden-Wasserkapazität weisen ein hohes Schadrisiko auf und bedürfen des Waldumbaus.²² Der Umfang dieser Wälder in Deutschland wird auf über 600.000 ha geschätzt.

2.3.3 Kiefer

Die heimische Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) ist nach der Fichte die zweithäufigste Baumart Deutschlands und ebenso wie diese von großer ökonomischer Bedeutung. Im Unterschied zur Fichte gilt sie als äußerst robust und genügsam und kommt auch gut mit Trockenheit zurecht. Dennoch gerät auch sie durch die Auswirkungen des Klimawandels immer stärker unter Druck (Mette/Kölling 2020; dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 20 f.). Seit 2015 werden in einigen Regionen wie Mittelfranken oder Südbrandenburg in einem größeren Umfang Kiefern schäden beobachtet. Es handelt sich hierbei um einen Komplex aus Trocken- bzw. Hitzeschäden, in Kombination mit biotischen Sekundärschädlingen wie dem Diplodiapilz (Triebsterben der Kiefer) und dem Kiefernprachtkäfer. Hinzu kommt die Mistel als weiterer Schwächeparasit. Darüber hinaus führen Sturm und Schneebruch, in Kombination mit periodisch auftretenden Insektenschäden, zu Mortalität bei der Kiefer, ebenso wie Waldbrände, die 2018 und 2019 vor allem in kieferndominierten Wäldern von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern zu Waldverlusten auf mehr als 5.000 ha führten. In Kiefernwäldern auf armen, sandigen Böden ist die Feuergefahr sehr hoch, was vor allem an der Begleitvegetation in diesen Beständen wie z.B. Gräsern liegt (Müller 2019; Seifert et al. 2022, S. 151).

²¹ Unter Mykorrhizierung versteht man die Besiedlung der Feinwurzeln von Bäumen mit Symbiosepilzen. Der Mykorrhizapilz erleichtert die Wasser- und Nährelementaufnahme der Bäume über die Feinwurzelspitzen.

²² Vom Waldumbau ausgenommen sind alte Buchenwälder im Bestand des Bundes, für die seit Anfang 2024 ein Einschlagmoratorium gilt (BMUV 2024).

2.3.4 Eiche

In der jährlichen Inventur zur Erhebung der Waldgesundheit gehören die beiden heimischen Eichenarten Trauben- und Stieleiche seit vielen Jahren zu den am deutlichsten geschädigten Baumarten (dazu und zum Folgenden Spatthelf 2022, S. 21). Das Eichensterben, zu dem vielfältige Faktoren beitragen, ist bereits seit Längerem Gegenstand der Forschung (Kätzel et al. 2006). Prädisponierend für die Vulnerabilität der Eichen ist ihr Wasserleitungssystem. Als ringporige Baumarten, die nur in den beiden äußersten Jahresringen Wasser leiten, sind sie besonders empfindlich gegenüber Schädigungen. Ist es in einem Jahr sehr trocken, werden schmale Jahrringe gebildet, die wenig Wasser transportieren und wenig Reservestoffe aufgebaut. Dies kann zu einem verzögerten Austrieb im Folgejahr führen, denn die zum frühjährlichen Blattaustrieb notwendige Substanz wird aus Reservestoffen des Vorjahres gebildet. Diese Prozesse können zu einer geringen Kronenbildung führen und letztlich eine starke Vitalitätsschwächung bis zur Mortalität auslösen. Trauben- und Stieleiche sind dabei besonders empfindlich gegenüber Frühjahrstrockenheit, weniger gegenüber Sommertrockenheit. Möglicherweise können besser an trockene und heiße Standorte angepasste mediterrane Eichenarten, wie Flaum- oder Zerreiche, die heimischen Eichen in unseren Wäldern teilweise ersetzen.

2.4 Wald im Klimawandel: gesellschaftliche Debatten und politische Strategien

Seit vielen Jahren ist zu beobachten, dass die Auseinandersetzung über Ursachen sowie Implikationen der massiven Waldschäden von verschiedenen gesellschaftlichen Akteuren sehr konfrontativ und unversöhnlich geführt wird (Popkin 2021). Spätestens seit der Aufeinanderfolge von mehreren Trockenjahren ab 2015 (sich seit 2018 noch verstärkend) mit ihren zum Teil katastrophalen Auswirkungen, vor allem in den sehr stark mit Fichten bestockten Gebieten etwa im Sauerland und Harz, in Sachsen und Nordostbayern, wird erneut von einer Waldkrise in Deutschland gesprochen (dazu und zum Folgenden Spatthelf 2022, S. 15). Auch das Wort Katastrophenwald wird beim Anblick der großen Kahlfelder bzw. der abgestorbenen Gerippe der Fichtenwälder bemüht. Im Zuge dessen wird vielfach angezweifelt, ob der Weg, den die deutsche Forstwirtschaft seit Jahrzehnten eingeschlagen hat, der richtige war bzw. ist (der Holzweg, Knapp et al. 2021). Der Forstpartie bzw. den Waldbesitzenden insgesamt (Staats- und Privatbesitz) werden schwere Fehler vorgeworfen, teilweise werden sie als Ursache des Problems angesehen (Bode 2019).

Im Folgenden werden die Grundzüge der Walddebatte beleuchtet und die wesentlichen Streitpunkte herausgearbeitet (Kap. 2.4.1). Sie geben Hinweise auf die inhärenten Zielkonflikte, die den Umgang mit dem Wald im Klimawandel prägen und sich auch in politischen Strategien wiederfinden lassen (Kap. 2.4.2).

2.4.1 Grundzüge der deutschen Walddebatte

Die aktuellen Waldschäden wurden und werden in den Medien breit rezipiert, wobei Schlagworte wie »Jahrhundertkatastrophe«, »Waldsterben 2.0« und »Notstand« häufig auftauchen. Erinnerungen an die Waldsterbedebatte in den 1980er Jahren werden wach (Engel 2020). Wie damals herrscht auch heute zum Teil in der Gesellschaft die Befürchtung vor, dass ein großflächiges Absterben der Wälder – diesmal aufgrund der klimatischen Veränderungen – kaum noch aufzuhalten ist. Naturschutzverbände nutzen dieses Narrativ, um auf die Dringlichkeit einer »ökologischen Waldwende« aufmerksam zu machen (BUND o.J.) Dem wird von manchen entgegengehalten, dass es vor 40 Jahren nicht zum befürchteten Waldsterben gekommen sei und es auch aktuell nicht zu einem Waldsterben 2.0 kommen werde. Falls überhaupt, könne eher nur die Rede von einem spezifischen Forststerben sein, da hauptsächlich Monokulturen aus Fichten und Kiefern von den klimawandelbedingten Veränderungen betroffen seien (Böhmer 2022, S. 96 f.).

Zu konstatieren ist jedenfalls, dass sich Forstwirtschaft und Waldpolitik in Deutschland in einem zunehmend dynamischen gesellschaftspolitischen Umfeld bewegen, in dem Sorgen um die Zukunft des Waldes, unterschiedliche Interessen und wissenschaftliche Unsicherheiten aufeinanderprallen. Dieses hochpolarisierte Diskursumfeld ist nicht neu, sondern prägt schon seit vielen Jahren die gesellschaftlichen Debatten im Waldbereich. In einer im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz durchgeführten Diskursanalyse wurden bereits 2012 zwei sich diametral gegenüberstehende Diskurskonstellationen identifiziert: einerseits die »Wald-Naturschutzkoalition«, andererseits die »Forst/Holz-Koalition«, die hinsichtlich der Bewirtschaftung und Klimawandelanpassung von Wäldern sehr unterschiedliche Standpunkte und normative Überzeugungen haben (Milad et al. 2012). Diese beiden Koalitionen, die jeweils unterschiedliche Akteure umfassen – Naturschutzverbände auf der einen Seite, Organisationen und Verbände des Clusters Forst und Holz auf der anderen –, stehen sich auch heute noch weitgehend unvereinbar gegenüber.

Eine der zentralen Konfliktlinien in den aktuellen Diskursen zum Waldumbau bezieht sich auf die Frage, in welchem Umfang Wälder nachhaltig genutzt bzw. geschützt werden sollten. Auf Naturschutzseite gibt es etliche Stimmen, die fordern, das bedrohte Ökosystem Wald mit seinem unbestrittenen Wert für eine Vielzahl von menschlichen Bedürfnissen (Klimaschutz, Hort der Biodiversität, Lieferant weiterer Ökosystemleistungen) unter einen sehr weitreichenden Schutz zu stellen (WWF 2021). Eine Verschnaufpause für den Wald also, die es ihm ermöglicht, über Selbstregulationsprozesse wieder zu einer stabilen Entwicklung zu kommen, und die seine Resistenz und Resilienz erhöht. Auch der Begriff Waldumbau, der eine gezielte Steuerung der Waldentwicklung impliziert, wird in diesem Zusammenhang teilweise kritisch gesehen (Fenske/Einzel 2022). Dahinter steht die Annahme, dass ungesteuerte Ökosysteme sich selbst infolge evolutionärer Entwicklungsprozesse optimieren und dadurch gegenüber negativ wirkenden Umweltfaktoren weniger vulnerabel sind als vom Menschen aktiv beeinflusste (Wohlleben 2015).²³ Entsprechend fordern auf der einen Seite etwa Naturschutzorganisationen wie der BUND, Naturschutzbund Deutschland (NABU) oder die Naturschutzinitiative eine Abkehr von der intensiv betriebenen Forstwirtschaft in Richtung einer ökologisch verträglicheren Waldbewirtschaftung oder gar einen grundsätzlichen forstwirtschaftlichen Paradigmenwechsel. Diese Waldwende soll eine Minimierung menschlicher Eingriffe bei der Bewirtschaftung der Wälder und einen Verzicht auf vermeintlich naturwidrige Aufräum- und Aufforstungsprogramme wie das künstliche Einbringen nicht standortheimischer Baumarten einschließen (BUND 2020).

Auf der anderen Seite stehen die wirtschaftlichen Belange des Clusters Forst und Holz mit einem jährlichen Umsatz von ca. 187 Mrd. Euro und etwa 1 Mio. Beschäftigten (Jahr 2018; BMEL 2021a, S. 10). Die Befürchtung von Waldbesitzerverbänden und der Holzwirtschaft lautet, dass die Herausnahme von Flächen aus der Waldbewirtschaftung und ein weiterer Rückgang der Nadelholzfläche aufgrund des Waldumbaus zu einer Verknappung des Holzangebots führen (Guericke/Spathelf 2018). Betont wird in diesem Zusammenhang, dass gerade die verstärkte stoffliche Holznutzung, insbesondere der Holzbau, von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele ist, da dadurch klimaschädliche Materialien substituiert werden können (Milad et al. 2012, S. 62 ff.). Schließlich wird auch darauf hingewiesen, dass die Wälder (in Deutschland) Kulturlandschaften darstellen, die seit Jahrhunderten vom Menschen genutzt und verändert wurden. Vielfach sind diese Kulturwälder durch eine beträchtliche Habitatvielfalt gekennzeichnet, die sich bei einer Stilllegung signifikant verringern würde (Milad et al. 2012). Ein Beispiel dafür sind etwa Eichenwälder, die aufgrund der hohen Konkurrenzkraft der Buche mittel- bis langfristig ohne steuernde Eingriffe des Menschen stark zurückgedrängt würden.

Befeuert wird die Debatte nicht nur durch abweichende Interessen, sondern u. a. auch durch wissenschaftliche Unsicherheiten – etwa hinsichtlich komplexer ökosystemarer Zusammenhänge oder auch der weiteren Entwicklung des Klimawandels und seiner Auswirkungen auf die Waldökosysteme. Wie mit Wäldern im Klimawandel umzugehen ist, ist deshalb auch wissenschaftlich umstritten (Kap. 3.5). Unterschiedliche Perspektiven auf Nachhaltigkeit sowie in der Konsequenz unterschiedliche Problemwahrnehmungen spielen ebenfalls eine Rolle (Milad et al. 2012, S. 58 ff.). Wird primär der Aspekt in den Vordergrund gerückt, dass Wälder als wertvolle, biodiversitätsreiche Ökosysteme durch den Klimawandel substanziell bedroht sind – was entsprechend eine Verstärkung der Naturschutzbemühungen erfordert? Oder werden Wälder vor allem als Quelle des nachwachsenden Rohstoffes Holz gesehen, dessen verstärkte Nutzung von großer ökonomischer und klimapolitischer Bedeutung ist? Diese verschiedenen Sichtweisen entsprechen nicht zuletzt unterschiedlichen gesellschaftlichen Zielsetzungen, also dem Schutz der Natur bzw. Biodiversität sowie dem Schutz des Klimas, die in politischen Strategien im Bereich Waldpolitik sowie darüber hinaus jeweils unterschiedlich akzentuiert werden.

2.4.2 Politische Strategien mit Waldbezug: Ziele und Zielkonflikte

Die wesentliche Ausrichtung der nationalen Wald- und Forstpolitik wird in den Waldstrategien vorgegeben. Die erste dieser Strategien wurde von der Bundesregierung 2011 als »Waldstrategie 2020« veröffentlicht. Erklärtes Ziel war, die vielfältigen Ansprüche an den »Natur- und Wirtschaftsraum Wald«, nämlich »Klimaleistung, Biodiversität, Rohstoffe, Erholungsleistung und Energie«, aufeinander abzustimmen und mögliche Konflikte zu lösen (BMELV 2011, S. 3). Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit sollten dabei gleichrangig Beachtung finden, um wirtschaftliche Leistungsfähigkeit mit ökologischer Verantwortung und sozialer Gerechtigkeit zu verbinden (S. 8). Hervorgehoben wurden die »Potenziale der heimischen Wälder zur Verbesserung des Klimaschutzes über die Nutzung von Holz«, gleichzeitig wurde aber auch darauf hingewiesen, dass angesichts der klimatischen Ver-

²³ Der Kontext dieser Bestrebungen, die Natur häufiger und auf größerer Fläche Natur sein zu lassen, sind die Nature-based Solutions beim Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen. Im Kern dieses Ansatzes stehen Maßnahmen zur Lösung von sozioökonomischen Problemen, die natürliche Prozesse nutzen, kostengünstig sind und die Resilienz des betreffenden Systems erhöhen (Salvatori/Pallante 2021).

änderungen »geeignete Anpassungsmaßnahmen« erforderlich sind (BMELV 2011, S. 6). Zu verschiedenen Handlungsfeldern (Klimaschutz und -anpassung, Waldbau sowie Biodiversität und Waldnaturschutz) wurden Herausforderungen beschrieben und Lösungsansätze skizziert. So sollte die biologische Vielfalt im Wald z.B. durch nicht bewirtschaftete Flächen oder Steigerung des Totholzanteils verbessert (BMELV 2011, S. 21), zugleich aber auch die Verwendung von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft zur Substitution energieintensiver Materialien mit nachteiliger CO₂-Bilanz gefördert (BMELV 2011, S. 11) und die Holzernte deutlich gesteigert werden (um rund ca. 100 Mio. m³/Jahr; BMELV 2011, S. 15). Um Letzteres zu erreichen, wurde vorgeschlagen, einen frühzeitigen Umbau der Wälder zu »gemischten, mehrschichtigen, standortgerechten und möglichst naturnahen Bestandesformen mit überwiegend heimischen Baumarten« voranzutreiben, durch den vorübergehend zusätzliche Holz mengen auf den Markt gebracht werden können (BMELV 2011, S. 23).

Konkrete Vorschläge für ein koordiniertes Vorgehen, das diese sehr unterschiedlichen Zielsetzungen im Blick behält und austariert, waren in der Waldstrategie 2020 allerdings nicht zu finden, ebenso wenig wie Zielkonkretisierungen. In der aktuellen »Waldstrategie 2050« ist dieses Manko zum Teil behoben, indem zu zehn verschiedenen Handlungsfeldern (darunter »Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel«, »Biodiversität und Waldnaturschutz«, »Holzerzeugung und Verwendung«, »Waldentwicklung, nachhaltige Bewirtschaftung und Jagd« etc.) u. a. folgende zentrale Meilensteine bis 2030 formuliert wurden (BMEL 2021c):

- Maßnahmenpläne zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel sowie zum Risiko- und Krisenmanagement liegen vor und werden umgesetzt.
- Für Wälder, die besonders von Trockenheit bedroht sind (derzeit geschätzt über 2,85 Mio. ha), sind Umbaupläne erarbeitet und in einem Drittel davon Maßnahmen bereits eingeleitet.
- Die holzbasierten Bioökonomie wird ausgebaut sowie die Holzbauquote im Wohnungsneubau auf 30% erhöht.
- Die biologische Vielfalt im Wald hat sich weiter verbessert durch naturnahe Waldbewirtschaftung und ein kleinräumig stark wechselndes Mosaik unterschiedlicher Waldflächen.
- Die Verjüngung standortgerechter, artenreicher und klimaresilienter Mischwälder aus Naturverjüngung, Saat und Pflanzung erfolgt im Wesentlichen ohne Schutzmaßnahmen vor dem Verbiss durch Wild.
- Systeme zur Honorierung der vielfältigen Ökosystemleistungen des Waldes sind etabliert und werden umgesetzt.

Insgesamt steht die »Waldstrategie 2050« (BMEL 2021c) ganz im Zeichen der Extremwetter der Jahre seit 2017 und den daraus resultierenden Waldschäden. Hervorgehoben wird die Kohlenstoffspeicherwirkung von Wald und Holz, die allerdings durch den fortschreitenden Klimawandel zunehmend bedroht ist. Wald- und Klimapolitik werden folglich in einen engen Zusammenhang gestellt. Übergeordnetes Ziel der »Waldstrategie 2050« ist, »die Wälder in Deutschland mit ihren vielfältigen Ökosystemleistungen für den einzelnen Menschen und die Gesellschaft, die Natur sowie die Wirtschaft zu erhalten und an die sich ändernden klimatischen Bedingungen anzupassen« (BMEL 2021c, S. 3). Das der Strategie zugrunde liegende Leitbild sieht eine integrative Bewirtschaftung vor, sodass Stabilität, biologische Vielfalt, Produktivität und die vielfältigen Schutzleistungen der Wälder sowie ihre Erlebbarkeit zum Wohl der gesamten Gesellschaft nachhaltig gewährleistet sind (BMEL 2021c, S. 6).

In den Reaktionen auf die »Waldstrategie 2050« (bzw. die vorgelegten Entwürfe des BMEL) manifestieren sich die bekannten Konfliktlinien der Walddebatte (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 24 f.). Während Natur- und Umweltverbände im Entwurf eine Bankrotterklärung an die Erhaltung dringend erforderlicher naturnaher Waldökosysteme und eine Missachtung des Stand der Forschung über die Klimawirkung verstärkter Holznutzung sahen (DNR et al. 2021), befürchtete der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik (WBW), dass durch die starke Betonung der CO₂-Speicherung in Waldökosystemen und Produkten die erforderliche Substitutionswirkung energieintensiver Materialien durch die Holznutzung darüber in den Hintergrund gedrängt würde (WBW 2020). Der Deutsche Forstwirtschaftsrat begrüßte dagegen, dass mit der Strategie die forstwirtschaftlichen Leistungen anerkannt würden (DFWR 2021). Der gesamte Prozess für die Erarbeitung einer Waldstrategie 2050 wurde von der neuen Bundesregierung neu aufgesetzt. Die neue Waldstrategie soll 2024 als Strategie der Bundesregierung vorgelegt werden (BMEL 2022c).

Festzuhalten bleibt dennoch, dass die naturnahe Waldbewirtschaftung sowie der Umbau »von reinen Nadelwäldern zu stabileren und artenreicheren Mischwäldern« (BMEL 2021c, S. 24) seit Jahren zu den etablierten forstpolitischen Zielen in Deutschland gehören (BMEL 2014, S. 12). Auch die »Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel« sieht die »stabile, strukturreiche und standortgerechte Entwicklung von Mischwäldern« vor (Bundesregierung 2020b, S. 55). Die Reaktionen, die die Veröffentlichung der »Waldstrategie 2050« durch das

BMEL²⁴ auslöste, machen jedoch exemplarisch deutlich, dass die im Waldstreit zutage tretenden Konflikte zwischen ökonomischen sowie ökologischen Interessen und Zielen damit keineswegs aufgelöst sind. So kritisierten Umwelt- und Naturschutzverbände in einem offenen Brief, dass ein grundlegender Wechsel im Umgang mit dem Wald und der Waldbewirtschaftung nicht zu erkennen sei und insbesondere klare klima- und biodiversitätsrelevante Ziele und Maßnahmen für den Wald nach wie vor fehlten (DNR et al. 2021). Kritisiert wurde auch, dass sich das BMEL vor Veröffentlichung nicht mit dem Bundesumweltministerium abstimme (Bandt 2021). Das Umweltressort macht in der Waldpolitik u. a. »die Bedeutung dauerhaft ungenutzter Wälder für die biologische Vielfalt« stark und hat u. a. die »stärkere Integration des Schutzes der Biodiversität« gefordert (BMU o. J.). Somit bleiben die erwähnten Ziel- und Interessenskonflikte im Spannungsfeld schutz- und nutzungsorientierter Ansätze virulent und spiegeln sich auch in Politikstrategien, die sich nicht direkt auf den Waldbereich beziehen.

Naturschutz- und Biodiversitätspolitik

Die maßgebliche politische Strategie zur Erhaltung der Biodiversität, also der Vielfalt von Arten, Ökosystemen und Genen, die auch für den Naturschutz im Allgemeinen von zentraler Bedeutung ist, ist die 2007 verabschiedete Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt (NBS). Die Bundesregierung setzte damit eine Vorgabe der Konvention über die biologische Vielfalt um, die auf der Rio-Konferenz 1992 der Vereinten Nationen zu Umwelt und Entwicklung erlassen wurden (TAB 2014, S. 78 ff.). Sie verpflichtet alle unterzeichnenden Staaten dazu, Strategien und Maßnahmen zum Schutz und zur nachhaltigen Nutzung der Biodiversität zu erlassen, die seit vielen Jahren in teils dramatischen Ausmaßen abnimmt (BMUB 2014).

Die NBS enthält insgesamt ca. 330 Zielvorgaben mit einem maximalen Zeithorizont bis 2050, wobei geplant war, die prioritären Ziele bis 2020 zu erfüllen. Mittels Indikatoren- und Rechenschaftsberichte werden die Entwicklung der Biodiversität und damit die Erreichung der Ziele kontinuierlich überprüft. Der Rechenschaftsbericht 2014 zeigte diesbezüglich im Ergebnis, dass »die bisher ergriffenen Maßnahmen [nicht ausreichen], die in der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt gesetzten Ziele in allen Teilaspekten zu erreichen« (BMUB 2014, S. 99). Um die Bemühungen zu verstärken, initiierte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) das Handlungsprogramm »Naturschutz-Offensive 2020«, das 40 vordringliche Maßnahmen in 10 Handlungsfeldern umfasste. Eines davon bezog sich auf den Waldbereich und enthielt u. a. folgende priorisierte Ziele bis 2020 (BMUB 2015, S. 19):

- Bäume und Sträucher der natürlichen Waldgesellschaft verjüngen sich ganz überwiegend natürlich.
- Mit naturnahen Bewirtschaftungsformen werden die natürlichen Prozesse zur Stärkung der ökologischen Funktionen genutzt. Alt- und Totholz sind in ausreichender Menge und Qualität vorhanden.
- Der Flächenanteil der Wälder mit natürlicher Waldentwicklung beträgt 5 % der Waldfläche, auf Flächen der öffentlichen Hand 10 %.

Obwohl ökologische, ökonomische und soziale Aspekte entsprechend der Multidimensionalität des Leitbilds Nachhaltigkeit in der Biodiversitätsstrategie gleichermaßen berücksichtigt werden sollen, weist die NBS eine klare ökologische Fokussierung auf. Besonders deutlich wird das an dem Ziel, bis 2020 auf 2 % der Landfläche Deutschlands Wildnisgebiete entstehen zu lassen. Sollte dies auch Wälder umfassen – wovon auszugehen ist – wären die entsprechenden Flächen also jeglicher Nutzung entzogen und eine integrative Bewirtschaftung, wie in der »Waldstrategie 2050« vorgesehen, wäre hier nicht umsetzbar.

Bislang sind nur etwa 0,6 % der Landesfläche für die großflächige Wildnisentwicklung dauerhaft gesichert (vornehmlich in den Kernzonen der Nationalparke, in Teilen der Flächen des Nationalen Naturerbes sowie in einigen großflächigen Naturschutzgebieten), wie im Rechenschaftsbericht 2021 festgestellt (Bundesregierung 2021, S. 41). Spezifisch für den Bereich Wald wird zudem festgehalten, dass sich deren ökologische Wertigkeit in den letzten Jahrzehnten dank naturnaher Bewirtschaftung, dem vermehrten Waldumbau und der gezielten Erhaltung spezifischer Waldstrukturen deutlich verbessert habe (Bundesregierung 2021, S. 39). Dieser Befund stützt sich allerdings hauptsächlich auf die Daten der 3. BWI, die 2011 und 2012 durchgeführt wurde und deren Ergebnisse insbesondere nach den Dürrejahre ab 2018 somit nicht mehr als aktuell anzusehen sind. Zudem stehen immer noch eine Reihe waldbundener Arten auf der Roten Liste gefährdeter Tierarten und insgesamt ergibt sich erneut das Fazit, dass die bisher ergriffenen Maßnahmen nicht genügen, um die in der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt gesetzten Ziele in allen Teilaspekten zu erreichen.

²⁴ Anders als die »Waldstrategie 2020« wurde die »Waldstrategie 2050« nicht als Strategie der gesamten Bundesregierung, sondern als Sektoralstrategie des BMEL veröffentlicht. Grund war, dass das BMEL eine Abstimmung mit den anderen Ressorts vor der Bundestagswahl 2021 nicht mehr für realistisch hielt (WBW 2021, S. 56).

Die Weiterentwicklung der NBS ist aktuell in Arbeit und soll konkretere, prägnantere Ziele und andere Handlungsfelder enthalten (BfN o. J.). Über die konkreten Inhalte ist Anfang 2024 noch nichts bekannt, allerdings soll die 2020 veröffentlichte EU-Biodiversitätsstrategie 2030 berücksichtigt werden. Diese ist Teil des europäischen Green Deals und hat weitreichende Schutzbemühungen zum Ziel. So sollen in Verantwortung der Mitgliedstaaten 30 % der Landfläche geschützt werden (heute 26 %), davon 10 % streng (heute 3 %) (EK 2020, S. 4 f.). Die Ausweitung der strengen Schutzgebiete soll vor allem die verbleibenden Primär- und Urwälder der EU umfassen, die es allerdings noch zu bestimmen gilt. Für Deutschland ist davon auszugehen, dass die streng geschützten Landflächen, die neu hinzukommen müssen, sich überproportional auf Waldflächen beziehen werden, wie das Thünen-Institut festgestellt hat (Isermeyer et al. 2020, S. 10). Noch deutlicher als die nationale Biodiversitätsstrategie sehen die EU-Pläne also eine Einschränkung forstwirtschaftlicher Nutzung vor, was mit dem Leitbild der »Waldstrategie 2050« (integrative Bewirtschaftung, Stärkung der holzbasierten Bioökonomie) schwerlich vereinbar scheint.

Klima- und Energiepolitik

Deutschland hat sich in dem 2021 beschlossenen Bundes-Klimaschutzgesetz²⁵ verpflichtet, den Ausstoß der Treibhausgasemissionen bis 2030 auf minus 65 % (gegenüber 1990) zu senken und bis 2045 klimaneutral zu werden. Der Forstwirtschaft kommt dabei eine wichtige Rolle zu, da vitale Waldökosysteme zum einen in der Baumbiomasse und im Boden Kohlenstoff speichern und zum anderen über die Nutzung des nachwachsenden Rohstoffs Holz fossile Energieträger substituiert werden können. Im Rahmen der UN-Klimarahmenkonvention werden treibhausgasrelevante Maßnahmen wie Brandrodung von Wäldern oder Moorentwässerung, aber auch Kohlenstoffsenken-Wirkungen wie Humusaufbau im Boden im LULUCF-Sektor bilanziert. Nach (nicht mehr ganz aktuellen) Schätzungen leisten Wälder und Holzverwendung in Deutschland einen positiven Klimaschutzbeitrag von jährlich 92 Mio. t CO₂-Äquivalenten, was ca. 11 % der gesamten mittleren Treibhausgas-Emissionen in Deutschland von 2012 bis 2017 entspricht (Bolte et al. 2021a). Sowohl die Verbesserung der Treibhausgasenkenleistung des Waldes als auch die verstärkte Holzverwendung in energetischer und stofflicher Hinsicht gehören damit zu wichtigen klima- und energiepolitischen Zielsetzungen in Deutschland. Damit die Senkenwirkung der Wälder erhalten bleibt, ist allerdings ihre möglichst nachhaltige Bewirtschaftung erforderlich –, was mit dem Ziel einer verstärkten Nutzung des Rohstoffes Holz in Konflikt geraten kann.

Dieses Spannungsfeld deutet sich in verschiedenen energie- und klimapolitischen Strategien an. So z. B. im »Klimaschutzplan 2050« von 2016, in dem der Waldschutz und die nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder als wichtige Maßnahme hervorgehoben werden (BMU 2016, S. 68). Die Holzverwendung soll gefördert werden, allerdings im Rahmen der Grenzen einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung. Um den Zielkonflikt zwischen Holznutzung und Nachhaltigkeit zu entschärfen, wird angestrebt, »dass Holz zur Verlängerung der Kohlenstoffkreisläufe dort wo möglich und sinnvoll zunächst stofflich und erst in der Folge energetisch verwertet werden« sollte (BMU 2016, S. 69). Aspekte der intelligenten Holzverwendung sowie der nachhaltigen Forstwirtschaft wären zudem eng mit den »Erfordernissen der Ressourcen- und Materialeffizienz zu verzahnen« (BMU 2016, S. 68). Als Meilenstein wird dabei auf die Neuauflage der »Charta für Holz« verwiesen.

2017 vom BMEL veröffentlicht, werden mit der »Charta für Holz 2.0« (BMEL 2021a) drei hauptsächliche Ziele verfolgt: Schutz des Klimas durch nachhaltige Holzverwendung, Stärkung des Clusters Forst und Holz und Schonung endlicher Ressourcen. Die Charta basiert auf dem Grundverständnis, dass Wälder als wichtige Ökosysteme nicht nur Holz, sondern viele andere wichtige Funktionen bereitstellen (Bodenschutz, Trinkwasserversorgung, Reinhaltung der Luft etc.), die es durch eine nachhaltige Bewirtschaftung zu sichern gilt. Für sieben prioritäre Handlungsfelder²⁶ werden Ziele formuliert. So sollen etwa die Potenziale im Holzbau besser genutzt und die Holzbauquote gesteigert (Handlungsfeld »Bauen mit Holz in Stadt und Land«), der Anteil an stofflich genutztem Laubholz erhöht (Handlungsfeld »Potenziale von Holz in der Bioökonomie«), das Waldholzpotenzial langfristig gesichert (Handlungsfeld »Ressource Wald und Holz«) sowie Umsatz und Wertschöpfung im Cluster Forst und Holz gesteigert werden (Handlungsfeld »Cluster Forst und Holz«).

Im Kontext der »Charta für Holz 2.0« spielt im Förderprogramm »Nachwachsende Rohstoffe« des BMEL der Förderschwerpunkt »Stärkung der nachhaltigen Forstwirtschaft zur Sicherung der Waldfunktionen« (FNR 2017) eine zentrale Rolle (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 25). Im Mittelpunkt stehen Vorhaben, die Konzepte und Maßnahmen zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung analysieren und weiterentwickeln und dabei

²⁵ Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12.12.2019, zuletzt am 18.8.2021 geändert

²⁶ Bauen mit Holz in Stadt und Land, Potenziale von Holz in der Bioökonomie, Material- und Energieeffizienz, Cluster Forst und Holz, Ressource Wald und Holz, Wald und Holz in der Gesellschaft, Forschung und Entwicklung

die Ansprüche der Waldbesitzenden und der Holzwirtschaft ebenso im Blick haben wie gesellschaftliche Anforderungen. Der Fokus liegt auf der Stärkung der klimafreundlichen und innovativen Holzverwendung (insbesondere im Bereich Bauen) sowie auf der stofflichen Verwendung von Laubholz, der Kreislaufwirtschaft und der Kaskadennutzung.²⁷

Dieser eher ganzheitliche Ansatz, nämlich Schutz der Waldökosysteme, ihrer Ressourcen sowie ökologischer Funktionen durch nachhaltige Nutzung, kommt auch in der Nationalen Bioökonomiestrategie zum Ausdruck. Die Forstwirtschaft wird dort als zentrales Standbein einer biobasierten Wirtschaft bezeichnet und die nachhaltige Steigerung der Produktivität (unter Bedingung der Wahrung von Biodiversität) sowie die nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung biogener Rohstoffe als wichtige Handlungsfelder benannt (Bundesregierung 2020a). Parallel dazu wird derzeit die Biomassestrategie der Bundesregierung ausgearbeitet. Ein Eckpunktepapier liegt seit Oktober 2022 vor (BMWK et al. 2022). Unter anderem soll über diese Strategie die Biomassenutzung anders eingebettet und organisiert werden (Welle et al. 2022, S. 25). Denn sie steht nach Ansicht der Bundesregierung »häufig in Konkurrenz zu der im Bundes-Klimaschutzgesetz verankerten Stärkung der Klimaschutzleistung natürlicher Ökosysteme, zu Zielen des Umweltschutzes und der agrar-ökologischen Wende« (BMWK et al. 2022, S. 1). In beiden Strategien – Biomassestrategie (gemäß vorliegenden Eckpunkten) sowie Nationale Bioökonomiestrategie – wird die Forderung aus dem »Klimaschutzplan 2050« aufgegriffen, dass im Sinne einer effizienten, klimaschonenden Ressourcennutzung die langfristige stoffliche Nutzung Priorität vor der energetischen Verwertung haben sollte (Kaskadennutzung).

Dies entspricht jedoch noch nicht der tatsächlichen Praxis. Nach wie vor ist Holz ein wichtiger Energieträger. Fast die Hälfte des Holzes wird in Deutschland energetisch genutzt (60 Mio. m³(s) Holz in 2020), wobei die Wärmeerzeugung von Privathaushalten sowie die Verwertung in Biomasseanlagen etwa je 50 % ausmachen (Hennenberg et al. 2021, S. 20). Befördert wird dies durch gesetzliche Rahmenbedingungen und Fördermaßnahmen, durch die starke Anreize zur energetischen Holzverwendung gesetzt werden. Zu erwähnen ist hier insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz²⁸, das Vergütungssätze für die Einspeisung erneuerbarer Energieträger in den Strommarkt vorsieht, wozu auch Biomasse wie Holz gehört. Auch in der EU macht Biomasse mit ca. 60 % den Hauptanteil an erneuerbaren Energien aus. Die energetische Holzverwertung trägt davon die Hauptlast (EK 2019). Inwiefern das Verbrennen von Holz zur Erzeugung von Strom und Wärme auch zukünftig als nachhaltig anerkannt werden soll (und entsprechend gefördert werden kann), war einer der Streitpunkte bei den mehrjährigen Verhandlungen auf EU-Ebene zur Novellierung der Richtlinie (EU) 2023/2413²⁹ (nachfolgend EER III). Mit EER III strebt die EU an, den Anteil der erneuerbaren Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Transport bis 2030 deutlich zu erhöhen (von 32 % [Zielvorgabe EER II von 2018] auf 42,5 % [Zielvorgabe EER III]) (BMWK 2023). Nachdem das EU-Parlament erst anderes beschlossen hatte (Schulzki-Haddouti 2022), steht im Ergebnis der Verhandlungen fest, dass Holz weiterhin als erneuerbarer Energieträger gilt und auch das Verbrennen von Primärholz, bei Einhaltung bestimmter Nachhaltigkeitskriterien, von den EU-Staaten auf ihre Erneuerbaren-Ziele anrechenbar ist (Kirchner 2023). Dies wurde von Umweltschutzverbänden, die eine weiter steigende Nachfrage nach Energieholz und negative Auswirkungen auf die Wälder befürchten, scharf kritisiert (AGRA-Europe 2023). Die Forstwirtschaft begrüßte hingegen die Entscheidung. Wie die Arbeitsgemeinschaft Deutscher Waldbesitzerverbände (AGDW) mit Bezug auf Eckpunktepapier der Biomassestrategie anmerkte, brächte die stoffliche Nutzung in der Regel höhere Erträge, aber alles andere Holz, das vorrangig beim Durchforsten oder als Kronenholz bei der Erntennutzung anfällt (vor allem auch bei kleineren Flächen), werde als Brennholz genutzt (Koch 2022a). Diese Form der Brennholznutzung habe eine erhebliche Bedeutung für die Pflege von Kleinprivatwald.

Die weitere Ausgestaltung der klima- und energiepolitischen Rahmenbedingungen hat wesentlichen Einfluss auf die Nutzung von Biomasse und damit auch direkten Einfluss auf die Art und Weise, wie Wälder zukünftig bewirtschaftet werden. Dabei zeigen sich dieselben widerstreitenden Positionen, die auch die Walddebatte prägen. Während die Forstwirtschaft kürzere Umtriebszeiten und eine verstärkte Holznutzung präferiert, verweisen Naturschutzverbände darauf, dass eine naturnahe Waldbewirtschaftung zu bevorzugen sei, da Wälder mit hohem Totholzanteil eine höhere Senkenleistung bei der Kohlenstoffbindung erbringen (Ibisch et al. 2021).

²⁷ Auch die 2023 von der Bundesregierung verabschiedete ressortübergreifende Holzbauinitiative, die »den Einsatz des nachhaltigen Rohstoffes Holz im Bausektor stärken und für mehr Klimaschutz, Ressourceneffizienz und schnelleres Bauen sorgen« soll (BMWSB 2021), strebt eine Kaskadennutzung sowie die Sicherung nachhaltiger Rohstoffversorgung und Wertschöpfungsketten an (BMWSB/BMEL 2023).

²⁸ Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2023) vom 21.7.2014, zuletzt am 5.2.2024 geändert

²⁹ Richtlinie (EU) 2023/2413 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652

2.5 Fazit

Die Waldökosysteme in Deutschland stehen unter massivem Druck: Dürren, Luftschadstoffe, Schädlinge und Brände haben den Wald in den letzten Jahren stark geschädigt. Der fortschreitende Klimawandel als einer der maßgeblichen Treiber dieser Situation könnte zukünftig zu einer weiteren Verschlechterung des Waldzustandes und langfristig sogar zu einer Destabilisierung der Waldökosysteme führen, sollte es nicht gelingen, diese resilienter gegenüber Klimaveränderungen zu machen.

Der Umbau von Monokulturen oder artenarmen hin zu standortangepassten, artenreicheren, altersgemischten Beständen und naturnäheren Mischwäldern gilt forstpolitisch als wichtigster Ansatzpunkt, um die nationalen Waldbestände vitaler und stabiler zu machen sowie deren Funktionen auch unter sich ändernden klimatischen Bedingungen zu sichern. Aufgrund der Dynamik des Klimawandels und der langen Entwicklungszyklen von Bäumen ist jedoch noch ungewiss, welche Maßnahmen sich langfristig als nachhaltig erweisen werden. Während etliche heimische Baumarten zunehmend unter Trockenstress geraten und Schaden nehmen, werden gebietsfremde Arten u. a. wegen ökosystemarer Risiken (ungebremste Diffusion, Veränderung von Nährstoffkreisläufen, Ressourcenkonkurrenzen) teilweise kritisch gesehen.

Darüber, welche Rolle der Forstwirtschaft (und welche Form der Bewirtschaftung) bei der Bewältigung von Waldkrisen aber auch bezüglich ihrer Mitverursachung zukommt, wird seit dem Auftreten der ersten großflächigen Waldschäden in den 1980er Jahren gerungen (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 21 f.). Einer der grundlegenden Streitpunkte spannt sich entlang der Frage auf, wie viel Holznutzung und in welcher Form unter diesen Bedingungen zielführend ist. Auch wenn sich einige Positionen inzwischen angenähert haben – weg vom kahlschlagwirtschaftlich geprägten monokulturellen Altersklassenwald hin zu strukturreichen stabilen Mischwäldern – bleibt weiterhin umstritten, wie viel Waldnatur der Selbstorganisation überlassen bleiben darf und wie viel aktiv-gestalterisch eingegriffen werden soll. Es geht dabei nicht nur um Flächenanteile, sondern auch um Bewirtschaftungsansätze und ihr Wirkungspotenzial auf den Wald und seine gesellschaftlich relevanten Beiträge. Die Zusammensetzung der Akteure, die inhaltlich konträre Positionen vertreten, bleibt dabei seit Jahren ähnlich und verweist auf eine lange Tradition und Beharrlichkeit an Konflikten. Dies äußert sich in hitzigen Debatten zu nahezu jedem neu aufgelegten Programm oder (weiter)entwickelter walddpolitischer Strategie oder Fördermaßnahme.

Der Schutz der Wälder und die Förderung der Forstwirtschaft sind Ziel zahlreicher Strategien bzw. Initiativen der Weltgemeinschaft, der Europäischen Union und Deutschlands (Bund und Länder) (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 27 f.). Die daraus resultierenden und teilweise sehr komplexen Maßnahmen haben beträchtliche Auswirkungen auf den Wald und die Forstwirtschaft. Inwiefern diese einander verstärken oder aber konterkarieren, ist nicht einfach zu beantworten. Denn die in den verschiedenen Programmen, Strategien oder Maßnahmenkatalogen formulierten Ziele (Förderung der Forstwirtschaft, Schutz von Wäldern oder Anknüpfung der Holznutzung) sind bei genauerer Betrachtung äußerst konfliktträchtig. Aktuell umfasst die politische Förderlandschaft noch eine Vielfalt an Strategien, die auf unterschiedlichen Ebenen und meist sektoral ansetzen und unzureichend oder gar nicht aufeinander bezogen sind. Das macht es schwierig, Wirkungen konkret zuzuordnen oder Lenkungsfunktionen erkennen zu können, und erschwert ein langfristiges, strategisches Vorgehen. Heterogene Eigentumsstrukturen und Bewirtschaftungsgrößen, föderale Rahmenbedingungen sowie unterschiedliche Nutzungsinteressen und teils begrenzte finanzielle Handlungsmöglichkeiten der Eigentümer/innen sind zusätzliche Herausforderungen.

3 Anforderungen an den naturnahen Waldumbau und resiliente Waldökosysteme

Schon in der von 2011 stammenden Waldstrategie 2020 (BMELV 2011) sowie in der 15 Jahre alten nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (BMUB 2007) wurden naturnahe oder natürliche Waldgesellschaften als eine notwendige Voraussetzung für die Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel angesehen. Betont wurde in diesem Kontext und im Hinblick auf die Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion der Wälder die Notwendigkeit der Erhaltung ihrer (ökologischen) Funktionsfähigkeit insbesondere durch naturnahen Waldbau bzw. Waldumbau. Angesichts der massiven Auswirkungen der Dürre- und Hitzejahre seit 2018 auf die Wälder – in Kombination mit Sturmereignissen und Schädlingsbefall – wurden diese Ziele vielfach bekräftigt (BfN 2020; BMUB 2015; Brang et al. 2014). Demnach soll ein naturnaher Waldbau die Anpassungsfähigkeit, Resilienz und Resistenz der Wälder unterstützen und zugleich deren Vitalität und Produktivität auch bei immer häufigeren Witterungsextremen im sich verstärkenden Klimawandel fördern. Was allerdings in der Praxis ein naturnaher Wald(um)bau ist oder sein könnte, dazu gibt es weder eine genaue Definition noch eine einheitliche Referenz zur Bewertung der Naturnähe von Wäldern. Das liegt vor allem daran, dass es in Deutschland keine über Jahrhunderte vom Menschen unbeeinflussten Wälder mehr gibt (Volk/Spathelf 2023).

Relativ eindeutig ist die Beobachtung, dass sehr viele Wälder gegenüber den häufigeren oder gar permanenten Hitze- und Trockenperioden immer anfälliger werden. Dies betrifft insbesondere Reinbestände aus Nadelholzarten. Diese zeichnen sich generell durch geringere Ökosystemleistungen und Anpassungsfähigkeiten aus als arten- und strukturreiche Wälder. Der aktuelle Waldökosystemwandel ist jedoch ein sehr vielfältiges Geschehen, das durch natürliche Organismenausbreitungen, Arealverschiebungen, kontinuierlich zunehmende anthropogene Überprägungen der Landschaften, Lebensraumfragmentierungen und diversen (Schad-)Stoffeinträgen sowie vor allem durch Klimaveränderungen und deren Auswirkungen beeinflusst wurde und wird. Beim Waldumbau handelt es sich also um einen dynamischen und ergebnisoffenen Prozess, der nicht an einem bestimmten Punkt endet, sondern stetig voranschreitet (Ibisch 2019, S. 3). Das alles führt zu zunehmenden Unsicherheiten hinsichtlich einer klimaresilienten Bewirtschaftung der Wälder (Stark et al. 2019, S. 14 f.), vor allem, da die Forstwirtschaft durch besonders langfristig wirkende Entscheidungen geprägt ist.

Im Folgenden werden in enger Anlehnung an das Gutachten von Spathelf (2022) die Anforderungen an den naturnahen Waldumbau und resiliente Waldökosysteme beleuchtet. Zunächst bietet Kapitel 3.1 einen Überblick zum Stand des naturnahen Waldbaus in Deutschland und es werden die unterschiedlichen waldbaulichen Konzepte und Verfahren vorgestellt, die darauf abzielen, einen optimal strukturierten, nachhaltig funktionsfähigen Zustand der vom Menschen genutzten Wälder zu erreichen. Die Eigenschaften resilienter Waldökosysteme sowie zentrale Aspekte zu Anpassungserfordernissen werden in Kapitel 3.2 näher beleuchtet, während sich Kapitel 3.3 mit den Arealstabilitäten der wichtigsten Baumarten in Deutschland sowie möglichen Baumarten für den Wald der Zukunft befasst. Der aktuelle Stand der Forschung zur Vermeidung von Wildschäden im Wald sowie zur Waldbrandprävention wird in Kapitel 3.4 dargestellt. Anknüpfend an die vorherigen Kapitel diskutiert das Kapitel 3.5 resümierend und perspektivisch die Implikationen für das Waldmanagement, orientiert an der Idee einer zielführenden Multifunktionalität von Wäldern und einem ganzheitlichen Ökosystemmanagement. Das Kapitel schließt mit einem Fazit (Kap. 3.6).

3.1 Naturnaher Waldumbau

Waldumbau umfasst eine Reihe von Maßnahmen, die darauf abzielen, einen optimal strukturierten, nachhaltig funktionsfähigen Zustand der vom Menschen genutzten Wälder zu erreichen (Thomasius 1996; dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 11). Unter naturnahem Waldumbau wird im mitteleuropäischen Kontext die Überführung von gleichaltrigen Reinbeständen (zum Teil aus naturfernen Baumarten bestehend) in strukturierte, möglichst ungleichaltrige Dauerwälder verstanden (Fritz 2006).³⁰ Der Waldumbau ist als Ziel und Fördertatbestand inzwischen Gegenstand fast aller Waldbaustrategien auf Bundes- und Landesebene (Kap. 2.4.2).

Der Klimawandel ist eine der bedeutendsten aktuellen und zugleich langfristigen Herausforderungen für die Forstwirtschaft, wobei die Geschwindigkeit des Klimawandels und das Eintreten der resultierenden (zumeist negativen) Auswirkungen besonders problematisch ist (Kap. 2.3). Bäume sind langlebig und ortsfest und Waldbestände sind in ihrer Lebensspanne sehr unterschiedlichen Umwelt- und Wachstumsbedingungen ausgesetzt. Können sich Wälder nicht an Umweltveränderungen anpassen, wird der einzelne Baum geschwächt, darüber hinaus aber auch das gesamte Waldökosystem gestört. Durch den Klimawandel bekommen Waldbäume, die heute noch relativ gut an die Klimabedingungen ihres Standortes angepasst sind, zukünftig möglicherweise zunehmende Probleme mit

³⁰ Seit kurzer Zeit findet auch der internationale Begriff Restoration (also Restauration, Renaturierung) Anwendung (WBW 2021).

den sich häufenden Wetterextremen oder mit einer zunächst schleichenden, dann sich beschleunigenden Änderung der Standortbedingungen. Klar ist deshalb, dass Forstwirtschaft durch den Klimawandel risikoreicher wird: Die zukünftigen Veränderungen der Wuchsbedingungen müssen berücksichtigt werden, ohne das Wissen, wo und in welchem Umfang sich welche Veränderungen vollziehen werden (Bauhus 2022).

Der Gedanke der Nachhaltigkeit ist in der Forstwirtschaft bereits seit über 300 Jahren verankert (Kap. 2), wird jedoch aktuell besonders auf die Probe gestellt. Klimawandelwirkungen auf Wälder und die resultierenden Notwendigkeiten sowie Möglichkeiten der Klimawandelanpassung in der Waldbewirtschaftung werden seit andert-halb Jahrzehnten recht intensiv diskutiert. Dies hat nach Ansicht einiger Forstwissenschaftler aber nicht dazu geführt, dass die Forstwirtschaft auf die seit spätestens 2018 eingetretene Waldkrise wirklich vorbereitet gewesen wäre und komplexere Anpassungsstrategien vorlägen (Höltermann 2021; Ibisch 2019). Außer Frage steht, dass u. a. die Vielfalt von Mischwäldern und somit auch die Baumartenmischung ein wichtiger Ansatz zur Stabilisierung und Vitalisierung der Bestände sowie zur Erhaltung der Waldfunktionen und zur Steigerung ihrer Resilienz ist (Kap. 3.3).

3.1.1 Stand in Deutschland

Deutschlands Wälder durchliefen in den vergangenen Jahrhunderten mehrere Phasen der Transformation. Während das Verhältnis von Laub- und Nadelholz um das Jahr 1300 noch bei ca. 70 % zu 30 % lag, war es Anfang des 20. Jahrhunderts 30 % zu 70 %. Seit einigen Jahrzehnten findet, vor allem im öffentlichen Wald, ein (ökologischer) Waldumbau in die umgekehrte Richtung statt: Die einförmigen, naturfernen Nadelwälder werden in vielfältigere, strukturierte Mischwälder mit einer höheren ökologischen Qualität und Stabilität umgebaut, wobei die Entwicklung im Privatwald am wenigsten weit vorangeschritten ist (Spathelf 2022, S. 12). Schon seit Anfang der 1990er Jahre fördert der Bund gemeinsam mit den Ländern Maßnahmen des Waldumbaus, hauptsächlich über die GAK (zur forstlichen Förderung siehe auch Kap. 5.3). Von 2020 bis 2023 wurden der Waldumbau und die Wiederbewaldung der Schadflächen u. a. mit 800 Mio. Euro aus Bundes- und Landesmitteln gefördert.

Ende 2021 lässt sich der Stand zum Waldumbau in Deutschland wie folgt zusammenfassen (BMEL 2014 u. 2021c; UBA 2019). Zu bemerken ist, dass die Daten bisher meist nur den Stand bis 2012 abbilden (Stichjahr der 3. BWI), da die Ergebnisse der aktuellen Bundeswaldinventur 4 erst Ende 2024 veröffentlicht werden:

- Das Verhältnis Nadelbäume–Laubbäume beträgt aktuell 55:45, was im Vergleich mit 1990 – als es noch 66:34 betrug – eine deutliche Entwicklung anzeigt. Die 3. BWI machte deutlich, dass von 2002 bis 2012 die Fläche mit (zum Teil ausschließlichen) Fichtenbestand um 242.000 ha (8 %) ab- und die Buchenfläche um 102.000 ha (6 %) zunahm.³¹ Neben der Buche stieg auch der Flächenanteil der anderen Laubbaumarten (leicht) an. Bei den Nadelbäumen haben nur die Douglasie um ca. 35.000 ha (19 %) und die Tanne um knapp 19.000 ha (11 %) geringfügig zugelegt, die Fläche mit Kiefern hat dagegen um ca. 85.000 ha (3 %) abgenommen. Besonders in den jüngeren Altersklassen fällt der Rückgang der Kiefer auf.
- Etwa 75 % der deutschen Wälder sind Mischwälder mit zwei oder mehr Baumarten. Die Tendenz ist weiter leicht steigend.
- Etwa ein Viertel des Waldes ist über 100 Jahre alt und die jüngeren Wälder (bis 20 Jahre) sind zu 85 % aus Naturverjüngung hervorgegangen.

Insgesamt gesehen konzentriert sich der Waldumbau zumeist auf Reinbestände der Fichte und Kiefer und ist zudem von 2002 bis 2012 eher langsam vorangekommen (Spathelf 2022, S. 13). Der Anteil der Fichtenbestände mit hohem bis sehr hohem Klimarisiko (= Trocken- und Borkenkäferisrisiko) von 12,5 % ist in diesem Zeitraum kaum zurückgegangen (UBA 2019, S. 115).

Der beschleunigte Klimawandel und die aktuellen Dürreschäden haben mittlerweile vielfach zu einer Neubetrachtung des Risikos geführt, insbesondere im Bereich von labilen Fichtenbeständen in Höhenlagen unterhalb von 600 m sowie labilen Buchenbeständen mit geringer standörtlicher Wasserverfügbarkeit (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 13 f.). Nach Berechnungen des Thünen-Institutes für Waldökosysteme müssen in Deutschland etwa 2,2 Mio. ha Fichtenwälder sowie 620.000 ha Buchenwälder dringend zu Mischwäldern umgebaut werden, dazu kommen mindestens 500.000 ha Schadflächen, die aktuell zur Wiederbewaldung anstehen (Bolte et al. 2021b).

³¹ Bereits zwischen 1987 und 2002 hatte die Fichtenfläche in den alten Bundesländern um 219.000 ha (8 %) ab- und die Buchenfläche um 151.000 ha (12 %) zugenommen, eine Entwicklung, die durch Sturmereignisse und Trockenjahre zusätzlich verstärkt wurde.

Um diesen Waldumbaubedarf bis etwa 2050 zu bewältigen, müssten jährlich knapp 100.000 ha Wald angepasst werden (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 14). Bei der Fichte sind dies die unteren und mittleren Lagen der Mittelgebirge, bei der Buche hauptsächlich kalkreiche Mittelgebirgs- aber auch Tieflandstandorte. Nach Angaben des UBA-Monitoringberichts wurden in Deutschland zwischen 2000 und 2017 jährlich etwa 22.000 ha Wald umgebaut (über alle Waldbesitzarten) (UBA 2019, S. 128). Das bedeutet, dass der naturnahe Waldumbau zukünftig erheblich beschleunigt werden muss. Mit dem vorläufigen Ende des Umbaus der noch verbliebenen Reinbestände endet jedoch nicht der weitere, kontinuierliche Anpassungsbedarf der Waldbewirtschaftung an den fortschreitenden Klimawandel. Anhand der Bayerischen Staatsforsten (BaySF), einem der größten Waldbesitzenden Mitteleuropas, wird eine aktuelle konkrete Waldumbauplanung in Kasten 3.1 exemplarisch dargestellt.

Kasten 3.1 Beispiel Waldumbau Bayerische Staatsforsten

Ziel des *Waldumbaus* sind stabile und strukturreiche Mischwälder, die zu mindestens 30 % aus Laubbäumen oder standortsangepassten und damit stabilen Nadelbäumen wie der Weißtanne bestehen (von BaySF auch als Klimawald bezeichnet). Bestehender oder durch Waldumbau begründeter Mischwald mit unterschiedlichem Aufbau und Alter der Bäume und mit Verjüngung unter dem Kronenschirm des Altbestandes hat ein hohes Selbstheilungsvermögen bei schadensbedingten Störungen und im Klimawandel. Auch bei Kalamitäten entstehen keine großen Kahlflächen. Zielgerichtete Durchforstungen und Pflegemaßnahmen fördern die erwünschten Laubholz- und Tannenanteile.

Herleitung des Waldumbaubedarfs (Angaben nach BaySF zum 1. Juli 2018): Es müssen 19.000 ha Fichtenwälder im Alter zwischen 40 und 80 Jahren und 87.000 ha Nadelwälder aus Fichte und Kiefer, die älter als 80 Jahre sind, umgebaut werden. Davon entfallen 7.000 ha auf natürlich vorkommende Nadelwälder in Höhenlagen bis zu 1.400 m, im Hochgebirge bzw. in den Mittelgebirgen bis 1.000 m über N.N., für die kein Umbauebedarf entsteht. Daraus ergeben sich insgesamt 99.000 ha Nadelwälder mit Handlungsbedarf zum Waldumbau.

Geplanter Abschluss des Waldumbaus: Im langfristigen Mittel werden in den Bayerischen Staatsforsten jährlich etwa 2.000 ha neue Kulturen geschaffen, d. h., die Verjüngung wird aktiv durch Pflanzung oder Saat in Altbeständen eingebracht. Zudem entsteht die neue Waldgeneration zu etwa drei Viertel aus Naturverjüngung. Insgesamt resultiert daraus ein jährlicher Umbau von rund 7.000 ha Nadelholzreinbeständen in klimatoleranten Mischwald (ursprünglich geplantes Ende: 2032). Aufgrund einer aktuellen Beschleunigung der jährlichen Umbaufläche auf 8.000 ha wird der Umbau voraussichtlich 2030 vorläufig abgeschlossen sein.

Quelle: Spathelf 2022, S. 15; BaySF o. J.

3.1.2 Waldbauliche Konzepte und Verfahren

Für die Erhöhung der Alters- und Strukturdiversität von Wäldern, und damit auch für deren Klimawandelanpassung, ist die Wahl eines passenden Waldbausystems die entscheidende Steuerungsgröße. Ein Waldbausystem umfasst alle Maßnahmen, die auf Bestandesebene von der Verjüngung über die Pflege bis zur Ernte der Bäume stattfinden (Spathelf 2022, S. 39). Unterschiedliche Waldbausysteme folgen dabei unterschiedlichen Konzepten (hierzu vertiefend Kap. 5).

Die nach wie vor häufigste Betriebsart in Deutschland (besonders im Privatwald) ist die Altersklassenwaldwirtschaft, die sich hauptsächlich an betriebswirtschaftlichen Kriterien orientiert. Die Altersklassenwaldwirtschaft erfolgt zumeist mit schnell wachsenden Baumarten, wozu primär Nadelhölzer gehören. Annähernd gleichaltrige Baumbestände mit einer sehr geringen Anzahl von Baumarten werden (jeweils nach Erreichen der Umtriebszeit = Maximum der Wertleistung) in einem Zyklus von Pflanzung, Pflege, Ernte und erneutem Pflanzen bewirtschaftet. Ertragsstarke Baumarten werden gepflegt, ertragsschwache durch verschiedene Maßnahmen verbessert oder entfernt und Freiflächen schnell wieder aufgeforstet (z. B. nach erfolgter Abholzung oder nach Schadereignissen wie Sturm, Feuer, Insektenkalamitäten). Es erfolgen regelmäßige intensive Durchforstungen zur Negativauslese von Bäumen. Totholz wird normalerweise vollständig entfernt (DFV o. J.b). Der Altersklassenwald ist besonders maschinen- und rationalisierungsfreundlich und die Waldnutzung wird somit auch technisch optimiert durchgeführt. Auch aus diesem Grund ist er bisher trotz hinreichend bekannter Probleme in der forstlichen Betriebspraxis, vor allem im Privatwald, relativ beliebt.

Daneben haben sich in den letzten Jahrzehnten aber auch alternative Bewirtschaftungsformen etabliert, die die Überführung von gleichaltrigen Reinbeständen (zum Teil mit naturferner Baumartenzusammensetzung) in strukturierte, möglichst ungleichaltrige Mischwälder zum Ziel haben (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 11).

Die naturnahe Waldwirtschaft entstand im 19. Jahrhundert in Mitteleuropa und wurde insbesondere in bäuerlichen Privatwaldbetrieben in den Mittelgebirgen Süddeutschlands und in den Alpen als Plenterwaldbewirtschaftung betrieben. Seit etwa 1980 beginnt sich naturnahe Waldwirtschaft in allen Waldeigentumsarten (besonders in den öffentlichen Wäldern) Deutschlands vermehrt durchzusetzen. Als wichtige Prinzipien der naturnahen Waldwirtschaft gelten (Brang et al. 2014):

- Bewirtschaftung von vielfältigen, möglichst strukturreichen Mischwäldern
- Annäherung an die Baumartenverteilung in der natürlichen Vegetation
- Möglichst Verzicht auf Kahlschläge
- Nutzung der Naturverjüngung
- (Pflege)Eingriffe zur Stabilisierung und Wertsteigerung des Waldes
- Schonung des Waldbodens und des verbleibenden Bestandes
- Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte wie Anreicherung mit Totholz

Naturnah nimmt dabei Bezug sowohl auf die Ähnlichkeit der angestrebten Wälder mit der Baumartenzusammensetzung der natürlichen Waldgesellschaft als auch der Nutzung natürlicher Prozesse wie der Naturverjüngung (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 11 u. 39). Die Frage, ob naturnahe Wälder eine höhere Anpassungsfähigkeit aufweisen als naturferne, ist nicht ganz trivial, zumal die Frage, wann Wälder naturnah sind, in Mitteleuropa nicht einfach zu beantworten ist. Mit der potenziell natürlichen Vegetation (pnV) kann annäherungsweise geklärt werden, welche Waldvegetation an einem bestimmten Standort von Natur aus möglich ist. Das pnV-Konzept weist jedoch einige Tücken auf (Kasten 3.2).

Kasten 3.2 Potenzielle natürliche Vegetation als Indikator für Naturnähe

Naturnähe kann im Wald durch verschiedene Variablen wie den flächigen Zusammenhang, das Vorhandensein von Lücken, Totholz, Mikrohabitaten, Sukzessionsdynamik, die Durchmesserverteilung der Bäume und ihre Vitalität sowie durch die potenzielle natürliche Vegetation (pnV) als Referenz beschrieben und quantifiziert werden (Stark et al. 2019, S. 14). Unter pnV wird das Artengefüge verstanden, das sich unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen ohne menschliche Eingriffe in die Vegetation herausbilden würde. Die pnV ist letztlich die idealisierte Endstufe einer Pflanzengesellschaft unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Standortbedingungen (Kovarík 2016, siehe hierzu auch Suck et al. 2014). Aus dem Unterschied dieser angenommenen Vegetation und den realen Verhältnissen resultiert die Naturnähestufe.

Mit dem pnV-Indikator kann als eine Naturnähereferenz die Frage beantwortet werden, welche Waldvegetation an einem bestimmten Standort von Natur aus möglich ist (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 39). Der zentrale Referenzparameter ist die Baumartenzusammensetzung, während andere Kriterien für Naturnähe wie die Anzahl alter Bäume oder historische Waldkontinuität nicht berücksichtigt werden (Michiels/Cullmann 2015). Ein sehr naturnaher Wald ist zu mehr als 90 % aus Baumarten der pnV zusammengesetzt und darf nur 10 % nicht standortheimische Baumarten aufweisen, während ein naturnaher Wald mehr als 75 % Baumarten der pnV hat. Weitere Stufen sind bedingt naturnah, kulturbetont und kulturbestimmt. Ein Vorteil des pnV-Indikators ist, dass er standardmäßig durch forstliche Inventuren erhoben werden kann (Stark et al. 2019, S. 15). Aus den Baumarten-Daten der Bundeswaldinventur ergibt sich für den Gesamtwald Deutschlands ein Anteil von 35 % naturnaher bis sehr naturnaher Wälder. Besonders naturnah sind Buchen- und Tannenwälder (80 bzw. 70 %), wenig naturnah Kiefernwälder (15 %).

Es gibt aber auch vielfache Kritik am pnV-Indikator. Beispielsweise gibt es keine standardisierten Methoden und Definitionen, die Herleitung der pnV-Referenz ist daher fachspezifisch uneinheitlich (Stark et al. 2019, S. 15 f.). Ein anderer Schwachpunkt betrifft die oft statische Interpretation des Konzepts, die die natürliche Variabilität der Baumartenvorkommen und die Dynamik der Waldentwicklung ausblendet (Stark et al. 2019, S. 16 f.). Reine pnV-Wälder sind nicht per se ökologisch stabiler bzw. klimaresilienter als Wälder mit anderen Mischbaumarten als den pnV-Arten einschließlich nicht gebietsheimischer Baumarten. Vielmehr können langfristig durch die menschliche Kulturtätigkeit aktiv gestaltete Wälder eine sehr hohe Vielfalt aufweisen (Spathelf 2022, S. 39). Plausibel wäre es deshalb, in einem dynamisch(er)en pnV-Konzept nicht nur Klimax-, sondern auch Pionierwaldstadien zu berücksichtigen, also ggf. völlig natürlich in Bestandslücken einwandernde Pioniergehölze als standörtlich naturnah einzustufen (Stark et al. 2015).

Quelle: Spathelf 2022, S. 39; Stark et al. 2019

Zu den Spielarten der naturnahen Waldwirtschaft gehören zum einen das Dauerwaldkonzept, das seit 1950 vor allem von einer kleinen Gruppe von Privatwaldbesitzenden, der Arbeitsgemeinschaft naturgemäße Waldwirtschaft (ANW 2013), popularisiert wurde. Hier sollen standortgerechte, an der natürlichen Waldgesellschaft orientierte Wälder entstehen. Klassische Forstschutzmaßnahmen bleiben auf ein geringes Maß beschränkt. Das Dauerwaldkonzept hat in den vergangenen Jahren, auch über die Arbeitsgemeinschaft Naturgemäße Waldwirtschaft (ANW) hinaus, immer mehr Anhänger unter Waldbesitzenden und Forstbediensteten gefunden. Zum anderen wird u. a. im Lübecker Stadtwald eine prozessschutzorientierte Waldwirtschaft betrieben.

Die Prozessschutzbewirtschaftung hat die natürliche Vielfalt und zieloffene Entwicklung des Waldes im Fokus. Der bewirtschaftete Wald soll einem ungenutzten Wald möglichst ähnlich sein und bedrohten Tieren und Pflanzen wieder Lebensraum bieten. Die Zusammensetzung der Baumarten und die Altersstruktur bleiben weitgehend der Natur überlassen, eingeschlagen werden nur einzelne reife Bäume. Der Grundansatz einer prozessschutzorientierten Waldnutzung entspricht in etwa der einer ökosystembasierten Waldbewirtschaftung: es geht um ein systemisches, adaptives Management (Bode 2019) sowie um die bestmögliche Erhaltung funktionstragender Strukturen und Mechanismen (dazu Ibisch 2022, S. 331). Weitere Grundlagen sind eine bestmögliche Dokumentation von Interventionen und die lernende Beurteilung ihrer Wirkungen. Von zentraler Bedeutung sind zudem das Realisieren und Respektieren noch unzureichend verstandener systemischer Zusammenhänge und das Tolerieren ergebnisoffener Entwicklungen.

Sowohl Dauer- als auch prozessschutzorientierte Waldwirtschaft streben eine kontinuierliche Verjüngung der Bestände an und ermöglichen Ungleichaltrigkeit und strukturreiche Mischbestände, bei lediglich kleinflächigen Kronendachöffnungen im Altbestand in der Verjüngungsphase. Die betriebswirtschaftlichen Aspekte der Altersklassenwaldwirtschaft sowie der zwei hier vorgestellten Spielformen der naturnahen Waldwirtschaft werden in Kapitel 5 beleuchtet.

3.2 Eigenschaften resilienter Waldökosysteme

Wälder sind komplexe Ökosysteme, »sich ergebnisoffen entwickelnde Gefüge aus Mikroorganismen, Pilzen, Pflanzen und Tieren« (Ibisch 2019, S. 3). Ökosysteme sind funktionale Systeme, die interagierende Organismen und ihre Umwelt beherbergen und durch Attribute wie Struktur, Funktion, Komplexität, Interaktion und Interdependenz sowie Wandel gekennzeichnet sind (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 24 ff.). Das Ökosystemkonzept ist die wichtigste Grundlage für ein erfolgreiches Waldmanagement, weil es die verschiedenen Teilsysteme des Waldes und seine Funktionen als Ganzes im Blick hat. Es ermöglicht ein Verständnis des Waldes als komplexes System und seiner Selbstorganisation einschließlich der Möglichkeit, sich dynamisch an Umweltveränderungen anzupassen. Ökosysteme sind aufgrund der komplexen, häufig nicht linearen Interaktionen in ihrem Verhalten kaum vorhersehbar.³² Aufgrund ihrer Komplexität können sie lange in einem stabilen Zustand verweilen, bei starken Störungen von außen (z. B. Feuer) jedoch Kipppunkte überschreiten und neue Systemzustände einnehmen (z. B. Übergang von Wald zu Grassteppe). Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist derjenige der Resilienz, der sich zu einem zentralen Konzept der Ökosystemtheorie und des Ökosystemmanagements entwickelt hat. So hat ein resilientes Waldökosystem die Fähigkeit, nach einer Störung hinsichtlich seiner zentralen Ökosystemfunktionen wieder zum Status vor der Störung zurückzukehren. Es ist aber auch in der Lage, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Resistenz hingegen bezeichnet die Kapazität eines Ökosystems, Störungen zu absorbieren, ohne sich wesentlich zu ändern.

Welche grundsätzlichen Eigenschaften ein Waldökosystem haben sollte, um als stabil (resistent und resilient) zu gelten, ist weder eindeutig noch einfach zu beschreiben (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 24 f.). Stabilität hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, je nach betrachtetem Störungsfaktor (Feuer oder Sturmwurf) und je nach Waldökosystem (Wälder der gemäßigten Zone oder Tropenwälder). Zudem ist es entscheidend, auf welcher Skalenebene (im Waldbestand oder auf Landschaftsebene) Stabilität betrachtet wird. Störungen können auf unterschiedliche Art und Weise in die Nahrungsnetzwerke und Feedback-Schleifen von Waldökosystemen einwirken und damit Resistenz und Resilienz beeinflussen. Monokulturen, eine starke Zerschneidung von Wäldern, übermäßige Stoffeinträge oder die Bodenverdichtung gefährden die Ökosystemintegrität der Wälder. Umgekehrt zeichnet sich ab, dass Waldökosysteme mit einer Kontinuität in ihrer Biomasse und reich an Nährstoffen sowie vielfältige Waldökosysteme (in Bezug auf den gesamten Artenreichtum) eine höhere Stabilität aufweisen als solche ohne diese Eigenschaften (Thom/Spathelf 2023).

³² Aufgrund der Interaktionen können sich zudem neue, emergente Eigenschaften herausbilden, die erst durch die Wechselwirkungen von Teilsystemen entstehen, in den Teilsystemen selbst jedoch nicht vorkommen. Ein Beispiel für emergente Eigenschaften ist die Pufferwirkung des Waldes in Bezug auf Klimaextreme durch das Zusammenwirken verschiedener Systemelemente des Waldes (Spathelf 2022, S. 24).

Eine im Klimawandel besonders wichtige Eigenschaft von Ökosystemen ist ihre Fähigkeit, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 26). Unter Anpassung werden die permanenten Angleichungen der Struktur und Funktionsfähigkeit von Individuen, Arten oder Populationen an ihre Umwelt verstanden. Anpassung kann dabei auf Ebene des Individuums³³ oder evolutiv durch Mutation und Selektion auf Populationsebene erfolgen. Die regulatorische Anpassung über die Veränderung des Erscheinungsbildes (Phänotyp) verläuft innerhalb der Reaktionsnorm einer Art und ist dadurch begrenzt. Das Vermögen von Populationen, sich in Zukunft an veränderte Umweltbedingungen anzupassen, wird als Anpassungsfähigkeit bezeichnet. Langfristig kommt der genetischen Anpassung eine große Bedeutung zu. Diese ist umso eher möglich, je grösser die Vielfalt an Genotypen und also die Wahrscheinlichkeit ist, dass geeignete Genotypen vorliegen.³⁴

Im Folgenden werden im Kontext des Themas »Anpassung von Wäldern« in enger Anlehnung an das Gutachten von Spathelf 2022 einige zentrale Eigenschaften resilienter Waldökosysteme näher beleuchtet. Dazu gehören die genetische Vielfalt (Kap. 3.2.1), die funktionelle Vielfalt (Kap. 3.2.2) sowie ein intakter Waldboden (Kap. 3.2.3).

3.2.1 Genetische Vielfalt

Baumpopulationen haben aufgrund ihrer Langlebigkeit und Ortsgebundenheit eine vergleichsweise hohe genetische Diversität (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 27). Diese Vielfalt ist ein wichtiger Parameter für die Anpassungskapazität einer Baumart. Elementar dabei ist die Funktionsfähigkeit des genetischen Systems, d. h. derjenigen Mechanismen, die die Neukombination und den Genfluss sicherstellen. Populationen, die eine Vielzahl an verschiedenen genetischen Reaktionsnormen aufweisen (sowohl genetische Unterschiede innerhalb einer Baumart als auch zwischen verschiedenen Baumarten), können langfristig auf eine sich verändernde Umwelt reagieren. Gleichzeitig ist die genetische Vielfalt von Baum-Populationen aufgrund des Klimawandels in Gefahr (Finkeldey/Hattemer 2010). Insbesondere bereits an höhere Temperaturen und Trockenheit angepasste Bestände am wärmeren Ende von Art-Verbreitungsgebieten (z. B. die Fichte in den östlichen und südlichen Voralpengebieten Österreichs) drohen verloren zu gehen (Kapeller et al. 2012).

Eine Betrachtung der genetischen Vielfalt der Hauptbaumarten in Deutschland zeigt, dass Buchen eine relativ hohe genetische Diversität innerhalb der Bestände besitzen, aber geringe genetische Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Teilpopulationen (oder Herkünften) innerhalb ihres Verbreitungsgebietes (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 27 f.). Weißtannen dagegen weisen große Unterschiede zwischen verschiedenen Herkünften auf: Südosteuropäische Tannenbestände sind genetisch vielfältiger als die nördlichen Vertreter dieser Baumart und gut an ein kontinentaleres Klima (wärmere, trockenere Sommer) angepasst. Tannen scheinen sich an viele von Ihnen eingenommenen Standorte gut anpassen zu können. Fichtenbestände weisen eine große genetische Variation in anpassungsrelevanten Merkmalen auf. Fichtenherkünfte z. B. aus dem warm-trockenen nordostdeutschen Tiefland erwiesen sich als trockenstressresistenter als solche aus niederschlagsreicheren süddeutschen Gebirgslagen. Auch Eichen weisen eine hohe genetische Vielfalt innerhalb der Populationen sowohl von Stiel- und Traubeneichen als auch von Flaumeichen auf.

Mit waldbaulichen und forstwirtschaftlichen Maßnahmen kann begrenzt Einfluss auf die genetische Vielfalt von Waldbeständen genommen werden (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 28). Die Förderung seltener, auch nicht gebietsheimischer Baumarten, zur Erhöhung der Baumartenvielfalt und damit auch genetischen Vielfalt steht hier an erster Stelle. Die Bund-Länder-AG Forstliche Genressourcen empfiehlt zur Erhöhung der genetischen Vielfalt und zur Verbesserung des Anpassungsvermögens der Wälder in Deutschland insbesondere den Anbau von Hainbuche, Winterlinde, Spitzahorn, Flaumeiche, Nordmannstanne, Orientbuche, Atlaszeder, Elsbeere und Baumhasel (Liesebach et al. 2021; mehr hierzu in Kap. 3.3).

Mithilfe von langfristigen (mehrere Jahrzehnte dauernden) Naturverjüngungsverfahren können viele Samenbäume unterschiedlichen Alters und Wachstumspotenzials in die Rekombination miteinbezogen werden und somit eine weitgehende Weitergabe der genetischen Vielfalt ermöglichen. Werden Naturverjüngungen ergänzt oder

³³ Beispiele für modulative und modifikative Anpassungsprozesse etwa an Trockenstress sind die Ausbildung kürzerer Triebe und weniger sowie schmalere Blätter bzw. Nadeln (kurzfristig-modulativ), aber auch Anpassungen im Gefäßquerschnitt des Leitungsgewebes (langfristig-morphologisch) (Spathelf 2022, S. 26). Dadurch reduziert sich der Saftstrom und schließlich der Wasserverbrauch (Transpiration) des Baumes.

³⁴ Neben der (langfristigen) genetischen Anpassung sind auch epigenetische Mechanismen der Anpassung von Waldbäumen dokumentiert (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 26). Unter Epigenetik versteht man Regulationsmechanismen, die aufgrund von Umweltfaktoren bei Organismen zur Aktivierung oder Deaktivierung von Genen führen. So konnte an Kiefern im schweizerischen Rhonetal nachgewiesen werden, dass die Nachkommen von unter Trockenheit aufgewachsenen Bäumen besser wuchsen als Nachkommen von Bäumen, die dieser Trockenheit nicht ausgesetzt waren (Bose et al. 2020). Die dabei erlangten elterlichen Anpassungseigenschaften können (müssen aber nicht) an die nächste Generation weitergegeben werden.

Waldbestände, z. B. nach Kalamität durch Pflanzung oder Saat, etabliert, ist die Verwendung von herkunftsgesichertem und genetisch angepasstem Vermehrungsgut relevant. Im Allgemeinen ist die deutlich individuenreichere Saat aus Diversitätsgründen einer Neupflanzung vorzuziehen, da so ein höheres Maß an Auslese ermöglicht wird. Auch im Rahmen der Waldpflege können durch gezielte Eingriffe Vielfalt und Heterogenität im Wald gefördert werden. Kritisch wird bei Erntemaßnahmen die Zieldurchmesserernte³⁵ gesehen, da hier selektiv die wüchsigsten und vitalsten Bäume entnommen werden – mit möglichen negativen Folgen für die genetische Diversität der Bestände.

Bei der künstlichen Begründung (Anpflanzung) mit angepasstem Vermehrungsgut geraten vermehrt Survivor Trees in den Blickpunkt, d. h. die gezielte Vermehrung (von Abkömmlingen) von Bäumen, die besonders intensive Stresssituationen bzw. Störungen überlebt haben, und so eine ideale genetische Ausgangssubstanz für den resilienten Waldumbau bieten. Die Forstpflanzenzüchtung kann durch Ausleseverfahren und die Fokussierung schnell wachsender Baumarten zum Waldumbau beitragen (Seifert et al. 2022, S. 174). Genetisches Monitoring kann darüber hinaus verlässliche Kriterien bereitstellen, um Zustände zu erfassen, Prognosen zu stellen und Instabilität durch Vorsorgemaßnahmen zu verhindern (Kap. 4.4).

3.2.2 Funktionelle Vielfalt

Die Baumartenzusammensetzung ist grundlegend für die Waldentwicklung einschließlich der damit verbundenen Ökosystemleistungen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 29). Vielfältige Mischwälder sind im modernen Diversitätsverständnis aus mehreren Baumarten mit unterschiedlich funktioneller Diversität aufgebaut. Dabei ist Mischung allein kein hinreichender Indikator für die Stabilität des Waldökosystems, vielmehr kommt es auf die biologischen Funktionen der Baumarten an (Messier et al. 2019; Spathelf 2023). Biologische Eigenschaften, die Wachstum, Überleben und Vermehrung einer Art bestimmen, sind für die Anpassungskapazität entscheidend. Dazu zählen z. B. Höhenwachstum, Rindendicke, Holzdichte, Blattmasse oder Wurzeltiefe. Solcherart diverse Wälder weisen eine Vielfalt von Reaktionsmustern gegenüber Störungen auf, sie haben eine hohe Response-Variabilität. Idealerweise werden also Baumarten mit vielen unterschiedlichen anpassungsrelevanten Eigenschaften miteinander kombiniert und dies bei mehrfachem Vorkommen einer spezifischen Eigenschaft (funktionelle Redundanz). Fällt eine Eigenschaft aus (z. B. Mortalität, Störungen), kann dies kompensiert werden (Baumartenmischung als Versicherung). Neben Diversität und Redundanz wird – besonders in Kulturlandschaften – auch der Konnektivität von diversen Habitaten (ökologische Korridore) eine Resilienzerhöhende Wirkung zugeschrieben (Mori et al. 2017).

Vielfältige Baumartenzusammensetzungen gelten im Vergleich zu Reinbeständen als stressresistenter, wie zahlreiche Metastudien (z. B. Bauhus et al. 2017a; Schnabel et al. 2021) verdeutlichen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 29 f.). Resistenz- bzw. Resilienzerhöhend sind die Risikoverteilung, aber auch veränderte ökologische Interaktionen von Mischbeständen. Baumartenmischungen sind zudem häufig produktiver als die jeweiligen Reinbestände, sie gewährleisten mit größerer Wahrscheinlichkeit die Bereitstellung einer Vielzahl von Ökosystemleistungen. In einer forstpraktischen Umsetzung dieses Diversitätsansatzes fasst man Baumarten zu bestimmten Wachstums- bzw. ökologischen Gruppen zusammen, z. B. schattentolerante Arten mit hoher Holzdichte und schweren Samen in einer Gruppe und lichtliebende Pioniere mit weniger dichtem Holz und leicht sich verbreitenden Samen in einer anderen. Ein vielfältiger und damit mit höherer Wahrscheinlichkeit resilienter Wald umfasst demnach mehrere Arten aus möglichst unterschiedlichen funktionellen Gruppen. Allerdings ist keinesfalls immer gewährleistet, dass ein solch vielfältiger Mischwald (in nicht bewirtschafteten Wäldern) sich über Selbstregulation herausbildet und langfristig erhalten bleibt. Diversität stellt demzufolge einen zentralen Baustein der Managementziele in der zukünftigen forstlichen Bewirtschaftung klimaresilienter Wälder dar.

Die Strukturvielfalt eines Waldes wird wesentlich durch seine horizontale und vertikale Struktur bestimmt, wozu Baumartenmischung und die Schichtung im Kronenraum als wichtige Merkmale gehören (Kasten 3.3). Horizontale und vertikale Struktur eines Waldes tragen zu seiner Resilienz gegenüber Umwelteinflüssen bei. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels ist insbesondere die Wirkung der Waldaufbauform (Altersklassenwald mit Kahlschlagverjüngung vs. Dauerwald), aber auch des Waldtyps (z. B. Nadel- vs. Laubwälder) bei der Pufferung von Extremtemperaturen von großer Bedeutung (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 39 f.). Die kühlende Wirkung der Kronenschicht auf den bodennahen Temperaturverlauf ist durch viele Studien belegt. Von Arx et al. (2012) maßen Temperaturdifferenzen von bis zu 5 °C (tägliche max. Lufttemperatur) in Beständen mit und ohne

³⁵ Darunter wir die Ernte von Bäumen verstanden, die als Ersatzgröße für die Produktreife einen zuvor festgelegten Durchmesser erlangt haben (in Deutschland häufig zwischen 50 und 70 cm Durchmesser in 1,3 m Höhe des Baumes) (Spathelf 2022, S. 28).

den Effekt der Kronenschicht auf Dauerbeobachtungsflächen in der Schweiz. Auch die Luftfeuchte in den Beständen mit Kronendach war höher als in Beständen ohne Kronendach. Zu ähnlichen Einschätzungen kamen Renaud et al. (2011), wobei sie feststellten, dass auch der Waldtyp das Ausmaß der Temperaturdifferenz beeinflusst. Blumröder et al. (2021) fanden 2018 und 2019 sogar Differenzen von Maximaltemperaturwerten am Waldboden und in 1,3 m Höhe von 9 °C zwischen niedrig bevorrateten, relativ offenen Kiefernwäldern und hoch bevorrateten Buchenwäldern. Ein geschlossenes Kronendach puffert nicht nur starke makroklimatische Veränderungen, sondern auch klimawandelbedingte Veränderungen in der Artenzusammensetzung des Ökosystems, während starke Kronendachöffnungen Biodiversitätsverluste eher beschleunigen (Zellweger et al. 2020). Diese puffende Wirkung scheint sich zu verstärken, je stärker die Temperaturextreme werden.

Kasten 3.3 Strukturvielfalt verschiedener Waldtypen

Ein Wald, in dem verschiedene Baumarten nebeneinander und die Kronenräume mehrerer Baumschichten übereinanderstehen, bietet vielfältige Lebensräume für Tiere und Pflanzen. Er kann zudem durch die Strukturvielfalt besser auf Umwelteinflüsse reagieren.

Wesentliches Element der horizontalen Struktur des Waldes ist die Baumartenmischung. Relativ wenig gemischt sind Kiefernwälder mit 57 % oder Fichtenwälder mit 71 % Flächenanteil mit Mischung. Die vertikale Struktur des Waldes wird durch die Schichtigkeit beschrieben. 2012 sind 68 % der Wälder zwei- oder mehrschichtig aufgebaut. Am häufigsten ist ein zwei- und mehrschichtiger Aufbau bei Tannen- (84 %), Buchen- (80 %), Eichen- (78 %) und Eschenwäldern (78 %), seltener bei Douglasien- (53 %) und Fichtenwäldern (58 %). Die größte Strukturvielfalt bieten Wälder, in denen Bäume unterschiedlicher Art und Größe gemeinsam vorkommen, das sind häufig Buchen- oder Eichenwälder. Auch in den seltenen Tannenwäldern kommen oft Strukturen mit mehreren Baumarten und Schichten im Kronenraum vor. Seltener sind gemischte und zugleich geschichtete Strukturen in Fichten- und Kiefernwäldern.

Quelle: BMEL 2014, S. 20 f.

Spathelf (2022, S.40 f.) führt Argumentationen an, in denen für eine möglichst kleinflächige Öffnung der Bestände und eine Verjüngung unter dem Schirm des Altbestandes plädiert wird. Auch Vorwälder aus Pionierbaumarten wie der Aspe oder Birke können Schutzschirme gegenüber Extremtemperaturen für die darunter gepflanzten Hauptbaumarten darstellen. Darüber hinaus gibt es die Aufforderung vonseiten des Naturschutzes, ältere Buchenwälder gänzlich oder zumindest für einen bestimmten Zeitraum aus der Nutzung zu nehmen, um den Hitze- und Transpirationsstress durch aktive Baumentnahmen zu verringern – so, wie es seit 2020 im Landeswald von Rheinland-Pfalz umgesetzt wird (Forstpraxis 2020). Es ist jedoch auch darauf hinzuweisen, dass ältere Wälder mit einer großen Habitatkontinuität für die Biodiversität bestimmter taxonomischer Gruppen und von Urwaldreliktarten wohl unverzichtbar sind, jedoch aufgrund ihres abnehmenden Zuwachses nur noch einen relativ gesehen geringeren Beitrag zum Klimaschutz im Sinne einer Senkenfunktion leisten. Darüber hinaus nimmt die Vitalität von Bäumen mit zunehmendem bzw. hohem Alter ab und die Labilität gegenüber Störungen zu (WBW 2023).

3.2.3 Intakter Waldboden

Eine Voraussetzung für resiliente Waldökosysteme ist die weitgehende Intaktheit der Waldböden. Ein funktionsfähiger Waldboden stellt dauerhaft Nährelemente und Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung, garantiert die Neubildung von unbelastetem Grundwasser und hat eine Senkenfunktion für organischen Kohlenstoff. Mit Blick auf den notwendigen Schutz der Waldböden als Vorsorge für die langfristige Sicherung der Waldökosystemleistungen sind insbesondere drei Bereiche in den Fokus geraten: die Befahrung, die Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und das Mikrobiom (dazu und zum Folgenden Riek/Russ 2019; Spathelf 2022, S. 46 f.):

- Bei der Bewirtschaftung der Wälder hat die Mechanisierung der Holzernte in den vergangenen Jahren stark zugenommen (siehe hierzu Kap. 4.2). Die Gründe dafür liegen in der Produktivitätssteigerung bei der Holznutzung, aber auch im geringeren Unfallrisiko für die Waldarbeiter/innen, vor allem auch auf Kalamitätsflächen. Bereits durch einmalige Befahrung können empfindliche Böden gestört und irreparabel geschädigt werden. Dauerhaft verformte Böden haben eine eingeschränkte Eignung als Lebensraum für Wurzeln und Bodenlebewesen und sind Hindernisse für die Keimung von Sämlingen. Zwar wurden in den letzten Jahren angepasste Technologien und Verfahren zur Schadensminderung wie Breitbandraupen für Maschinen oder auch die Pferderückung entwickelt und eingesetzt, dennoch führte der Maschineneinsatz im Wald auf 10 bis 15 % der Waldfläche zu einer Einschränkung der Bodenfunktion.

- Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. In versauerten Böden (pH-Werte unter 4) sinkt die Verfügbarkeit wichtiger Nährstoffe (z. B. Kalium, Mangan oder Calcium). Eine zu starke Versauerung insbesondere der Humusaufgabe und des Oberbodens führt zu einer Immobilisierung des Stickstoffes (z. B. besonders in Kiefernwäldern). Dieser kann dann zudem bei Entstehen von Kahlflächen zu hohen Belastungswerten im Grundwasser führen.
- Schließlich beeinflussen Mikroorganismen die Bodenqualität und die Pflanzengesundheit. Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Zersetzung von Biopolymeren, wie Lignin oder Zellulose, sowie organischer Bodensubstanz und produzieren zusammen mit Pilzen die dafür erforderlichen Enzyme. Die vom Mikrobiom unterstützten Prozesse sind zudem wichtig für die Huminstoffbildung und damit die Wasserspeicherung und Nährstoffkreisläufe im Boden.

Eine zunehmende Bedeutung haben Wälder und insbesondere Waldböden auch als Speicher enormer Kohlenstoffmengen. Ibsch (2019, S. 4) führt diesbezüglich an, dass in Deutschland insbesondere in den Laubmischwäldern die Akkumulation von Humus und Totholz deutliche Kohlenstoff- sowie Nährstoff- und Wasserspeicherungen generiert. Und eine sehr große Studie zu gemäßigten und borealen Wäldern in Nordamerika (über 18.500 untersuchte Flächen) erbrachte als Ergebnis, dass der Kohlenstoffgehalt im jeweiligen Gesamtsystem mit dem Waldalter lange Zeit steigt und selbst in den ältesten Wäldern (jenseits von 130 Jahren) noch eine Wachstumsrate (wenn auch relativ geringe) zu verzeichnen ist. Es zeigte sich also, dass auch alte Wälder noch Kohlenstoffspeicher und -senken darstellen können und zugleich mit ihrem Biomassereichtum gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels relativ resistent sind (Thom et al. 2019).

Für Deutschland gilt, dass viele Waldböden vor allem unterhalb von 30 cm Bodentiefe noch Potenzial zur Speicherung von stabilen Humusverbindungen besitzen dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 47). Unklar ist jedoch, ob steigende Bodentemperaturen zu einem verstärkten Humusabbau führen und damit den Boden in eine CO₂-Quelle verwandeln könnten (Riek/Russ 2019). Grundsätzlich führen hohe Temperaturen bzw. Dürreperioden dazu, dass weniger Kohlenstoff gebunden bzw. durch eine erhöhte Mortalität der Bäume sogar mehr Kohlenstoff freigesetzt wird. Da viele Baumarten bei Hitze- und Dürrestress die Spaltöffnungen ihrer Blätter schließen (isohydrische Baumarten), kann nur in viel geringerer und verlangsamer Rate Kohlendioxid aufgenommen und zu Zucker und letztlich zu Holz verarbeitet werden. Dürre führt zu reduziertem Wachstum von Bäumen, da Wasser für die Bildung des Zellinnendrucks und die Zellstreckung notwendig ist. Insgesamt nimmt bei Trockenheit die Fähigkeit der Bäume, Kohlenstoff in Biomasse zu speichern, sowie damit die gesamte Kohlenstoffspeicherleistung von Wäldern und Waldböden stark ab. Die bei Trockenheit reduzierte Fotosyntheseleistung der Bäume und Waldpflanzen führt auch zu verringertem Kohlenstoffeintrag in die Waldböden und zu weniger Speicherung. Höhere Temperaturen beschleunigen wiederum die Zellatmung von in Böden lebenden Mikroorganismen und bewirken einen verstärkten Abbau der dortigen toten Biomasse, was ebenfalls die Speichermenge des Kohlenstoffs in Waldökosystemen verringert.

Der Klimawandel wirkt sich zudem immer mehr auf den Wasserhaushalt der Waldstandorte aus (dazu und zum Folgenden SMC 2023; Spathelf 2022, S. 47 f.). Diese sind besonders seit den Trockenjahren ab 2018 durch einen erheblichen Wassermangel gekennzeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Zahl der jährlichen Trockenstresstage zukünftig deutlich zunehmen wird (Riek/Russ 2019). Von zentraler Bedeutung in Zukunft ist deshalb die Sicherung eines ausreichenden Landschaftswasserhaushaltes.³⁶ Wichtige Maßnahmen hierfür sind die Verwendung angepasster Baumarten und Waldbauverfahren zur Verminderung der Verdunstungsverluste sowie die Wiedervernässung von Mooren und Feuchtbiotopen. Insbesondere der Zufluss von Sickerwasser zum Grundwasser, die Grundwasserneubildung, kann durch Maßnahmen des Waldumbaus wie die Beimischung von Laubbäumen in Nadelholzbeständen gefördert werden. Laubbäume verringern u. a. durch hohe Kronendichte die Verdunstungsverluste, der höhere Stammabfluss z. B. bei der Buche führt zu mehr Tiefensickerung im Vergleich zu Nadelbaumreinbeständen.

Neben einem beschleunigten Waldumbau zur Verbesserung des Wasserhaushaltes und der Nährstoffsituation auf den Waldstandorten werden von Wissenschaft und Forstpraxis folgende Einzelmaßnahmen empfohlen, um einen wirksamen und nachhaltigen Bodenschutz im Wald zu verfolgen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 48):

- Strikte Beschränkung der Befahrung mit Maschinen auf Rückegassen, verbunden mit einer sorgfältigen Holzernteplanung. Bereits im Vorfeld der Holzernteplanung sind geeignete organisatorisch-technische Maßnahmen zum Schutz des Waldbodens zu ergreifen. Im praktischen Forstbetrieb wurde ein griffiges Konzept

³⁶ Die Komponenten des Landschaftswasserhaushaltes (Wasserkreislauf) sind Niederschlag, Verdunstung, Tiefensickerung oder Infiltration, Abfluss und Grundwasserneubildung.

entwickelt und vor allem im öffentlichen Wald bereits breit umgesetzt: »Bodenschutz = Flächenbefahrungsverbot + Gassenschonungsgebot« (Grüll 2014). Dies bedeutet, dass jegliche Überfahrten im Wald mit Maschinen auf permanent festgelegten und markierten Rückelinien (oder im bergigen Gelände auf Maschinenwegen) stattzufinden haben. Der Abstand zwischen den Rückelinien hängt vom eingesetzten Holzertesystem und der Bodenempfindlichkeit ab und bewegt sich zwischen 20 und 40 m. Die Rückelinien wiederum sind schonend zu befahren und in einem guten Zustand zu erhalten. Noch nicht abschließend geklärt ist der Einsatz von Kleinstmaschinen (leichte Raupenfahrzeuge) außerhalb der Rückelinien, z. B. zur Bodenvorbereitung oder Saatunterstützung auf Kalamitätsflächen.

- Standortsangepasste Nutzungsintensitäten und bodenschonende Waldbaumaßnahmen wie Laubholzanbau und soweit wie möglich Verzicht auf Bodenbearbeitung. Die Belassung von Ernterückständen (Holz und Feinreisig) auf der Fläche sowie der Verzicht auf generelle Räumung dieser Biomasse nach Kalamitäten steigert die Nährstoffverfügbarkeit. Die Belassung und Akkumulation von Totholz ermöglicht die Verbesserung der Bodenstruktur und Wasserhaltefähigkeit des Bodens. Laubholzanbau hat bodenverbessernde Wirkung und wirkt der Versauerung entgegen. Die Laubbaumstreu ist leicht zersetzbar, zudem können Laubbäume tiefere Bodenschichten erschließen und bei höherem Nährstoffgehalt über eine Art Basenpumpe und den Streuabfall dem Oberboden Nährstoffe zuführen. Der Verzicht auf Bodenbearbeitung und Kahlhiebe mit ihren negativen Auswirkungen auf die Biodiversität und die mikroklimatischen Bedingungen (Austrocknung der Waldböden) sichert den Kohlenstoffspeicher im Boden (Riek et al. 2015; Riek/Russ 2019).

3.3 Baumarten für den Wald der Zukunft

Der Klimawandel hat mittel- bis langfristig Auswirkungen auf die Verbreitungsareale, in denen die Baumarten eine gute klimatische Eignung aufweisen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 22 f.). Eine Projektion der Verbreitungsareale beispielsweise der Fichte in Baden-Württemberg bis Ende des 21. Jahrhunderts zeigte (bei Annahme eines Worst-Case-Klimaszenarios), dass die Baumart nur noch in den Hochlagen der Mittelgebirge (z. B. Schwarzwald) und nur als Mischbaumart vorkommen könnte (Albrecht et al. 2019). Auch für die Buche wird (z. B. in Brandenburg) ein deutlicher Rückgang der Verbreitungsareale bis zum Ende des Jahrhunderts vorhergesagt (Spathelf et al. 2016).

Insgesamt ist für Deutschland für die kommenden 10 bis 20 Jahre noch von einer gewissen Arealstabilität der wichtigsten Baumarten auszugehen, zumindest, wenn von einem moderaten Klimaszenario ausgegangen wird (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 23; Spathelf et al. 2016). Bis zum Ende des Jahrhunderts werden jedoch voraussichtlich viele Nadelwälder (Baumarten Fichte, Weißtanne und Lärche) verlorengehen. Günstigenfalls wird bei Rückzug einer Baumart eine andere Art infolge von Sukzessionsprozessen an ihre Stelle treten, wie seit etwa 15 bis 20 Jahren am Beispiel der Kiefer und der sie ersetzenden submediterranen Flaumeiche in den inneralpinen Trockentälern zu beobachten ist (Rigling et al. 2016). In den tieferen Lagen Deutschlands könnten sich insbesondere wärmeliebende Baumarten wie die Edelkastanie, Flaumeiche oder Zerreiche stärker ausbreiten, während Buchenwälder in die mittleren Gebirgslagen einwandern und dort zugleich die Bestände vor allem von Fichte und Kiefer abnehmen könnten. Solche Baumartenareal-Entwicklungsszenarien sind zwar mit Unsicherheiten behaftet, sie sollten dennoch bereits heute bei der Waldumbauplanung berücksichtigt werden. Zur Unterstützung der Waldbewirtschaftung im fortschreitenden Klimawandel wurden von den Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten Klimakarten erstellt (FVA o. J.), die für die vier Hauptbaumarten – Fichte, Kiefer, Eiche, Buche – auf Basis verschiedener Klimaszenarien (RCP 4.5 und RCP 8.5) Baumarteneignung und Vulnerabilitäten für die Zeiträume von 2021 bis 2050 sowie von 2071 bis 2100 prognostizieren (verfügbar für öffentliche Waldflächen in Baden-Württemberg) (Albrecht et al. 2019).

Nicht zuletzt haben Arealverschiebungen von Baumarten neben ökologischen auch ökonomische Folgen (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 23). Studien prognostizieren, dass die europäischen Wälder aufgrund einer Verschiebung des Baumartenspektrums von Nadel- zu Laubbäumen mit Schwerpunkt mediterrane Eichenarten bis gegen Ende des 21. Jahrhunderts in ihrem Bestandswert um knapp ein Drittel im Vergleich zu 2010 zurückgehen könnten (Hanewinkel et al. 2010 u. 2013), was hauptsächlich an der Verdrängung der wuchskräftigen und gut bezahlten Nadelhölzer liegt.³⁷ Infolge dessen verstärkten sich in vielen forstwissenschaftlichen sowie -wirtschaftlichen Diskursen die Überlegungen, ob es sinnvoll einzusetzende alternative Baumarten zu den in Deutschland vorkommenden Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche gibt. Vor allem seltene heimische Baumarten stehen im Fokus, das Baumartenportfolio der hiesigen Wirtschaftswälder zu verbreitern bzw. zu ergänzen.

³⁷ Der mögliche Rückgang im Nadelholzaufkommen wird erhebliche Auswirkungen auf die Holzverwendung vor allem im Bauwesen haben.

Einige Forstwissenschaftler/innen sehen aber auch in gebietsfremden Baumarten Optionen, die Klimaresilienz unserer Wälder zu erhöhen, wenngleich ihr verstärkter Einsatz ökologisch umstritten ist und deshalb auch in den maßgeblichen Politikstrategien und Förderkonzepten nicht vorgesehen ist (Kap. 2.4).

Prinzipiell gibt es mittlerweile zahlreiche Ansätze, um die zukünftige Eignung der Baumarten im Klimawandel modellhaft abschätzen zu können (z. B. Klimahüllen, Arealmodelle oder Vulnerabilitätskarten; siehe hierzu Albrecht et al. 2019), Regionalisierungskonzepte (Spathelf et al. 2016) oder auch Risk Assessment-Methoden (Vor et al. 2016) zur Beurteilung der Invasivität (Spathelf 2022, S. 30 f.). Eignungsempfehlungen für aktuell wichtige Baumarten werden in verschiedenen Projekten entwickelt, so z. B. im Projekt »Klimawandelbedingte Mortalitäts- und Wachstumstrends als Grundlage für bundesweit vergleichende Baumarteneignungsbeurteilungen« (MultiRiskSuit) der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) (Laufzeit: 2022 bis 2027; Kasten 3.4). Zu beachten sind dabei jedoch immer auch die Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des Klimawandels. Primär auf klimaresiliente Baumarten zu setzen, wird dieser unklaren Dynamik nicht gerecht und würde auch einer ganzheitlichen Perspektive auf die Waldanpassung zuwiderlaufen, die vor allem an der Stabilität der Ökosysteme zu bemessen ist (Ibisch 2019, S. 10). Alternative Baumarten können deshalb immer nur ein Baustein einer Klimawandelanpassung der Wälder sein.

Kasten 3.4 Projekt »MultiRiskSuit« der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt

Als Grundlage für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel werden im Verbundprojekt »Klimawandelbedingte Mortalitäts- und Wachstumstrends als Grundlage für bundesweit vergleichende Baumarteneignungsbeurteilungen« (MultiRiskSuit) verbesserte multikriterielle Eignungsempfehlungen für wichtige Baumarten (Fichte, Kiefer, europäische Lärche, Douglasie, Tanne, Buche, Trauben- und Stieleiche, Birke, Bergahorn, Hainbuche, Roteiche) erarbeitet. Hierfür werden existierende Verfahren zur Baumarteneignungsbeurteilung aus allen Bundesländern verglichen. Diese Pluralität der Eignungseinstufungen in den Ländern stellt die Grundlage für verbesserte Eignungsempfehlungen dar, die für differenziertere strategische Waldbauplanungen und mittelfristige forstbetriebliche Entscheidungen bereitgestellt werden. Ziel ist die Abschätzung der Zukunftsfähigkeit von Baumarten und -mischungen unter sich verändernden Umweltbedingungen. Diese Eignungsempfehlungen und die sie bestimmenden Risiko- und Leistungsprojektionen werden an der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE), Waldzustandserhebung (WZE) und Bundeswaldinventur (BWI) flächig abgeleitet bzw. angewendet. Auf dieser Grundlage erfolgen Vergleiche der Eignungsempfehlungen in benachbarten Ländern sowie zwischen den aktuellen (häufig nur regionalen) expertenbasierten Verfahren und den modellgestützt adaptierten Verfahren. Dieser Vergleich wird durch Sensitivitätsanalysen über große Standortgradienten ergänzt. Ausgehend von rezenten Klimabedingungen (1981–2010) werden als zeitliche Korridore die nahe (2021–2050) und ferne Zukunft (2071–2100) betrachtet.

Quelle: NW-FVA o. J.

3.3.1 Gebietsheimische alternative Baumarten

Bei der Erweiterung des Baumartenspektrums der Wälder und als alternative Baumarten für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche steht grundsätzlich eine größere Anzahl von selteneren heimischen Baumarten zur Verfügung, wie beispielsweise Sorbusarten (z. B. Vogel- und Mehlbeere), Linden, Hainbuche und Feldahorn oder auch Weißtanne und Eibe (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 31). Der Anteil dieser Baumarten in Deutschlands Wäldern ist bisher sehr gering und liegt oft unter einem Prozent oder im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Die angenommene Vorteilhaftigkeit dieser seltenen heimischen Baumarten bezieht sich neben den bekannten klimarelevanten Kriterien wie Trockenstresstoleranz u. a. auch auf Frosthärte und Empfindlichkeit bzw. Resilienz gegenüber Schadorganismen. Aufgrund der artspezifischen Ausprägung von Trockenresistenz und Frosthärte für trockene bis sehr trockene Standorte werden z. B. Spitzahorn, Feldahorn, Hainbuche als sehr gut geeignet angesehen. Verschiedene Studien identifizierten noch weitere heimische Baumarten wie z. B. Edelkastanie, Hainbuche, Sandbirke oder Elsbeere als vielversprechende Alternativbaumarten (de Avila/Albrecht 2018; Tab. 3.1).

Tabelle 3.1 Vielversprechende heimische Alternativbaumarten im Klimawandel

Baumart	wissenschaftliche Evidenz
Edelkastanie (<i>Castanea sativa</i>) L	LWF 2018
Elsbeere (<i>Sorbus torminalis</i>) L	Kunz et al. 2018
Feldahorn (<i>Acer campestre</i>) L	Kunz et al. 2018
Hainbuche (<i>Carpinus betulus</i>) L	Jenssen 2009; Lockow/Lockow 2009
Linden (<i>Tilia spec.</i>) L	Jenssen 2009
Sandbirke (<i>Betula pendula</i>) L	Michiels 2009
Speierling (<i>Sorbus domestica</i>) L	Kunz et al. 2018
Spitzahorn (<i>Acer platanoides</i>) L	Kunz et al. 2018
Weißtanne (<i>Abies alba</i>) N	LWF 2011; Frank et al. 2017

L = Laubbaum, N = Nadelbaum

Quelle: Spathelf 2022, S. 34

In der Praxis zeigen einige seltenere heimische Baumarten, wie z.B. Spitz- und Feldahorn oder Elsbeere und Speierling, eine höhere Trockenstresstoleranz als die Buche (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 31 f.; Kunz et al. 2018). Bei den gebietsheimischen Nadelbäumen wird auch die Weißtanne als Mischbaum- und mögliche Ersatzbaumart angesehen, da sie eine größere Trockenstressresistenz als die Fichte oder Lärche aufweist, zugleich einen weiten Niederschlagsgradienten aushält (600 bis 2.500 mm Jahresniederschlag) und eine geringere Anfälligkeit gegenüber Borkenkäferbefall und Sturm hat (Frank/Büchsenmeister 2016). Ihr Rückgang in den vergangenen 2 Jahrhunderten ist zu einem großen Teil auf Wildverbiss und falsche waldbauliche Behandlung zurückzuführen. Dennoch wird auch die Weißtanne in den tiefliegenden Gebieten zukünftig als vulnerabel eingeschätzt (van der Maaten-Theunissen et al. 2013).

3.3.2 Fremde Herkünfte heimischer Baumarten

Als Herkunft oder Provenienz wird ein Ort bezeichnet, an dem ein Waldbestand wächst, unabhängig davon, ob er autochthon (also natürlich) ist oder nicht (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 35). Die Provenienzforschung liefert seit über einem Jahrhundert Informationen darüber, wie Baumarten in ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet regional differenziert sind und welche Leistung, aber auch Schadanfälligkeit bestimmte Herkünfte an anderen Wuchsorten aufweisen (Lockow 2015). Seit einigen Jahren wird zunehmend das Potenzial von Provenienzversuchen erkannt, die Reaktion von Herkünften auf ein verändertes Klima aufzuzeigen und somit vorangepasste Herkünfte zu identifizieren. So zeigen beispielsweise Kiefern aus dem Zentralmassiv in Frankreich am neuen Wuchsort Chorin in Brandenburg eine zwar schlechtere Wachstumsleistung als Kiefern aus dem Baltikum oder Nordostdeutschland. Sie weisen jedoch eine bessere Trockenstressresistenz auf, da sie an diesem wärmeren südwestlichen Ende des Kiefernverbreitungsareals Anpassungsprozesse durchlaufen haben (Lockow 2015). Auch Fichten zeigen je nach Provenienz eine unterschiedliche Anpassungskapazität an Trockenheit. Die bisher an Trockenheit besser angepassten Tieflandsherkünfte sind robuster als sensitive Hochlagenherkünfte (Bolte et al. 2021). Weitere Beispiele von Provenienzen, die besser an warm-trockenere Klimate angepasst sind, sind südosteuropäische Rotbuchen, zentralalpine oder kalabrische Weißtannen sowie die slawonische Eiche (zu den Stieleichen gehörend) vom Balkan, diese werden bereits bei der Verjüngung von Wäldern in geringem Umfang berücksichtigt (Schirmer 2017).

Die natürliche Wanderungsgeschwindigkeit von Provenienzen bzw. Baumarten ist allerdings viel zu gering, um mit den Auswirkungen des Klimawandels Schritt halten zu können (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 36 f.). Um diese Wanderung bzw. Migration von Baumarten zu unterstützen, wird seit einigen Jahren das Konzept »Assisted Migration« diskutiert. Darunter wird die planvolle Verbreitung von Baumarten-Herkünften in ein Gebiet mit dafür geeignetem Klima verstanden. Das Konzept wird kontrovers diskutiert, da man bisher davon ausging, dass lokal oder regional gewonnenes Vermehrungsgut am besten an den jeweiligen Anbau- bzw. Wuchs-ort angepasst ist. Was retrospektiv richtig ist, muss jedoch für eine Zukunft mit gerichteter Veränderung des Klimas nicht zwingend zutreffend sein. Diskutiert wird, ob mit Assisted Migration ggf. nicht nur die Produktivität von Waldökosystemen gesichert, sondern auch neue Genotypen in den Genpool einer Population eingespielt werden und so zu einer besseren Anpassungsfähigkeit der Wälder beitragen könnten (Versicherungshypothese). Andererseits besteht, vor allem beim Transfer von Arten oder Provenienzen über weite Entfernungen, bei Nichtbeachtung der Klimapassgenauigkeit das Risiko von Fehlanpassungen oder auch von Invasivität (Messier et al. 2019; Spathelf/Linde 2020).

3.3.3 Nicht gebietsheimische und exotische Baumarten

Auch bei nicht gebietsheimischen Baumarten besteht bereits eine über 100-jährige Anbautradition in Deutschland (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 33). Nach Otto (1994) sind nicht gebietsheimische Baumarten dann ökologisch zuträglich, wenn sie standortsgemäß sind, sich gut verjüngen und gut mischbar sind, vertikale Waldstrukturen auszubilden vermögen und phytopathologisch robust sind. Angesichts des Klimawandels bleibt bei der zukünftigen Eignungsbeurteilung eine Unsicherheit, sofern sie aus retrospektiven Erfahrungen geschlossen wird. Deshalb sind neben den historischen Erfahrungen die Klimaähnlichkeit aus Analogregionen und die Anbauerfahrungen aus dem Ursprungsgebiet eine notwendige Grundlage zur Beurteilung solcher Baumarten für den klimaresilienten Wald der Zukunft.

Die Methodik zur Identifikation solcher Baumarten ist bereits etabliert (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 30). In Voruntersuchungen kann die grundsätzliche klimatische Eignung einer Baumart ermittelt (Identifikation von mit dem Anbauort vergleichbaren Analogklimaten) und die große Vielfalt der Anbaumöglichkeiten eingegrenzt werden. Eine Bereisung der Ursprungsgebiete und eine Beschreibung der geno- und phänotypischen Eigenschaften der Bestände einschließlich einer Nutzwertbetrachtung ist ebenfalls hilfreich. Schließlich folgen Anbauversuche, um die Eignung einer Baumart am konkreten Anbauort zu erfassen. Solche Anbau- und Herkunftsbzw. Provenienzversuche sind eine wichtige Informationsquelle für die Eignung von Alternativbaumarten.³⁸ Damit ließen sich z. B. bei der eingeführten Baumart Douglasie wertvolle Erkenntnisse zu waldbaulichen Eigenschaften verschiedener Herkünfte des Ursprungsgebietes gewinnen und damit Anbauempfehlungen herleiten (Konnert/Bastien 2019). Ein Problem ist, dass sehr viele Ersatzbaumarten zwar diskutiert werden, eine systematische Auswertung von Anbauversuchen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen sowohl zu den selteneren heimischen Alternativbaumarten als auch zu den nicht gebietsheimischen Baumarten in Deutschland jedoch weitestgehend fehlen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

In ökologischer Hinsicht besteht ein besonderes Risiko darin, dass sich nicht heimische Baumarten unkontrolliert auf Kosten der heimischen Flora ausbreiten. Solche Pflanzenarten werden invasiv genannt (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 37). Sie sind eine Gefahr für die Biodiversität (Kasten 3.5) und sollen nach dem Naturschutzrecht aus den Ökosystemen entfernt werden. Die Invasivität von Organismen ist ein komplexer Prozess und sehr kontextbezogen. Invasivität kann deshalb nur sehr schwer, unter genauer Betrachtung der örtlichen Faktoren und spezifischer Arteigenschaften, vorhergesagt werden (Heger 2016). Anerkannt ist, dass artenreichere Ökosysteme generell weniger anfällig sind gegenüber invasiven Organismen als artenärmere, da zahlreiche Nischen bereits besetzt sind (Felton/Smith 2017). Die meisten der nicht heimischen Baumarten, die nach Deutschland eingeführt wurden, sind nicht invasiv. Auf einer Liste von potenziell invasiven Pflanzenarten, die das Bundesamt für Naturschutz vor einigen Jahren zusammenstellte, steht jedoch auch die Douglasie, die auf 2 % der deutschen Waldfläche vorkommt. Anhand von Versuchen und der langjährigen Erfahrung aus der forstlichen Praxis konnte jedoch gezeigt werden, dass die Douglasie sich gut in Wälder mit heimischen Baumarten integrieren lässt, ohne sich auf Kosten dieser auszubreiten (Ammer C. et al. 2016; Spathelf/Linde 2020). Die spätblühende Traubenkirsche hingegen ist definitiv invasiv und bereitet seit Längerem erhebliche Probleme für die heimischen Wälder – vor allem in den Kiefernwäldern Norddeutschlands. Begünstigt durch den selektiven Wildverbiss besetzt sie die

³⁸ Folgende Anbaumerkmale sollten bei der Eignungsbeurteilung berücksichtigt werden (Šeho/Janßen 2019): Klima und Standortseignung, Trockenstresssensitivität und Frostempfindlichkeit, genetische Ausstattung (Struktur, Vielfalt und Diversität), Wuchsleistung und Stammqualität (Holzverwendung), Anfälligkeit gegenüber Schadorganismen.

ökologische Nische in lichten Kiefernjungwäldern. Die spätblühende Traubenkirsche wird vom Wild wegen unverträglicher Blatthaltstoffe geschmäht, deshalb werden die heimischen Laubbaumarten bevorzugt verbissen. Mit einem konsequenten Management, z. B. Stockrodung der Traubenkirsche, Reduktion des Wildverbisses und Anbau von heimischen Baumarten wie der Buche, kann sie erfolgreich zurückgedrängt werden (Petersen 2015). Die Tendenz geht hier verstärkt zu waldbaulichen Methoden der Eingrenzung. Das heißt, die Traubenkirsche wird so behandelt wie alle anderen Baumarten auch (Spathelf 2024, pers. Mitteilung).

Kasten 3.5 Auswirkungen nicht einheimischer Baumarten auf die Biodiversität

Unter Federführung der Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) hat ein Team europäischer Forscher/innen den Stand des Wissens zu den ökologischen Folgen von eingeführten Baumarten analysiert (Wohlgemuth et al. 2022). Dazu sichtet es die Ergebnisse von insgesamt 103 Studien, in denen anhand von 7 solcher Baumarten untersucht wurde, wie sich von gebietsfremden Baumarten dominierte Bestände im Vergleich zu Beständen einheimischer Baumarten auf die Artenvielfalt oder den Bodenzustand auswirken. Zu den betrachteten Organismen gehören Pflanzen, Moose, Mikroorganismen und Insekten vom Boden bis in die Baumkronen.

Insgesamt überwogen die negativen Konsequenzen der gebietsfremden Arten für die Biodiversität. So zeigen 65 Studien, dass auf und bei Douglasien weniger Insektenarten leben. Auch die invasiven nordamerikanischen Robinien verringern die Insektenvielfalt, Eukalyptus diejenige der Vögel. In zusammenhängenden, homogenen Pflanzungen schneiden viele eingeführte Arten mit Blick auf die Biodiversität der Waldökosysteme klar schlechter ab als einheimische. Die WSL konstatiert aber auch, dass die Art der Waldbewirtschaftung einen wesentlichen Einfluss darauf hat, ob Douglasien oder andere nicht gebietsheimische Baumarten insgesamt positive oder schlechte Auswirkungen in einem Wald aufzeigen. Einheitliche und dichte Douglasien-Bestände sind als Lebensraum für viele Organismen ungeeignet. Gleiches gilt jedoch auch für die Fichten, die in den letzten 100 Jahren in Tieflagen Mitteleuropas großflächig für die Holzgewinnung angepflanzt wurden. Hingegen würden Douglasien in Beständen einheimischer Waldbäume, einzeln oder in kleinen Gruppen, die Ökosystemintegrität kaum beeinträchtigen. Der Einfluss auf die einheimische Biodiversität ist dabei offensichtlich eher gering.

Quelle: Kittl 2023

Für Bayern wurde im Rahmen des Projekts »Alternative Baumarten in der Klimakrise« (Pratsch/Lieberth 2019) eine grundsätzliche Strategie entwickelt, die mehrere Schritte zur Identifikation von geeigneten Baumarten beinhaltet (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 34): erstens die Nutzung des Potenzials heimischer (auch seltener) Baumarten, zweitens die Verwendung alternativer Herkünfte heimischer Baumarten aus wärmeren Gebieten sowie drittens die Nutzung nicht gebietsheimischer Baumarten nach vier Eignungskategorien (anbauwürdig und empfohlen, anbaufähig und eingeschränkt empfohlen, nicht ausreichend anbaufähig und nicht empfohlen, nicht anbauwürdig und nicht empfohlen). In Brandenburg orientieren sich die Überlegungen in ähnlicher Weise an den Beurteilungskriterien für nicht gebietsheimische Baumarten der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Forstliche Genressourcen (Schröder et al. 2021). Hat eine nicht gebietsheimische Baumart das Potenzial, vulnerable heimische Baumarten (zumindest teilweise) zu ersetzen und ist ausreichend Vermehrungsgut vorhanden, sind die entsprechenden Baumarten für mögliche Anbauten in Betracht zu ziehen.

Erste forstwissenschaftliche Eignungsuntersuchungen und -auswertungen von exotischen Baumarten für Nordostdeutschland identifizierten etwa die Douglasie, Roteiche, Küstentanne, Thuja und die Japanlärche als gut wüchsig, robust und verzüchtungsfähig (Lockow 2002) (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 33 f.). Mithilfe einer aufwendigen Filtermethode wurden für Bayern u. a. Küstentanne, Roteiche und Douglasie als geeignet identifiziert (mit bereits ausreichenden Anbauerfahrungen), aber auch eine Reihe weiterer Baumarten, für die jedoch noch keine Anbauerfahrungen vorliegen (Ponderosakiefer, mazedonische Kiefer, Silberlinde und Orientbuche) (Schmiedinger et al. 2009). Eine Auswertung zahlreicher Anbauversuche mit nicht gebietsheimischen Baumarten in Baden-Württemberg stellte insbesondere Douglasie, Küstentanne sowie Roteiche aufgrund ihres sehr guten Wachstums als anbauwürdig heraus (Klädtker 2017). Ein Überblick über vielversprechende nicht gebietsheimische (exotische) Alternativbaumarten im Klimawandel findet sich in Tabelle 3.2.

Resümierend kommt Spathelf (2022, S. 38) zu dem Ergebnis, dass nicht gebietsheimische Bäume (in geringem Maße) unter Umständen sinnvolle Beimischungen darstellen und zur Erhöhung der Klimaresilienz der Wälder beitragen können. Der Aspekt der Invasivität von Alternativbaumarten im Klimawandel ist zukünftig grundsätzlich mit in die Überlegungen und Entscheidungen zum Waldumbau und zur Baumartenauswahl zu integrieren

und mithilfe geeigneter Monitoringverfahren zu überprüfen. In den meisten Waldbaurichtlinien finden sich dazu entsprechende Ausführungen in den Grundsätzen, z. B. im Waldbaukonzept von Nordrhein-Westfalen (MULNV-NRW 2019): »angemessene Integration klimastabiler, eingeführter Baumarten unter Berücksichtigung der ökologischen Verträglichkeit und Standortgerechtigkeit«. Die gemeinsame Erklärung von Bundesamt für Naturschutz und Deutscher Verband der Forstlichen Forschungsanstalten zur Bewirtschaftung der Douglasie kann als ein Beispiel für die Bewertung und die Entwicklung von gemeinsam getragenen Managementoptionen nicht gebietsheimischer Baumarten angesehen werden (Spathelf 2022, S. 38).

Tabelle 3.2 **Vielversprechende nicht gebietsheimische Alternativbaumarten im Klimawandel**

Baumart	wissenschaftliche Evidenz
<i>Arten, die sich bewährt haben</i>	
Douglasie (<i>Pseudotsuga menziesii</i>) N	Klädtker 2017; Brang et al. 2016; Lockow 2002
Japanlärche (<i>Larix kaempferi</i>) N	Lockow 2002; de Avila/Albrecht 2018
Küstentanne (<i>Abies grandis</i>) NB	Klädtker 2017; Brang et al. 2016; LWF 2011; Lockow 2002
Riesenlebensbaum (<i>Thuja plicata</i>) N	Panka 2014; Lockow 2002
Roteiche (<i>Quercus rubra</i>) L	Kätzel et al. 2020; Klädtker 2017; Lockow 2002
<i>Arten, bei denen Anbauverfahren fehlen</i>	
Baumhasel (<i>Corylus colurna</i>) L	Šeho et al. 2017; Mettendorf 2016
Hickory (<i>Carya spec.</i>) L	Mettendorf 2016; Lockow 2002
lindenblättrige Birke (<i>Betula maximowicziana</i>) L	Thiede 2021
mediterrane Eichenarten (<i>Quercus spec.</i>) L	Hanewinkel et al. 2013; Kätzel et al. 2012
Orientbuche (<i>Fagus orientalis</i>) L	Brang et al. 2016
Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i>) L	Carl 2018; Vor et al. 2015; Lockow 2002
Schwarzkiefer (<i>Pinus nigra</i>) N	Vor et al. 2015
Tulpenbaum (<i>Liriodendron tulpifera</i>) L	Mettendorf 2016
weitere Tannenarten (<i>Abies spec.</i>) N	Brang et al. 2016; Schmiedinger et al. 2009
Zedern (<i>Cedrus atlantica</i> und <i>libani</i>) N	Šeho/Janßen 2019; Leder/Wolff-Metternich 2017

L = Laubbaum, N = Nadelbaum

Quelle: Spathelf 2022, S. 34

3.4 Maßnahmen zur Begrenzung von Wildschäden und Waldbränden

Im Folgenden werden in enger Anlehnung an das Gutachten von Seifert et al. (2022) der aktuelle Stand des Wissens sowie Konzepte zur Reduktion von Wildschäden im Wald sowie zur Prävention von Waldbränden dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf Maßnahmen in den Bereichen Waldmanagement bzw. Waldbau.

3.4.1 Wildbestandsregulierung

Beim Waldumbau hin zu klimastabilen Wäldern spielen die natürliche sowie künstliche Verjüngung der Wälder eine zentrale Rolle (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 89). In diesem Kontext kommt auch den großen waldbewohnenden Pflanzenfressern eine relevante Wirkung auf die Waldentwicklung zu. Aufgrund seiner Ernährungsgewohnheit hat insbesondere das Schalenwild einen Einfluss auf die Baumartenzusammensetzung und Wuchsdynamik von Waldbeständen. Die Wirkung des Verbisses durch Schalenwild reicht von veränderten Wuchsrelationen zwischen den Arten über eine Veränderung der Artenzusammensetzung bis hin zum Totalausfall von einzelnen Baumarten (Ammer 1996). Wildschäden durch nicht angepasste Wildbestände können somit die

nachhaltige, naturnahe Bewirtschaftung des Waldes und den Aufbau strukturreicher, klimastabiler Wälder gefährden.

Innerhalb des Schalenwilds hat in Deutschland hinsichtlich seiner nahezu flächendeckenden Verbreitung sowie seiner absoluten Zahl das Reh die mit Abstand größte Bedeutung (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 91).³⁹ Das Reh gehört zu den Buschrandbewohnern und ist ein typischer Wald- bzw. Waldrandbewohner (Stubbe 1997). Innerhalb von Wäldern besiedelt es häufig Randstrukturen wie die Übergänge zwischen verschiedenen Bestandesformen oder Altersklassen. Mit zunehmender Entfernung von diesen Strukturen nimmt die Rehdichte innerhalb der Wälder ab (Reimoser et al. 2006). Als Nahrung (Äsung) dienen dem Rehwild über das ganze Jahr hinweg Stauden, Sträucher sowie Laub- und Nadelbäume. Die Anteile der verschiedenen Pflanzengruppen variieren im Jahresverlauf erheblich. Im Winter haben Laub- und/oder Nadelbäume eine sehr hohe Relevanz für die Ernährung der Rehe, woraus sich gerade für das Winterhalbjahr ein starker Einfluss der Rehe auf die Waldverjüngung ableiten lässt. Rehwildverbiss an Bäumen und Büschen findet aufgrund der Größe der Rehe überwiegend in einem Höhenbereich von 20 bis 90 cm statt und kann je nach Situation bereits die Überlebensrate von Keimlingen beeinträchtigen (Nopp-Mayr et al. 2009). Durch die insgesamt hohe Bedeutung der Verjüngungspflanzen als Nahrung insbesondere der Rehe⁴⁰ lassen sich trotz aller Maßnahmen zur Verhinderung von Verbisschäden diese nicht zu 100 % vermeiden.

Abbildung 3.1 Sommer- (a) und Winterschältschäden durch Rotwild (b), Fegeschlagschäden durch Reh (c) und Rothirsch (d)



Quelle: Seifert et al. 2022, S. 94

Neben Verbisschäden sind wirtschaftlich sowie im Hinblick auf die Waldstruktur Schältschäden von Bedeutung (Abb. 3.1; dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 94). Diese werden überwiegend von Hirschen verursacht und durch das jährliche Abfegen des Bastes vom fertigen Geweih (Fegeschaden) sowie vor und während der Brunft als Markierung von männlichen Tieren hervorgerufen (Verheyden et al. 2006). Geschält werden zumeist Fichten, Douglasien, Eschen, Esskastanien sowie verschiedene Sorbusarten, z. B. Vogel- und Mehlbeere. Schältschäden haben ebenso wie Verbisschäden einen Einfluss auf die Vitalität und Stabilität der Bestände (Ammer 1996). Durch die Schältschäden können Fäulepilze in das Holz dringen, die zu einer Destabilisierung des Baumes führen können. Bei Sturmereignissen führen Schältschäden vermehrt zu Stock-, Wurzel- und Stammbrüchen (König 1996).

Waldstrukturen haben einen großen Einfluss auf die Entstehung von Wildschäden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 96 f.). So sinkt die Häufigkeit des Verbisses an jungen Bäumen ausgehend von einzelstehenden Bäumen hin zu Bäumen, die mitten in einem Verjüngungskern wachsen. Auch bei Fegeschäden an Tannen wurde

³⁹ 89 % des jährlich in Deutschland erlegten pflanzenfressenden Schalenwildes sind Rehe (Schmitz 2021). Bei Reproduktionsraten von ein bis zwei Kitzen je weibliches Reh und Jahr (Zeiler 2009) errechnet sich bei einer durchschnittlich in den letzten 10 Jahren erzielten jährlichen Abschussrate von ca. 1.175.000 erlegter Rehe ein geschätzter Bestand zwischen 2,6 Mio. und 3,9 Mio. Rehen.

⁴⁰ Die Nahrungsgewohnheiten von Rot- und Damhirschen sowie Gämsen sind deutlich stärker auf Gräser ausgerichtet. Doch auch sie fressen Verjüngungspflanzen von Laub- und Nadelbäumen (z. B. (Anke et al. 2007)) und können daher Einfluss auf die Zusammensetzung und Überlebensrate der Waldverjüngung nehmen.

z. B. im Oberallgäu ein Zusammenhang zwischen der Bestockungsdichte und der Entstehung von Schäden festgestellt. Je dichter die Tannen standen, umso seltener wurden sie durch Fege geschädigt. Verjüngungsverfahren, die auf Naturverjüngung der Bestände abzielen, erweisen sich aufgrund ihrer hohen Stammzahlen und dem dichten Stand der einzelnen Bäume weniger wildschadensanfällig als Verjüngungen mit geringeren Stammzahlen, wie sie die Regel bei künstlicher Bestandsbegründung sind (Lipp 2015).

Rolle der Jagd

Die Jagd bzw. die Jagdausübungsberechtigten spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung bzw. Vermeidung von Wildschäden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 97). Grundlage für die jährlich bis 3-jährig geplanten Jagdstecken (Abschussplanung) ist der Gesundheitszustand der Wildpopulation, zudem in einigen Bundesländern (z. B. Bayern) auch ein Vegetationsgutachten sowie (je nach Wildart) auch die Anzahl der Tiere (Leonhardt/Pießkalla 2021). Allerdings lassen sich Wildpopulationen nicht exakt erfassen. So wird beispielsweise über die im bayerischen Alpenraum praktizierte Fütterungszählung des Rothirsches die Rothirschpopulation systematisch unterschätzt. Zieht man diesen Zählbestand ohne Korrektur als Grundlage für die Abschussplanung heran, leitet sich daraus durchgängig ein zu niedriger Abschussplan ab (König 2019). Und selbst diese regelmäßig zu niedrig angesetzten Abschusspläne werden häufig nicht erfüllt.

Die vielfachen Beziehungen zwischen Räubern und Beute sowie zwischen Herbivoren und Pflanzengesellschaften sind Forschungsfelder in der Wildbiologie/Wildökologie und liefern wichtige Hinweise für die Abschussplanung speziell bei der Notwendigkeit, Populationen zu reduzieren bzw. Wildschäden zu reduzieren (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 95 ff.):

- Bei untragbaren Wildschäden, die z. B. im Rahmen der Vegetationsgutachten vor dem Abschussplan erstellt und dokumentiert werden, ist es oft nicht zielführend, den Abschussplan um ein bis zwei Stück pro 100 ha zu erhöhen. Stattdessen muss die bisher geleistete Strecke über einen Zeitraum von mindestens 3 Jahren verdoppelt oder verdreifacht werden. Da großflächig eine so starke Reduktion einer Population nicht möglich ist, müssen lokale Jagdschwerpunkte errichtet werden. Zudem ergibt sich hieraus die Notwendigkeit eines umfassenden Ansatzes, der nicht nur auf eine Reduktion des Wildes setzt, sondern auch eine räumliche Verlagerung mit Duldungsgebieten oder attraktiven ungestörten Äsungsflächen beinhaltet, um das Wild durch Bejagung verbunden mit einer Habitatgestaltung aus einem Problembereich herauszudrängen.
- Unter Umständen sind schon wenige Pflanzenfresser wie Rehe ausreichend, um die Verjüngungsentwicklung zu schwächen. In diesem Fall könnten zusätzlich technische Maßnahmen wie Zäune, Manschetten bzw. Wuchshüllen oder chemische Mittel erforderlich sein (siehe hierzu Seifert et al. 2022, S. 105 ff.).
- Von der Jägerschaft wird die Fütterung des Schalenwildes (zumeist im Winter) vielfach als ein wichtiger Beitrag zur Vermeidung von Wildschäden gesehen, z. B. Prestel 2022. Nach Ansicht vieler Ökologen, z. B. Deutz et al. 2009; Völk/Hochrainer 2009, führt die Fütterung jedoch vielmehr dazu, dass die Umweltkapazität für Pflanzenfresser erhöht wird. Schwache und kranke Wildtiere können so den Winter überleben und gesunde Tiere eine höhere Fitness und ein höheres Körpergewicht erreichen. Dadurch steigt die Zuwachsrate in der Population. Da zumeist keine höheren Abschussraten erfolgen, können durch die steigenden Wildichten vermehrt Wildschäden entstehen. Seifert et al. (2022, S. 102) konstatieren entsprechend, dass die aktuelle Fütterungspraxis der Jägerschaft insbesondere für Rehe sowie die resultierenden Populationssteigerungen eine wesentliche Ursache für Verbiss- und/oder Schältschäden darstelle.

Ähnliche inhaltliche Aspekte und Argumentationen bietet auch das Bundesamt für Naturschutz (BfN 2020, S. 22) in einem Positionspapier, in dem u. a. auch der Beitrag der Jagd zum Waldumbau beleuchtet wird. Es stellt fest, dass die in vielen Jagdbezirken (zu) hohen Schalenwildichten die Entwicklung und Sicherung klimastabiler Wälder behindern und es daher unverzichtbar sei, die Wildbestände auf ein verträgliches Maß zu reduzieren. Dabei wird auch auf gesetzlichen Anpassungsbedarf hingewiesen: Vorgeschlagen wird, den Grundsatz »Wald vor Wild« durch eine Verpflichtung zu angepassten Wildbeständen ins Bundesjagdgesetz aufzunehmen. Des Weiteren wäre es besonders zur Sicherstellung der Waldnaturverjüngung notwendig, alle 3 Jahre ein Verbissgutachten zu erstellen. Sollte sich daraus eine zu hohe Belastung für die nachwachsenden Bäume ergeben, müssten die unteren Jagdbehörden gesetzlich verpflichtet sein, einen Plan zu erstellen, der den für eine naturnahe Waldwirtschaft notwendigen Mindestabschuss verbindlich vorgibt. Hierzu wäre der § 21 Bundesjagdgesetz entsprechend zu ergänzen. Auch sollten die zuständigen Behörden nach § 27 Bundesjagdgesetz anordnen können, dass Jagdausübungsberechtigte innerhalb einer bestimmten Frist den Wildbestand zu verringern haben, wenn dies u. a. mit Rücksicht auf das öffentliche Interesse an einer naturnahen Waldwirtschaft notwendig ist.

Perspektiven

Unter den Gegebenheiten des Klimawandels wird sich der Wald in vielfacher Hinsicht verändern und zugleich die Wirkung des Wildes auf den Wald und seine Verjüngung durch Wildschäden beeinflussen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 108 f.). Erwartet werden folgende Habitats- und Wirkungsänderungen (WBW 2021): Zunahme von Laubhölzern, niedrigere Bestandshöhen der Bäume, insgesamt lichtere Wälder, Zunahme von Schadensereignissen wie Stürme, Feuer, Hitze und Dürre sowie Insektenschäden. Hinsichtlich des Verhaltens des Schalenwildes wird vermutet, dass diese Habitatveränderungen zu einer Verbesserung der Nahrungsverfügbarkeit durch lichtere Wälder mit entsprechend mehr Bodenvegetation und damit zu einem weiteren Anstieg der Wildpopulationen führen. Insgesamt ist mit einem steigenden Einfluss des Wildes auf die natürliche und künstlichen Bestandbegründung in den Wäldern zu rechnen. Da Wälder auch Schutz vor klimatischen Extremen bieten, werden diese verstärkt bei Hitze durch Wildtiere aufgesucht werden. Und da Wildtiere ihren Wasserbedarf aus der pflanzlichen Nahrung decken, können bei Trockenheit oder Dürre Verbisschäden noch zunehmen. Somit steht zu erwarten, dass sich durch den Klimawandel der Wald-Wild-Konflikt weiter verschärfen wird.

Technische Maßnahmen zum Schutz vor Wildverbiss können zwar insgesamt teilweise notwendig sein, verursachen jedoch erhebliche Kosten, wenn sie großflächig zum Einsatz kommen müssen.⁴¹ Ein langfristiger Lösungsansatz besteht deshalb neben der Anpassung der gesetzlichen Grundlagen (insbesondere der Bundesjagd- und Landesjagdgesetze) in einem geeigneten Wildtiermanagement. Nach Ansicht von Seifert et al. (2022, S. 109 f.) bedarf es dafür einer umfänglichen Mediation und Moderation, um Lösungen zu finden, die für die beiden wichtigsten, in ihren Interessen aber oft gegensätzlichen Akteure Forst und Jagd akzeptabel und realisierbar sind. Ziel eines Diskurses müssen der gemeinsame Konsens und Wille sein, dass die Regulation des Wildbestandes so vorstangeht, dass die jeweils im Wald vorhandenen Baumarten sich natürlich verjüngen (möglichst ohne Einzäunungen und andere technische Schutzmaßnahmen) und gleichzeitig die Ziele der Jagd (Erlebniswert, Erlegung alter männlicher Stücke) realisiert werden können. Beide Ziele sind laut Seifert et al. (2022) vereinbar, sofern Forst und Jagd sich ihrer gemeinsamen Verantwortung stellen. Mediation und Moderation bedürfen dabei einer Unterstützung durch Wildbiologen bzw. Wildtiermanager, da diese eine neutrale Perspektive auf das Handeln von Forst und Jagd einnehmen können und das Fachwissen beider Bereiche vereinen, um so disziplinübergreifend akzeptable und zielführende Strategien zu entwickeln.

Besondere Bedeutung kommt außerdem den Waldstrukturen und Waldzuständen zu, die sich direkt auf die Entstehung von Wildschäden auswirken (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 119). Durch eine flächige und kontinuierliche Verjüngung im Sinne eines dauerwaldartigen Waldbaus in Kombination mit einer zielführenden Jagd könnte eine deutliche Verringerung bzw. Minimierung der Verbisschäden erreicht werden. Bei allen Forstbetriebsmaßnahmen wäre daher auf die Auswirkung der Maßnahmen hinsichtlich der Entstehung von Wildschäden zu achten. Beispielsweise kann bei Pflanzung neben der Zielbaumart noch eine Füllbaumart gepflanzt werden, die zu einem früheren Dichtstand führt und damit zu einer Reduktion der Schadenswahrscheinlichkeit beiträgt. Bei einer gegebenen Wilddichte, die unter der Trage- bzw. Umweltkapazität liegt, kann eine zusätzliche Entlastung in der Waldverjüngung erreicht werden, indem im Winter dem Rehwild alternative Äsung zur Verfügung gestellt wird (jedoch keine Fütterung aus den zuvor dargelegten Gründen). Aufgrund der opportunistischen Nahrungsaufnahme der Rehe kann der Verbiss an Bäumen durch andere bevorzugte Pflanzen ersetzt werden. So haben Stauden und Sträucher für Rehe eine hohe Nahrungsattraktivität (Häsler/Senn 2012). Die gezielte Anlage von Randstrukturen mit Stauden und Sträuchern erhöht die Biodiversität im Wald, kann als Barriere und Brandschutzstreifen dienen und lenkt die Aufmerksamkeit der Rehe von der Baumverjüngung ab.

3.4.2 Waldbrandprävention

In Deutschland befinden sich Waldbrandrisikogebiete vor allem in trockenen Regionen mit oftmals hohen Kiefernanteilen in den Wäldern, wie etwa in Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen sowie in Teilen des Oberrheingebiets (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 150). Jährlich brannten im Schnitt der vergangenen Jahre etwa 400 ha Wald, in den Hitze- und Dürre Jahren seit 2018 jeweils mehr als 2.000 ha (BLE 2021b). Waldbrände entstehen gewöhnlich bei trocken-heißen Wetterbedingungen und meistens durch menschliches Mitwirken (Süssner 2020). Dass in Kiefernwäldern auf sandigen Böden die Feueregefahr besonders hoch ist, liegt teilweise auch an der Begleitvegetation in diesen Beständen (Müller 2019). Durch den Waldumbau von Nadelholzmonokulturen hin zu Laub(misch)wäldern könnte sich zukünftig das Waldbrandrisiko in Deutschland

⁴¹ Berechnungen von Ammer et al. (2010) zeigen auf, dass allein die jährlichen Opportunitätskosten in Deutschland für den Bau von Schutzzäunen im Wald zur Verhinderung von Wildschäden bis zu 90 Mio. Euro betragen (Spathelf 2022, S. 55).

unter Umständen wieder etwas abschwächen, denn grundsätzlich schätzen Experten das Brandrisiko in Laubwäldern in Deutschland als nicht so hoch ein (ForestFireWatch/Erling Verlag GmbH & Co. KG 2020). Insgesamt gesehen legen Szenarien aber nahe, dass die Waldbrandgefahr aufgrund einer steigenden Anzahl und Länge von Trockenperioden zunehmen wird. Es wird davon ausgegangen, dass Wälder durch den Klimawandel lichter sein werden, was zu mehr brennbarer Bodenvegetation und zu trockeneren Bedingungen am Waldboden führen könnte, da die Niederschläge von Frühjahr bis Herbst geringer ausfallen werden (UBA 2021).

Thema der folgenden Ausführungen sind präventive Maßnahmen beim Waldbrandschutz im Bereich des Waldbaus und Waldmanagements. Technische Optionen zur Früherkennung und Bekämpfung von Bränden wurden in einem Themenkurzprofil des TAB (2023) zusammengefasst und werden hier nicht speziell beleuchtet.

Maßnahmen im Bereich Waldmanagement und Waldbau

Etwa 75 % aller Waldbrände in Deutschland sind Bodenfeuer (Dännart 2015), die relativ gut bekämpft werden können, solange das Feuer nicht in den Kronenbereich vordringt und damit zum Voll- bzw. Kronenfeuer wird (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 153 f.). Bei den großen Waldbränden 2018 konnte das Feuer jedoch nicht schnell bekämpft werden, da die Flächen munitionsbelastet waren (Müller 2019). Daher ist es notwendig, vor allem die Bedingungen in Bodennähe zu kontrollieren, die Brände begünstigen. Ein Brand kann nur entstehen, wenn genügend brennbares Material wie Gras, Totholz, Reisig, Streuauflage, Harze oder Rohhumus vorhanden ist. Zudem muss das Material trocken genug sein. Besonders trockenes Gras im Frühling entflammt leicht und entzündet dann weiteres Brennmaterial wie Äste, die dann entsprechend lange weiterbrennen. Hieraus resultieren zwei grundlegende Handlungsoptionen zur Waldbrandvermeidung: Reduzierung von brennbarem Material in Bodennähe sowie Vermeidung der Austrocknung des Materials. Das Austrocknen des Bodens und des Brennmaterials kann u. a. auch durch eine geeignete Baumartenwahl gesteuert werden, die sicherstellt, dass die Bodenschicht so geschützt ist, dass sie nicht austrocknet. Die richtige Baumartenwahl ist aber auch der Garant dafür, dass kalamitätsbedingte Störungen der Baumschicht lokal begrenzt bleiben. Nadelbäume sind durch den geringeren Flammpunkt und höheren Harzgehalt generell stärker brandgefährdet als Laubbäume.

Risikosenkende bzw. -erhöhende Faktoren für Waldbrände sind im Kasten 3.6 zusammengefasst (WBW 2021, S. 77).

Kasten 3.6 Waldeigenschaften und Waldbrandrisiko

Risikoerhöhende Merkmale

- leicht entzündbare Bodenvegetation (vor allem trockenes Gras nach dem Winter) in offenen, lichten Wäldern bzw. auf Sturm- oder Käferschadensflächen
- große Streuauflagen und brennbarer Rohhumus (typisch unter Kiefer, aber auch Fichte und Lärche, die als Rohhumusakkumulierer gelten; (Forster et al. 2019)
- entzündbares Totholz bzw. Schlagabraum (hohe Brandintensitäten und längere Brände bei Bodenfeuern)
- gestufte Bestände mit starker vertikaler Schichtung sowie tiefbeastete Bestände und Jungbestände (Risiko-faktor für eine Feuereskalation vom Bodenbrand zum Kronenbrand, da das Feuer wie an einer Leiter entlang der Äste hochbrennen kann; Süßner 2020 S. 26)

Risikosenkende Merkmale

- geastete Bestände bzw. Bestände mit natürlichen Astabwurf nach dem Absterben eines Astes (Vermeidung des Feuerleitereffekts)
- eine gut umsetzbare Laub- oder Nadelstreu, die brennbare Rohhumusauflagen verhindert (z. B. bei Douglasie, Buche, Ahorn, Esche).
- dichte, hochbekronte Bestände ohne Begleitvegetation (Gras, Büsche) und lange Totastzonen (z. B. geastete Douglasie)
- Bestände aus Baumarten, die eine schnelle Streuabbau und Zersetzung von Feinreisig gewährleisten (u. a. Ahorn, Birke, Buche, Douglasie, Esche, Linde, Tanne)

Quelle: Seifert et al. 2022, S. 153

Folgenden Maßnahmen sind waldbauliche Präventivmaßnahmen, die im Rahmen des (naturnahen) Waldmanagements angewendet werden können (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 151 f.; Süßner 2020):

- *Wundstreifen*: Wenige Meter breite, von Hand angelegte Streifen, auf denen die Streu und Rohhumusaufgabe bis zum Mineralboden entfernt wird. Die Freihaltung von Vegetation soll die Ausbreitung von Bodenfeuern verhindern. Sie dienen als vorbeugender Waldbrandschutz bzw. auch zur aktiven Brandbekämpfung und können maschinell regelmäßig gepflegt werden.
- *Schutzstreifen*: Gegen die Ausbreitung von Bodenfeuern angelegte Streifen von ca. 30 m Breite. Die Bodenvegetation wird regelmäßig entfernt und die Bäume auf dem Streifen werden geastet (Entfernung der unteren Äste) um eine Ausbreitung von Feuern in die Krone zu verhindern. Der Streifen benötigt regelmäßige Pflege zwecks Verhinderung von brennbarem Grasunterwuchs.
- *Laubholzriegel*: ein zumeist 200 bis 300 m breiter Streifen, der mit Laubholz bewachsen ist. Dieser wird in nadelholzdominierten Wäldern angelegt, um so auch Kronenfeuer aufhalten zu können.
- *Laubholzunterbau bzw. Waldumbau*: Nadelbaumreinkulturen können auch mit Laubholz unterpflanzt werden. Laubholz sorgt für zusätzlichen Schatten und reduziert zumeist die (leicht brennbare) Bodenvegetation. Zudem ist das Laub leichter zersetzbar und verhindert so dicke Auflagen aus nicht zersetztem Rohhumus, welche die Brandgefahr erhöhen.
- *Erschließung, Beschilderung*: Um an Feuer gelangen zu können, müssen mit (großen) Löschfahrzeugen befahrbare Straßen vorhanden sein. Notwendig ist eine gute Beschilderung der Straßen, Wege und Waldorte, damit Einsatzkräfte schnell die Brandherde erreichen können.
- *Wasserversorgung*: Vor Ort muss ausreichend Löschwasser zur Brandbekämpfung verfügbar sein, z. B. durch zuvor eingerichtete und gut erreichbare Löschteiche mit entsprechenden Zapfstellen oder Zisternen.

Die als besonders feuergefährlich geltenden jungen Kiefernreinbestände sind durch die schwer abbaubare Nadelstreu (Streu und Rohhumus), die bis zum Boden ragenden Äste (Totasterhalter) und durch den großen Harzgehalt der Bäume stark gefährdet (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 154). Erst durch die im späteren Alter erfolgende Astung wird die Brandgefahr gemindert. Darüber hinaus sind ältere Kiefernbestände lichter, wodurch sich eine Bodenvegetation (vor allem Gräser) bilden kann, durch die sich wiederum die Feuergefahr erhöht. Gibt es im Winter strenge Frostperioden, sodass das Gras erst sehr spät im Frühjahr anfängt zu wachsen, kann die alte, abgestorbene Grasschicht nicht früh im Jahr durch frisches, grünes und schwer entflammbares Gras ersetzt werden. Dadurch steigt die Brandgefahr in den Frühjahrsmonaten. Allerdings sinkt die Brandgefahr durch milde Winter, wenn eine Grasschicht schon im Frühjahr grün ist. Zur Verminderung der Brandlast werden in gefährdeten Regionen schon bisher die Bäume komplett aufgearbeitet und zum Teil auch der Schlagabraum gehäckselt, der aus Ernterückständen wie Ästen, Zweigen, Wipfeln und nicht geernteten Stammstücken besteht, um die Biomasse aus dem Wald zu entfernen oder die Zersetzung zu beschleunigen und so die Brandlast zu verringern (Maier/Hengst-Ehrhard 2022). Entlang von Waldwegen ist die regelmäßige Mahd von Gras bzw. das Beseitigen von Büschen ein bewährtes Mittel.

Weitere Maßnahmen, die bei der Prävention von Waldbränden helfen können, sind Astung sowie kontrolliertes Abbrennen von Bodenvegetation (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 155). Astung zur Waldbrandbekämpfung muss flächig durchgeführt werden und nicht, wie typischerweise forstlich üblich, nur an den späteren Werträgern (Z-Bäume), die bei der Ernte den Endbestand bilden. Astung ist allerdings zeitaufwendig und somit teuer. Derzeit ist eine Renaissance bei der Entwicklung von Klettersägen zu beobachten, die zur automatisierten Astung größerer Nadelholzbestände genutzt werden können. Diese automatisierten Sägen entfernen die Äste vom unteren Stammteil und fahren dabei selbständig den Baumstamm entlang hoch. Die Technologie war schon vor einigen Jahrzehnten verfügbar (z. B. die Klettersäge von Fichtel-Sachs, Schweinfurt), konnte sich jedoch nicht nachhaltig etablieren, vor allem weil die Geräte sehr schwer waren und zum Baum getragen werden mussten. Derzeit sind allerdings etliche Neuentwicklungen auf dem Markt oder in der Erprobung (Baker 2018). Sollten sich diese Geräte als praxisgeeignet erweisen, hinsichtlich der Handhabung, Astungsleitung und den Investitionskosten, wäre eine flächige Astung als Präventionsmaßnahme eine Option.

Eine weitere Maßnahme, die im Ausland intensiv und erfolgreich genutzt wird, ist das kontrollierte Abbrennen von Bodenvegetation und Streuschichten (Prescribed Burning) zu Zeiten, in denen genügend Feuchtigkeit in der Bodenschicht herrscht, sodass keine heißen Feuer und damit einhergehende gefährliche Brandsituationen entstehen. Dabei wird die Brandlast unter Aufsicht fachkundiger Personen gezielt durch Bodenfeuer reduziert, um katastrophalen Vollbränden im Kronenraum vorzubeugen (Fernandes/Botelho 2003). Prescribed Burning wird in Deutschland derzeit nicht praktiziert (Herrmann o. J.), wäre aber eine Option, vor allem wenn sich die Feuergefahr von Vollbränden weiter erhöhen sollte. Wichtig ist dabei eine effiziente Methode, kleinere Brände zu entfachen.

Technische Hilfsmittel dazu sind auf Hubschrauber und neuerdings auch auf Drohnen montierte Munitionsbehälter, die kugelförmige Zündsätze im Wald abwerfen, welche sich selbst entzünden, sobald sie auf den Waldboden aufschlagen (z. B. System IGNIS der Firma Drone Amplified⁴²). Damit ist ein flächiges Abbrennen der Bodenvegetation und Streuschicht unter der Voraussetzung möglich, dass die Baumarten in den betroffenen Waldbeständen eine dicke Borke haben, die kleinen, nicht heiß brennenden Feuern widersteht.

Eine Charakterisierung der mitteleuropäischen Baumarten nach ihrer Rindenisolation gegen Feuer ist allerdings bislang noch recht rudimentär und mit methodischen Mängeln behaftet. Hier besteht Forschungsbedarf. Auch die ökologischen Auswirkungen von Prescribed Burning sind in Deutschland kaum untersucht. Studien aus Ländern, in denen die Technik schon länger angewandt wird, zeichnen ein komplexes Bild (Elliott et al. 1999; Fontúrbel et al. 2021). Grob lässt sich sagen, dass die Intensität der Feuer, die Frequenz der Feuer und auch die Jahreszeit Einflüsse auf die ökologischen Konsequenzen haben.

3.5 Implikationen für das Waldmanagement

Die planvolle und zielorientierte Steuerung von Ökosystemen wird als Ökosystemmanagement bezeichnet (Spathelf 2022, S. 24). Dabei geht es nicht nur um die Nutzung der Ökosystemleistungen, sondern auch um die Sicherung des Status der Ökosysteme und das Monitoring möglicher Veränderungen. Zugleich geht es oftmals auch darum, die Erbringung einzelner Funktionen und Leistungen zu maximieren, was in der Regel mit der Reduktion anderer Leistungen einhergeht. Zu konstatieren ist aber, dass die Idee einer solchen Multifunktionalität von Wäldern, also viele Leistungen gleichzeitig und gleich stark nutzen zu können, sehr spezifische standörtliche und eben auch klimatische Rahmenbedingungen erfordert (Ibisch 2019, S. 8). Die Wälder sollen zum einen möglichst viel Kohlenstoff und Wasser speichern, die Biodiversität sichern bzw. befördern, andererseits aber viel Holz als beständig nachwachsende Ressource für die Bauwirtschaft sowie die Bioökonomie insgesamt liefern und zugleich den zunehmenden und intensiveren Hitzeperioden und Dürren trotzen. Unter den Gegebenheiten eines sich beschleunigenden Klima- und sich verstärkenden Umweltwandels wird ein immer größerer Anteil der Primärproduktion von Waldökosystemen für die Pufferung von Extremen (Hitze, Trockenheit, Windwurf, Feuer, Insektenkalamitäten etc.) und die Anpassungsleistungen benötigt.

Eine naturnahe bzw. naturgemäße Waldwirtschaft, wie sie momentan in zahlreichen Forstbetrieben Deutschlands betrieben wird, ist zum Teil kompatibel mit den beschriebenen Anpassungserfordernissen. Offen sind jedoch noch etliche Fragen hinsichtlich geeigneter Managementoptionen im Spannungsfeld von Schutz und Nutzung: Ist eine strenge Separierung von Naturschutzflächen und Nutzflächen erforderlich (Integration vs. Segregation, Kap. 3.5.1)? Sollen Wälder weitgehend sich selbst überlassen werden oder ist der Waldumbau durch Eingriffe aktiv voranzutreiben (aktives vs. passives Waldmanagement, Kap. 3.5.2)? Ob bei Wiederaufforstungen hauptsächlich auf passive Strategien (Naturverjüngung) oder auf aktive Aufforstung gesetzt werden sollte, wird aus forstwissenschaftlicher Sicht intensiv diskutiert (Kap. 3.5.3).

3.5.1 Integration oder Segregation?

In der Forstwirtschaft werden schon seit Längerem zwei Ansätze verfolgt, um Zielkonkurrenzen bei der Waldbewirtschaftung zu minimieren (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 53). Beim *integrativen Ansatz* sollen die Interessen und Ziele der Waldeigentümer und zugleich die Ansprüche verschiedener gesellschaftliche Gruppen an den Wald verfolgt werden. Bei der *segregierten Forstwirtschaft* werden die Ökosystemleistungen des Waldes auf unterschiedlichen Flächen bereitgestellt, um so die (potenziell konfligierenden) Waldbewirtschaftungsziele zu erreichen. Hier besteht ein Nebeneinander von strikt geschützten Gebieten, meist auf einer erheblichen Waldfläche der betreffenden Länder, sowie an den ökonomischen Erfordernissen ausgerichteten intensiv bewirtschafteten Wäldern.

In Deutschland wird auf der überwiegenden Waldfläche zwar nach ökonomischen Gesichtspunkten gewirtschaftet, jedoch bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Mindestanforderungen an den Waldnaturschutz (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 53). Dieser Ansatz wird auch als integratives Waldmanagement bezeichnet (Kraus/Krumm 2013). Hierbei können in den für die Nutzung vorgesehenen Flächen spezifische Waldeleistungen wie Erholung, Schutz vor Naturgefahren oder Bereitstellung von Nichtholzwaldprodukten auf Teilflächen priorisiert werden. Das integrative Waldmanagement geht überwiegend mit den Erfordernissen der Anpassung der Wälder an den Klimawandel konform. Es erfüllt eine Vielzahl der Ansprüche, die aus den sozioökonomischen Rahmenbedingungen in der dicht besiedelten und vielfältigen Kultur(wald)landschaft Mitteleuropas mit ihrer

⁴² <https://droneamplified.com> (30.5.2024)

jahrhundertealten Nutzungsgeschichte hervorgehen. Dieser Ansatz wird jedoch vermehrt infrage gestellt und zugleich die stärkere Berücksichtigung segregativer Elemente gefordert, um den sich ändernden Anforderungen der Gesellschaft an den Wald gerecht zu werden (z. B. Borchers 2010).

Kasten 3.7 Trittsteinkonzept

Ein vielversprechendes Beispiel der Anwendung des integrativen Waldmanagements ist das Trittsteinkonzept, wie es im Betrieb Ebrach der Bayerischen Staatsforsten entwickelt wurde (Mergner 2021). Unter einem Waldtrittstein werden Waldorte oder Baumansammlungen verstanden (Größe > 0,3 ha), deren Bäume zahlreiche Habitatstrukturen aufweisen und ökologisch besonders wertvoll sind. Typische Trittsteine sind beispielsweise eine Altholzinsel im jungen Wald, eine schwer erschließbare mit Wald bedeckte Schlucht, ein reich strukturierter Waldrand oder ein ehemaliger Niederwald oder Mittelwald. Trittsteine können z. B. als Naturwaldreservate oder Naturschutzgebiete geschützt sein, müssen es aber nicht. Wichtig ist jedoch die Vernetzung der Gebiete. So werden Attraktoren für Artenvielfalt geschaffen, die sich langfristig positiv auch auf den genutzten Wald auswirken. Im Forstbetrieb Ebrach der Bayerischen Staatsforsten ergeben Trittsteine über 10 % der Waldfläche (darunter sechs größere Naturwaldreservate), die der natürlichen Entwicklung überlassen sind (Mergner/Kraus 2020).

Quelle: Spathelf 2022, S. 54 f.

Ein relevanter Aspekt im Spannungsfeld von integrativem und segregativem Ansatz ist der Umfang und die Konnektivität der nicht genutzten (z. B. stillgelegten) Waldflächen vor allem zur Sicherung der Biodiversitätsfunktion (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 54 u. 59). In der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt (BMUB 2007) ist Deutschland die Verpflichtung eingegangen, bis 2020 5 % der Waldfläche unter strengen Schutz zu stellen bzw. aus der Nutzung zu nehmen (NWE-Flächen, Wälder mit natürlicher Waldentwicklung). Das Ziel wurde jedoch nicht erreicht (Engel et al. 2019). Und die aktuelle EU-Biodiversitätsstrategie sieht vor, 10 % der EU-Landflächen unter strengen Schutz zu stellen (EK 2020). Spathelf (2022) konstatiert, dass das integrative Waldmanagement einen für Deutschland geeigneten und international anschlussfähigen Waldbewirtschaftungsansatz darstellt, der – bei einem grundsätzlich integrativen Ansatz, wie das Trittsteinkonzept zeigt (Kasten 3.7) – Raum lässt für Schwerpunktsetzungen bei der Verfolgung verschiedener Waldleistungen (partielle Segregation).

3.5.2 Aktives oder passives Waldmanagement?

Laut Wissenschaftlichem Beirat Waldpolitik (WBW 2020, S. 30) geht es beim naturnahen und klimaangepassten Waldumbau zwar auch um integrative vs. segregative Modelle bzw. Überlegungen, noch mehr jedoch um den grundsätzlichen Aspekt eines aktiven vs. passiven Waldmanagements in unseren zukünftigen Wäldern. Eine der Hauptkonfliktlinien in diesen wissenschaftlichen Diskussionen zum richtigen (naturnahen) Waldumbau ist die Frage, ob Wälder weiterhin nachhaltig genutzt werden sollen oder ob das Ökosystem Wald mit seinem unbestrittenen Wert für eine Vielzahl von menschlichen Bedürfnissen (Klimaschutz, Hort der Biodiversität, Lieferant weiterer Ökosystemleistungen) unter einen weitgehenden Schutz unter Ausschluss oder zumindest einer deutlichen Reduktion der Nutzung gestellt werden sollte (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 16 u. 49). Eine Verschnaufpause für den Wald also, die es ihm ermöglichen soll, über Selbstregulationsprozesse wieder zu einer stabilen Entwicklung zu kommen, und die seine Resistenz und Resilienz erhöht. Entsprechend weist z. B. Wohlleben (2015) darauf hin, dass ungesteuerte Waldökosysteme sich mittels evolutionärer Entwicklungsprozesse selbst optimieren und daher auch gegenüber negativen Umweltauswirkungen weniger vulnerabel bzw. resilienter und stabiler sind als solche, die vom Menschen aktiv beeinflusst oder gestaltet werden.

Allerdings sind die allermeisten Wälder in Deutschland und Mitteleuropa seit Jahrhunderten auch vom Menschen intensiv genutzte, gestaltete und veränderte Kulturlandschaften (Volk/Spathelf 2023; dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 16 u. 49 f.). Diese Kulturwälder, wie beispielsweise das Waldgebiet des Jahres 2023, der Choriner Wald in Brandenburg, wurden durch forstliche Bewirtschaftung (naturnahen Waldbau) in den vergangenen 200 Jahren zu vielfältig gemischten und strukturreichen Laubwäldern entwickelt. Entstanden waren sie vielfach aus ausgeplünderten baumarmen Agroforsten. Kulturwälder sind heute oft durch eine beträchtliche Habitatvielfalt gekennzeichnet, die sich bei einer Stilllegung signifikant verringern würde. Ein gutes Beispiel dafür sind Eichenwälder, die aufgrund der hohen Konkurrenzkraft der Buche mittel- bis langfristig ohne steuernde Eingriffe des Menschen stark zurückgedrängt würden. In aktuelle(re)n Untersuchungen zur trockenstressinduzierten Mortalität

in Buchenwäldern konnte zudem gezeigt werden, dass bewirtschaftete Bestände insgesamt keine höhere Mortalität als unbewirtschaftete Bestände haben – wenngleich in den bewirtschafteten Wäldern eher ältere und höhere Bäumen betroffen sind –, während in unbewirtschafteten Wäldern aufgrund der hohen Konkurrenz der Bäume untereinander (fehlende Baumentnahmen) verstärkt unterständige Bäume absterben (Meyer et al. 2022). Dass Pflegeeingriffe Wälder anpassungsfähiger gegenüber Klimaextremen wie Trockenis oder Sturm machen können, legen weitere Untersuchungen nahe (Senf et al. 2019; Sohn et al. 2016; Stubenazy et al. 2020).

Anzuführen sind in dem Diskussionszusammenhang auch die relevanten Aspekte einer kontinuierlichen, einzelbaumorientierten Pflege zur Sicherung der Strukturvielfalt und der Verbesserung von Vitalität, Stabilität und Wertleistung in Dauerwäldern (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 50). Sie sind ein Grundprinzip der naturgemäßen Waldwirtschaft. Ihre vielfältige Baumartenmischungen sind eine Folge von Eingriffen, die ein zu dichtes Aufwachsen und den Ausschluss von weniger konkurrenzkräftigen Baumarten verhindern. Funktionelle Diversität, also das Vorhandensein von Baumarten mit unterschiedlichen anpassungsrelevanten Eigenschaften wie Trockenstresstoleranz oder Frosthärte, kombiniert mit Redundanz dieser Eigenschaften hat zur Folge, dass ein störungsbedingter Verlust nicht sofort zum Verlust der Anpassungs-Eigenschaften führt (Messier et al. 2019). Die in naturgemäß bewirtschafteten Wäldern realisierten Nutzungsmengen sorgen für Kontinuität in der Waldverjüngung, weil so die Lichtverhältnisse in Bodennähe verbessert werden und es – bei konsequent habitatverträglichen Wildbeständen – zu flächenhafter Etablierung von Verjüngung kommt. Beispiele für durch aktives Management gesicherte Waldaufbauformen bzw. Strukturelemente sind lichte Eichenwälder, deren faunistische Artenvielfalt mit Baumentnahmen zur Senkung der Holzvorräte sichergestellt werden können, aber auch Waldinnenränder (Freiräume an Wegen, Leitungstrassen oder kleinen Öffnungen im Wald) mit ihrer biodiversitätsfördernden Wirkung oder Pionierbaumarten, die aufgrund ihrer Lichtbedürftigkeit in ihrer Entwicklung einer steten Förderung bedürfen.

3.5.3 Aktive Aufforstung oder Naturverjüngung?

Ganz grundsätzlich betrachtet scheinen Störungen vielerlei Art bestimmend für die Waldentwicklung zu sein (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 41). Dazu zählen insbesondere Stürme, Dürren, Landschaftsbrände und biotische Schadereignisse. Grundsätzlich wird zwischen großflächigen, bestandesersetzenden und kleineren (z. B. das Absterben einer Baumgruppe) Störungsereignissen unterschieden. Wie resistent und resilient Waldökosysteme gegenüber Störungen reagieren, ist zu einer zentralen Frage der Waldökosystemforschung und des Waldmanagements geworden. So wirken Störungen beispielsweise auf die Biomasseakkumulation und damit Kohlenstoffspeicherfähigkeit von Waldlandschaften und sie haben Einfluss auf die Biodiversitätsentwicklung auf verschiedenen Skalenebenen.

Ein wichtiger Mechanismus der Selbstregulation von Wäldern nach Störungen ist die natürliche Wiederbewaldung (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 42). Nach Störungen entsteht in Deutschland fast immer wieder Wald. Auf Sturm- oder Brandflächen gehören insbesondere Pionierbaumarten wie die Zitterpappel (Aspe) oder Birke zu den Erstbesiedlern von Kahlfleichen. Der Eintrag der Baumarten hängt von den Samenquellen in der Nachbarschaft, den überliegenden Samen im Boden oder von samenverbreitenden Tieren (vor allem Vögeln) ab (Aldinger/Kenk 2000; Dobrowolska 2015; Schubert 2022). Die Regenerationskraft der Wälder ist oft hoch, sodass nach etwa 3 bis 5 Jahren wieder ausreichend dichte Wälder entstehen. Häufig ist der Anteil der Pionierbaumarten größer als vor der Störung, auch bleiben kleinere Flächen unbestockt.⁴³ Zahlreiche Studien zeigen, dass die Baumartenvielfalt zu einer Steigerung von Resistenz und Resilienz im Wald führt, vor allem gegenüber kleinflächigen Störungen (z. B. (Jactel et al. 2017). Grund dafür ist der Effekt der Risikostreuung durch verschiedene Baumarten gegenüber dem Störungsereignis. Weitere Effekte in Mischbeständen sind reduzierte Dichten von gegenüber bestimmten Störungen besonders empfindlichen Bäumen oder wirkungsvolle Symbiosen, z. B. bei Mykorrhizen, die zu einer besseren Wasserversorgung der Bäume führen.

Die Frage, ob beim naturnahen Waldumbau insbesondere nach großflächigen Schadereignissen ausschließlich auf eine Naturverjüngung beim Baumbestand sowie im gesamten Waldökosystem und somit auf forstliches Nichtstun gesetzt werden sollte oder ob eine aktive Aufforstung zu klimastabileren Wäldern führt, wird kontrovers diskutiert. Nach Ansicht von Expert/innen wäre im Einzelfall zu klären, ob es wahrscheinlich ist, dass sich in absehbarer Zeit Baumarten einfinden, die mit dem künftigen Klima zurechtkommen (SMC 2023). Möglicherweise könnte dies bei kleineren Flächen und vor allem dann gelingen, wenn ausreichend Bäume von trockenheitstoleranten Baumarten am Rande des geschädigten Bestandes vorhanden oder auf der Fläche verblieben sind, von denen in

⁴³ Bei Ausbleiben einer Verjüngung sind in der Regel eine oder mehrere der folgenden Hemmnisse verantwortlich: extreme auf die Verjüngungspflanzen wirkende Witterungsverhältnisse, fehlende Samenbäume, mächtige Streuauflagen oder Vergrasung, hohe Verbissbelastung (Spathelf 2022, S. 42).

nennenswertem Umfang eine Naturverjüngung zu erwarten wäre. Wenn dies aber nicht der Fall ist, wächst auf solchen Flächen sehr häufig und überwiegend die Baumart, die zuvor dort bereits vorhanden war oder den Baumbestand dominierte. In solchen Fällen könnte es daher sinnvoll sein, aktiv Pflanzungen solcher Baumarten vorzunehmen, von denen eine höhere Resilienz gegenüber zunehmender Hitze und Trockenheit erwartet wird. Infrage kommen dabei neben einheimischen Arten auch nicht heimische aus solchen Regionen, in denen das gegenwärtige Klima dem zukünftig in Deutschland erwarteten ähnelt (siehe Kriterien zur Prüfung der ökologischen Zuträglichkeiten von Baumarten in Kap. 3.3.3). Generell ist zu konstatieren, dass bei der Wiederbewaldung von Kahlf lächen der standörtlich-räumliche Kontext zu beachten ist. Zugleich kristallisieren sich in den Waldbauüberlegungen vor allem öffentlicher Waldbesitzenden einige Grundprinzipien der Wiederbewaldung heraus:

- Naturverjüngung vor Saat vor Pflanzung
- Etablierung funktionell vielfältiger Baumbestände
- Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte (Schaffung von Trittsteinen, Habitatbaumgruppen, Totholz, keine Kompletträumung von Altbestandsresten)
- Befahrung nur auf dafür vorgesehenen Linien

Die komplette Räumung von Störungsflächen war lange gängige Praxis im Umgang mit Kalamitäten (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 43). In Fichtenbeständen kann die effektive Räumung von abgestorbenen Bäumen und des Schlagabraumes, also der Ernterückstände, zwar weiterem Borkenkäferbefall vorbeugen (Dobor et al. 2020). Der Ansatz des Aufräumens und Aufforstens wird jedoch gerade im Kontext von notwendigen Anpassungen an den Klimawandel auch als kontraproduktiv kritisiert (Ibisch 2019, S. 10 f.). Angeführt werden beispielsweise Erfahrungen aus Brandenburg, wo auf geräumten und danach witterungsexponierten Waldbrandflächen Kiefern gepflanzt wurden, die größtenteils noch im ersten Jahr nach der Pflanzung wieder eingingen. Auch wird konstatiert, dass die Räumung von durch Kalamitäten betroffenen Flächen erhebliche Folgeschäden anrichten könnte, zum einen durch die intensive Befahrung mit schwerem Gerät und die resultierende Verdichtung der Böden, insbesondere aber durch die auf Kahlf lächen auftretenden mikroklimatischen Extreme. Infolgedessen könnte das Waldökosystem bzw. Habitat viele Nährstoffe verlieren, ebenso das Wasserspeichungsvermögen und die für die biotische Regulation bedeutsamen unzähligen Pflanzen, Tiere und Kleinstlebewesen (Ibisch 2019, S. 10). Neuere Forschungsergebnisse verdeutlichen die negativen Wirkungen von Kahlf lächenberäumungen und Sanitärhiebsen auf das Waldökosystem (Thorn et al. 2019). So erhöht die vollständige Räumung von Ernterückständen und Totholz den Klimastress auf Kalamitätsflächen sowie das Risiko von Sturmschäden an künstlich erzeugten Bestandesrändern. Umgekehrt wird auf die positiven Wirkungen von im Bestand zurückgelassenen Materials hingewiesen, etwa weil so ein Großteil der Artenvielfalt an Pflanzen, Vögeln, Insekten und Pilzen verbleiben und eine gewisse Habitatkontinuität gewährleistet werden kann (Thorn et al. 2020).

Auch nach Einschätzungen des BfN (2020, S. 7) sollten in der aktuellen Situation der Wälder in Deutschland un gelenkte Sukzessionsprozesse viel stärker als in der Vergangenheit in Wiederbewaldungsstrategien berücksichtigt werden (ein Prozess, der insbesondere im öffentlichen Wald bereits seit einiger Zeit stattfindet), letztlich mit dem Ziel, unter dem Vorrang natürlicher Entwicklungs- und Anpassungsprozesse naturnahe Laubmischwälder entstehen zu lassen. Darum sollten etwa durch Kalamitäten oder andere Einschlagsmaßnahmen entstandene Freiflächen nicht oder nur eingeschränkt geräumt werden. Es sei davon auszugehen, dass bei Vorhandensein von auf den Flächen abgestorbenen und/oder noch stehenden Altbäumen sich im Zuge der natürlichen Sukzession eine diverse (und manchmal besser angepasste) Folgegeneration an Baumbeständen etablieren kann (standortbezogene Selektion) als bei künstlichen Verjüngungsverfahren bzw. Aufforstungen (ohne Einbringung von bisher nicht vorhandenen Baumarten). Durch das auf den Flächen verbliebene Totholz entstehen so vielfältige Strukturen, Feuchtigkeits-, Licht- und Temperaturgradienten, die weiterhin zu einer Erhöhung der Lebensraumvielfalt in den Folgebeständen beitragen (z. B. Thorn et al. 2017).

3.5.4 Schlussfolgerungen

Insgesamt spricht vieles dafür, dass eine aktive Waldbewirtschaftung, sofern sie in nachhaltiger Weise vorgenommen wird, den Waldumbau zu klimastabileren Wäldern wesentlich unterstützen kann (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 49 u. 52). Eine schonende Holznutzung trägt zur Waldpflege bei und kann den Aufbau strukturreicher Mischwälder erleichtern, zu verminderter Konkurrenz zwischen den Bäumen führen und daher ein zentrales Anliegen im Bereich der Anpassung von Wäldern an den Klimawandel begünstigen (Ammer 2017; Bauhus et al. 2017b; Brang et al. 2014). Spathelf (2022) schlussfolgert, dass sorgsam gepflegte, also genutzte Wälder häufig ebenso stabil sind wie ungenutzte Wälder und sogar Vorteile haben können, was die Bereitstellung spezifischer Ökosystemleistungen anbelangt (z. B. Erholungswald, Schutz vor Naturgefahren).

Waldumbau und Anpassung an den Klimawandel sind jedoch eine Daueraufgabe (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 64). Es ist nicht davon auszugehen, dass ein bestimmter Zielwald mit klimaangepassten Baumarten, sollte er je erreicht werden, dauerhaft resistent und resilient gegenüber Umweltveränderungen ist. Insbesondere vulnerable Wälder bzw. Waldgebiete, die aufgrund des Klimawandels und zunehmender klimatischer Extremereignisse stark geschädigt werden können, sind rechtzeitig mit geeigneten Monitoringsystemen (Kap. 4.1) zu identifizieren und dann vordringlich zu stabilisieren. Waldumbau und Anpassung an den Klimawandel werden demnach zu einer kontinuierlichen Herausforderung. Dies erfordert einen dafür geeigneten Managementansatz und robuste Entscheidungen unter Berücksichtigung zunehmender Unsicherheit.

Ein geeignetes Konzept im Bereich des Managements natürlicher Ressourcen ist das adaptive Management (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 64; (Gregory et al. 2006; Williams/Brown 2014). Ziel dabei ist es, die Unsicherheit bezüglich des Systemverhaltens von Waldökosystemen durch Wissenszugewinn (z. B. über Monitoring, Forschung) zu verringern. Adaptives Management wird als ein iterativer Prozess in kurzen Zeitabständen verstanden, wobei in der Vorbereitungsphase die Einbindung von relevanten Stakeholdern und die Definition gangbarer Managementalternativen empfohlen wird. Basierend auf dem aktuellen Verständnis des Ökosystems und seiner prognostizierten Entwicklung werden anschließend Maßnahmen zur Umsetzung identifiziert und durch ein geeignetes Monitoring überprüft. Monitoringkenngrößen, die die Ökosystemresilienz beeinflussen können, sind z. B. Intensität der Naturverjüngung, Baumartenvielfalt, Totholzmenge, Bestandesvorrat, Baumvitalität, Diversitätsparameter (Bestand, Landschaft). Mithilfe des Monitorings können somit die in einem Managementzyklus gemachten Erfahrungen aufgegriffen, das Problem neu definiert und die Ziele angepasst werden. Schließlich werden auch konkrete Praxistests empfohlen, um gezielt Wissen zu generieren und in Entscheidungen einfließen zu lassen. Ein aktuell viel diskutiertes Beispiel für Praxistests sind großflächige Versuche auf Landschaftsebene, Waldreallabore. In ihnen werden verschiedene Managementoptionen in ihren Auswirkungen auf Ökosystemleistungen wie z. B. Biodiversität oder Kohlenstoffspeicherung miteinander verglichen (Rudow/Bugmann 2021). Waldreallabore sollen zudem aktuelle und zukünftige Aspekte der Waldbewirtschaftung und -nutzung für die Gesellschaft erlebbar machen.

3.6 Fazit

Der beschleunigte Klimawandel bedroht die Integrität der Waldökosysteme in Deutschland erheblich. Die Folgen bisher sind eine zunehmende Vulnerabilität und gestiegene Mortalität aller Baumarten, vor allem der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche und Buche und der Verlust an Produktivität (Volumenwachstum). Insbesondere die Baumart Fichte ist infolge der heißen Dürren seit 2018 im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt in erheblichem Umfang – auch großflächig – abgestorben. Etwa 10% der Fichtenvorräte und damit ursprünglich sehr zuwachskräftige Wälder gingen in Deutschland dadurch verloren. Angesichts der massiven Auswirkungen der Dürre- und Hitzejahre auf die Wälder – im Verbund mit Sturmereignissen und Schädlingsbefall – wird die Notwendigkeit eines beschleunigten Waldumbaus vielfach bekräftigt.

Waldumbau umfasst eine Reihe von Maßnahmen, die darauf abzielen, einen nachhaltig funktionsfähigen Zustand der vom Menschen genutzten Wälder zu erreichen, und ist als Ziel und Fördertatbestand inzwischen Gegenstand fast aller Waldbaustrategien auf Bundes- und Landesebene. Vor allem im Kleinprivatwald sind noch erhebliche Umsetzungsdefizite zu verzeichnen. Allgemeines Ziel des Waldumbaus ist der Aufbau von Mischwäldern mit hoher struktureller Vielfalt zur Förderung der Stabilität (Resilienz) und Anpassungsfähigkeit der Wälder. Mischwälder sind – und dazu liegen umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse bereits seit längerer Zeit vor – den Reinbeständen sowohl in der Produktivität als auch in der Resistenz sowie Resilienz gegenüber Störungen und Stress in aller Regel überlegen (Spathelf 2022, S. 5).

Die Resilienz von Waldökosystemen ist angesichts der beschleunigten Umweltveränderungen zu einem zentralen Ziel der Waldbewirtschaftung in Deutschland geworden (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 5). Dabei rücken die Bewahrung sowie die Wiederherstellung der Ökosystemintegrität immer stärker in den Vordergrund. Zu den als zentral erachteten Anpassungsprinzipien gehören genetische Vielfalt, Baumartenvielfalt, dauerwaldartige Bewirtschaftung zur Sicherung von Strukturvielfalt und Waldklima, Schutz des Bodens sowie Nutzung des Potenzials von Wäldern zur Selbstregulation. Als Schlüsselprozess zur Entwicklung von resilienten Wäldern wird die Waldverjüngung angesehen, mit dem Ziel, vielfältige Waldökosysteme zu etablieren. Diese können Stressereignisse und Störungen besser absorbieren, wodurch Waldökosystemleistungen langfristig gesichert werden. Eine wichtige Voraussetzung, damit der Waldumbau zu klimaresilienten Wäldern gelingen kann, sind nach allgemeiner Experteneinschätzung habitatangepasste Wildbestände.

Wälder haben in Deutschland immer noch eine gute Selbstregulationsfähigkeit: Nach Wald entsteht überwiegend wieder Wald (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 5). Zur Wiederbewaldung der umfangreichen Kahlfelder in Deutschland erscheint deshalb sinnvoll, verstärkt natürliche Prozesse wie Naturverjüngung zu nutzen und Elemente des Vorbestandes wie Habitatbäumen und auch Totholz weitgehend zu belassen. Dennoch sind, vor allem bei ungünstigen Voraussetzungen, wie fehlendem Naturverjüngungspotenzial, Vergrasung, zu hohen Wildbeständen, auch Aufforstungsmaßnahmen in Erwägung zu ziehen. Ein besonderes Augenmerk ist auf die möglichst geringe Beeinträchtigung des Waldbodens zu legen, denn ein funktionsfähiger Waldboden wird unter Klimawandelbedingungen immer mehr zum unverzichtbaren Wasser- und Kohlenstoffspeicher. Die Beschränkung der Befahrung bei Maschineneinsatz auf Rückelinien sowie die Humusverbesserung durch Beimischung von Laubbäumen in Nadelwäldern und kahlschlagfreie Verjüngung erscheint dabei essenziell.

Deutlich zeigt sich, dass Forstwirtschaft durch den Klimawandel risikoreicher wird. Die zukünftigen Veränderungen des Klimas sowie der Wuchsbedingungen müssen beim Waldmanagement und der Wiederbewaldung berücksichtigt werden, ohne genaues Wissen, wo, wie und in welchem Umfang sich welche Veränderungen vollziehen werden. Waldumbau und Anpassung an den Klimawandel wird demnach zu einer kontinuierlichen Herausforderung. Ob dabei ein grundlegender Paradigmenwechsel erforderlich ist, z. B. durch eine Nutzungsreduktion oder eine Stilllegung von Waldflächen in größerem Umfang, ist eine der zentralen Streitfragen in der Walddebatte (Kap. 2.4.1). Dabei geht es auch um die grundsätzliche, für die waldbauliche Praxis sehr komplexe Fragestellung, ob eher ein aktives oder passives Waldmanagement für die Erreichung der angestrebten waldbaulichen Ziele zuträglich ist. Die vorliegende Evidenz spricht eher dafür, dass nachhaltige Waldbewirtschaftung und schonende Holznutzung dazu beitragen können, den Aufbau vielfältig gemischter Wälder mit hoher Strukturvielfalt zu befördern (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 5). Zudem sichert die aktive Gestaltung von Waldökosystemen vielfach erwünschte regulierende und unterstützende Ökosystemleistungen wie Schutz vor Naturgefahren und Erholung. Selbst Biodiversitätsschutz lässt sich mit einer sinnvollen Mischung von genutzten Wäldern und ungenutzten Waldschutzgebieten oder Trittsteinen gewährleisten.

4 Technische Innovationen für Waldumbau und nachhaltiges Waldmanagement

In diesem Kapitel werden innovative Technologien vorgestellt, die für den Waldumbau eine wichtige Rolle spielen. In Kapitel 4.1 werden Schlüsseltechnologien beleuchtet, die für das Waldmonitoring relevant sind. Kapitel 4.2 befasst sich mit neuen maschinellen Ansätzen in der Waldbewirtschaftung, Fortschritten in den Bereichen von Sensorik und IT sowie mit der sich verstärkenden Digitalisierung der Wertschöpfungsketten bzw. der forstfachlichen Prozesse. In Kapitel 4.3 werden die neuen Möglichkeiten im Bereich des biotischen Waldschutzes beschrieben und in Kapitel 4.4 schließlich die Funktionen und Möglichkeiten analysiert, die ein genetisches Monitoring für die Entwicklung klimaresilienterer und stresstoleranterer Wälder bereitstellen kann. Zunächst wird jeweils der Stand der Technik erläutert, sodann werden mögliche Technologieperspektiven und einige Rahmenbedingungen aufgezeigt. Die Ausführungen in diesem Kapitel erfolgen in enger Anlehnung an das Gutachten von Seifert et al. (2022).

4.1 Waldzustandsmonitoring

Bei den Technologien für das Waldmonitoring herrscht eine starke Dynamik und etliche Akteure sowohl aus den Forstwissenschaften als auch aus der Geografie oder den Ingenieurwissenschaften leisten hier wichtige Beiträge. In diesem Kapitel sollen in enger Anlehnung an die Ausführungen von Seifert et al. (2022, S. 15 ff.) insbesondere drei Schlüsseltechnologien als Innovationstreiber mit Relevanz für den Waldumbau beleuchtet werden: multispektrale Sensoren auf Drohnen und Satelliten, boden- und luftgestützte Laserscanner zur Baum- und Waldstrukturanalyse sowie Algorithmen und Methoden des maschinellen Lernens zur Mustererkennung in Bildern und zur Auswertung dreidimensionaler Punktwolken.

Unter einem Waldzustands- bzw. Waldmonitoring werden hier alle Maßnahmen verstanden, die einer effektiven Überwachung von Gesundheit, Vitalität und Leistungsfähigkeit der Wälder dienen. In diesem Kontext können verschiedene Technologien und Sensorplattformen sowie auch unterschiedliche Datenquellen genutzt werden, deren Entwicklung hinsichtlich Hard- und Software und Einbindung in ein Gesamtkonzept derzeit sehr dynamisch verläuft. Das Waldmonitoring dient bei der Anpassung der Wälder an den Klimawandel den im Folgenden angeführten Zielen, die sich hinsichtlich ihrer zeitlich-räumlichen Skalen unterscheiden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 15):

- Langfristige Beobachtung von Flächen ausgewählter Natur- und Wirtschaftswälder sowie in Naturwaldreservaten und Nationalparks, um Trends in der Vitalität der jeweiligen Wälder und Bäume festzustellen.
- Erstellung von Waldinventuren, die zur Zuwachsermittlung sowie als Grundlage der strategischen Betriebsplanung und der laufenden Produktions- und Vitalitätskontrolle dienen. Durch die Erfassung produktionsrelevanter Wald- und Baumstrukturen wird die bestandesweise, monetäre und technische Grundlage für die Umsetzung von Umbaumaßnahmen planbar.
- Flächendeckende Priorisierung bestimmter Waldflächen, um Schäden und Ausfällen über rechtzeitige Umbaumaßnahmen präventiv zuvorzukommen.
- Schnelle Schadenserkenkung im Kalamitätsfall (Sturm, Trockenheit, Insektenbefall, Pathogene). Diese dient der taktischen Planung kurativer Umbaueingriffe, damit Maßnahmen rechtzeitig initiiert werden können, bevor größere Schäden im Baumbestand auftreten.

4.1.1 Überblick über bestehende Waldmonitoringnetzwerke

Es gibt in Deutschland mehrere, komplementär aufgestellte Netzwerke zum Waldmonitoring, deren Ziele und Methoden im Folgenden kurz beschrieben werden.

Bundeswaldinventur (BWI)

Die Bundeswaldinventur (BWI) wurde 1986 implementiert und gesetzlich im § 41a des Bundeswaldgesetzes festgeschrieben (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 16 ff.). Sie findet im 10-jährigen Turnus statt. Die letzte Hauptinventur liegt für 2012 vor. Eine neue Auswertung erfolgt im Verlauf der Jahre 2022/2023 (die Ergebnisse werden voraussichtlich Ende 2024 veröffentlicht). Das Stichprobenraster der BWI ist 8 x 8 km groß und es wird in manchen Bundesländern bzw. regional weiter verdichtet. Ziel ist die Erfassung der großräumigen Waldverhältnisse, getrennt nach Waldbesitzarten (Groß-/Kleinprivatwald, Staatswald, Kommunalwald). Die BWI wird vom Bund koordiniert und von den Ländern mit ausgeführt. Sie erlaubt eine flächige Beurteilung des Zuwachses und der Mortalität in den Wäldern. Die BWI nutzt keine modernen Technologien und wird durch Inventurtruppen am Boden mit einfachen Messinstrumenten durchgeführt.

Waldzustandserhebung (WZE)

Eingebettet in das internationale Kooperationsprogramm Wälder (ICP Forests) schrieb die EU-Kommission 1986 mit der Verordnung Nr. 3528/86⁴⁴ einheitlich die jährliche Erhebung des Kronenzustandes von Waldbäumen für ihre Mitglieder vor (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 15 f.). Die Zuständigkeit liegt in Deutschland bei den Bundesländern, der Bund wirkt koordinativ mit. Die Stichprobenpunkte werden bundeslandspezifisch im Raster von 2 x 2 km bis zu maximal 16 x 16 km durchgeführt, um den Belaubungsgrad der Bäume zu ermitteln. Die WZE bildet zusammen mit der Bodenzustandserhebung (BZE) das Level-I-Netz des harmonisierten Waldmonitorings auf europäischer Ebene. Etwa 430 Stichprobenpunkte von insgesamt ca. 6.000 Punkten des europäischen Level-I-Waldmonitoringnetzes liegen in Deutschland. Die WZE basiert derzeit auf Einschätzungen von Expert/innen und greift nicht auf moderne Technologien zurück.

Bodenzustandserhebung (BZE)

Die Bodenzustandserhebung (BZE) untersucht den Zustand und die Veränderung von Waldböden in einem langjährigen Intervall und im 8 x 8 km Raster (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 17 ff.). Ende der 1980er Jahre das erste Mal durchgeführt, wurde sie 2006 bis 2008 wiederholt. 2022 bis 2024 steht die nächste Erhebung an. Die BZE wird von den Ländern durchgeführt, auf Bundesebene koordiniert und zusammengefasst. Die Flächen werden repräsentativ für den Wald in den einzelnen Bundesländern ausgewählt und sind eine wichtige Grundlage für das Monitoring über den gegenwärtigen Zustand der Waldböden sowie deren Veränderung. Es werden Standardmethoden zur Laboranalyse eingesetzt, um den Steingehalt, die Bodentextur (Korngrößenverteilung), den Stickstoffgehalt, die Lagerungsdichte, den pH-Wert sowie den Kohlenstoffgehalt zu bestimmen.

Waldklimastationen

Die Waldklimastationen (Level-II-Messstationen) wurden ab 1994 als Intensivmonitoringstationen für Waldbestände ergänzend zum WZE-Netz im selben rechtlichen Rahmen und nach ähnlichen Organisationsstrukturen des Bundes und der Länder etabliert (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 15 f.). Ziel der 68 deutschen Level-II-Standorte (insgesamt 800 europäische Stationen) ist die zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Gesundheit von Wäldern und die Erforschung von Umwelteinflüssen auf die Entwicklung der Bäume. Dazu werden phänologische Daten zum Blattaustrieb und zur Fruchtbildung erhoben. Es werden zudem Baumattribute wie Durchmesser und Höhe erfasst sowie klimatische und hydrologische Werte (Temperatur, Niederschlag, Bodenfeuchtegehalt). Die Daten werden zum Teil mithilfe von Sensoren erhoben und elektronisch aufgezeichnet.

Forstliche Versuchsflächennetze

Etliche Bundesländer betreiben auch forstliche Versuchsflächennetze (teilweise seit dem 19. Jahrhundert) (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 17). Diese Versuchsflächen (mehrere tausend Parzellen) dienen z. B. der Untersuchung von verschiedenen Baumherkünften exotischer wie auch einheimischer Baumarten, des Einflusses der Standraumregulierung (Pflanzabstand und Durchforstung) oder der Baumartenmischung auf das Baum- und Bestandeswachstum. Wegen ihrer Langfristigkeit und der Möglichkeit, experimentell auch waldbauliche Praktiken jenseits des Praxisüblichen zu verfolgen, besitzen diese Flächen eine wichtige Funktion in der Erforschung präventiver Aspekte des Waldumbaus im Hinblick auf notwendige Klimaanpassungen. Die Bäume werden zumeist mit Standardinstrumenten (Durchmessermaßband, Hypsometer) vermessen. Für Forschungszwecke werden mittlerweile vermehrt auch moderne Technologien wie Drohnen und terrestrische Laserscanner erprobt.

Monitoringtechnologien und Anwendungsbereiche

Bei der Datenerhebung zum Waldmonitoring kommen verschiedene Sensorplattformen (Drohnen, Satelliten etc.) und Sensortypen zur Anwendung (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 19 f.). Grundsätzlich zu unterscheiden sind aktive und passive Fernerkundungstechnologien. Bei passiven Verfahren wird die Rückstrahlung eines Objektes aufgefangen und es werden die Reflexionswerte in verschiedenen Frequenzbereichen analysiert. Daraus lassen sich z. B. Stressreaktionen von Pflanzen ableiten, da die spektralen Signaturen gesunder und gestresster Pflanzen voneinander abweichen. Diese Unterschiede, die sich auf unterschiedliche Reflexionseigenschaften von gestressten Pflanzen aufgrund unterschiedlicher Chlorophyllaktivität, Carotinoid- und Wasser-

⁴⁴ Verordnung (EWG) Nr. 3528/86 über den Schutz des Waldes in der Gemeinschaft gegen Luftverschmutzung

gehalte zurückführen lassen, bilden die Grundlage der spektralen Analyse von Pflanzenstress aus Fernerkundungsdaten mit passiven Multispektralverfahren. Hingegen senden aktive Verfahren ein Signal aus und detektieren den rückkehrenden Impuls. Die aktiven optischen Verfahren wie beispielsweise Laserscanning dienen in erster Linie der Strukturermittlung von Bäumen und Wäldern. Diese spielt beim Waldumbau eine wichtige Rolle, denn strukturelle Merkmale (Baumzahl, -dimension, -verteilung, -art) bestimmen die möglichen Managementinterventionen.

Eine wichtige Rolle spielen Algorithmen, die für die Analyse und Interpretation der erhobenen Daten, insbesondere für Bildverarbeitung und Mustererkennung, benötigt werden. Hier ist aktuell eine dynamische Entwicklung zu verzeichnen, da zunehmend Methoden des maschinellen Lernens bzw. insbesondere Deep-Learning-Algorithmen Einzug halten (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 25). In der Bildrekonstruktion aus Kamerabilddaten (RGB-Bildern) ist der Structure-for-Motion-Algorithmus zu erwähnen, der es erlaubt, aus multiplen Bildern, die mit Überlappung aufgenommen wurden, dreidimensionale Punktwolken zu berechnen. Bei der 2- und 3-D-Mustererkennung bieten Algorithmen und inzwischen auch spezialisierte Hardware Unterstützung, um Probleme wie z. B. die Erkennung und Abgrenzung (Segmentierung) einzelner Bäume oder die Zuweisung von Schadstufen bzw. Vitalitätsklassen effizient zu lösen.

Fernerkundliche Sensorplattformen zum Waldmonitoring

Etliche Sensorplattformen stehen für Monitoringzwecke zur Verfügung: von satellitengestützten Systemen über bemannte Flugsysteme bis hin zu Drohnen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 20 f.). Darüber hinaus werden (vor allem im Laserscanningbereich) fahrzeug- und personengelegene Sensorplattformen bodengestützt (terrestrisch) eingesetzt. Sensorplattformen und Sensoren lassen sich nahezu beliebig kombinieren, die Kombinationsmöglichkeiten sind nur durch die Nutzlast der Trägerplattform begrenzt. Grundsätzlich lassen sich mithilfe multispektraler Sensoren durch unterschiedliche Spektralbänder Baumarten unterscheiden, allerdings erlauben satellitengestützte multispektrale Daten momentan noch keine Differenzierung einzelner Bäume. Dennoch sind auch Daten auf Bestandesebene von großem Interesse für den Waldumbau, da damit für Waldbestände wichtige Vitalitätsparameter wie biotisch und abiotisch induzierter Pflanzenstress, Photosyntheseleistung und Transpiration des Waldes ermittelt werden können. So kann der Waldumbau auf solche Bestände fokussiert werden, bei denen der dringendste Handlungsbedarf besteht. Pflanzenstress lässt sich durch Verschiebungen im reflektierten Frequenzspektrum detektieren. Je nach Stressor ergeben sich dabei spezifische Frequenzmuster (z. B. Wasserentzug der Blätter bei Trockenschäden detektierbar im kurz- und mittelwelligen Infrarot, Chlorophyllrückgang bei Trockenstress detektierbar im sichtbaren Spektrum und im nahen Infrarot), sie sind eine wichtige Grundlage für Waldumbauplanungen, die Baumarten und deren Anpasstheit an das zukünftig erwartete Klima abgleichen müssen.

Im Folgenden wird auf (Sensor-)Technologien im Satelliten-, Drohnen- und Laserscanningbereich eingegangen.

Satelliten

Satellitendaten stehen für ganz Deutschland in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zur Verfügung (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 21). Für den zivilen Einsatz verfügbare Satellitendaten erfassen den Wald mit Pixelgrößen bis zu 0,5 m panchromatisch (in Graustufen über viele Spektralbereiche integriert), 2 m im RGB-Bereich (Farbbild im sichtbaren Lichtspektrum) und bis zu 10 m im multispektralen Bereich (über das sichtbare Lichtspektrum hinaus). Dies lässt strukturelle Analysen auf Einzelbaumebene mit panchromatischen und RGB-Daten und grundlegende physiologische Analysen bis auf Bestandesebene mit multispektralen Daten zu. Aus multispektralen Satellitendaten (Tab. 4.1) können in Kombination mit terrestrischen Stichproben strukturelle Waldparameter auf Bestandesebene berechnet werden. Bei multispektralen Daten werden typischerweise Spektralbereiche von 0,3 bis 2,5 μm abgedeckt. Spektralbereichslücken entstehen, weil die Atmosphäre nur in spektralen Fenstern durchlässig ist, sodass Satelliten nur bestimmte Strahlung empfangen können.

Die meisten Satelliten werden von der NASA und der ESA betrieben. Die Tabelle 4.1 zeigt Satellitenplattformen (und deren Betreiber) mit größtenteils frei verfügbaren Daten (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 22 ff.). Zusätzlich ist der Bereich der geometrischen Auflösung am Boden angegeben, die je nach Frequenzband variiert. Der größte Vorteil von Satelliten liegt in der großräumigen Verfügbarkeit der Daten in täglichen oder mehrtägigen Wiederholungen. Die zeitliche Datenauflösung hängt von der Überflugfrequenz und diese bei orbitalen Satelliten von deren Umlaufbahn ab. Ein Nachteil satellitenbasierter Fernerkundung ist, dass Wolken je nach Frequenzspektrum und Sensortyp eine Auswertung behindern oder gar ganz verunmöglichen können. Abhängig

von ihrer Flughöhe werden Satelliten in verschiedene Typen aufgeteilt (zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 22 f.):

- GEO (Geostationary Orbit): geostationäre Satelliten mit einer Flughöhe von etwa 35.790 km. Die Umlaufzeit beträgt 24 Stunden. In Bezug auf die Erdoberfläche sind diese Satelliten ortsfest (z. B. Astra, Eutelsat, Inmarsat, Meteosat).
- MEO (Medium Earth Orbit): Satelliten mit einer Flughöhe von 6.000 bis 36.000 km und einer Umlaufdauer von 4 bis 24 Stunden (z. B. GPS, Galileo, GLONASS)
- LEO (Low Earth Orbit): Satelliten mit einer Flughöhe von 200 bis 1.500 km und einer Umlaufdauer von 1,5 bis 2 Stunden (z. B. Iridium, Globalstar, GLAST)
- *SSO (Sun Synchronous Orbit)*: Sonnensynchroner Orbit, bei denen ein bestimmter Punkt auf der Erde immer an derselben Tageszeit überflogen wird. Dabei werden 7 bis 16 Planetenumrundungen (3,5 bis 1,5 Stunden Umlaufdauer) pro Tag erreicht bei Flughöhen von 275 bis 5.200 km (z. B. ERS, Landsat, Envisat).

Tabelle 4.1 **Typische multispektrale Satelliten, Betreiber, Frequenzspektrum, geometrische Auflösung je nach Spektrum, Datenverfügbarkeit**

Satellit	Betreiber	Überflugfrequenz Deutschland in Tagen	Spektralbereich in nm	spektrenabhängige Auflösung in m	Lizenz
Landsat 8	NASA/ USGS	16	435–12.510	15–100	Open Data
Sentinel 2	ESA	1–2	439–2.290	10–60	Open Data
VIIRS	USA	1	412–13.350	375–750	Open Data
MERIS	ESA	3	390–1.040	300	Open Data
AVHRR	NOAA	0,25	580–12.500	1.100	Open Data
MODIS	NASA	1–2	405–14.385	250–1.000	Open Data
SPOT 5	CNES	5	480–1.750	2,5–20	eingeschränkt/ kommerziell
Landsat 7	NASA/ USGS	16	450–12.500	15–60	Open Data
Landsat 5	NASA/ USGS	16	450–12.500	30–120	Open Data
ASTER	NASA	16	520–11.650	15–90	Open Data
IKONOS	GeoEye	1–3	445–900	0,82–3,2	eingeschränkt/ kommerziell
Quickbird	GeoEye	2,4–5,9	450–900	0,61–2,44	eingeschränkt/ kommerziell

Quelle: Seifert et al. 2022, S. 22

Drohnen

Drohnen lassen sich ähnlich flexibel wie Satelliten mit verschiedensten Sensoren bestücken, z. B. RGB-Kameras, Multispektral- und Hyperspektralsensoren, Infrarotsensoren und Laserscannern (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 24). Sie besitzen bislang im Vergleich zu bemannten Fluggeräten eine deutlich geringere Flächenabdeckung, zeichnen sich aber durch ihre hohe Verfügbarkeit und die hohen erzielbaren geometrischen Auflösungen im Nahbereich aus, die bis in den einstelligen Zentimeterbereich reichen. Mit Drohnen lassen sich Multispektraldaten auf Einzelbaumbene erheben sowie Strukturdaten von Bäumen (Baumhöhen, Kronenbreiten etc.)

in höchster Auflösung erfassen. Mit handelsüblichen Drohnen können bei hohen Bodenauflösungen, die eine Einzelbaumidentifizierung und damit eine baumgenaue Zuordnung der Vitalitätsanalyse zulassen, etwa Flächen von 6 ha (Multikopter) bis 80 bis 90 ha Fläche (Starrflügler) pro Stunde befliegen werden. Drohnen fliegen im Waldmonitoring meist teilautonom entlang vorprogrammierter Flugbahnen, werden aber immer durch eine Pilotin oder einen Piloten überwacht, der im Zweifelsfall eingreifen kann.

Laserscanning

Laserscanning – auch als LiDAR (Light Detection and Ranging) – bezeichnet, ist eine Methode, mit der insbesondere Abstandsinformationen gewonnen werden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 22 f.). Über ein dichtes Netz an Laserimpulsen wird die Umgebung abgetastet und für jeden Punkt werden dreidimensionale Koordinaten erzeugt, sodass in der resultierenden Punktwolke direkt gemessen werden kann. Laserscanning kann vom Flugzeug oder der Drohne (Airborne Laser Scanning – ALS), vom Boden auf dem Dreibeinstativ (Terrestrial Laser Scanning – TLS) sowie fahrzeug- (Mobile Laser Scanning – MLS) bzw. personengetragen (Personal Laser Scanning – PLS) eingesetzt werden. Alle Verfahren zeichnen kontinuierlich während der Bewegung 3D-Daten auf. Die Systeme besitzen unterschiedliche Vorzüge und Nachteile, die vor allem in der Flächenproduktivität, der Auflösung, der Genauigkeit sowie der Anwendung unter dem Kronendach oder über dem Kronendach liegen. Die größte Flächenleistung bieten vom Flugzeug oder Helikopter getragene ALS-Systeme. Bei 4.000 m Flughöhe können etwa 800 bis 1.000 km²/Stunde aufgenommen werden, bei etwa 8 Punkten/m². Bei niedriger Flughöhe (400 m) und entsprechend höherer geometrischer Auflösung am Boden (50 Punkte/m²) werden immerhin noch 150 km²/h erreicht. Nachteile der Befliegung ist die unvollständige Erfassung des Bestandes unterhalb der Krone, während TLS-, MLS- und PLS-Systeme den Stammraum sehr gut erfassen können, aber weniger Abtastungsdichte bei den Baumspitzen aufweisen.

Anwendungsbereiche

Langfristmonitoring

In Deutschland ist die Anwendung von Luftbilddaten aus bemannten Befliegungen bei größeren Forstverwaltungen übliche Praxis (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 26). Im Prinzip bieten Helikopter und Flugzeuge durch ihre größere Nutzlast weitreichendere Sensorausstattungen als Drohnen. Die aus Befliegungen entstehenden Daten sind im Ergebnis Drohnen Daten sehr ähnlich, aber aufgrund der relativ hohen Kosten und der eher geringen Flexibilität (mehrere Wochen Vorlaufzeit) im Einsatz weniger verfügbar, weshalb sie vor allem für lange geplante Befliegungen etwa im Rahmen von Waldinventuren mittels Laserscanning eingesetzt werden. Weitere z. B. multispektrale Fernerkundungsdaten werden derzeit von den größeren staatlichen Forstverwaltungen in Pilotprojekten getestet. Satelliten- und Drohnen Daten werden eher von forstlichen Versuchsanstalten verarbeitet, die über die notwendige Expertise verfügen, und der forstlichen Praxis dann als Kartenmaterial physisch oder über Webseiten zur Verfügung gestellt (hier insbesondere den Kleinprivatbesitzenden). In langfristigen Monitoringnetzwerken und auf langfristig angelegten Versuchsflächen kommen derzeit, jenseits der TLS- und Drohentechnologie, wenige neue Technologien zum Einsatz. Die eingesetzten Standardsensoren erfassen das Baumwachstum und die Baumphysiologie sowie mikrometeorologische und hydrologische Variablen. Sie werden zwar stetig weiterentwickelt und energieeffizienter, aber größere Technologiesprünge sind im Sensorbereich derzeit nicht zu erwarten.

Waldinventuren

Waldinventuren dienen der Ermittlung der Waldfläche, des Holzvolumens und weiterer Strukturparameter wie Flächen ohne Baumbestand oder Bekronungsgrad (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 26). Sie werden in größeren Forstverwaltungen typischerweise im 10-jährigen Intervall durchgeführt und bilden die Grundlage für die forstliche Planung sowie für die Wertermittlung im Forst. Bei diesen Betriebsinventuren wird derzeit mit traditionellen Methoden vorgegangen: Ein Inventurtrupp (zumeist zwei Personen) sucht definierte Stichprobepunkte im Wald auf und misst dort Baumart, Baumdurchmesser und an Unterstichproben Baumhöhen sowie die Verjüngung. Die Durchführung erfolgt gewöhnlich mit analogen Messinstrumenten. Kleinwaldbesitzende oder Kommunen haben in der Regel keinen Zugriff auf entsprechende Inventursysteme. Ihre Kenntnisse über Waldstruktur und Holzvolumen sind daher recht begrenzt. Satelliten- und Drohnen Daten oder terrestrische Laserscanner werden in Waldinventuren in Deutschland derzeit praktisch kaum eingesetzt.

In den Nationalinventuren (Forstbetriebe bzw. Wälder) anderer Länder (z. B. Finnland) kommen hingegen bereits seit einigen Jahrzehnten luftgestützte Systeme auf der Basis von ALS zum Einsatz (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 27). Insbesondere die Möglichkeit, vollflächig arbeiten zu können und nicht auf Stichprobenpunkte limitiert zu sein, erweitert die Möglichkeiten der Wald- bzw. Forstbetriebsinventuren substanziell. Auch in Deutschland wurde der Fernerkundungseinsatz im Kontext von Inventuren (inklusive Erfolgskontrolle der Maßnahmen sowie Planung für die nächste Planungsperiode) untersucht, mit dem Ergebnis, dass traditionelle Betriebsinventur und Fernerkundung kompatible Daten für die Forsteinrichtung als Grundlage der forstlichen Planung liefern können (Luftbild und ALS) (z. B. Staupendahl et al. 2020). Ziel ist die Erstellung eines Forsteinrichtungswerks als schriftlich dokumentierte Grundlage der nachhaltigen Waldbewirtschaftung. Die Kosten für eine fernerkundungsbasierte Forsteinrichtung liegen bei Flächen von mehreren tausend ha mit etwa 20 bis 30 Euro/ha auf dem Niveau konventioneller bodengebundener Forsteinrichtungen. Durch die insgesamt gesehen derzeit noch relativ hohen Kosten, die vor allem bei ALS-Befliegungen und für die Extraktionen von Bauminformationen durch Fernerkundungsexperten anfallen, sind Verfahren mit Luftbild und ALS zurzeit nur für große Forstbetriebe geeignet. Eventuell werden in Zukunft mit Drohnen und besserer Verfügbarkeit von kostenlosen Fernerkundungsdaten der Vermessungsämter diese Verfahren auch für kleinere Betriebe unter 500 ha interessant.

Eine Zukunftsvision sind permanente Vollerfassungen, die alle Bäume umfassen und kontinuierlich auf den neuesten Stand gebracht werden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 28). Forschungsgruppen an der Universität Freiburg, an der RWTH Aachen, an der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften (SLU) und am Norwegischen Institut für Bioökonomieforschung (NIBIO) arbeiten im Rahmen ihrer jeweiligen Projekte an einer Präzisionsforstwirtschaft, bei der jeder Baum im Bestand bekannt ist: In regelmäßigen Abständen werden Inventuren über Befliegungen durchgeführt. Diese werden durch fahrzeugmontierte Scansysteme (z. B. an Harvestern, Forwardern oder Autos) zusätzlich bei jedem Einsatz im Wald laufend mit neuen Informationen abgeglichen und aktualisiert. Die Datenspeicherung erfolgt in einem digitalen Zwilling (Reitz et al. 2019), der als virtuelles Abbild des realen Waldes mit allen wichtigen Messgrößen verstanden werden kann, wobei auch noch nicht existente Technologien oder waldbauliche Verfahrensweisen virtuell getestet werden können. Präzisionsforstwirtschaft und die Methode des digitalen Zwillings könnten – obgleich überwiegend zurzeit noch in der Erforschung – zukünftig wichtige Elemente für eine effiziente Umsetzung des Waldumbaus darstellen, insbesondere im Hinblick auf den Aufbau von vertikal reich strukturierten Mischbeständen. Hier können etwa Algorithmen zur Baumarten-erkennung, zur Baumsegmentierung und zur Extraktion von Stammparametern spezifisch eingesetzt werden (Maschler et al. 2018; Stereńczak et al. 2020), um so für individuelle Bäume die jeweiligen Biomassen, Kohlenstoffgehalte und CO₂-Speicherkapazitäten oder auch den Konkurrenzdruck durch andere Bäume berechnen zu können. Auf Grundlage solcher Informationen lässt sich ein Einzelbaummanagement umsetzen, das die strukturellen Eigenschaften der Wälder explizit berücksichtigt und für den Waldumbau besonders geeignet ist, z. B. im Rahmen gezielter Durchforstungseingriffe und Erntemaßnahmen.

Flächen- bzw. Anpassungspriorisierungen

Fernerkundungsdaten lassen sich dazu nutzen, besonders trockenstressanfällige oder durch Kalamitäten (Insekten, Sturm) bereits (vor)geschädigte Waldflächen zu erkennen, die beim Waldumbau prioritär zu behandeln sind (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 29 f.). Diesbezüglich lassen sich Stressweiser etwa aus multispektralen Satellitendaten nutzen, um Bestände auf ihre Trockenstressanfälligkeit zu überprüfen. Entsprechende Vegetationsindizes auf der Basis von Multi- und Hyperspektraldaten werden derzeit wissenschaftlich für die Stressanalyse genutzt. Diese Vegetationsindizes kontrastieren gesunde und gestresste Bestände, indem sie verschiedene Spektralbänder mathematisch in Beziehung zueinander setzen, um Pflanzenstress aufzuspüren (z. B. D’Odorico et al. 2021). Während Drohnen sich zur akuten Stressdiagnose sehr gut eignen, sind sie für eine flächige Umbaupriorisierung wegen der eher geringen Flächenleistung und der fehlenden Möglichkeit, retrospektive Daten zu beziehen, weniger geeignet. Strukturelle Merkmale, wie die Lückigkeit bzw. der Kronenschluss, können dagegen sehr gut aus Drohnen- oder auch terrestrisch mittels TLS im Rahmen von Präzisionsforstinventuren quantifiziert werden. Auch können Bestände identifiziert werden, die aufgrund bestimmter Merkmale ungünstige Zukunftsprognosen aufweisen, z. B. durch das gegenwärtige Baumartenportfolio, eine Lückigkeit in der Bestandesstruktur oder ein durch die Exposition bestimmtes Windwurfisiko.

Detektion im Kalamitätsfall

Im Kalamitätsfall werden aktuelle Monitoringtechniken wie Befliegung mit Flugzeug oder Hubschrauber und der Aufnahme von Luftbildern zunehmend mit satellitenbasierten Datenquellen ergänzt. Auch moderne multi- und hyperspektrale Sensoren auf Drohnen und Flugzeugen kommen vermehrt zum Einsatz (z. B. Einzmann et al. 2021;

dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 30 f.). Bislang wurde die Borkenkäferdetektion überwiegend durch eine Suche per Fernglas auf Befallszeichen (Bohrmehl und Einbohrlöcher) durchgeführt. Es steht zu erwarten, dass zukünftig auch Fernerkundungstechnologien eingesetzt werden, um befallene Bäume frühzeitig zu detektieren, sodass der Baum im Rahmen von waldsanitären Maßnahmen ggf. rechtzeitig entnommen werden kann. Insbesondere aus Kostengründen werden Drohnen voraussichtlich beim Pathogenmonitoring zunehmend an Bedeutung gewinnen und die direkte Bekämpfung von Schadorganismen von der Drohne mit chemischen oder biologischen Mitteln findet ebenfalls immer häufiger Anwendung (Kap. 4.3). Zwar ist keine große Flächenabdeckung möglich, aber Drohnen können zeitlich sehr flexibel eingesetzt werden, um speziell Brennpunkte des Gradationsgeschehens zu überwachen. Einen innovativen Weg geht ein Konsortium der Universität Göttingen, der Universität Freiburg und weiterer Forschungspartner mit dem Projekt »ForestCare« (Uni Göttingen). Eine Drohne soll mittels mobiler Gaschromatografie nach Geruchsstoffen suchen, wie sie vom Borkenkäfer befallene Bäume ausstoßen. Erste Versuche waren teilweise erfolgreich, jedoch ist die Aufnahme der Spurengase am Drohnensystem sehr stark von den herrschenden Witterungsbedingungen abhängig (Paczkowski et al. 2021).

4.1.2 Perspektiven und Rahmenbedingungen

Bei den Technologien für das Waldmonitoring herrscht eine starke Dynamik und viele Akteure aus den Forstwissenschaften sowie auch aus den Geo- oder den Ingenieurwissenschaften leisten wichtige Beiträge in Forschung, Entwicklung und Einsatz. Drei Schlüsseltechnologien können hier als Innovationstreiber mit Relevanz für den Waldumbau identifiziert werden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 4):

- Multispektrale Sensoren auf Drohnen und Satelliten bieten innovative Möglichkeiten für die Erfassung von Stressfaktoren und Schädlingen, aber auch für die kostengünstige und flexible Erfassung von Bäumen und Waldstrukturen. Eine frühzeitige Identifizierung von Pflanzenstress (Hitze, Trockenheit etc.) ist wichtig, um gestresste Bestände prioritär im Waldumbau behandeln zu können.
- Laserscanner stellen boden- und luftgestützt wichtige Daten zur Baum- und Waldstruktur zur Verfügung und leisten bei der Präzisionsinventur und der strukturellen Weiterentwicklung der Forstwirtschaft sowie beim naturnahen Waldumbau eine signifikante Rolle. Durch die Möglichkeit, Kronen- und Stamminformationen zu jedem individuellen Baum zu erfassen, sind die Anwendungen des Laserscanning ein Schlüssel zur Entwicklung einzelbaumgesteuerter Managementverfahren und bilden damit die Grundlage für den Waldumbau zu strukturierten Mischbeständen.
- Von großer Bedeutung sind auch moderne Algorithmen zur Mustererkennung aus Bildern und dreidimensionalen Punktwolken von Laserscannern mithilfe des maschinellen Lernens. Wohl sind viele Algorithmen mittlerweile positiv auf ihre Anwendung hin getestet, aber noch nicht ausreichend robust für einen automatischen praktischen Einsatz. Insbesondere befinden sich die benötigten forstspezifischen Adaptionen und Softwarelösungen noch in der Entwicklungsphase. Zumindest bereits in Forschungsprojekten angelangt ist die Kombination unterschiedlicher Sensoren und die Auswertung mit KI-Methoden, was vor allem in der Früherkennung von Kalamitäten einen wichtigen Beitrag leisten könnte.

Wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung vielversprechender Verfahren bzw. Technologien sowie mögliche Anwendungshürden betreffen vor allem wirtschaftlich-infrastrukturelle und rechtliche Aspekte (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 32 ff.). So erschweren zurzeit die gesetzlichen Restriktionen für einen autonomen Flug außer Sicht den Drohneneinsatz im Wald. Eine lückenlose Beobachtung der Drohne durch den Drohnenpiloten kann nur sehr aufwendig (z. B. durch Hebebühnen) sichergestellt werden. Die Durchführungsverordnungen 2019/947⁴⁵ und 2020/746⁴⁶ haben aber jüngst den Rahmen erweitert, sodass mit der Umsetzung der Verordnung in nationales Recht auch Flüge außerhalb der Sichtweite möglich werden. Diese können genehmigt werden, wenn die Drohne beim Luftfahrt-Bundesamt registriert und der/die Drohnenpilot/in bei der Landesbehörde registriert ist und eine entsprechende Ausbildung nachweisen kann. Zudem muss eine Risikobewertung des Fluges durchgeführt werden. Eine wirtschaftlich-infrastrukturelle Hürde sind die unzureichende Verfügbarkeit bzw. die relativ hohen Kosten von mit staatlichen Mitteln erhobenen Daten (Kataster-, ALS- und Wetterdaten sowie aus ALS abgeleitete Oberflächenmodelle) zum Zweck des Waldmonitorings. Oft müssen Daten teuer bei Vermessungsämtern oder intermediären Dienstleistern gekauft werden. Diese Regulation des Datenzugriffs hemmt wichtige Innovationen. Auch ALS-Rohdaten sind in der Regel für eine weitere Auswertung nicht

⁴⁵ Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge

⁴⁶ Durchführungsverordnung (EU) 2020/746 zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 hinsichtlich der Verschiebung der Anwendungsfristen bestimmter Maßnahmen im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie

verfügbar. Als positiv ist hingegen die breite Teilhabe von Großforschungseinrichtungen, Universitäten und Hochschulen wie auch privaten Dienstleistern an Forschungsprojekten zu verzeichnen (Kasten 4.1).

Kasten 4.1 Relevante Forschungsprojekte

Die im Folgenden genannten Projekte sind eine relevante Auswahl aus verschiedenen Datenbanken der Fachagentur für Nachhaltige Rohstoffe (FNR) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Einige Projekte der Grundlagenforschung werden auch bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie auf europäischer Ebene gefördert.

- Verbundvorhaben Forstprax (FNR): Implementierung eines drohnengestützten Borkenkäferfrühdetektionsverfahrens in die FORSTliche PRAXis; Universität Göttingen, Universität Freiburg
- Verbundprojekt RiMa (FNR): Risikobewertung, Überwachung und Auswirkungen von Massenvermehrungen des Eichenprozessionsspinners (*Thaumetopoea processionea* L.) in Eichen(misch)wäldern. Universität Göttingen
- Verbundvorhaben AutoDrone (FNR): Einsatz autonom bewegter Drohnentechnologie in der Waldinventur; TU Dresden
- Verbundvorhaben BY-CS-UAV (FNR): Charakterisierung des Zustandes sowie kurzfristiger Veränderungen der oberirdischen Biomasse sowie der Kohlenstoffbindung mithilfe von UAV-Technologie in Wäldern am Beispiel des Flachlands in Bayern; Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
- Verbundvorhaben PROTECTFOREST (FNR): drohnengestützte Detektion phytophager Forstschädlinge mittels Electronic Nose; Universität Freiburg, Hochschule Rottenburg
- Verbundvorhaben Buche-Akut (FNR): Buchenkalamitäten im Klimawandel – Ursachen, Folgen, Maßnahmen; Teilvorhaben 3: Analyse von Prädispositionsfaktoren, Risiko und waldbauliche Strategien; Universität Göttingen
- Waldzustandsmonitoring F³ (FNR): flächendeckende Fernerkundungsbasierte forstliche Strukturdaten; Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
- Verbundvorhaben FORSENSE (BMBF): Kombination moderner Sensortechnologien zur optimierten Ressourcenbewertung im Wald; Scientes Mondium, TU München

Quelle: Seifert et al. 2022, S.34.

4.2 Forsttechnologische und maschinelle Ansätze

Der Waldumbau umfasst arten-, mischungs- und qualitätsregulierende Pflege-, Durchforstungs- und Nutzungseingriffe, die wesentlich auf forsttechnischen Maßnahmen beruhen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S.39). Dabei ist das forsttechnische Handeln auf diversen Ebenen etlichen Anforderungen unterworfen, die neue maschinelle Ansätze erforderlich machen. So erfordern Dauerwälder eine andere Bewirtschaftung und den Einsatz anderer Technologien als die üblichen schlagweisen Wälder. Hervorzuheben sind etwa die Notwendigkeit eines bodenschonenden Arbeitens, der Schutz des verbleibenden Baumbestandes und der bestehenden Verjüngung, die Verringerung des fossilen Kraftstoffverbrauchs sowie eine Minimierung der Kosten. Im folgenden Kapitel soll in enger Anlehnung an das Gutachten von Seifert et al. (2022, S.39 ff.) beleuchtet werden, welche Potenziale insbesondere innovative maschinelle Ansätze bieten, um die skizzierten Herausforderungen zu bewältigen.

4.2.1 Stand der Technik und Herausforderungen

Die aktuell verfügbare Technik zur Bewirtschaftung naturnaher Wälder wird im Folgenden für Maßnahmen in den Bereichen Kulturbegründung (Pflanzung und Saat), Jungbestandspflege und Bestandesregulierung sowie Jung- und Altdurchforstung kurz skizziert. Anschließend werden die Herausforderungen durch den naturnahen Waldumbau beschrieben, die zum Teil neue maschinelle Ansätze erforderlich machen.

Kulturbegründung – Pflanzung und Saat

Bei der Pflanzung bestimmen Zustand und Größe der Pflanzen – wurzelnackt (kleine Pflanze mit Wurzel ohne Erdballen), Containerpflanzen (mit Wurzelballen in kleinen Pflanzbehältnissen und Wasserdepot), Heisterpflanzen (ab einer Höhe von etwa 1,25 m) – das entsprechende Pflanzverfahren (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 45 f.). Während bei kleinräumigen Maßnahmen zur Saat und zur Pflanzung manuelle oder motormanuelle Verfahren genutzt werden, bieten auf großen Schadflächen insbesondere maschinelle Containerpflanzsysteme eine hohe Flächenleistung. Containerpflanzen haben einen gegenüber wurzelnackten Pflanzungen verbesserten Anwuchserfolg bei zudem erweitertem Ausbringzeitfenster (Pflanzung auch in kälteren Jahreszeiten möglich). Dies resultiert aus der risikoloserem Transportmöglichkeit der Containerpflanzen (kaum Wurzelschäden). Zudem kann den Pflanzen ein Startwasserdepot mitgegeben werden. Solche (Container-)Pflanzsysteme sind in Skandinavien im Einsatz und wurden jüngst auch in Deutschland auf großen Katastrophenflächen vermehrt genutzt. Derartige Systeme gibt es als Anbaukomponente für Bagger (z. B. Bracke Forest AB, Schweden⁴⁷; Risutec, Finnland⁴⁸). Sie haben den Vorteil, dass Fällrückstände wie Wipfel, Äste, Wurzelstöcke nur grob zu beseitigen sind, da die Pflanzstellen lediglich kleinräumig mit dem hydraulischen Kranausleger vorbereitet werden. Pflanzverfahren, bei denen etwa mittels einer Pflugschar der Boden in langen Schlitzen geöffnet werden muss, haben diesbezüglich Nachteile, da dabei sowohl Fällrückstände als auch Wurzeln stören können. Deshalb sind solche Systeme allenfalls mit entsprechenden Fräsen nutzbar.

Jungbestandspflege und Bestandesregulierung

Bei der Jungbestandspflege und Bestandesregulierung überwiegen Arbeitsmittel und -verfahren, die manuell (Abknicken, Ringeln, Abhauen, Abtrennen mit Handsägen usw.) oder motormanuell (Motorsäge) durchgeführt werden. Erst ab einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von deutlich über 15 cm kommen aus Kostengründen (Schwachholz-)Harvester infrage. Erwähnenswert sind auch Fäller-Bündler-Aggregate. Dabei handelt es sich um Harvestervarianten, die neben den Greifarmen ohne Entastungsfunktion noch zusätzliche Sammelarme haben, sodass bereits geerntete Stämme beim Weitergreifen in einer Kranbewegung erfasst werden können (Abb. 4.1).

Jung- und Altdurchforstung – Verjüngungsnutzung, Entnahme erntereifer Bäume, Räumung

Seit der Sturm- und Orkanserie im Winter 1989/1990 (Tief »Vivian« und »Wiebke«) hat sich in Deutschland die aus Skandinavien stammende Kurzholztechnik erfolgreich etabliert (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 47 f.). Hier fällt, entastet und sortimentiert ein Harvester (Kranvollernter) mit seinem Prozessorkopf den Baum (Abb. 4.2).

Diese Maschinen haben üblicherweise eine relativ große Reichweite und helfen dabei, die erzeugten Sortimente in der Nähe der Rückegasse abzulegen. Anschließend sammelt ein Forwarder (Tragrückeschlepper) mit einem an einem Kranausleger montierten Greifer die Sortimente und legt sie an Forststraßen zum Abtransport durch Lkw ab. Große Radharvester bieten Kranreichweiten bis zu 11 m, große Raupenharvester von über 15 m. Dennoch ist gerade bei größeren Baumdimensionen oder bei größeren Rückegasseabständen, aber auch bei großem oder werthaltigem Laubholz die Hilfe von motormanuellen (menschlichen) Zufällern notwendig, um die an ihre technischen Grenzen geratenen Harvester zu unterstützen. Grob geschätzt werden in Deutschland derzeit vermutlich rund 60% der Ernteeingriffe hochmechanisiert, 40% motormanuell durchgeführt. Langholzsortimente können vollmechanisiert nur mit sehr leistungsstarken Baggerhavestern bearbeitet werden. Diese bieten den Vorteil, Bäume innerhalb gewisser Abmessungsgrenzen und der Entfernung zur Gasse (Hebelgesetz, Kranreichweite) auch stehend und somit ohne größere Fällschäden entnehmen zu können.

⁴⁷ <https://www.brackeforest.com> (30.5.2024)

⁴⁸ <https://risutec.fi> (30.5.2024)

Abbildung 4.1 Fällер-Bündler-Aggregat mit doppelten Greiferarmpaaren der schwedischen Firma Bracke Forest



Quelle: Seifert et al. 2022, S.47

Abbildung 4.2 Raupenharvester



Bei einer Stehendentnahme trennt ein starker Raupenharvester zunächst den Baum vom Stock, hebt ihn senkrecht aus dem Bestand und legt ihn anschließend zur Weiterverarbeitung in die Rückegasse.

Quelle: Seifert et al. 2022, S.43

Herausforderungen durch den naturnahen Waldumbau

Die seit Beginn der 1990er Jahren aus den nadelholzdominierten skandinavischen Ländern eingeführte Kurzholzerntetechnik mit Harvester und Forwarder ist besonders mit Nadelholz kompatibel (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S.40f.). Mit an einem Kranausleger montierten Harvesterkopf wird der Baum vom Stock getrennt, mit Hydraulikkraft umgedrückt und der Stamm durch das Aggregat gezogen und zugleich entastet. Dies ist bei Laubholz gleicher Dimension für die identische Größenklasse an Harvestern deutlich schwieriger bis unmöglich zu realisieren. Laubbäume lassen sich aufgrund der höheren Holzdichte und umfangreicheren Kronen schwerer manipulieren und erfordern deswegen größere Kraftreserven für eine sichere Fällung. Starkäste, ein von der idealen Kreisform abweichender Querschnitt und gekrümmte Stammverläufe führen dazu, dass die Entastung deutlich schwieriger ist. Der Vorgang braucht somit mehr Zeit, die Produktivität der entsprechenden Arbeitsschritte ist geringer, die Kosten pro Festmeter (fm) Holz steigen.

Ein naturnaher Wald umfasst verschiedene Baumarten und die daher höhere Artenzahl pro Ernteeingriff führt in der Erstellung baumartenspezifischer Ernte- und Lagerungssortimente zu einer Verteuerung der Erntevorgänge (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 41 f.). Die Herausforderung ergibt sich insbesondere aus der Notwendigkeit, sortenreine, auf unterschiedliche Kunden genau zugeschnittene Polter (Zwischenlager an der Forststraße) zu errichten, damit der nachgelagerte Transportvorgang per Lkw die richtigen Sortimente zum Kunden liefert. Gerade Laubholz bringt ein weites Spektrum an Qualitätsstufen hervor: Krummes, astiges Holz lässt sich oft nur energetisch bei geringen Erlösen verwerten, durchmesserstarke, gerade Schaftstücke lassen sich dagegen sehr gut verkaufen. Diese hohe Wertdifferenzierung beim Laubholz erhöht somit die Zahl an ausgeformten Sortimenten in laubholzreichen oder laubholzdominierten Hieben zusätzlich. Dies führt sowohl in der Aufarbeitung als auch beim Rücken zu einer Erhöhung der Komplexität und des zu tätigenden Aufwands.

Hinzu kommt, dass bei einer naturnahen bzw. waldschonenderen Waldbewirtschaftung tendenziell weiter auseinandergezogene Rückegassenabstände (Schneisen bzw. Wege für die Erntemaschinen) eingesetzt werden (30 m oder mehr) (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 42 f.). Grundsätzlich soll die Verjüngung mit ihrer sich entwickelnden Schichtung bei der Entnahme im Hauptbestand möglichst nicht beschädigt werden. In der Konsequenz erhöht dies ebenfalls den Aufwand, da die Zwischenzone mit Zufällern (manuell mit Sägen etc. arbeitende Personen) bearbeitet werden muss oder schwerere, teurere Maschinen mit deutlich höheren Kranreichweiten zum Einsatz kommen müssen. Ein weiterer relevanter Aspekt betrifft Wälder, in denen der Anteil von Laubholz erhöht und kleinflächigere oder stufige Strukturen geschaffen werden sollen. Diese zeichnen sich durch entsprechende Baumgruppen und Kleinflächen aus und Unterbaugruppen (Pflanzungen unter dem Altbaumbestand) müssen zunächst durch manuelle Pflanzung etabliert werden.

4.2.2 Technologische Innovationen

Die beschriebenen Herausforderungen, die sich durch den naturnahen Waldbau ergeben, machen die Entwicklung neuer Maschinenkonzepte erforderlich. Hierbei ermöglichen Fortschritte in Sensorik und IT zunehmend die Etablierung innovativer Assistenzsysteme zur Unterstützung der Maschinenbediener/innen, zugleich aber auch die Realisierung eines maschinen- und umweltschonenderen Arbeitens. Entsprechende Assistenzsysteme sind dabei in etlichen Einsatzphasen vorstellbar, angefangen von der Kulturbegründung (Pflanzmaschinen) über Durchforstungen bis hin zu Holzernteeingriffen (Harvester, Forwarder). Im Folgenden werden erst Innovationen bei Maschinen und Gerätschaften beschrieben, schließlich Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung und Informationstechnologien (Wald und Holz 4.0) vorgestellt.

Maschinen und Gerätschaften

Kulturbegründung – Pflanzung und Saat

Bei der Kulturbegründung sind zwei Entwicklungslinien relevant. Zum einen werden zum Säen oder Pflanzen vollmechanisierte Verfahren entwickelt, teilweise als zweckorientierte Aufbauten auf Basis existierender großer Trägersfahrzeuge (z. B. Forwarder) (zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 50 f.):

- Ein Beispiel im Bereich Pflanzung ist die schwedische Entwicklung »Plantma-X« (Plantma Forestry o. J.), die seit 2019 als Prototyp verfügbar ist und auf die Pflanzmaschine »Silva Nova 90M« aus den 1990er Jahren zurückgeht. Das Potenzial derartiger Maschinen im konkreten Waldbau, insbesondere im Hinblick auf eine weitere Automatisierung der Maschinen und Arbeitsvorgänge (durch die automatische Bestimmung des Pflanzpunktes sowie des Mikrostandortes), wird als hoch eingeschätzt (Manner/Ersson 2021).
- Auch für das Ausbringen von Saatgut werden vermehrt hochmechanisierte Verfahren eingesetzt, z. B. Gerätbauoptionen für Harvester. Dabei wird am Kranausleger des Harvesters eine Pflugscheibe angebracht, sodass das Saatgut dadurch zielgerichtet in die entstehende flachgründige Pflugschar eingebracht wird (Gabriel 2022). Aber auch Verfahren zur Saatausbringung per Drohne werden aktuell getestet (einen Überblick zu drohnengestützter Saat geben Mohan et al. 2021).

Zum anderen geht es um die Entwicklung von kleineren, leichteren Maschinen, die perspektivisch ebenfalls autonom arbeiten sollen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 51 f.). Aufgrund des geringen Maschinengewichts und bodenschonender Bandlaufwerke wäre so ein Befahren der Kulturflächen und der Ausbringungsflächen auf vielen Standorten weniger problematisch als bislang. Ein Beispiel hierfür ist als aktuelles Entwicklungsvorhaben der »Multiscope Forest Planter« der estnischen Firma Milrem Robotics (o. J.) zu nennen. Zu konstatieren ist aber, dass die meist skandinavischen Entwicklungen nicht ohne Weiteres mitteleuropäischen Bedürfnissen entsprechen, weil z. B. das hier auszubringende Pflanzenspektrum viel größer ist und sich Standorte und

Witterungsbedingungen unterscheiden. Auch sind in Deutschland Bestrebungen hin zu einer automatisierten Vollmechanisierung noch nicht erkennbar.⁴⁹

Maschinen für vollmechanisierte Verfahren, die geeignet sind, um mit hoher Leistung auf großen Flächen Saaten oder Pflanzungen mit hohem Automatisierungsgrad vorzunehmen, gibt es derzeit (noch) nicht (Seifert et al. 2022, S. 52). Ebenso existieren bis dato auch keine Kleinmaschinen, die mit einem hohen Autonomiegrad entsprechende Aufgaben erledigen könnten.

Jungbestandspflege und Bestandesregulierung

In den Bereichen Jungbestandspflege und Bestandesregulierung ist die Arbeitsweise noch immer überwiegend händisch oder motormanuell und somit zeit- und kostenintensiv (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 52 f.). Auch neue Entwicklungen wie der »Spacer«, ein innovatives rückengetragenes Freischneidegerät (z. B. »Husqvarna 535FBX«; Husqvarna o. J.), haben daran nichts grundsätzlich geändert. Vorteile des Geräts sind vor allem die ergonomische Erleichterung. Das Verbundvorhaben »Entwicklung eines vollmechanisierten Ernteverfahrens zur Pflege von Jungbeständen« sollte die Automatisierung und Mechanisierung bei der Jungbestandspflege voranbringen. Als erster Prototyp wurde 2018 ein Miniharvester (mit einer Breite von nur 1,27 m; TU Wildau o. J.) auf Messen präsentiert, jedoch gibt es bislang keine Folgeaktivitäten. Insgesamt ist zu konstatieren, dass die Schwierigkeit, sich in den Jungbestandspflegeflächen zu bewegen (hohe Dichte und Unübersichtlichkeit) sowie die richtigen Entnahmestellen zu identifizieren, aktuell die Entwicklungsbestrebungen vollautomatisierter Verfahren sehr bremst. In anderen Bereichen (Pflanzung, teilautonome Arbeitsschritte beim Harvester und Forwarder) werden die Automatisierungsgrade wahrscheinlich sehr viel schneller zunehmen.

Jung- und Altdurchforstung – Verjüngungsnutzung, Entnahme erntereifer Bäume, Räumung

Zukünftige Entwicklungsbestrebungen bei den relevanten Erntemaschinen sollten insbesondere eine Anpassung des Harvesterkopfes in den Blick nehmen, um mit Laubholz bzw. gemischten Beständen besser umgehen zu können (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 53 f.). Dabei wäre zu berücksichtigen, dass Laubholz häufiger von der idealen kreisrunden Stammquerschnittsform abweicht (ovale spannrückige Form). Hier gibt es erste Entwicklungsansätze der österreichischen Konrad Forsttechnik GmbH, die mit der Harvesterkopfschere »Woody« (KONRAD o. J.) und deren schlanken Greifferrahmen eine Bauweise im Angebot hat, die besser mit gekrümmtem Holz umgehen kann. Darüber hinaus sind aktuell keine größeren Aktivitäten oder Verbundforschungsvorhaben bekannt, die Entwicklungen in diesem Bereich zum Ziel haben (Mederski et al. 2022).

Ein weiteres wichtiges Entwicklungsfeld betrifft die Steuerung der Kräne und Greifer, was forstlich insofern wichtig ist, als viele Maschinen wie Harvester, Forwarder, Lkw und Schlepper mit Kränen und Anbaugeräten ausgestattet sind (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 54 f.). Bei Harvestern ist bei großen Distanzen und bei Sichtbehinderung z. B. das exakte und schonende Positionieren des Harvesteraggregats eine große Herausforderung. Zudem besteht die Problematik des sich in einer pendelnden Bewegung an der Kranspitze befindlichen Funktionsträgers (Greifer, Harvesterkopf etc.). Durch semiautomatische Funktionalitäten im Harvesterkopf (z. B. Zielsteuerung) und in der Kranbedienung könnten die Arbeitsprozesse beschleunigt und auch die Materialbeanspruchung an der Maschine reduziert werden.⁵⁰ Solche Funktionsunterstützungen brauchen eine enge Kopplung aus sensordatengestützter Objekt-, Maschinenzustands- und Umgebungserfassung sowie den nötigen Arbeits- und Funktionsschritten, die entsprechend gesteuert und überwacht werden müssen. In den letzten Jahren wurden von verschiedenen Herstellern Steuerungslösungen mit einem gewissen Autonomiegrad entwickelt. So erlaubt es eine Kranspitzensteuerung dem/r Bediener/in, sich auf die Bewegungstrajektorie der Kranspitze zu konzentrieren. Die separate Ansteuerung der einzelnen Krankomponenten (je nach Kranbauform sind dies an einem Forwarder Hauptarm, Knickarm, Teleskop) ist nicht mehr nötig. Dies beschleunigt das Erlernen der Maschinenbedienung, verringert Schäden an der Maschine (Zemánek/Fiřo 2022) und steigert die Produktivität (Wagner et al. 2021). Exemplarisch sei hier von John Deere (2021) die intelligente Kransteuerung (Intelligent Boom Control) genannt, die einige innovative Fahrerassistenzfunktionen bietet. Mittlerweile ist auch erkennbar, dass sich durch KI noch weitere Potenziale eröffnen, die über die alleinige Bewegungssteuerung hinausgehen. So scheint etwa eine Gewichtsermittlung der bewegten Stämme möglich, ebenso eine Unterstützung bei der Sortierung des Holzes (Geiger et al. 2020).

⁴⁹ Wenngleich einige Firmen ihre universellen, fernsteuerbaren Geräteträger für unterschiedliche Aufgaben weiterentwickeln (z. B. Seilwinden bei Fällung, Fräse bei Jungbestandspflege, Säaggregat mit integrierter Bodenfräse, Containerpflanzung).

⁵⁰ Etwa durch automatische Krümmungs- und Asterkennung, weitergehende Greifer- und Entastungssteuerung, Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit und Bewegungsintegration in die Kran-Kinematik.

In der Summe zeigt sich, dass verbesserte Sensorik und integrierte Datenauswertung (auch KI-gestützt) perspektivisch eine deutlich weitergehende Automatisierung ermöglichen könnten (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 58 ff.). Erwähnenswert ist etwa der rein elektrisch angetriebene, autonom operierende Holz-Lkw »T/Log« des schwedischen Transportunternehmens Einride. Das Fahrzeug hat keine Fahrerkabine und lässt sich nötigenfalls auch per Teleoperation steuern (Nykvist/Olsson 2020). Beim innovativen Ansatz des schwedischen Start-ups AirForestry⁵¹ soll ein leichtes (60 kg) Harvesteraggregat von einer Drohne an die Baumkrone eines Durchforstungsbaumes geflogen werden, sodann den Stamm am Wipfel ergreifen und diesen auf dem Weg nach unten entasten, den entasteten Stamm vom Stock trennen und abschließend zum Lagerplatz fliegen (sogar vollautomatisierte luftgestützte Durchforstungsschritte sind angedacht). Aktuell ist unklar, ob das Konzept wirklich bis zur Funktionsfähigkeit entwickelt wird. Auch würde es aufgrund der benötigten Kronenstruktur nur bei Nadelbäumen funktionieren und wäre somit in laubholzreichen mitteleuropäischen Wäldern allenfalls als Nischenlösung und in Ergänzung zu traditionellen Ernteverfahren denkbar. Neuartig und ungewöhnlich ist auch der Ansatz der University of Canterbury in Neuseeland. Entwickelt wurde dort ein Roboter, der sich gänzlich ohne Bodenkontakt von Baum zu Baum bewegt, um Durchforstungen vorzunehmen (Meaclem et al. 2015; Parker et al. 2016).

Digitalisierung und Informationstechnologie (Wald und Holz 4.0)

Bestrebungen zur Erreichung weiterer Autonomiegrade hängen auch davon ab, dass auf der Ebene der Datenerhebung, des Datenaustausches und der Datenkommunikation sowie -analyse Fortschritte erzielt und verfügbare Technologien genutzt werden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 62). So lassen sich Aspekte von Industrie 4.0 wie der digitale Zwilling (digitale Kopie eines realen Objekts, eines Prozesses oder Ablaufs) auch auf Vorgänge innerhalb der Forstwirtschaft übertragen (Wald und Holz 4.0), indem relevante Objekte und Prozesse in der Holzwertschöpfungskette digital abgebildet werden. Der automatisierte Austausch von Informationen zwischen Forstmaschinen oder digitale Systeme zur Verbesserung der Arbeitssicherheit für Waldarbeiter/innen können beispielsweise zukünftig zu Optimierungen in der Holzerntekette führen sowie die Unfallverhütung unterstützen. Seit einigen Jahren werden diesbezüglich branchenspezifische Betrachtungen angestellt, so etwa die Möglichkeiten innerhalb der Wertschöpfungskette Forst und Holz (Feng/Audy 2020; Reitz et al. 2019), die forsttechnischen Einsatzmöglichkeiten insgesamt (Brown et al. 2020) oder die Möglichkeit eines Intelligent Predictive Maintenance, also eines vorausschauenden Wartungskonzepts für die Forstwirtschaft (Maktoubian et al. 2021). Neben der Prozesssicht (Wertschöpfungskette) und dem Blick auf Maschinen (Predictive Maintenance) ist auch der personenzentrierte Ansatz Smart Forest Work (Wagner et al. 2021) zu nennen, wo Waldarbeiter/innen zielgerichtet digitale Unterstützung zur Arbeitserledigung bereitgestellt wird.

Die Entwicklung in Richtung Maschinenautonomie könnte in Verbindung mit den Optionen des digitalen Zwillings perspektivisch intelligente Teleoperation ermöglichen, also das Bedienen von Maschinen aus der Distanz (Seifert et al. 2022, S. 62 f.). Das Fernbedienen von Forstmaschinen wird heute schon in Neuseeland genutzt, um die Maschinenbediener/innen keiner Gefahr in exponiertem, steilem Gelände auszusetzen. Die Entwicklungsbestrebungen von Einride (2018) in Richtung einer tatsächlichen Fernoperation bietet Chancen hinsichtlich deutlicher Produktivitätssteigerung und Arbeitssicherheit. Dieser Ansatz lässt sich auch auf Anwendungssituationen in der Waldbewirtschaftung übertragen.

Auch in Deutschland werden entsprechende Entwicklungen vorangetrieben. Das Kompetenzzentrum Wald und Holz 4.0⁵² (KWH 4.0) ist dabei ein wichtiger, unabhängiger Akteur an der Schnittstelle von Forschung und Praxis. Als einschlägige Forschungseinrichtungen sind die Universität Göttingen (Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie) sowie der 2021 gegründete Cluster Präzisionsforstwirtschaft Freiburg⁵³ zu nennen, darüber hinaus Forstliche Forschungs- und Versuchsanstalten sowie das Forstliche Bildungszentrum für Waldarbeit und Forsttechnik in Arnsberg-Neheim (Teil des Zentrums für Wald und Holzwirtschaft, NRW) (Seifert et al. 2022, S. 63 f.).

⁵¹ <https://www.airforestry.com/en/> (30.5.2024)

⁵² <https://www.kwh40.de> (30.5.2024)

⁵³ Beteiligt sind die Universität Freiburg, die Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg und das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik.

4.2.3 Perspektiven und Rahmenbedingungen

In der Waldbewirtschaftung zeichnen sich im Wesentlichen drei Handlungspfade ab, die helfen können, die vielfältigen Herausforderungen im Waldumbau, in der Bewältigung von Katastrophen wie auch in der regulären Bewirtschaftung naturnaher, gemischter Wälder zu bewältigen (zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 4 f.):

- Von großer Bedeutung ist die zielgerichtete Weiterentwicklung bestehender maschinenbautechnischer Komponenten speziell für mitteleuropäische laubholzreiche Waldsituationen. Der Kostendruck ist bei unproduktiven, motormanuellen Arbeitsverfahren besonders hoch, vorteilhafter sind dagegen vollmechanisierte oder teilmechanisierte Verfahren. Insofern ist das zielgerichtete Anpassen von Harvesterkomponenten (z. B. optimierter Harvesterkopf und -kranarm für Laub- wie Nadelholz) an typische Ernteeingriffe in Mischwäldern ein sinnvoller Ansatz.
- Fortschritte in Sensorik und IT ermöglichen die Etablierung von Assistenzsystemen zur Unterstützung der Maschinenbediener/innen. Diese Entwicklungen können die Produktivität erhöhen und zugleich maschinenschonenderes und umweltschonenderes Arbeiten realisieren. Entsprechende Assistenzsysteme sind in vielen Einsatzphasen vorstellbar, in der Kulturbegründung (Pflanzmaschinen), bei Durchforstungen bzw. jedwedem Holzernteeingriffen (Harvester, Forwarder). In diesen Bereichen scheint eine gezielte Förderung besonders hilfreich, um nötige Kompetenzen der Forschung aus unterschiedlichen Disziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Forstwissenschaften) von Hochschulen mit Firmen umsetzungsnah zusammenzubringen.
- Ein dritter Aspekt stellt die verstärkte Digitalisierung der Wertschöpfungskette bzw. der forstfachlichen Prozesse dar. Hier lässt sich eine Kooperation entlang der Holzerntekette mit den vielen beteiligten Akteuren sehr viel besser in allen Dimensionen zusammenführen, ebenso ist das Überwinden forstpolitischer Hemmnisse (Strukturnachteile bei Klein- und Kleinstwaldbesitzenden sowie Bündelung auf der Abnehmerseite zu tendenzmäßig größeren Holzverwertern) dadurch sehr viel leichter möglich. Insofern wäre auch hier eine stärkere Förderung von Forschungsvorhaben und Implementierungsbestrebungen sinnvoll.

Letztlich hängen Entwicklungen im Bereich Forstmaschinen von Innovationen in Grundlagentechnologien ab, die meist von der akademischen Forschung bereitgestellt werden, und von entsprechend positionierten Firmen, die diese Technologien in marktrelevante Produkte umzusetzen vermögen. Damit die Innovationen in der Praxis auch ankommen, braucht es schließlich gut ausgerüstete Betriebe mit entsprechend ausgebildeten Mitarbeiter/innen.

- Die Ausstattung und Qualität der deutschen Hochschulen und Forschungsinstitutionen, die alle relevanten Felder vom Maschinenbau über Elektrotechnik, Informatik bis hin zu Forstwissenschaften abdecken, ist als gut einzuschätzen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 65). Das lässt sich auch an diversen transdisziplinären Forschungsvorhaben ablesen (z. B. »Datenraum Wald und Holz (DWH 4.0)« (PresseBox 2021) oder »SmartForestry« (FNR 2021b 2021). Vermehrt interdisziplinär zu kooperieren scheint der zielführende Weg zu sein: Maschinenbau, Informatik und Forstwissenschaft gehen gezielt gemeinsam die Aufgabenstellungen mit Blick auf die notwendigen Waldumbau- und Entwicklungsmaßnahmen an. Allerdings bemängeln etwa Seifert et al. (2022, S. 65), dass das Zusammenführen sinnvollerweise verstärkt über eine marktnahe Forschungsförderung geschehen sollte, die Möglichkeiten, Firmen und Forschungsinstitutionen produktbezogen zusammenzuführen, aber noch unzureichend sind. Sie sehen die Gefahr, dass bei produktbezogenen Entwicklungen an den Hochschulen teure Prototypen ohne Marktrelevanz verbleiben und so keinen wirklichen Lösungsbeitrag liefern. Andererseits aber hätten Firmen alleine, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen, oft nicht ausreichende finanzielle Mittel und Zugang zu neuester Technologie (wie sie an Hochschulen und Forschungsinstitutionen bereitstehen).
- Die Andreas Stihl AG & Co. KG hat sich auf handgeführte Geräte spezialisiert und ist eine der wenigen deutschen Hersteller von Weltrang (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 64 f.). Auffällig ist in der jüngsten Produktentwicklung eine digitale Durchdringung der Produkte. So verbindet etwa ein Smart Connector (Stihl o. J.) diverse Geräte. Angeboten wird darüber hinaus ein Flottenmanagement. Im Bereich der selbstfahrenden Forstmaschinen (Harvester, Forwarder, Skidder etc.) ist der Markt hingegen stark von skandinavischen Firmen dominiert. Bei den global dominierenden Maschinenherstellern (John Deere, Komatsu, Ponsse) ist zwar aktuell eine Digitalisierung der Produkte festzustellen, zugleich aber auch eine ausgeprägte proprietäre Sicht (was eine offene Entwicklung von Wald und Holz 4.0 stark behindert), da bevorzugt in eine eigene digitale Maschineninfrastruktur investiert wird. Auch scheint das Interesse an einer Weiterentwicklung und Anpassung von Maschinen an die Anforderungen einer naturnahen, mischwaldreichen Bewirtschaftung in Deutschland bzw. Mitteleuropa eher gering. In Deutschland ist der bedeutendste Akteur mit Vollsortiment (Harvester, Forwarder, Skidder) die HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau GmbH &

Co. KG, die international aber eine eher kleine Rolle spielt. Auch diese Firma bringt sich in mehrere deutsche wie europäisch geförderte Projekte ein. Weitere Anbieter (z. B. Pfanzelt Maschinenbau GmbH, Atlas Kern GmbH, SENNEBOGEN Maschinenfabrik GmbH, Welte Fahrzeugbau GmbH) liefern kein Vollsortiment, sondern bedienen bestimmte Maschinentypsegmente für den forstlichen Bereich. Die technologischen und finanziellen Möglichkeiten scheinen stark limitiert, um tatsächlich im Wettstreit um Maschinen mit hohen Autonomiegraden zeitnah und erfolgreich eigene Produkte entwickeln zu können.

- Um die genannten forsttechnischen Verfahren im Waldumbau zum Einsatz zu bringen, müssen genügend dafür ausgerüstete Betriebe mit entsprechenden Maschinen bereitstehen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 48 f.). Grundsätzlich hat sich in Deutschland ein ausreichender Bestand an forstlichen Lohnunternehmen etabliert, welche professionell ausgerüstet sind und im Maschinenbestand regelmäßig Investitionen tätigen. Essenziell in diesem Kontext ist aber auch, dass Waldarbeiter/innen und Bediener/innen forstlicher Maschinen adäquat aus- und weitergebildet sind, um die komplexen Verfahren sicher zum Einsatz zu bringen (gerade auch im Kontext einer naturnahen Waldbewirtschaftung). Die Ausbildung von Forstwirtschaftlern im dualen System sowie die sich dynamisch an neuen Verfahrenstechniken orientierenden Weiterbildungsmöglichkeiten an forstlichen Bildungszentren sind prinzipiell gut. Auch auf akademischer Ebene ist Deutschland gut positioniert, Fachhochschulen und Universitäten gibt es in ausreichender Zahl und mit modernen Studienplänen. Zu konstatieren ist jedoch, dass angesichts der umfangreichen Aufgaben in der naturnahen Waldbewirtschaftung ein Fachkräftemangel besteht, auch wenn sich in den letzten Jahren die Zahl an Berufsinteressenten verstetigt hat. Die Zahl der Forstwirtschaftszubildenden ist seit dem Tiefststand in 2016 wieder leicht angestiegen und auch auf akademischer Ebene hat die Anzahl der eingeschriebenen Studierenden im Bereich Forstwissenschaft/Holzwirtschaft seit 2006/2007 von 4.559 auf 6.771 in 2020/2021 deutlich zugenommen (BMEL 2022a). Ob sich damit tatsächlich eine dauerhafte Trendwende in der Gesamtzahl der in der Branchengruppe Forstwirtschaft sozialversicherungspflichtig Beschäftigten andeutet, bleibt abzuwarten.

4.3 Biotischer Waldschutz

Die Disziplin Waldschutz befasst sich mit den abiotischen und biotischen Risikofaktoren, die auf solitäre Gehölze, Waldbestände oder das gesamte Ökosystem Wald einwirken, sowie mit der Datenerhebung und -verarbeitung (Monitoring und Prognose), der Beratung und ggf. Durchführung von prophylaktischen und therapeutischen Maßnahmen (Seifert et al. 2022, S. 132). Betrachtet werden in diesem Kapitel die wichtigsten potenziellen Schadfaktoren biotischer Natur (Insekten, Pilze), Stand und Perspektiven im biologischen Waldschutz sowie zentrale Rahmenbedingungen. Die Ausführungen erfolgen in enger Anlehnung an das Gutachten von Seifert et al. (2022, S. 132 ff.).

4.3.1 Aktueller Stand des Waldschutzes in Deutschland

Vor allem die naturfernen Waldbestände sind durch den Klimawandel und unmittelbar durch biotische Faktoren (insbesondere Insekten und Pathogene) in ihrem Bestand gefährdet (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 133). Diese Faktoren haben einen starken Einfluss auf das Wachstum und die Vitalität der Bäume im Allgemeinen, ebenso auf die Struktur und Zusammensetzung der gesamten Biozönose (Lebensgemeinschaft der Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen in einem Biotop) der Waldökosysteme (WBW 2021). Das Beispiel des bedeutendsten heimischen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* (Buchdrucker) zeigt, wie schnell Insekten zu einer Bedrohung für ganze Waldökosysteme werden können. Infolge der beiden extremen Trockenjahre 2018 und 2019 wurden durch den Rindenbrüter in ganz Europa großflächige Schäden in Fichtenbeständen verursacht, die zum Teil mit einer hohen Mortalität und daraus resultierender (temporärer) Entwaldung einhergehen. Lange Trockenperioden, Hitze und Sturmschäden schwächen die Bäume und begünstigen die Fortpflanzung der Insekten (Biedermann et al. 2019). 2019 und 2020 wurden dadurch bundesweit 277.000 ha Fichtenbestände vernichtet (BMEL 2021b).

Hinzu kommen neue Herausforderungen durch gebietsfremde Arten, deren Ausbreitung durch Globalisierungseffekte (Handel, Tourismus) beschleunigt wird (MacLachlan et al. 2021) und deren Auswirkungen auf Ökosysteme zumeist nicht vorhersehbar sind (Paulin et al. 2020; dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 133). Gebietsfremde Insektenarten können die Baumartenzusammensetzung deutlich verändern und negativ auf die Biodiversität wirken. Auch neu eingebrachte Baumarten und mit ihnen neue Schadorganismen (z. B. phytopathogene Pilze oder Insektenarten aus den Ursprungsgebieten der Baumarten) können schädigend wirken und ggf. auch heimische Baumarten gefährden (Mally et al. 2021). Die Gefahr der Einschleppung von Pathogenen besteht auch bei der Einfuhr von Samen nicht heimischer Pflanzenarten (Franić et al. 2019).

In Deutschland gibt es insbesondere in den Landesforstverwaltungen und Forschungseinrichtungen der Länder und des Bundes institutionelle und organisatorische Strukturen, die ein differenziertes Bild der Waldschutzsituation zeichnen können (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 133 f.). So gibt es Vereinbarungen hinsichtlich Methodik und Vorgehen bei der Erhebung landesweit bedeutsamer Schadorganismen. Außerdem existieren Anleitungen für Überwachungsverfahren (Monitoring) zu den in den einzelnen Regionen unterschiedlich bedeutenden heimischen Schadorganismen, basierend auf empirischen Studien und Statistiken.⁵⁴ Die spezifischen Monitoringverfahren erfüllen sowohl durch ihre Praktikabilität als auch ihre hinreichende Präzision die Kriterien im Sinne eines integrierten Pflanzenschutzes sowie einer guten fachlichen Praxis gemäß § 3 Pflanzenschutzgesetz⁵⁵.

Zur guten fachlichen Praxis zählen vor allem schonende Kultivierungen, ein auf das notwendige Maß beschränkter Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel und die Evaluierung aller waldhygienischen Maßnahmen. Die jeweils stufenspezifisch abgeleiteten Prognosen (Schätzung der nächstfolgenden Populationsentwicklung) dienen als Entscheidungsgrundlage für mögliche Maßnahmen (Intensivierung der Überwachung durch Einleitung der nächsten Stufe, Pflanzenschutzmitteleinsatz als Ultima Ratio). Allerdings ist zu konstatieren, dass in Deutschland und auf europäischer Ebene für gebietsfremde Arten ein mehrstufiges Monitoring noch immer fehlt (Schumacher 2016).

Grundsätzlich umfasst der vorbeugende Waldschutz folgende Aspekte (zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 135):

- Standortwahl, Diversität (Art-, Alters- und Strukturvielfalt des Bestandes)
- Erhalt der Bodenqualität (Düngung, Humus, Kalkung, Fruchtfolge), Vermeidung von Belastungen (z. B. Verdichtung)
- Resistenzzüchtungen
- Einsatz gesunden Saat- und Pflanzgutes, Naturverjüngung
- Abstimmung forstlicher Maßnahmen (Durchforstung, Ernte, Holztransport, Waldhygiene) aus waldhygienischer Perspektive (z. B. saisonale Gefahr von Massenvermehrungen durch Rindenbrüter an Holzpoltern im Wald)
- Förderung von Antagonisten (räuberische und parasitische Arthropoden, Singvögel, Fledermäuse etc.)

Eine wichtige Rolle spielen *physikalische Maßnahmen* im Waldschutz, wie sie ggf. auch in Zusammenhang mit Borkenkäferkalamitäten zum Einsatz kommen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 135 f.). Diese Methoden umfassen z. B. Sanitärhiebe, Rückschnitt, Entrindung mit dem Ziel einer Reduktion oder des Entzugs bruttauglichen Materials, Warmwasserbäder (Saatgut), Dämpfung (Substrate) oder Solarisation (Bodenflächen) zur Desinfektion bzw. Sterilisation von Pflanzenmaterial oder Substraten zum Schutz vor Pathogenen, Trocknung, Nasslager, Hitzebehandlung (z. B. Schnittholz) zur Schaffung unwirtlicher Entwicklungsbedingungen oder zur direkten Beseitigung von latenten Schadorganismenstadien sowie Mahd z. B. zur Vermeidung von Brutstätten waldhygienisch relevanter Wühlmausarten. Auch *biotechnische Verfahren* kommen in begrenztem Umfang zum Einsatz. Dazu zählen Lockstoffe (Sexual-/Aggregationspheromone), Abwehr-/Signalstoffe (Repellents) sowie Beschleunigungs-/Hemmstoffe (z. B. Häutungshemmer/-beschleuniger). Zudem werden *chemisch-synthetische Präparate* mit hohem Wirkungsgrad und verbesserter Umweltverträglichkeit in geringem Umfang eingesetzt, z. B. Insektizide auf Pyrethroid-Basis oder Fungizide auf Schwefelbasis.

Die Optionen für therapeutische Maßnahmen im Waldschutz (insbesondere gegen Schadinsekten) sind grundsätzlich sehr beschränkt (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 136). So nimmt etwa die Zahl der für eine Anwendung im Wald zugelassenen chemischen Pflanzenschutzmittel (PSM) seit vielen Jahren stetig ab. 2021 lief die Zulassung für vier der bis dato noch fünf verfügbaren Präparate (Storanet®, TRINET P®, Cyperkill Forst® und Forester®) aus der Wirkstoffgruppe der umweltbelastenden Pyrethroide endgültig aus. Die Zulassung für das letzte zur Verfügung stehende Pflanzenschutzmittel dieser Insektizidkontaktgifte endete am 31. August 2022. Zu konstatieren ist aber auch, dass mit dem Einsatz chemischer PSM zwar eine schnelle und effektive Wirksamkeit verbunden ist, diese aber auch erhebliche negative Auswirkungen auf die Umwelt haben können. So verursacht etwa die geringe Spezifität direkte Wirkungen auf Nichtzielorganismen (z. B. Nützlinge und aquatische Organismen) sowie indirekte Langzeiteffekte durch Rückstände oder Abbauprodukte und damit erhebliche Störungen des (Wald-)Ökosystems (Leroy et al. 2022). Eine aktuelle Studie zeigt, dass auch Insekten in Schutzgebieten, in denen

⁵⁴ So bestehen etwa in Brandenburg fortschrittliche Verfahren zur Schätzung der Populationen (Status quo, Dynamik) der aufgrund des hohen Kiefernanteils bedeutsamen Kieferschadinsekten, wie etwa Nonne (*Lymantria monacha*), Kieferspinner (*Dendrolimus pini*), Kiefernspanner (*Bupalus piniaria*), Kieferneule (*Panolis flammea*) und Kiefernbuschhornblattwespe (*Diprion pini*).

⁵⁵ Pflanzenschutzgesetz (PflSchG) vom 6.2.2012, zuletzt am 20.12.2022 geändert

keine chemischen PSM eingesetzt wurden, mit Rückständen dieser Mittel belastet sind (Brühl et al. 2021). Allerdings werden aktuell jährlich nur auf ca. 0,1 % der Waldfläche Deutschlands PSM eingesetzt (WBW 2021, S. 86).

Selektiv wirkende biologische Pflanzenschutzmittel, die als Alternative für den integrierten Waldschutz infrage kommen, stehen aber nicht in ausreichender Anwendungsbreite zur Verfügung oder sind nicht kurzfristig erhältlich (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 137). Die Gründe hierfür sind etwa ein langwieriger und kostenintensiver Entwicklungs- und Zulassungsvorlauf, mangelnde Attraktivität für entwickelnde Unternehmen aufgrund eines durch die hohe Spezifität sehr begrenzten Absatzmarktes sowie das Fehlen staatlicher Förderung. Diesbezüglich scheinen Anstrengungen auf mehreren Ebenen notwendig zu sein, wie etwa die Etablierung eines prioritär vorbeugenden bzw. schonenden Waldschutzes unter bestmöglicher Ausnutzung selbstregulierender Prozesse (z. B. Balla et al. 2021).

4.3.2 Optionen für den biotischen Waldschutz

Kernpunkt des naturgemäßen Waldumbaus ist die Schaffung stabilerer Mischbestände mit hoher Struktur- und Artenvielfalt. Für mehrere Jahrzehnte werden in Deutschland jedoch noch die wenig(er) diversen Bestandestypen dominieren. In dieser Übergangsphase wäre es wichtig, dass zur Sicherung der Ökosystemfunktionen geeignete Verfahren und Mittel des Pflanzenschutzes auf vorrangig biologischer (und biotechnisch modifizierter biologischer Mittel) Basis zur Verfügung stehen, auch weil chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel für den Wald zukünftig (wie in Kap. 4.3.1 erläutert) nicht mehr erlaubt sein werden (WBW 2021, S. 86 f.).

Der biologische Waldschutz kann die Erreichung der Ziele eines naturnahen Waldumbaus durch den Einsatz von natürlich vorkommenden, spezifischen Gegenspielern von Schadorganismen oder entomopathogenen (sich u. a. von Insekten ernährenden) Mikroorganismen zur Kontrolle bzw. Regulation der Populationsdichte forstlicher Schadorganismen unterstützen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 137 f.). Dies kann durch die Einführung und langfristige Etablierung oder durch die Unterstützung bereits vorhandener Gegenspieler (z. B. räuberische und parasitoide Insekten oder Entomopathogene) erfolgen. Eine weitere Option ist die kurzfristige Ausbringung einer großen Zahl oder die Erhöhung der Anzahl bereits vorhandener mikrobieller Antagonisten (Überschwemmungstaktik). Vorteilhaft ist, dass die eingesetzten Organismen oft schon in der Population des Schadorganismus vorhanden und somit nicht systemfremd sind. Entscheidend ist die hohe Spezifität, zum Teil für nur eine einzige Schadinsektenart oder wenige Arten einer Artengruppe, sodass Nichtzielorganismen nicht beeinflusst werden. Im Allgemeinen werden dem biologischen Pflanzenschutz im Wald gute Erfolgsaussichten zugesprochen. Einen Überblick über den Stand geben etwa Balla et al. (2021).

Im Folgenden werden bereits etablierte Methoden des biologischen Waldschutzes – Einsatz von Makro- sowie von Mikroorganismen und Nematoden – kurz vorgestellt und ihre Anwendungsperspektiven für Deutschland skizziert.

Einsatz von Makroorganismen

Zum Schutz von Waldökosystemen durch Makroorganismen werden zumeist parasitische Hymenopteren (Hautflügler) und Dipteren (Zweiflügler), seltener räuberische Arthropoden verwendet (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 138 f.). Kenis et al. (2017) nennen eine Zahl von über 3.000 Einführungen in Waldökosysteme und geben an, dass 34 % dieser Einführungen die Populationsdichte der Zielorganismen erfolgreich reduziert haben. Erfolge wurden besonders bei der Kontrolle holzbewohnender Käfer erzielt (Wang et al. 2021). Parasitoide können die Population der Schadinsekten langfristig unter die Schadschwelle regulieren (Duan et al. 2021). Die Aufgaben der Produktion und (zumeist mehrmalige) Freisetzung der Gegenspieler übernehmen in vielen Ländern staatliche Einrichtungen. Maßnahmenerfolge treten oft erst nach mehreren Jahren auf, da die Generationszeiten der Gegenspieler denen der Zielorganismen entsprechen oder sogar länger sind. Eine schnelle Wirksamkeit hinsichtlich der Reduktion einer Schadinsektenpopulation kann somit nicht erzielt werden. Die Etablierung von Gegenspielern ist unter diesem Gesichtspunkt als den Waldumbau begleitende, langfristig wirkende Methode anzusehen. In Deutschland fehlen vielfach praktische Erfahrungen, was u. a. darin begründet ist, dass die Entwicklung entsprechender Produkte sehr teuer und die Zulassung sehr aufwendig ist. Zudem ist der forstwirtschaftliche Markt für diese biologischen Produkte in Bezug auf erzielbare Erlöse aufgrund der kleinen Anwendungsflächen und der nur periodisch auftretenden Schadorganismen sehr klein. Hier wäre eine europäische bzw. internationale Zusammenarbeit sinnvoll.

Einsatz von Mikroorganismen und Nematoden

Entomopathogene gehören wie Mikroorganismen und Nematoden zu den natürlichen (Umwelt-)Faktoren, die Insektenpopulationen regulieren und in jeder Insektenart in hoher Diversität nachgewiesen werden können (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 139). Es bestehen verschiedene Anwendungsoptionen: Bei der Überschwemmungstaktik wird eine große Zahl von Entomopathogenen freigesetzt, um eine schnelle Reduktion der Zielinsektenpopulation zu erreichen. Die sehr kurzen Generationszeiten der Pathogene führen zu einer schnellen Etablierung in der Population der Zielinsekten. Zudem bilden sie in vielen Fällen gegenüber Umwelteinflüssen (Temperaturen, Trockenheit etc.) widerstandsfähige Dauerstadien und können sich schnell und über große Entfernungen verbreiten. So kann in kurzer Zeit eine hohe Durchseuchung der Schadorganismen stattfinden und zugleich eine über mehrere Insektengenerationen anhaltende Wirksamkeit erzielt werden. Viele dieser mikrobiellen Gegenspieler (Bakterien, Viren, Pilze sowie Nematoden) wurden in den vergangenen Jahrzehnten charakterisiert und auf ihr Potenzial für einen Einsatz im biologischen Waldschutz untersucht (z. B. Hajek/van Frankenhuyzen 2017).

Produkte auf der Basis des *Bakteriums Bacillus thuringiensis* (B.t.) sind schon seit Jahren Bestandteil des integrierten Pflanzenschutzes, insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich, wo sie weltweit ca. 10% der Produktion von PSM ausmachen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 139 f.). Im Waldschutz werden B.t.-Produkte ebenfalls seit Jahrzehnten eingesetzt. Der Einsatz in deutschen Wäldern ist jedoch durch Anwendungsaufgaben stark eingeschränkt und wird auch forschungsseitig nicht sonderlich gefördert (BVL 2019). Studien haben jedoch gezeigt, dass die negativen Auswirkungen einer Insektengradation bzw. des Kahlfraßes auf die Biozönose wesentlich gravierender waren als die Folgen des Einsatzes von B.t. zum Schutz der Bestände (z. B. Manderino et al. 2014).

Eine Organismengruppe mit großem Potenzial im biologischen Pflanzenschutz in Waldökosystemen sind *entomopathogene Viren* (EPV) (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 140 f.). Bereits vor über 150 Jahren wurde am Ende von Massenvermehrungsphasen von Schadinsekten in Deutschland das Wipfelsterben beobachtet (sterbende und tote Larven hängen massenhaft in den Baumkronen). Ursache sind artspezifische Polyederviren, die natürlich in den Insektenpopulationen vorkommen und bei hoher Insektendichte eine Virusepidemie verursachen. Die Viren werden oral aufgenommen und zerstören während ihrer Replikation die Zellen verschiedener Gewebe der befallenen Insekten. Sie sind relativ schnell wirkend, verursachen eine hohe Mortalitätsrate, sind aber umweltsensibel (z. B. UV-Strahlung) und daher nur kurzzeitig wirksam. Im Rahmen des biologischen Pflanzenschutzes werden Viren in der Regel frühzeitig ausgebracht, um die Massenvermehrung zu beenden, bevor größere Schäden auftreten. Allerdings ist die Produktion von Viren nur in lebendem Gewebe, in Zellkulturen oder Insektenmassenzuchten möglich und daher aufwendig und kostenintensiv. Zudem ist das Marktpotenzial aufgrund der hohen Spezifität für nur eine Insektenart sehr begrenzt. In Deutschland besteht Erfahrung bei der Anwendung von Viren im Obstbau, wo Präparate gegen typische Obstschädlinge (z. B. Apfelwickler) erfolgreich eingesetzt werden (Jehle 2008). In Bezug auf den Waldschutz besitzen EPV in Deutschland ein großes Potenzial, da Viren in fast allen bedeutsamen Schadinsekten natürlich vorkommend nachgewiesen wurden und Expertisen im Hinblick auf Produktion und Anwendung aus anderen Ländern übertragbar sind. Aktuell sind aber keine Viruspräparate für die Anwendung im Wald in Deutschland zugelassen (Seifert et al. 2022, S. 140).

Die Gruppe der *Mikrosporidien* (einzellige Pilze) wurde intensiv als Gegenspieler von Forstinsekten untersucht (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 141). Sie zeichnen sich durch eine hohe Wirtsspezifität aus (ähnlich den Viren), entfalten aber nur eine moderate Mortalität im Wirt. Die Übertragung erfolgt durch die Aufnahme der von infizierten Insekten abgegebenen, langlebigen Mikrosporidiensporen, aber auch über kontaminierte Eigelege infizierter Adulten. Durch ihre Charakteristik eignen sich Mikrosporidien jedoch nicht für Einsätze mit dem Ziel einer schnellen Reduktion einer Insektenpopulation, sondern bewirken längerfristig die Regulierung einer Population auf ein Niveau unterhalb der Schadensschwelle.

Entomopathogene Pilze (EPF) sind wichtige Regulatoren von Arthropodenpopulationen, die natürlich in Waldökosystemen vorhanden sind (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 141). Die Infektion der Insekten erfolgt durch äußerlich anhaftende Sporen und einen Keimschlauch, der die Cuticula (wächserne, harte Hautschicht) der Insekten durchdringt, weshalb auch Ruhestadien (z. B. Puppen) infiziert werden können. Meist werden in kurzer Zeit hohe Mortalitätsraten erreicht. Aufgrund ihrer Widerstandsfähigkeit weisen EPF in der Regel eine langfristige Wirkung auf die Insektenpopulation auf. Studien in Waldökosystemen in Japan und USA konnten zeigen, dass holzbewohnende Insekten (hier: Käfer) durch den Einsatz von Pilzbändern oder Injektion der Pilzsporen unter die Rinde erfolgreich kontrolliert werden können (Hajek/Bauer 2009; Shimazu 2009). Nachgewiesen ist die Wirksamkeit gegen den Asiatischen Laubholzbockkäfer und den Eschenbastkäfer, zwei invasive Arten, die Gehölzpflanzen in Europa zerstören können. Neue Formulierungen der EPF (als Granulat) ermöglichen

auch den Einsatz in trockenen Biotopen (Dara et al. 2019). Auch gegen Schadinsekten neubegründeter Waldbestände wie den Großen Braunen Rüsselkäfer und Schnellkäferlarven scheinen EPF gut zu wirken (z. B. Eckard et al. 2014).

Schließlich erfährt auch der Einsatz von *Nematoden* (EPN) im Waldschutz zunehmend Beachtung (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 142). Nematoden suchen ihre Wirte aktiv auf und dringen über Körperöffnungen ein. Sie ernähren sich von toter organischer Materie und setzen nach dem Eindringen Mikroorganismen frei, die den Wirt abtöten. Die Spezifität von Nematoden ist noch nicht ganz geklärt und im forstlichen Bereich gibt es bislang relativ wenige Anwendungsbeispiele. In Nordamerika wurden gute Erfolge durch den Einsatz von EPN gegen eine invasive Holzwespe (*Sirex noctilio*) erzielt (Bedding 2009). Versuche in Europa zeigen eine hohe Wirksamkeit gegen *Hylobius abietis*, einen Hauptschädling in neubegründeten Beständen (Torr et al. 2005). In anderen Untersuchungen zeigte sich eine gute Wirkung in Kombination mit weiteren biologischen Gegenspielern wie z. B. EPF (Mc Namara et al. 2018). Für Deutschland beschreibt Barth (2013) die Anwendung gegen den Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*) in Waldökosystemen, die aber u. a. aufgrund der hohen Kosten kaum zum Einsatz gekommen ist. Grundsätzlich sind in Deutschland aber Produktionsstätten für EPN und das nötige Fachwissen vorhanden,⁵⁶ sodass eine Anwendung im Waldschutz möglich bzw. ausbaubar erscheint.

4.3.3 Perspektiven und Rahmenbedingungen

Der integrierte Waldschutz beinhaltet eine Kombination aus prophylaktischen, physikalischen, pflanzenzüchterisch-anbautechnischen, biotechnischen und biologischen sowie – als Ultima Ratio – chemischen Verfahren (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 7 u. 143). In den vergangenen Jahren haben bedingt durch die Auswirkungen des Klimawandels die Herausforderungen des Waldschutzes enorm zugenommen. Festzustellen ist einerseits eine verminderte Vitalität und damit Stabilität insgesamt der Wirte (Bäume, Ökosysteme), während andererseits Schadorganismen durch veränderte Wirt-Parasit-Beziehungen sowie das Auftreten neuer Arten ein größeres Schädigungspotenzial aufweisen. Gleichzeitig haben zunehmende Restriktionen (vor allem Präparat- und Wirkstoffanzahl, Anwendungs- und Zulassungsbeschränkungen) sowie marktorientierte Entscheidungen der Hersteller zu einer deutlichen Reduktion der Wahlmöglichkeiten bei den Präparaten im Pflanzenschutz geführt. Im Zusammenwirken mit oft langwierigen Genehmigungsverfahren führt dies dazu, dass mitunter nur noch ein einziges Präparat (mit ggf. hoher Umweltbelastung) zur Verfügung steht. Um die Resilienz der Wälder für die Zukunft nachhaltig und umweltschonend zu erhöhen und einen guten Gesundheitszustand dauerhaft zu etablieren, wären die präventiven Möglichkeiten noch intensiver auszuschöpfen bzw. zu optimieren sowie die Weiterentwicklung biotechnischer und biologischer Verfahren voranzutreiben. Die der Zustandserfassung und Prognoseberechnungen dienenden Monitoringverfahren müssen den sich verändernden Rahmenbedingungen kontinuierlich angepasst werden, um auf neue Herausforderungen (vor allem gebietsfremde, invasive Arten) frühestmöglich angemessen reagieren zu können. Den umweltverträglichen, biologischen Verfahren muss im Pflanzenschutz deutlich mehr Beachtung zuzukommen.

Neben Erforschung, Entwicklung und Einsatz langfristig populationsregulierender, natürlicher Antagonisten sind auch die Erfassung invasiver Arten und die Entwicklung von Strategien zu deren Kontrolle wichtig. Zugleich wären administrative Prozesse (Zulassung und Genehmigung) zu optimieren (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 143 f.). Neben der 2023 erfolgten Einrichtung eines nationalen Instituts für Waldschutz (Julius Kühn-Institut) wäre eine Stärkung anwendungsbezogener Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich des biologischen Waldschutzes durch ein nationales Förderprogramm sinnvoll (unter Einbindung von kleinen und mittleren Unternehmen und der Zulassungsstellen). Notwendig erscheint zudem der Aufbau von Forschungs- und Produktionsstätten für Produkte des biologischen Waldschutzes, insbesondere im Hinblick auf zu erwartende invasive Schadorganismen. Da insgesamt in Deutschland in den letzten Jahrzehnten die Forschungs- und Lehrkapazitäten in der Forstentomologie und Forstpathologie besonders an Universitäten sukzessive abgebaut wurden, gilt es die entsprechende Expertise wieder aufzubauen und auch die Mitarbeiter/innen der zuständigen Verwaltungen (untere und mittlere Behörden der Forstverwaltung, Forschungs- und Versuchsanstalten mit behördlichen Zuständigkeiten des Pflanzenschutzes) passend aus- und weiterzubilden.⁵⁷

⁵⁶ Als führender Produzent ist etwa die e-nema Gesellschaft für Biotechnologie und biologischen Pflanzenschutz mbH zu nennen, das auch in der Forschung zum biologischen Pflanzenschutz tätig ist.

⁵⁷ Anders sieht es in den USA aus, wo z. B. in Bezug auf invasive Arten und den Einsatz mikrobieller Gegenspieler von Schadinsekten bereits ein großer Erfahrungsschatz besteht (Balla et al. 2021; MacLachlan et al. 2021).

4.4 Genetisches Monitoring

Für das Überleben von Baumpopulationen und ihre Anpassungsfähigkeit an sich wandelnde Umweltbedingungen sind genetische Ressourcen in ihrer Gesamtheit elementar wichtig (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 181 f.). Genetisches Monitoring ist ein Forschungsfeld, das die Untersuchung dieser Ressourcen zum Ziel hat. Die Überprüfung der genetischen Kontrolle von phänotypischen Merkmalen wie z.B. der Toleranz gegenüber abiotischen und biotischen Stressfaktoren ist aufgrund der hohen Komplexität der genetischen Steuerung sehr aufwendig, schafft jedoch die notwendigen Voraussetzungen für die Früherkennung von Merkmalen im forstlichem Vermehrungsgut, die für Anpassung, Überleben oder Wuchsleistung bedeutsam sind. Dabei lassen sich auch Risiken infolge von genetischer Erosion (Genverluste) oder von Inzucht erkennen.⁵⁸ Im Folgenden werden der Stand von Forschung und Anwendung beim genetischen Monitoring (Kap. 4.4.1) sowie der Beitrag zum Waldumbau beleuchtet (Kap. 4.4.2), schließlich wird auf Perspektiven und Rahmenbedingungen eingegangen. Die Ausführungen in diesem Kapitel erfolgen in enger Anlehnung an Seifert et al. (2022, S. 174 ff.).

4.4.1 Stand von Forschung und Anwendung

Die genetische Variation innerhalb der Arten (Variabilität) ist für deren Anpassungs-, Regenerations- und Überlebensfähigkeiten von größter Bedeutung (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 174 ff.). Je heterogener die Umweltbedingungen und je länger die Entwicklungszyklen von Bäumen sind, desto wichtiger sind die genetischen Ressourcen von Waldbaumpopulationen für ihr Überleben und ihre Stabilität über Generationen hinweg (z. B. Hattemer/Ziehe 2018). Genetische Merkmale von Bäumen lassen sich anhand von DNA-Markern (aus Kern, Chloroplasten und Mitochondrien) mithilfe eines DNA-Screening sowie durch diverse genetisch kontrollierte phänotypische Merkmale identifizieren. Im Vordergrund steht dabei die Frage nach der Aussagefähigkeit der detektierten genetischen Information, z. B. welche Genmarker für welchen Zweck bzw. welche forstpraktische Anwendung eingesetzt werden können. In Deutschland werden forstgenetische Studien von verschiedenen Bund- und Länderinstitutionen (z. B. Universitäten, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalten) durchgeführt, wobei die Grenzen zwischen genetischer Forschung und der Anwendung in der forstlichen Praxis fließend sind. In unterschiedlicher Intensität wird die forstgenetische Forschung maßgeblich von denjenigen Universitäten geprägt, die gegenwärtig noch eigenständige forstwissenschaftliche Fachrichtungen bzw. Fakultäten aufweisen.⁵⁹ Alle Institutionen sind dem Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA) angeschlossen. Grundsätzlich ist der Bedarf an weiteren Studien und eine entsprechende Forschungsförderung sehr groß, weil es bis dato nur sehr wenige Projekte zur Entwicklung genetischer Marker für diejenigen DNA-Abschnitte gibt, die an der Ausprägung von Toleranzen gegenüber klimabedingten und auch biotischen Stresseinwirkungen beteiligt sind (Kap. 4.2).⁶⁰

Mit der Neugründung von Anstalten für Forstpflanzenzüchtung wurde in Deutschland besonders Mitte des 20. Jahrhunderts eine Vielzahl von Anbauversuchen mit Stichproben aus dem Verbreitungsgebiet der jeweiligen Baumart (Herkunftsversuche) angelegt (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 177). Im Fokus standen vor allem die Baumarten Rotbuche, Stiel- und Traubeneiche, Fichte, Weißtanne und Waldkiefer und auch nicht heimische Baumarten wie Douglasie, Roteiche und Robinie. Herkunftsversuche sind auch heute noch eine wichtige Aufgabe des forstgenetischen Versuchswesens. Sie haben zum Ziel, die »Eignung unterschiedlicher Herkünfte heimischer sowie alternativer Baumarten [...] im Hinblick auf den Klimawandel« (AWG o. J.a) zu untersuchen. Daneben geht es aber auch um spezielle Maßnahmen der Forstpflanzenzüchtung wie z. B. Anlage von Samenplantagen, Prüfung der resultierenden Bäume (Nachkommenschaftsprüfung) sowie Resistenzzüchtung (gegen Krankheiten, Trockenheit, Hitze etc.). Diese Prüfungen sollen den Zuchtwert selektierter Bäume aus den Phänotypen seiner Nachkommen ermitteln und beziehen sich meist auf schnellwüchsige Baumarten (Pappel- und Weidenarten, teilweise Lärche, Robinie). Aus den Ergebnissen dieser Feldversuche werden für den gesamten Forstbereich Anbauempfehlungen durch die DVFFA-Sektion Forstgenetik/Forstpflanzenzüchtung abgeleitet. Ausgewählte Versuchsflächen dienen auch der Erhaltung forstlicher Genressourcen.

⁵⁸ Inzucht resultiert aus Verwandtenpaarung und bewirkt durch die Überrepräsentanz von Nachkommen aus Selbstbefruchtung (vorwiegend bei Koniferen) sowie von Voll- und Halbgeschwistern eine zunehmende genealogische Ähnlichkeit (z. B. Hattemer/Ziehe 2018).

⁵⁹ Beispielsweise die Universität Freiburg (Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen), Universität Göttingen (Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie), TU Dresden (Fachrichtung Forstwissenschaften), TU München (School of Life Sciences).

⁶⁰ Eine Zusammenstellung von Ergebnissen, die repräsentativ für eine Vielzahl von Einzelstudien, Projektverbänden und Netzwerken ist, bietet Liesebach 2020.

Kasten 4.2 Relevante Forschungsprojekte

- Das Ziel des Verbundprojekts »GenMon« (Genetisches Monitoring für Rotbuche und gemeine Fichte in Deutschland, BMEL/BMUV – Waldklimafonds; AWG o. J.b) war die Bewertung genetischer Anpassungsfähigkeit von (diesen) Baumarten gegenüber Umweltveränderungen.
- Ein weiteres Verbundprojekt war »sensFORclim« (Klimasensitivität von Forstgenressourcen in Deutschland; AWG o. J.d). Ziel war die Identifizierung von Beständen für die Produktion von klimatolerantem, heimischem Vermehrungsgut der Baumarten Fichte, Buche und Tanne.
- Ein Projekt aus der Grundlagenforschung wird von der Universität Göttingen koordiniert: »Entwicklung genetischer Marker zur Analyse von Anpassungen an Trockenstress bei Traubeneiche und Buche« (BMEL – Waldklimafonds).⁶¹
- Ziel des 2020 ausgelaufenen Projekts »LifeGenMon« (Life for European Forest Genetic Monitoring System, EU-Life-Programm Bayerische Forstverwaltung; AWG o. J.c) mit 6 Partnern in Slowenien, Griechenland und Deutschland war die Etablierung eines forstgenetischen Monitoringsystems in Buchen- und Tannenbeständen. Langzeitstudien dieser Art ermöglichen Informationen über genetische Konsequenzen waldbaulicher Verfahren und über Saatgutqualität.
- Das 2019 ausgelaufene Projekt »SUSTREE« (Saat- und Pflanzgut für Wälder der Zukunft; AWG o. J.e) wurde von Interreg Central Europe, einem Programm zur Erweiterung transnationaler Zusammenarbeit in Zentraleuropa gefördert. Projektziel war der länderübergreifende Austausch von forstlichem Vermehrungsgut, bessere Nutzungsmöglichkeiten von Zulassungsregistern und Klimadaten sowie die Strukturierung von Samentransferzonen.
- Ziel des 2018 ausgelaufenen Projekts »FitForClim« (Bereitstellung von leistungsfähigem und hochwertigem Forstvermehrungsgut für den klima- und standortgerechten Wald der Zukunft, BMEL-Waldklimafonds)⁶², war die Auswahl von vitalen, qualitativ hochwertigen Bäumen (Eiche, Bergahorn, Douglasie, Fichte, Kiefer, Lärche), um diese zum Aufbau von Samenplantagen und Klonarchiven zu nutzen. Solche Verfahren der Forstpflanzenzüchtung können für die Versorgung von forstlichem Vermehrungsgut bedeutsam sein, bedürfen aber einer kritischen Überprüfung hinsichtlich möglicher Einschränkungen der genetischen Variabilität.

Quelle: Seifert et al. 2022, S. 185 ff.

Genetisches Monitoring hat sich in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum etabliert. Dies gilt für die Grundlagenforschung ebenso wie für Anwendungen im Zusammenhang mit klimabedingten Herausforderungen. Seifert et al. (2022, S. 178 ff.) identifizieren u. a. folgende Verbesserungsmöglichkeiten, um genetisches Monitoring zielorientierter und aussagefähiger zu gestalten:

- *Auswahl der zu untersuchenden Baumarten und Waldökosysteme:* Forstgenetische Populationsstudien beziehen sich zumeist auf die am häufigsten vorkommenden Baumarten Rotbuche, Stiel- und Traubeneiche, Fichte, Waldkiefer, Douglasie, auch Weißtanne. Seltener Waldbaumarten sind stark unterrepräsentiert, z. B. Sorbusarten, gemeine Hasel, europäische Eibe, aber auch Sommer- und Winterlinde, Erlen-, Ulmen- und Ahornarten sowie darüber hinaus Arten in bestimmten Waldgesellschaften, wie z. B. Flussauen oder nahe der Baumgrenze im Gebirge. Auch mit Blick auf die zu erwartenden klimatischen Veränderungen wären seltener Baumarten mehr in den Fokus zu rücken.
- *Optimierung klimaresilienter Mischungsformen:* Genetisches Monitoring konzentriert sich meist auf einzelne Baumarten, während Mischungen sowohl hinsichtlich der Anzahl beteiligter Baumarten als auch ihrer Mischungsanteile oft vernachlässigt werden. Bei der Förderung von Mischwäldern bzw. auch der Einbringung seltener Baumarten stößt allerdings die Forderung nach möglichst hoher Baumartenzahl pro Flächeneinheit aus genetischer Sicht dann an Grenzen, wenn die Individuenzahl pro Baumart so gering ist, dass die Reproduktion nicht oder nur so eingeschränkt möglich ist, dass in der Nachkommenschaft Belastungen durch Inzucht und Genverarmung auftreten. Diesbezüglich scheint die Intensivierung genetischer Studien zu Mischungsformen zielführend, um so Kriterien für Mischungsanteile ableiten zu können.

⁶¹ <https://www.uni-goettingen.de/en/633327.html> (30.5.2024)

⁶² <https://www.fitforclim.de/index.html> (30.5.2024)

- *Translokation mit Fokus auf Klimaresilienz und Stresstoleranz:* Die Herkunftsversuche beziehen zwar baumartspezifische Habitate ein, sind aber zu wenig an den erwarteten Umweltbedingungen orientiert. Translokationsversuche zielen darauf ab, zukünftige klimatische Belastungen vorweg zu nehmen und können daher den Kenntnisstand über Reaktionsnormen von Genotypen unter Freilandbedingungen erweitern. Beispielsweise lassen sich Jungpflanzen aus höheren Lagen den wärmeren Bedingungen und der biotischen Umwelt weit unterhalb aussetzen. Zum Austesten der Reaktionsnormen von Genotypen kann Translokation auch umgekehrt erfolgen, d. h. von mittleren in höhere Lagen oder von Süden nach Norden. Diese Variante orientiert sich auch an der zu erwartenden Verdrängung von Arten und daraus folgender Verschiebung ihres Areals (z. B. Buchenpopulationen von mittleren in höhere Lagen der Mittelgebirge).
- *Korrelationen zwischen genetischen Merkmalen und Stresstoleranz:* Studien über die genetische Kontrolle klimarelevanter Merkmalsausprägungen (Toleranz gegen Wassermangel, Temperatursensitivität etc.) sind technisch machbar, aber sehr aufwendig und noch nicht im Stadium des Routineeinsatzes. Das hat mit der hohen Komplexität der genetischen Steuerung von Toleranzmechanismen zu tun (Joshi et al. 2016), aber auch damit, dass darauf bezogene Forschungsarbeiten zu wenig gefördert werden. Es gibt bereits Erfolgsmeldungen, aber dazu bedurfte es gemeinschaftlicher Anstrengungen vieler kooperierender Arbeitsgruppen meist über Ländergrenzen hinweg. So konnten z. B. Rellstab et al. (2016) für Eichenarten, Pfenninger et al. (2021) für die Rotbuche sowie Depardieu et al. (2021) für die Weißfichte DNA-Abschnitte nachweisen, die an der Ausprägung klimarelevanter Merkmale beteiligt sind.
- *Koordinierung forstpflanzenzüchterischer Aktivitäten:* Züchterischen Maßnahmen sind aufgrund der Gefahr einer Einschränkung der genetischen Diversität und somit des Anpassungspotenzials der jeweiligen Baumkollektive enge Grenzen gesetzt. Bei der Auslese stresstoleranter und klimaresilienter Kollektive geht es daher nicht um die Zusammenstellung einzelner Hochleistungsklone, sondern um die Auswahl von Herkunftsstichproben mit möglichst hohem Anpassungspotenzial an heterogene Umweltbedingungen (phänotypisch bedeutsame Merkmale für Toleranz bzw. Resistenz). Wichtig wäre deshalb die enge Verzahnung züchterischer Aktivitäten mit der forstgenetischen Grundlagenforschung, um Kenntnisse über die genetische Kontrolle phänotypisch bedeutsamer Merkmale einschließlich der Ausprägung von Toleranz bzw. Resistenz (siehe vorangehenden Punkt) direkt für die züchterische Auslese nutzen zu können.

4.4.2 Beitrag zum Waldumbau

Der Waldumbau hat zum Ziel, klimaresiliente und stresstolerante Wälder aufzubauen und vielfältige Ökosystemleistungen zu generieren, was die Forstgenetik durch die Bereitstellung genetischer Kriterien für infrage kommende Maßnahmen unterstützen kann (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 174 u. S. 181). Im Hinblick auf die Stabilität von artenreichen Waldbeständen lassen sich mithilfe des genetischen Monitorings Zustände des Waldes bzw. der Bäume erfassen sowie Prognosen über deren weitere Entwicklung erstellen. Im Fokus stehen dabei allgemeine Diversitätsparameter sowie spezielle genetische Merkmale, die für Anpassung und Überleben besondere Bedeutung haben, weil sie z. B. an der Ausprägung von Toleranz gegenüber Trocken- und Hitzestress, Schadstoffen oder Frosteinwirkungen beteiligt sind. Solche Parameter können sehr effizient zur Einschätzung der Anpassungs- und Überlebensfähigkeit von Populationen herangezogen und daraus ggf. notwendige Vorsorgemaßnahmen abgeleitet und mithilfe forstpflanzenzüchterischer Maßnahmen (z. B. durch entsprechende Ausleseverfahren) umgesetzt werden. Wichtige Beiträge kann die Forstgenetik bei der Qualitätskontrolle von Vermehrungsgut, der Kontrolle der Waldverjüngung sowie der Festlegung von Mindestpopulationsgrößen leisten.

Qualitätskontrolle von Vermehrungsgut

Das für den Handel zugelassene forstliche Vermehrungsgut unterliegt detaillierten Qualitätskriterien (geregelt im Forstvermehrungsgutgesetz⁶³ sowie den Durchführungsverordnungen der Länder) (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 182). Qualitätskriterien, die auf einem genetischen Monitoring beruhen, gibt es jedoch nicht. Somit fehlen Gewährleistungen hinsichtlich der genetischen Qualität des Vermehrungsgutes. Dieser Mangel kann jedoch prinzipiell behoben werden, weil genetisches Monitoring leicht zu standardisieren ist und die zuständigen Institutionen in einigen Bundesländern (sowie das Thünen-Institut als Ressortforschungseinrichtung des Bundes) in der Lage sind, solche Untersuchungen durchzuführen. Schon eine kleine Stichprobe von 50 bis 100 Samenkörnern aus einer Saatgutpartie, welche zur Begründung von 100 ha oder auch weit mehr ausreichen würde, kann

⁶³ Forstvermehrungsgutgesetz vom 22. Mai 2002, zuletzt am 31. August 2015 geändert

konkrete Aussagen über genetische Variabilität und mögliche Inzuchtbelastungen liefern. Forstliches Vermehrungsgut ist mit der Erwartung verknüpft, dass daraus langlebige Wälder entstehen, was die Bedeutung der Qualitätskontrolle auch durch genetisches Monitoring unterstreicht.

Die Verfügbarkeit von forstlichem Vermehrungsgut ist unter Vorsorgeaspekten grundsätzlich hochrelevant (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 181). Dennoch hat sich infolge der Schwerpunktverlagerung von der künstlichen auf die natürliche Verjüngung die Zahl der Forstbaumschulen und auch die Größe der Anbauflächen zuletzt drastisch reduziert (Paul 2019). Dies ist problematisch, da im Falle von Kalamitäten (Windwurf, Borkenkäfer u. a.) Vermehrungsgut zeitnah benötigt wird. Da dessen Anzucht einen mehrjährigen Vorlauf braucht und im Zuge des Waldumbaus deutlich mehr Baumarten und Herkunftsgebiete zu berücksichtigen sind, bedeutet dies in der Konsequenz, dass zukünftig deutlich mehr Vermehrungsgut vorgehalten werden muss als letztlich auch abgerufen wird.

Kontrolle der Waldverjüngung

Analog zum genetischen Monitoring im forstlichen Vermehrungsgut sollten auch Naturverjüngungen genetisch überprüft werden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 183). So hat ein Altbestand nicht automatisch eine ihn repräsentierende Naturverjüngung. Wenn nur ein kleiner Teil der Altbäume Früchte ausgebildet hat (Fruktifikation), sind Einschränkungen der genetischen Diversität im Jungwuchs wahrscheinlich. Dieser Umstand ist einer Naturverjüngung nicht anzusehen, er kann aber durch vergleichendes genetisches Monitoring von Altbestand und seiner Verjüngung überprüft werden. Um eine Beteiligung möglichst vieler Altbäume am Jungwuchs zu erreichen, sollte sich die Verjüngung über mehrere Fruktifikationsperioden erstrecken. Heterogene Umweltbedingungen wie z. B. Auflichtungen (Mosaikstrukturen) begünstigen kleinräumig variierende Verjüngungsszenarien und somit den Erhalt seltener Genotypen, womit auch die Wahrscheinlichkeit steigt, Nachkommen seltener Baumarten im Jungwuchs zu erhalten.

Obwohl die Nachfrage nach forstlichem Vermehrungsgut in der Vergangenheit rückläufig war, ist künftig mit zunehmendem Bedarf zu rechnen, z. B. für den Umbau von Nadelholzbeständen in stabile Mischwälder, für die Wiederbegründung nach Kalamitäten oder auch zur Ergänzung von Naturverjüngungen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 183). Dafür braucht es qualitativ hochwertiges Vermehrungsgut (Früchte, Samen; wie beschrieben), was jedoch nicht garantiert ist, wenn dessen Beerntung nicht auf der Gesamtfläche eines Bestandes erfolgt, sondern die im FoVG vorgeschriebene Mindestzahl von Bäumen inselartig in Gruppen beerntet wird. Vielmehr kann es so zur Anreicherung von Inzucht und damit zur Reduzierung individueller Vielfalt kommen, weil Voll- und Halbgeschwister ebenso wie Nachkommen aus Selbstbefruchtung (Koniferen) überrepräsentiert sind.⁶⁴ Solche Belastungen könnten prinzipiell unter naturnahen Anzuchtbedingungen durch starke Selektion wieder kompensiert werden. Dies ist jedoch zumeist nicht der Fall, weil die Anzucht so optimiert ist, dass möglichst wenig Pflanzen ausfallen. Um Kosten zu sparen, erfolgt die Kulturbegründung im Wald in geringer Dichte (z. B. 2.500 Pflanzen/ha), sodass auch in diesen Stadien natürliche Selektion (Konkurrenz) nur sehr moderat dazu beitragen kann, Inzuchtbelastungen zu minimieren. Solche Risiken können durch repräsentative Beerntung, Anzucht unter selektionierenden Bedingungen und Dichtstand in der Jugendphase wirksam eingegrenzt werden. Zugleich ist jedoch ein kontrollierendes genetisches Monitoring unverzichtbar.

Festlegung von Mindestpopulationsgrößen

Stabile ungleichaltrige Mischwälder haben aus ökologischer Sicht und mit Blick auf die Risikominimierung eine hohe Bedeutung (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 184). Aus forstgenetischer Sicht ist die Regenerationsfähigkeit solcher Waldökosysteme eine wichtige Voraussetzung für den langfristigen Erhalt ihres Anpassungs- und Überlebenspotenzials. Die damit verbundene Fähigkeit, Nachkommen zu erzeugen, ist aber an Voraussetzungen gebunden, wie etwa Mindestpopulationsgrößen, um die genetische Variabilität zu erhalten und Inzuchtbelastungen zu vermeiden. Ein Solitärbaum mag schützenswert erscheinen, wenn aber keine Paarungspartner in Reichweite sind, ist die Reproduktion unterbunden. Deshalb kommt es nicht auf die Maximierung von Artenzahlen an, sondern auf die richtige Mischung unter Beachtung von Mindestpopulationsgrößen jeder einzelnen Art. Diese Untergrenzen betreffen primär seltene Arten. Die Festlegung von erforderlichen Individuenzahlen ist nicht trivial, Verallgemeinerungen sind wegen der Besonderheiten der einzelnen Arten (z. B. Modus der Pollenverbreitung, Altersstruktur) kaum möglich.

⁶⁴ Die Pollenbeiträge im Saatgut benachbart stehender Erntebäume sind zwangsläufig homogener als es der Fall ist, wenn die Erntebäume über den Bestand verstreut sind.

4.4.3 Perspektiven und Rahmenbedingungen

Genetische Parameter können wichtige Kriterien für alle infrage kommenden Maßnahmen im Waldumbau liefern und die Erkennung und Vermeidung von Risiken unterstützen. Genetisches Monitoring wurde jedoch bislang nur in einzelnen Bereichen und in sehr unterschiedlicher Intensität gefördert (zumeist als sporadische Fördermaßnahmen). Das große Potenzial dieses Forschungs- und Entwicklungsgebiets wird daher bislang nicht voll ausgeschöpft (Seifert et al. 2022, S. 9).

Herkunftsversuche sind fast ausnahmslos auf die gegenwärtigen Umweltbedingungen abgestimmt (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 184). Sie erfüllen wichtige Aufgaben, weil beispielsweise die Verwendung gebietsfremder Baumarten wie Edelkastanie, Zerr-, und Flaumeiche ohne Testungen in ihrem hiesigen Anbaubereich riskant wäre. Dennoch bedarf es zusätzlicher Versuchsanlagen, um vor allem einheimische Baumarten in Umweltbedingungen zu verfrachten, die für sie in den nächsten Jahrzehnten (oder weit darüber hinaus) maßgeblich sein werden. Solche Translokationsversuche mindern das Risiko einer unzureichenden Anpassungsfähigkeit künftiger Waldgenerationen. Dabei empfiehlt sich die Verfrachtung von Jungpflanzen aus mittleren und höheren Lagen in tiefer gelegene und wärmere, um ihre künftige Konkurrenz- und Überlebensfähigkeit beurteilen zu können. Da Klimaänderungen sehr differenziert auftreten werden und die Umweltverhältnisse eine insgesamt größere Bandbreite erwarten lassen (abiotisch und biotisch), sollten Translokationsversuche mit Jungpflanzen auch in umgekehrter Richtung vorgesehen werden, um auch kühlere klimatische Bedingungen zu berücksichtigen.

Zum forstlichen Vermehrungsgut bestehen zwar umfangreiche rechtliche Grundlagen auf EU-Ebene (Richtlinie 1999/105/EG⁶⁵) sowie in Deutschland (FoVG), allerdings sind genetische Kriterien hierin nicht verankert (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 180 u. S. 188). Für den (naturnahen, klimaresilienten) Waldumbau wäre jedoch eine angemessene Einbindung genetischer Erkenntnisse (mit Kompetenzbündelung bei der DVFFA) dringend erforderlich. Zudem ist von Relevanz, dass die für den Anbau wichtigen Herkunftsempfehlungen wohl im FoVG verankert sind, aber nur in großen Abständen auf den neuesten Stand gebracht werden. Die Liste der bisher 28 Baumarten (plus Pappelhybride), die dem FoVG unterliegen (Anlage FoVG⁶⁶), wäre dringend zu erweitern, ebenso die Zahl der ausgewählten oder geprüften Saatguterntebestände.⁶⁷ Vordringlich wären Regelungen für heimische Baumarten (z. B. Elsbeere, Feldahorn, Flatterulme, Speierling, Silberpappel) sowie für nicht heimische Baumarten, die sich in Anbauversuchen bewährt haben.

Aufgabe des genetischen Monitorings ist vor allem auch die Entwicklung und Nutzung molekulargenetischer Marker, die an der Ausprägung von Toleranzen gegenüber klimabedingten Stresseinwirkungen beteiligt sind (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 185 u. S. 188). Verbundprojekte konzentrieren sich auf die häufigsten Baumarten. Defizitär beforscht werden seltene Arten, die jedoch künftig an Bedeutung gewinnen könnten. Auch fehlen Studien zu Mischbeständen. Erforderlich ist die Bündelung der bisherigen Erkenntnisse, die Rückschlüsse darüber erbringen könnte, welcher Teil der molekulargenetischen Informationen auch über Artgrenzen hinweg wirksam ist. Das ist die Voraussetzung, um grundlegende Prozesse der genetischen Steuerung von Toleranz gegenüber Umwelteinwirkungen zu erkennen und per genetischem Monitoring für die Überprüfung von Populationen und auch als Auslesekriterium zu nutzen. Notwendig wäre dafür eine bessere Koordination der Grundlagenforschung im Bereich der Markerentwicklung sowie eine deutlich verbesserte Forschungsförderung für molekulargenetische Analysen.

⁶⁵ Richtlinie 1999/105/EG über den Verkehr mit forstlichem Vermehrungsgut

⁶⁶ Das FoVG gilt gemäß Anlage für die folgenden 28 Baumarten mit Bedeutung für die inländische Forstwirtschaft: Weißtanne, Große Küstentanne, Spitzahorn, Bergahorn, Schwarzerle (Roterle), Grauerle, Sandbirke, Moorbirke, Hainbuche, Rotbuche, Esskastanie, Esche, europäische Lärche, japanische Lärche, Hybridlärche, Fichte (gemeine Fichte), Sitkafichte, Schwarzkiefer, Waldkiefer (gemeine Kiefer), Pappeln (alle Arten und künstliche Hybride), Vogelkirsche (außer zur Verwendung im Obstbau), Douglasie, Traubeneiche, Stieleiche, Roteiche, Robinie, Winterlinde, Sommerlinde.

⁶⁷ Ausgewählte Erntebestände gibt es derzeit nur für 10 Baumarten auf 1,4% der Waldfläche. Repräsentativität für den gesamten Genpool kann damit nicht erwartet werden (Seifert et al. 2022, S. 188).

5 Ökonomische Aspekte des naturnahen Waldumbaus

Der politisch angestrebte Umbau der verschiedenen Wälder zu resilienten Mischwäldern hat erhebliche forstbetriebliche Auswirkungen und ist u. a. mit hohen Anpassungsleistungen bzw. Kosten für einen Nutzungswandel der Wälder bzw. Forsten verbunden. Sein Erfolg hängt wesentlich davon ab, ob es gelingt, die erforderlichen Finanzmittel kurz- und langfristig zu generieren und insbesondere die vielen kleineren Privatwaldbesitzenden angemessen zu unterstützen. Allerdings sind bislang die ökonomischen Implikationen einer naturnahen Waldwirtschaft im Vergleich zur Altersklassenwaldwirtschaft auf forstbetrieblicher Ebene kaum empirisch untersucht. Geeignete Betriebsvergleiche fehlen weitgehend. Um die ökonomischen, forstbetrieblichen Aspekte eines naturgemäßen Waldbaus zu beleuchten, wurden in Welle et al. (2022) mögliche waldbauliche Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsansätze sowie die Auswirkungen auf die Einkommenssituation von Forstbetrieben in kurz- und langfristiger Perspektive simuliert. Als Betrachtungs- bzw. Untersuchungsobjekte dienten fiktive Forstbetriebe, deren Waldbestände in ihrer Baumartenzusammensetzung und den Holzvorräten auf Durchschnittswerten beruhen, wie sie die dritte Bundeswaldinventur (3. BWI) erbracht hat. Zudem differenzieren die Simulationen zwischen prozessschutzbasierter Waldwirtschaft (PSW), Dauerwaldbewirtschaftung (DWW) und Altersklassenwaldbewirtschaftung (AKW) in allen Forstbetrieben.

In Kapitel 5.1 wird zunächst ein sehr knapper Überblick über die aktuelle betriebswirtschaftliche Situation der Forstbetriebe gegeben. Dies geschieht unter Verwendung von Daten aus dem »Testbetriebsnetz Forst« des BMEL (o. J.), um so – aufgeschlüsselt nach Eigentumsstrukturen und Betriebsgrößen – einen Überblick über den Holzertrag und die Betriebseinkommen zu erhalten. Darüber hinaus enthält Kapitel 5.1 eine Beschreibung des methodischen Vorgehens sowie eine Beschreibung der verschiedenen Bewirtschaftungsansätze. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5.2 die Ergebnisse der waldbaulichen Simulationen und betriebsökonomischen Kalkulationen für die untersuchten Beispielbetriebe zusammengefasst. Hierfür werden die Auswirkungen der verschiedenen Bewirtschaftungsweisen (PSW, DWW und AKW) für einen (kurzfristigen) 10-jährigen sowie für einen (langfristigen) 50-jährigen Zeitraum aufgezeigt und miteinander verglichen. Kapitel 5.3 schließlich bietet eine Bewertung bestehender nationaler und EU-weiter Förderinstrumente auf Grundlage der relevanten politischen Programme und Strategien sowie eine Diskussion innovativer Förderansätze unter Berücksichtigung von Anreizsystemen für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Die Ausführungen in diesem Kapitel erfolgen in enger Anlehnung an das Gutachten von Welle et al. (2022).

5.1 Hintergrund und Methodik

Nach einem kurzen Überblick über die wirtschaftliche Situation der Forstbetriebe (Kap. 5.1.1) werden im Folgenden die methodischen Grundlagen der Simulationen erläutert, die im Gutachten von Welle et al. (2022) vorgenommen wurden. Ziel ist es, die forstbetrieblichen Auswirkungen von drei verschiedenen Waldbewirtschaftungsansätzen für verschiedene Beispielbetriebe zu vergleichen, wobei die Vielfalt der Forstbetriebe in Deutschland (Wuchsregionen, Eigentumsart, Eigentumsgröße) angemessen abgebildet werden soll. Erst werden in Kapitel 5.1.2 die fiktiven Beispielbetriebe hergeleitet – ein staatlicher Forstbetrieb in der Wuchsregion Nord, ein kommunaler Betrieb im Osten und jeweils ein privater Forstbetrieb im Süden und im Westen –, anschließend in Kapitel 5.1.3 die verschiedenen Bewirtschaftungsverfahren (PSW, DWW, AKW) beschrieben.

Für die Beispielbetriebe und die drei Bewirtschaftungstypen wurden jeweils vier Forsteinrichtungszeiträume mittels der Forstware-Fachdatenbank »fe-db« simuliert (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 33).⁶⁸ Die waldbaulichen Kalkulationen in Forstware stützen sich auf forstwissenschaftliche Grundlagendaten, etwa Ertrags tafeln. Die erste Forsteinrichtung gilt ab 2022 für 10 Jahre, die zweite für weitere 10 Jahre nach der ersten Forsteinrichtung, die dritte nach 30 Jahren und die vierte Forsteinrichtung nach 50 Jahren. Der Simulationszeitraum »nach 30 Jahren« wurde zusätzlich gewählt, um die Genauigkeit einer Simulation nach 50 Jahren zu erhöhen. Aufgrund der enormen Datenmengen wurde nur für zwei Beispielbetriebe der Simulationszeitraum nach 50 Jahren durchgeführt, da diese beiden Simulationsergebnisse eine Richtungssicherheit in Bezug auf die Wahl des geeigneten Bewirtschaftungstypen vorgeben.

Die Planungs- bzw. Simulationsergebnisse wurden anschließend (bis auf das Ergebnis für 30 Jahre) in den Kalkulator von Sturm/Kaiser (1999) integriert, ein excelbasiertes ökonomisches Kalkulationstool, das die drei Bewirtschaftungstypen z. B. hinsichtlich ihrer Kulturkosten und Pflegemaßnahmen unterscheidet. Mithilfe dieses

⁶⁸ Die Forsteinrichtung dient in der Forstwirtschaft als Planungsinstrument für den Forstbetrieb. Darin werden beispielsweise Daten und Informationen über die Bestände erfasst und die jährliche Betriebsplanung mit Erntemengen (Hiebsätze) und Maßnahmenplanung (z. B. Zaunbau) geplant und beschrieben. Ein Planungshorizont von 10 Jahren ist üblich, danach erfolgt in der Regel eine weitere Forsteinrichtung (Welle et al. 2022, S. 33).

Kalkulationstools wurden die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen abgeschätzt. Die verwendeten Methoden werden in Kapitel 5.1.4 eingeordnet und diskutiert.

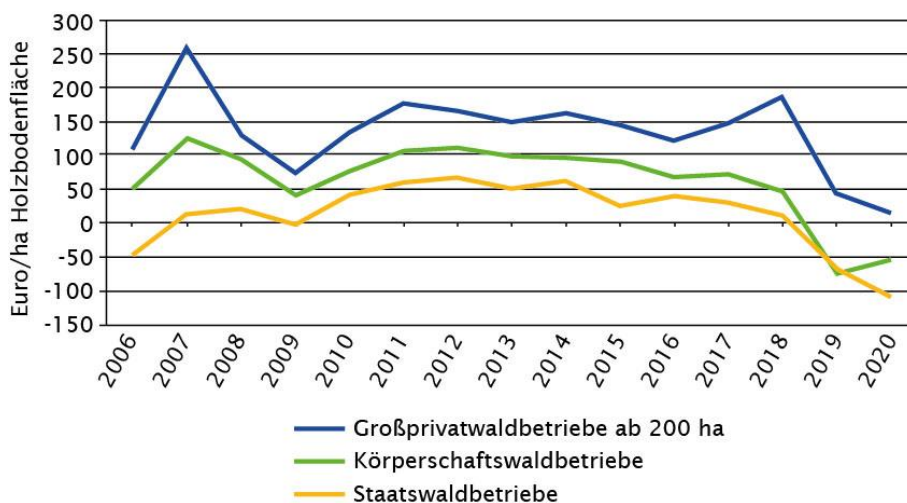
5.1.1 Wirtschaftliche Situation der Forstbetriebe

Um einen Überblick über die Betriebseinkommen und den Holzerntrag zu erhalten – aufgeschlüsselt nach Eigentumsstrukturen und Betriebsgrößen –, wurden für diesen Bericht aktuelle Daten (Stand: 2022) aus dem »Testbetriebsnetz Forst« des BMEL ausgewertet. Das »Testbetriebsnetz Forst« wird vom BMEL und den Ländern koordiniert und umfasst ca. 300 Privat- und Körperschaftswaldbetriebe ab 200 ha Waldfläche sowie alle Staatsforstbetriebe. In jährlichen Berichten werden relevante Buchführungsergebnisse zusammengefasst. Es repräsentiert somit eine zentrale Datenquelle zur Beurteilung der wirtschaftlichen Lage der deutschen Forstwirtschaft.

Festzustellen ist, dass die betriebswirtschaftliche Situation der Forstbetriebe variiert, wobei sich tendenzielle Unterschiede zwischen den Waldeigentumsarten erkennen lassen (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 29). Zudem unterliegt die wirtschaftliche Situation aufgrund von variablen Marktpreisen und Kalamitäten erheblichen Schwankungen. Die Reinerträge (berechnet aus der Differenz von Ertrag und Aufwand eines Forstbetriebs) in Körperschafts- und Privatwaldbetrieben beliefen sich zwischen 2010 und 2019 im Durchschnitt auf 93,5 Euro/ha (BMEL o. J.). Körperschaftswaldbetriebe sind dabei ertragsschwächer als die großen Privatwaldbetriebe. Diese Werte gelten für die Reinerträge ohne Förderung in Betrieben (Reinerträge I) ab 200 ha Waldfläche. In diesen Reinertrag I gehen die Erträge aus den Produktbereichen 1 bis 3 ein (Produktion von Holz und anderen Erzeugnissen, Schutz und Sanierung sowie Erholung und Umweltbildung). Zu den Erträgen pro Hektar in kleinen Forstbetrieben (< 200 ha Waldfläche) liegen umfangreichere Daten nicht flächendeckend vor. Noch am relativ besten untersucht ist die betriebswirtschaftliche Situation der kleinen Forstbetriebe in Baden-Württemberg (Gehrke/Hercher 2017). Die Höhe der Erträge war dort im Kleinprivatwald zwischen 2010 und 2015 fast genauso hoch wie beim Großprivatwald (78 Euro/ha vs. 79 Euro/ha), aber höher als im Körperschaftswald (71 Euro/ha). In einer Untersuchung von 50 Kleinprivatwaldbetrieben in Bayern waren die Reinerträge 2013 und 2014 ähnlich denjenigen in Baden-Württemberg, 2012 und 2015 aber etwa doppelt so hoch (Hastreiter 2017). Dies ist ein Indiz für die große zeitliche und räumliche Variabilität sowie organisatorische Diversität bei Kleinprivatwaldbetrieben.

Bei allen Besitztypen unterliegen die Erträge zeitlichen Schwankungen, insbesondere bedingt durch Störereignisse (Abb. 5.1; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 30). Von 2010 bis 2017, in denen keine heftigen, weiträumigen Störungen im Wald wirkten, variierte der Reinertrag zwischen 96 und 128 Euro/ha. 2007 lagen die Erträge infolge des Sturmereignisses »Kyrill« und der Vermarktung großer Mengen Sturmholzes allgemein höher. Borkenkäfergradationen (und Waldbrände) wirken sich demgegenüber ungünstig auf die Erträge aus, und zwar unmittelbar. So gingen 2018 und 2019 die Erträge rapide zurück, bis in die Verlustzone. Die Erträge der Körperschaftswaldbetriebe fielen in dieser Zeit sogar noch weiter hinter diejenigen des Großprivatwalds zurück (Welle et al. 2022, S. 30).

Abbildung 5.1 Entwicklung der Reinerträge I in Großprivat-, Körperschafts- und Staatswaldbetrieben



Quelle: Welle et al. 2022, S.29

5.1.2 Herleitung der Beispielbetriebe

Ein wichtiger Bestandteil bei der Abschätzung ökonomischer Aspekte des naturnahen Waldumbaus ist die Zusammensetzung der Baumarten und ihrer Altersklassen innerhalb eines Betriebes (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 35). Dazu müssen ausreichend gute Daten zur Verfügung stehen, wie sie etwa das »Testbetriebsnetz Forst« des BMEL zur Verfügung stellt. Die darin teilnehmenden Betriebe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eigentumsarten – Staatswald, Körperschaftswald und Privatwald –, der Betriebsgröße sowie der Baumartenzusammensetzung. Hierbei werden vier Baumartengruppen unterschieden: erstens Eiche, zweitens Buche und andere Laubbölder, drittens Fichte mit Douglasie und Tanne sowie viertens Kiefer mit Lärche und sonstigen Nadelbäumen. Dabei schwanken die Baumartenanteile nach Eigentumsart und Betriebsgrößen erheblich. Diese Daten stellen eine erste Grundlage dar, um die für diesen Bericht berechneten ökonomischen Ergebnisse mit denen aus dem »Testbetriebsnetz Forst« zu vergleichen. Als Grundlage für einen hier anvisierten Betriebsvergleich reichen die verfügbaren Daten aus dem »Testbetriebsnetz Forst« allerdings nicht aus, da detaillierte Eigenschaften der Betriebe nicht abgebildet sind, wie etwa die Baumartenverteilung von mehr als vier Hauptbaumarten, die Altersklassenverteilung der Baumarten sowie deren Vorräte und Zuwächse. Um eine realistische Situation der zu analysierenden Betriebe ableiten zu können, wurden daher die Daten der 3. Bundeswaldinventur (3. BWI) verwendet, die zum einen ein differenzierteres Bild in Bezug auf die real in Richtung Naturnähe umzubauenden Waldflächen ermöglichen und zum anderen mehr Baumarten abbilden, als es im »Testbetriebsnetz Forst« der Fall ist.⁶⁹ Insbesondere im naturnahen Waldumbau sind beispielsweise die Laubbäume mit niedriger und hoher Lebenserwartung von hoher Bedeutung (Welle et al. 2022, S. 36). Es wurden folgende Daten aus der 3. BWI ausgewählt und verwendet:

- Waldfläche (Standflächenanteil) in Hektar nach Baumaltersklasse und Baumartengruppe für jedes Bundesland
- Vorräte je Hektar nach Baumaltersklasse und Baumartengruppe für jedes Bundesland
- Zuwächse des Vorrates in Kubikmeter pro Hektar und Jahr nach Baumaltersklasse und Baumartengruppe für jedes Bundesland

Das Ziel der Analyse ist, Betriebe mit gleicher Eingangsvoraussetzung (z. B. in Bezug auf Baumartenzusammensetzung und Altersklassenverteilung) abzubilden, die aufgrund ihrer Naturnähestufe, der Wuchsregion und der Eigentumsart sowie ihrer Betriebsgröße unterschieden werden können (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 35). Herangezogen wurden dazu die Ergebnisse der naturschutzfachlichen Analyse der Waldökosysteme in Deutschland (Welle et al. 2018). Darin wurden Waldgesellschaften der 3. BWI zu 22 Waldtypen aggregiert und ihr naturschutzfachlicher Zustand anhand des Waldzustandsindex bewertet. Die Waldtypen lassen sich nach Kriterien der inneren Homogenität vegetationsstruktureller Merkmale, wuchsbestimmender ökologischer Faktoren sowie wesentlicher Prozessabläufe (z. B. Nettoprimärproduktion, Konkurrenz und Regeneration) sowie einem systemtypischen Störungsregime unterscheiden. Der Waldzustandsindex setzt sich aus sechs Einzelindikatoren zusammen: Naturnähe der Baumartenzusammensetzung, Repräsentanz, Gefährdung, Alt- und Starkbäume, Schutzstatus und Waldmanagement.

Als Grundlage für die Ableitung der in der Simulation zu analysierenden Forstbetriebe wurde der Indikator Naturnähe der Baumartenzusammensetzung gewählt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 36 f.). Wegen ihres prioritären Umbaubebedarfs wurden aus den Daten der 3. Bundeswaldinventur die Waldbestände in der schlechtesten Naturnäheklasse ausgewählt. Die Naturnähe ist hier definiert als die Übereinstimmung der aktuellen Baumartenzusammensetzung mit dem auf dem jeweiligen Standort natürlichen Vegetationspotenzial, welches aus der potenziellen natürlichen Vegetation abgeleitet ist. Die folgende Tabelle 5.1 zeigt die Waldflächenanteile für den deutschen Wald aufgeteilt nach der Naturnäheklasse im Waldzustandsindex und den Waldflächen mit naturnaher, bedingt naturnaher und naturferner Baumartenzusammensetzung.

⁶⁹ Für eine realistische Darstellung bzw. Ableitung der Baumartenanteile für unterschiedliche Eigentumsarten und Betriebsgrößen stellen die Daten der 3. BWI 2012 die einzige verfügbare Quelle für Deutschland dar (BMEL 2016). Die Ergebnisse der 4. BWI werden voraussichtlich erst Ende 2024 vorliegen.

Tabelle 5.1 Waldflächenanteile in Deutschland, differenziert nach Naturnäheklasse und Naturnähestufe

Naturnäheklasse im Waldzustand Index	Naturnähestufe naturnah	Naturnähestufe bedingt naturnah	Naturnähestufe naturfern	bestockte Waldfläche in ha
sehr gut	406.300	23.000	56.700	486.000
gut	92.300	8.000	39.000	139.300
mäßig	1.138.000	379.800	864.700	2.382.500
schlecht	446.000	274.500	558.800	1.279.300
sehr schlecht	973.100	1.689.500	3.408.700	6.071.300
bestockte Waldfläche in ha	3.055.700	2.374.800	4.927.900	10.358.400

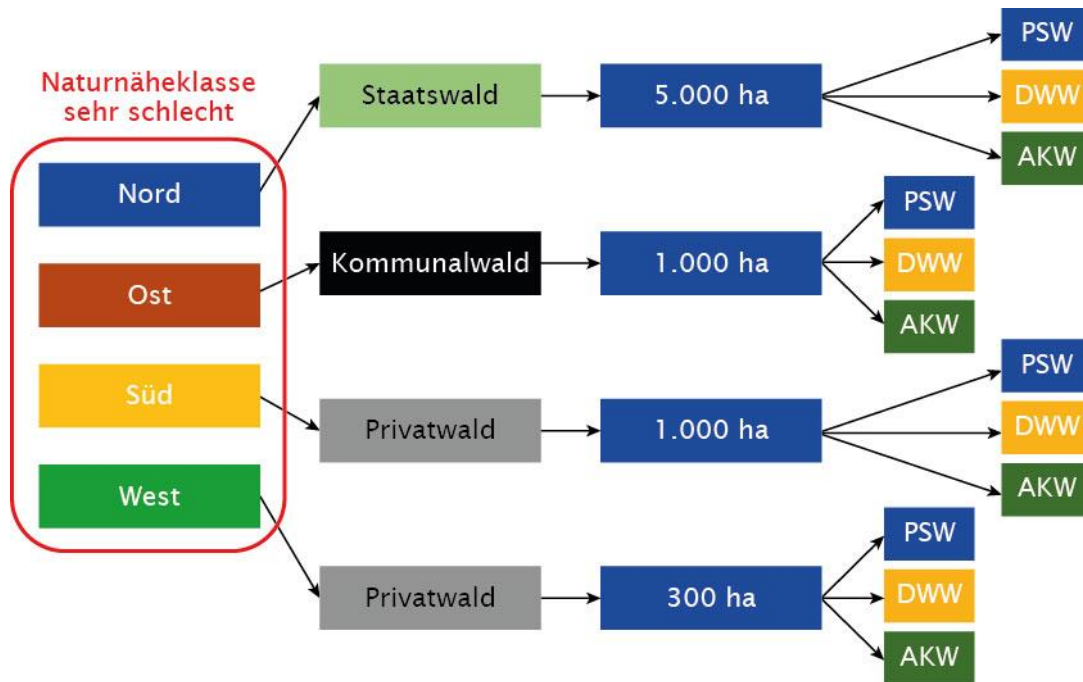
Quelle: Welle et al. 2022, S.36

Unterteilung nach Wuchsregionen, Eigentumsart und Betriebsgrößen

Weil die Wuchsbedingungen und Baumartenzusammensetzung in den Wäldern Deutschlands deutlich variieren, wurde eine Unterteilung in vier Wuchsregionen vorgenommen (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 37 ff.). Die Wuchsregionen sind durch vergleichbare klimatische und standortspezifische Merkmale gekennzeichnet und weisen ein ähnliches Wuchspotenzial auf: Nord steht für Schleswig-Holstein, Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern; Ost für Berlin, Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Bayern und Baden-Württemberg bilden die Wuchsregion Süd. Die Region West umfasst die Bundesländer Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und das Saarland. Diese vier Wuchsregionen wurden weiterhin hinsichtlich Eigentumsarten wie Staats-, Privat- und Kommunalwald gefiltert, da auch hier erhebliche Unterschiede in der Baumartenzusammensetzung zu verzeichnen sind.

Die Betriebsgrößen wurden mit 300, 1.000 und 5.000 ha definiert. Diese Betriebsgrößen entsprechen einer realistischen Betriebsgröße in Deutschland und sind mit den Betriebsgrößen im »Testbetriebsnetz Forst« des BMEL vergleichbar. Staatswälder zeichnen sich zumeist durch große Flächenanteile aus, daher wurde diesen 5.000 ha zugeordnet. Kommunal- und Privatwälder wurden beide mit 1.000 ha gelabelt, um eine bessere Vergleichbarkeit erhalten zu können. Zumeist haben die Privatwaldbetriebe einen stärkeren wirtschaftlichen Fokus, während in Kommunalwäldern eher der Erholungsaspekt der Bevölkerung im Vordergrund steht. Drittens wurde ein Privatwaldbetrieb (zumeist Vollerwerb) mit 300 ha definiert. Abbildung 5.2 zeigt, wie die für die Simulation definierten Beispielbetriebe nach Wuchsregionen, Eigentumsarten und Betriebsgrößen zusammengesetzt sind.

Abbildung 5.2 Beispielbetriebe



Quelle: Welle et al. 2022, S.40

5.1.3 Beschreibung der drei Bewirtschaftungstypen

Die Beispielbetriebe wurden für diesen Bericht anhand von drei unterschiedlichen Waldbewirtschaftungsansätzen bzw. Bewirtschaftungstypen analysiert und verglichen. Im Rahmen dieser drei Waldbewirtschaftungsansätze gibt es unterschiedliche Vorstellungen, wie der naturnahe Waldumbau stattfinden und welche waldbaulichen Ziele damit erreicht werden sollen. Die generellen Leitbilder der einzelnen Bewirtschaftungsmodelle werden im Folgenden kurz skizziert.

Prozessschutzorientierte Waldwirtschaft (PSW)

Bei der PSW stehen die natürliche Vielfalt und eine zieloffene Entwicklung des Waldes im Vordergrund, um dynamische Veränderungen auf der Ebene von Arten, Biozönosen, Ökosystemen und Landschaften zu gewährleisten (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.40 f.). Auf Waldökosysteme bezogen bedeutet dies, dass eine von menschlichem Einfluss weitgehend ungestörte, kontinuierliche Entwicklung des Waldbodens und der Waldvegetation im Fokus steht (Erhalt von Entwicklungsbedingungen). Windwurf, Feuer, Überschwemmung oder Insektengradation werden als Element des Prozessschutzes verstanden. Der bewirtschaftete Wald soll einem nicht bewirtschafteten Wald möglichst ähnlich sein im Hinblick auf Struktur, Vorrat und Artenvielfalt. Zur Überprüfung werden bei der PWS 10% der Waldfläche als nicht bewirtschaftete Referenzfläche ausgewiesen. Die konkrete Zusammensetzung der Baumarten und der Altersstruktur bleibt dynamisch und wird natürlichen Prozessen überlassen. Nutzung erfolgt nur nach festgelegten Zieldurchmessern, die sich primär auf einzelne alte Bäume (zumeist Laubbäume) beziehen. Eine Vornutzung findet in Laubholzbeständen kaum noch statt, eine Kultur- und Jungwuchspflege erfolgt also nicht. Im Rahmen der Förderung einer naturnahen Baumartenzusammensetzung werden höhere Hiebssätze im Nadelholz angestrebt, die die Nadelholzbestände abschöpfen, um Standflächenanteile für Naturverjüngungsprozesse bereitzustellen. Verjüngung geschieht als Naturverjüngung oder ergänzend als aktiver Vornbau. Pflanzungen werden in Ausnahmefällen dann vorgenommen, wenn eine Naturverjüngung durch nicht standortgerechte Baumarten zu erwarten ist. Sie erfolgen grundsätzlich als Teilflächenpflanzungen unter Verwendung standortheimische Baumarten. Kahlschläge und Monokulturen werden ebenso unterlassen, wie der Einsatz von Pestiziden und Dünger und starke Bodenbearbeitung.

Dauerwaldbewirtschaftung (DWW)

Die Dauerwaldbewirtschaftung orientiert sich insbesondere an den Grundsätzen der Arbeitsgemeinschaft Naturgemäßer Waldwirtschaft (ANW) und fokussiert auf eine stärkere Baumartenvielfalt auf Basis der natürlichen Waldgesellschaften (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 41 ff.). Die Wälder sollen stabiler, wirtschaftlicher, ästhetischer und naturnäher werden. Leitbild sind ungleichaltrige, strukturreiche Wälder mit standortgemäßen Baumarten bei natürlicher Verjüngung. Unterschiede zum Prozessschutz zeigen sich z. B. darin, dass aber auch ursprünglich nicht heimische Baumarten wie die Douglasie, Japanlärche, Küstentanne und Roteiche gepflanzt werden. In der DWW wird der Wald als dauerhaftes, vielgestaltiges und dynamisches Ökosystem angesehen mit dem Fokus, natürlich ablaufende Prozesse zur Optimierung naturgemäßer Waldwirtschaft zu nutzen. Dabei stehen ökonomische Ziele im Vordergrund, welche nachhaltig nur bei ökologischer Betrachtung erreicht werden. Die verschiedenen Entwicklungsstufen des Waldes sind optimalerweise auf der gleichen Fläche und nicht nebeneinander angeordnet. Dies gilt als Voraussetzung für eine weitgehende Stetigkeit des Waldökosystems im Sinne eines Dauerwaldes.

Gemäß den ökonomischen Grundsätzen der naturgemäßen Waldwirtschaft sollen standorttypische strukturreiche Mischbestände entwickelt werden (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 41 f.). Auch soll auf Kahlschläge und Räumungen verzichtet werden. Die Nutzung erfolgt einzelbaumorientiert in stetigen Pflege- und Erntemaßnahmen, wobei mehrere Eingriffe im Jahrzehnt mit mäßiger Eingriffsstärke vorgesehen sind. Standortgerechte Baumarten sollen gefördert werden. Ein zentraler ökologischer Grundsatz ist die Schaffung von Strukturvielfalt für licht- und wärmeliebende Arten. Auf den Einsatz ökosystemfremder Stoffe, wie Dünger und Biozide wird, von Ausnahmen abgesehen, weitgehend verzichtet. Verjüngung erfolgt im Voranbau, wobei Pflanzung eine relativ wichtige Rolle einnimmt.

Altersklassenwaldwirtschaft (AKW)

Die Altersklassenwaldwirtschaft orientiert sich an der schlagweisen Hochwaldbewirtschaftung, die klare, betriebswirtschaftlich orientierte Parameter als Zielsetzung eines Betriebes ansetzt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 42). Der Wald wird in Schläge eingeteilt, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten hiebreif sind. Erfolgt die Ernte in Schlägen, so führt dies zur Entstehung eines einschichtigen Altersklassenwaldes (in Ausnahmefällen können auch zweischichtige Bestände entstehen). Die AKW wird primär mit standortgerechten Baumarten umgesetzt, im Sinne einer höchstmöglichen Ertragserswartung. Dazu werden Maßnahmen zur Ertragssicherung und -steigerung vorgenommen, wie beispielsweise die Pflege ertragsstarker Baumarten und die Verbesserung ertragschwacher und degradierter Standorte. Die Bestandsbegründung erfolgt durch Pflanzungen ertragsstarker, als klimaresilient eingeschätzter Baumarten, wie z. B. Douglasie, Küstentanne und Roteiche. Düngung, Unkrautbekämpfung und Schutzmaßnahmen gegen Wild (wie beispielsweise Zaunbau, der in der PSW und DWW nicht so verstärkt durchgeführt wird) oder Insekten sind üblich. Es erfolgen starke Durchforstungen zur Negativauslese, Totholz wird entfernt. Die Nutzung ist technisch optimiert mit hohem Maschineneinsatz, dabei werden vorwiegend ganze Flächen kahlgeschlagen und meist wieder aufgeforstet. Naturverjüngung spielt nur bei Laubbaumarten eine nennenswerte Rolle. Innerhalb der Planungsperiode von 10 Jahren erfolgen ein bis zwei Pflegemaßnahmen zur Förderung ertragsstarker Baumarten, um die Differenzierung zu unterstützen und zum Aushieb aller schlecht geformten Bäume (Welle et al. 2022, S. 43 f.).

Tabelle 5.2 illustriert einige Unterschiede zwischen den drei Bewirtschaftungsverfahren sowie beispielhaft die Unterschiede in den Hiebsätzen bei ausgewählten Laub- und Nadelhölzern.

Tabelle 5.2 Unterschiede zwischen den drei Bewirtschaftungsverfahren

Kriterien	Prozessschutzwaldbau	ANW-Waldbau (Dauerwald)	Altersklassenwaldbau
Ziel	ergebnisoffene Entwicklung, natürliche Prozesse als Zielgröße, Naturnäheförderung	struktureicher Laubmischwald im Dauerwald mit begrenzten Vorräten (max. 400 Vfm)	artenreicher Laubmischwald mit standortgerechten Baumarten
unbewirtschaftete Fläche	10 % Referenzfläche	keine Referenzfläche	keine Referenzfläche
Nutzung	Zielstärkennutzung und minimale Vornutzung durch Pflege (reduzierter Hiebsatz im Laubholz, erhöht im Nadelholz; ca. 50 % Nutzung des Zuwachses im Laubholz)	Zielstärkennutzung und Vornutzung durch Pflege (ca. 80 % Nutzung des Zuwachses)	vollflächige Nutzung erlaubt, hohe Vornutzung durch Pflegemaßnahmen (Nutzung nahezu 90 % des Zuwachses)
Baumarten	standortheimische Baumarten	standortgerechte Baumarten (Experimente mit standortfremden Baumarten erwünscht)	standortgerechte Baumarten (Experimente mit standortfremden Baumarten erwünscht), Ziel: immer noch hoher Nadelholzanteil (an die 50 %)
Vornutzung Buche und Eiche	keine	1.370 Vfm	1.700 Vfm
Vornutzung Fichte und Douglasie	2.480 Vfm	2.480 Vfm	2.700 Vfm
Zielstärkennutzung Buche und Eiche	1.900 Vfm	2.540 Vfm	1.840 Vfm
Zielstärkennutzung Fichte und Douglasie	3.090 Vfm (nur Fichte)	2.100 Vfm (nur Fichte)	2.390 Vfm

Hiebsätze angegeben in Vorratsfestmeter (Vfm) bei einer jährlichen Planung für 10 Jahre auf 5.000 ha

Quelle: nach Welle et al. 2022, S. 43

5.1.4 Einordnung und Diskussion der verwendeten Methodik

Die Simulation möglicher Waldentwicklungen ist naturgemäß mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 221 f.). So sind bereits die Forstbetriebe, deren Waldbestände Gegenstand der für den vorliegenden Bericht vorgenommenen Simulation sind, durch Durchschnittswerte aus der dritten Bundeswaldinventur (3. BWI) beschrieben, nämlich durch die Flächen und Vorräte, die Baumarten und Baumartengruppen im Waldbestand einnehmen. Auch die Ertragstabellen, auf denen die Berechnung der Zuwächse basieren, sind bereits Verallgemeinerungen. Und obwohl sie regionalisiert sind, können sie die enorme Vielfalt lokaler Wuchsbedingungen nicht komplett darstellen. Die Berechnung des Brusthöhendurchmessers der Bäume zur Bestimmung der Erreichung ihrer Erntezielstärke ist deshalb notwendigerweise ungenau. Eine entsprechende Verzerrung ist aber in allen Berechnungen grundsätzlich gleichgerichtet und damit für die gegebenen Vergleichszwecke als unproblematisch anzusehen. Festzuhalten ist zudem, dass Ertragstabellen auf empirischen Daten beruhen, die Wuchsbedingungen und ökophysiologische Eigenschaften, mit denen Bäume in der Vergangenheit lebten und wuchsen, widerspiegeln. Solche statischen Bedingungen (ökologisches Gleichgewicht) gibt es in der Natur prinzipiell nicht, und die Annahme von ökologischer Konstanz wird durch die Dynamik des Klimawandels weiter relativiert. Mehr als je zuvor ändern sich die Wuchsbedingungen für Bäume in ihrem Habitat. Änderungen in den Holzzuwächsen ließen sich maximal für sehr eng eingegrenzte Situationen modellieren. Solche komplexen modellbasierten Projektionen liegen weit abseits der methodischen Zugriffsmöglichkeiten der hier vorgenommenen Analyse. Auch die Kalkulation der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Waldumbauansätze ist erheblichen Unsicherheiten unterworfen. Zwar steht nicht zu erwarten, dass die Prozesse der Bewirtschaftung

(Technik, Personaleinsatz) einen tiefgreifenden Umbruch erleben werden, die Entwicklung von Marktpreisen und Löhnen wird jedoch sicherlich Veränderungen durchlaufen. Die den Simulationen und Kalkulationen zugrunde liegenden Annahmen sind in Kasten 5.1 zusammengefasst.

Kasten 5.1 Annahmen im Überblick

Erzeugung der fiktiven Beispielbetriebe

- Auswahl von Waldbeständen: Wegen ihres prioritären Umbaubedarfs wurden aus den Daten der 3. BWI die Waldbestände in der schlechtesten Naturnäheklasse gewählt.
- Beschreibung der ausgewählten Waldbestände: Die Durchschnittswerte der 3. BWI in den Regionen Nord, Ost, Süd und West beschreiben die Waldbestände der Beispielbetriebe.
- Holzzuwächse: Die Simulation der jährlich zuwachsenden Holzvolumina basiert praxisnah auf regionalisierten Ertragstafeln.

Simulation der Waldentwicklung

- Bewirtschaftungsweisen: Es werden drei Bewirtschaftungsweisen gegenübergestellt (prozessschutzbasierte, Dauerwald- und Altersklassenwaldbewirtschaftung), jeweils für die drei Eigentumsarten Staatswald, Körperschaftswald und Privatwald. Diese unterscheiden sich in Maßnahmen der Waldverjüngung, Pflege, Ernte, Holzaufarbeitung, Vermarktung und der Planung.
- Risiken: Die unmittelbar zurückliegenden Störungen werden auf Grundlage aktueller Daten fortgeschrieben für Fichten (Insektenbefall) und Kiefern (Forstbrand).

Kalkulation der Wirtschaftlichkeit

- Sozialökologische Standards: Es wird von typischen Betrieben ausgegangen, die ihre Maßnahmen im Rahmen ihrer Ziele und Möglichkeiten sozial-ökologisch optimal verwirklichen (z. B. Löhne für Waldarbeiter/innen entsprechend Tarifen des Öffentlichen Dienstes).
- Holzbereitstellung: Es wird angenommen, dass bei der Waldbehandlung und Holzbereitstellung die stoffliche der energetischen Holznutzung und die Stammholz- der Industrieholznutzung vorgezogen wird.
- Eigentumsarten: Es werden Unterschiede der Bewirtschaftung zwischen den Eigentumsarten angenommen (z. B. keine Selbstwerbung in Staatswaldbetrieben).
- Betriebsgrößen: Die betrachteten Betriebsgrößen beeinflussen die simulierte Bewirtschaftung geringfügig (z. B. Saatgutgewinnung nur im größten Betrieb, Aufwand für Forsteinrichtung).
- Regionalität: Relevante Unterschiede werden reflektiert (z. B. Holzpreise).
- Monetäre Bewertung: Die zur Berechnung von Erlösen und Kosten angesetzten Preise sind Näherungswerte, basierend auf aktuellen Daten des Stadtwaldes Lübeck sowie weiterer Forstbetriebe im Abgleich mit einschlägiger Literatur.

Quelle: Welle et al. 2022, S. 33 f.

Für die Zwecke dieses Berichts standen mit der Forstware-Fachdatenbank »fe-db« dem Kalkulator von Sturm/Kaiser (1999) erprobte Instrumente zur Verfügung (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 222). Sie decken im Zusammenspiel sowohl die Simulation von Waldentwicklungen als auch die monetären Berechnungen der Aufwendungen und Erträge in Forstbetrieben ab. Mit ihnen lassen sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und unterschiedliche Zielsetzungen darstellen. Das methodische Werkzeug, das diesen Fähigkeiten am nächsten kommt, ist ein »forstbetriebliches Simulationsmodell zur ökonomischen Bewertung strategischer forstlicher Produktionsentscheidungen« (Strugholtz 2010). Dieses Modell deckt beide methodischen Schritte, die Simulation der Waldentwicklung und die Kalkulation der betriebsökonomischen Ergebnisse, ab. Das Modell ist ausdrücklich für Altersklassenwaldbewirtschaftung programmiert. Andere Bewirtschaftungsweisen lassen sich mit ihm nicht darstellen. Die simulierbaren Baumarten sind beschränkt auf Buche, Eiche, Fichte und Kiefer. Betriebsökonomische Parameter betreffen neben Erlösen aus dem Holzverkauf nur die Erntekosten (entscheidungsrelevante Kosten). Mit diesem Simulationsmodell ließe sich also kein Vergleich unterschiedlicher Bewirtschaftungsweisen anstellen, wie es für den vorliegenden Bericht zentral ist.

Simulations- und Kalkulationssoftwares können die Komplexität, die Dynamik und die immanenten Unsicherheiten nicht in toto reflektieren (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 222). Diesen Problemen wird Rechnung getragen, indem für die diesem Bericht zugrunde liegenden Simulationen stellenweise auf Schätzverfahren zurückgegriffen wurde (beispielsweise bei der Aufteilung der Holzernte in Sortimenten oder bei der Einschätzung des Bestockungsgrades der Altersklasse bis 20 Jahre). Im Zuge von Dateneingaben wurden basierend auf jahrzehntelanger Erfahrung aus der Waldbewirtschaftungspraxis behutsame Korrekturen der berechneten, statischen und daher unterkomplexen Ausgabewerte vorgenommen. Hierdurch ergibt sich ein deutlich realistischeres Bild, als es sich mit blinden Algorithmen erzielen ließe. Hinsichtlich der ausgewählten fiktiven Betriebe und Regionen ist zu konstatieren, dass natürlich eine Vielzahl weiterer Varianten existiert, die im Rahmen der Simulationen hätten berücksichtigt werden können, was allerdings für den vorliegenden Bericht aufgrund der resultierenden Überkomplexität nicht zweckdienlich gewesen wäre. Beispielsweise sind die Bestandsdaten in der Bundeswaldinventur mit Angaben zur Hangneigung verknüpft und tatsächlich unterscheiden sich die vier definierten Regionen hinsichtlich ihrer Topografie. So ist etwa die Region Nord von der norddeutschen Tiefebene geprägt, während weite Teile der anderen Regionen von Gebirgen eingenommen werden. Die Kosten für Ernte und Pflanzungen sind für Waldflächen mit starker Hangneigung deutlich höher als im Flachland. Eine prozessschutzbasierte Bewirtschaftung würde mit einem stark verringerten Hiebsatz reagieren, um einen ökonomisch ungünstigen Anstieg der Kosten zu vermeiden.

In den Berechnungen für den hier vorliegenden Bericht haben Welle et al. (2022) bewusst auf eine Diskontierung verzichtet, auch weil einige Grundannahmen der Diskontierung und der hieraus abgeleiteten finanzwirtschaftlichen Grundsätze nicht einfach auf Ökosysteme und deren Entwicklung anwendbar sind. So basiert die Diskontierung auf bestimmten Annahmen, nämlich, dass der Wert eines Geldbetrags durch die Möglichkeit der Verzinsung umso höher ist, je früher man ihn erhält. Eine konsequente Anwendung der Diskontierung in der Forstwirtschaft führt laut Welle et al. (2022, S. 223) somit dazu, dass schnell wachsende Baumarten mit niedrigen Umtriebszeiten die optimale Lösung sind, was jedoch einer ganzheitlichen Betrachtung von Waldökosystemen widerspricht. Kritisch zu betrachten sei außerdem die Diskontierungsansätzen zugrunde liegende Annahme, dass das Wirtschaftsgut Wald/Holz in Zukunft im gleichen Umfang zur Verfügung steht wie heute. Welle et al. (2022) bezweifeln deshalb, dass die Diskontierung außerhalb der betriebswirtschaftlichen Berechnung von Plantagen einen praktischen Wert für auf Langfristigkeit ausgelegte waldökosystembasierte Entscheidungen hat. Dafür bedürfe es vielmehr einer umfassenderen Betrachtung der Waldökosysteme, ohne sektorale betriebswirtschaftlich orientierte Diskontierungsansätze.

5.2 Ergebnisse der waldbaulichen und forstbetrieblichen Simulationen

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die fiktiven Forstbetriebe dargestellt. Das hierfür verwendete, sehr umfangreiche Gutachten von Welle et al. (2022) beleuchtet auf Grundlage der eigens durchgeführten Simulationen und Kalkulationen nicht nur die ökonomischen Aspekte eines naturgemäßen Waldumbaus, um die kurz- und langfristigen Auswirkungen auf die Einkommenssituation von Forstbetrieben aufzuzeigen, sondern stellt die Ergebnisse des naturnahen Waldumbaus in Bezug auf die Waldentwicklung insgesamt dar. Dabei werden die Auswirkungen für einen kurzfristigen 10-jährigen Zeitraum sowie für einen langfristigen 50-jährigen Zeitraum anhand der drei unterschiedlichen Bewirtschaftungsweisen aufgezeigt und miteinander verglichen. Es würde jedoch den Umfang dieses Berichts sprengen, wenn die kurz-, mittel- und langfristigen waldbaulichen sowie spezifischen ökonomischen Auswirkungen des naturnahen Waldumbaus anhand der fiktiven vier Beispielbetriebe und der drei Bewirtschaftungstypen im Detail erörtert würden.

Für nähergehende Betrachtungen seien Interessierte auf das ausführliche Gutachten von Welle et al. (2022) verwiesen. Im vorliegenden Bericht erfolgt (nur) eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse: Zuerst werden die Waldentwicklungen sowie die Betriebsergebnisse für die verschiedenen Betriebstypen angeführt (Kap. 5.2.1), anschließend weitere waldbauliche und forstbetriebliche Auswirkungen der verschiedenen Bewirtschaftungsverfahren vergleichend diskutiert (Kap. 5.2.2). Ein Vergleich mit Ergebnissen anderer Untersuchungen erfolgt abschließend in Kapitel 5.2.3.

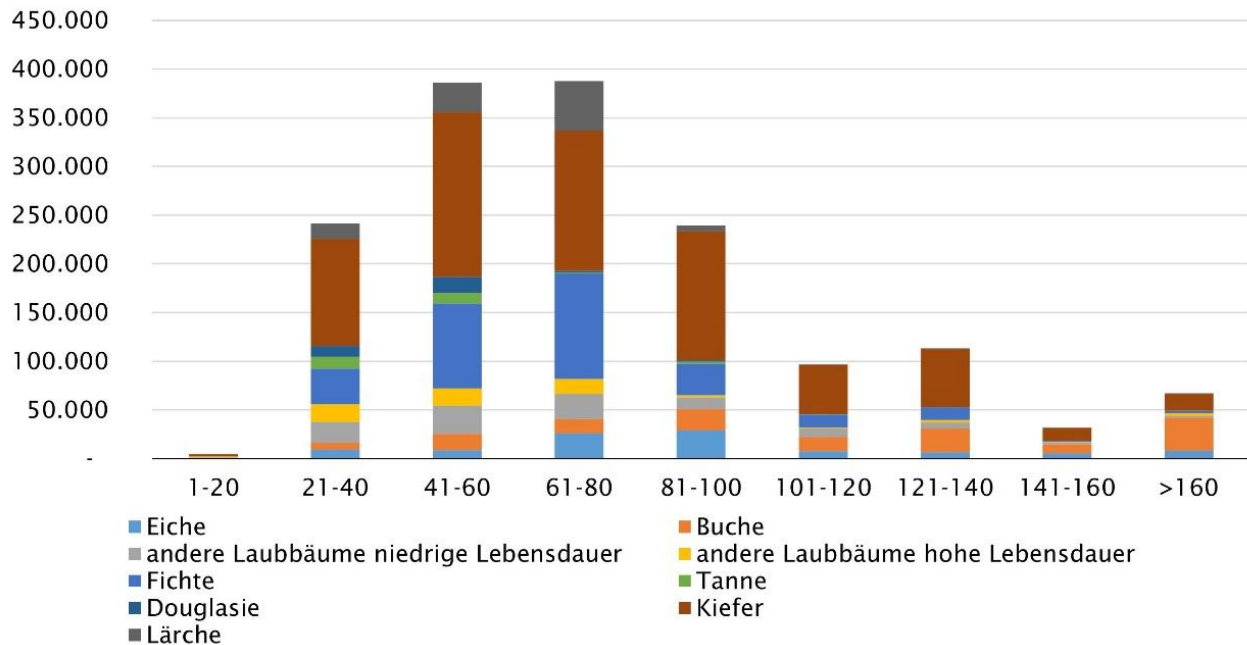
5.2.1 Vergleich der Bewirtschaftungstypen für die vier Beispielbetriebe

Staatswald mit 5.000 ha in der Region Nord

Abbildung 5.3 gibt einen Überblick über die Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse zum Ausgangszeitpunkt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 163). Der Staatswald weist in allen Altersklassen hohe Nadelbaumanteile auf, insbesondere Kiefer und Fichte. In den jungen Altersklassen 21 bis 40 und 40 bis 61 sind

auch Tannen-, Douglasien- und Lärchenanteile ersichtlich. Das heißt, der oft betonte Waldumbau in Richtung naturnaher Wald hat in der Vergangenheit nicht stattgefunden.

Abbildung 5.3 Verteilung der Vorräte (in fm) je Baumart und Altersklasse für einen 5.000-ha-Staatswald in der Region Nord zum Ausgangszeitpunkt



Quelle: Welle et al. 2022, S. 163

Der Vergleich relevanter Kennzahlen in Bezug auf Waldentwicklung und Betriebswirtschaft zwischen den drei Bewirtschaftungstypen in Abhängigkeit von der Zeit ist in Tabelle 5.3 dargestellt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 165 f.). Die Wälder in der Region Nord entwickeln in der PSW höhere Vorräte pro Hektar im Vergleich zur Bewirtschaftungsweise mittels Dauerwald- oder Altersklassenwaldkonzept. Insbesondere im Laubholz steigen in der PSW die Vorräte, da hier der Hiebsatz im Vergleich mit der DWW und der AKW reduziert ist. Daher entwickeln sich im zeitlichen Verlauf mehr Stammholz- und Starkholzsortimente, die in der Vermarktung hohe Preise erzielen können. Die höheren Vorratsfestmeter⁷⁰ (Vfm) in den Laubholzbeständen garantieren eine gute Resilienz und Stabilität der Wälder.

Tabelle 5.3 Entwicklung relevanter Kennzahlen bei den drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) in den ersten 10 Jahren, nach 10 Jahren und nach 50 Jahren

Kennzahl	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren			nach 50 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Betriebstyp									
Holzvorrat (Vfm/ha)	311	311	311	345	313	321	459	422	392
Stammholz (Efm)	597.890	597.890	597.890	739.190	668.070	656.620	1.274.560	1.178.770	1.114.010
Starkholz (Sortimente 4, 5, 6 Efm)	64.600	64.600	64.600	72.200	57.100	47.600	228.000	189.000	175.000
Hiebsatz (Efm/ha)	4,0	4,9	6,0	3,4	4,0	4,3	6,1	7,9	6,2

⁷⁰ Maß für Rohholz, oberirdisches Holzvolumen ab 7 cm Durchmesser (Derbholz) mit Rinde (D) (DFV o.J.b).

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren			nach 50 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Hiebsatz Laubholz (Efm/ha)	0,7	1,5	2,0	0,5	1,1	1,3	0,9	1,7	1,6
Hiebsatz Nadelholz (Efm/ha)	3,3	3,4	4,0	2,9	2,9	3,0	5,2	6,2	4,6
Erntemengen Laubholz Stammholz (EfM)	1.700 (11 %)	3.701 (18 %)	4.440 (17 %)	1.458 (11 %)	2.803 (16 %)	2.580 (13 %)	2.421 (10,5 %)	3.853 (11 %)	3.274 (12 %)
Erntemengen Laubholz Abschnitt und Palette (EfM)	65 (0,5 %)	265 (1 %)	317 (1 %)	62 (0,5 %)	249 (1 %)	240 (1,2 %)	58 (0,3 %)	231 (1 %)	206 (1 %)
Erntemengen Laubholz Industrieholz lang (EfM)	0	604 (3 %)	868 (3 %)	0	579 (3 %)	727 (4 %)	10	773 (2 %)	668 (2 %)
Erntemengen Laubholz Energie- und Brennholz (EfM)	724 (5 %)	1.903 (9 %)	3.141 (12 %)	197 (1,5 %)	926 (5 %)	2.042 (11 %)	787 (3,2 %)	2.479 (7 %)	3.150 (11 %)
Erntemengen Nadelholz Stammholz (EfM)	7.733 (52 %)	6.064 (29 %)	3.629 (14 %)	6.814 (53 %)	5.729 (34 %)	3.438 (18 %)	16.728 (72 %)	12.352 (36 %)	6.405 (23 %)
Erntemengen Nadelholz Abschnitt und Palette (EfM)	561 (3,7 %)	5.659 (27 %)	11.422 (43 %)	392 (3 %)	4.186 (25 %)	7.731 (40 %)	521 (2,3 %)	11.237 (33 %)	11.659 (42 %)
Erntemengen Nadelholz Industrieholz lang (EfM)	3.738 (25 %)	2.132 (10 %)	2.090 (8 %)	3.555 (28 %)	1.942 (11 %)	1.786 (9 %)	1.981 (9 %)	2.262 (7 %)	1.525 (6 %)
Erntemengen Nadelholz Energie- und Brennholz (EfM)	461 (3 %)	608 (3 %)	802 (3 %)	398 (3 %)	630 (4 %)	686 (3,7 %)	596 (2,7 %)	825 (2 %)	811 (3 %)
Erntemengen gesamt (EfM) LH und NH	2.489 LH (17 %)	6.474 LH (26 %)	8.766 LH (33 %)	1.717 LH (13 %)	4.557 LH (27 %)	5.589 LH (29 %)	3.276 LH (14 %)	7.336 LH (22 %)	7.298 LH (26 %)
	12.492 NH (83 %)	14.462 NH (74 %)	17.943 NH (67 %)	11.158 NH (87 %)	12.488 NH (73 %)	13.642 NH (71 %)	19.826 NH (86 %)	26.676 NH (78 %)	20.400 NH (74 %)
	14.981 (100 %)	20.936 (100 %)	26.709 (100 %)	12.875 (100 %)	17.045 (100 %)	19.231 (100 %)	23.102 (100 %)	34.012 (100 %)	27.699 (100 %)

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren			nach 50 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
erntekostenfreier ⁹⁴ Laubholzerlös (Euro/Efm)	63	49	112	72	46	104	56	45	
erntekostenfreier ³⁸ Nadelholzerlös (Euro/Efm)	37	34	38	37	36	54	46	39	
erntekostenfreier ⁴⁷ Holzerlös (Euro/Efm) und (Euro/ha)	45 141	39 188	48 210	47 123	39 159	61 149	48 282	41 329	224
erntekostenfreier ^{704.357} Holzerlös gesamt (Euro)	940.171	1.048.341	615.118	794.518	744.055	1.410.138	1.644.005	1.122.004	
sonstige Erlöse (Euro)	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
sonstige Erlöse (Euro/ha)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Betriebskosten (Euro)	903.995	1.269.075	1.306.258	853.825	1.108.265	1.314.108	1.124.221	1.524.122	2.084.625
Betriebskosten (Euro/ha)	181	254	261	171	222	263	225	305	417
Betriebsergebnis ^{-99.638} (Euro)	-228.904	-157.918	-138.707	-213.748	-470.053	385.917	219.883	-862.621	
Betriebsergebnis ⁻²⁰ (Euro/ha)	-46	-32	-28	-43	-94	77	44	-173	

Vfm = Vorratsfestmeter; Efm = Erntefestmeter; LH = Laubholz; NH = Nadelholz

Quelle: Welle et al. 2022, S. 163 ff.

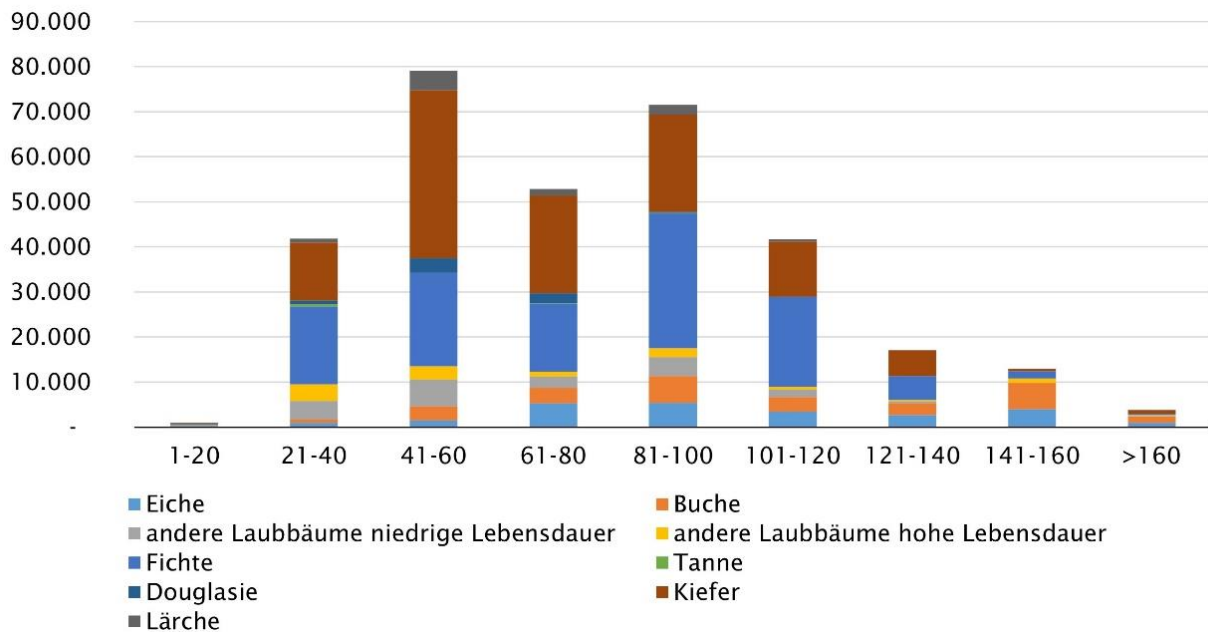
Durch den reduzierten Hiebsatz wird in der PSW in den ersten 10 Jahren weniger Holz geerntet (14.981 Erntefestmeter = Efm⁷¹) als in der DWW (20.936 Efm) und der AKW (26.709 Efm). Die Unterschiede basieren in erster Linie auf unterschiedlichen Erntemengen im Laubholz. Die Erntemengen im Nadelholz variieren nicht so stark, zum Vergleich wird in der PSW 12.492 Efm Nadelholz, in der DWW 14.462 Efm Nadelholz und in der AKW 17.943 Efm geerntet. Nach 10 Jahren reduzieren sich die Unterschiede in den Erntemengen und nach 50 Jahren kann in der DWW insgesamt am meisten geerntet werden. Das Betriebsergebnis ist für die ersten 10 Jahre in allen drei Bewirtschaftungstypen negativ, auch noch nach 10 Jahren, dabei hat die PSW über diese Zeiträume den geringsten Verlust zu verzeichnen und schreibt nach 50 Jahren die größten Gewinne, was primär durch eine Reduzierung der Holzernte- und der Betriebskosten erreicht wird.

Kommunalwald mit 1.000 ha in der Region Ost

Abbildung 5.4 gibt einen Überblick über die Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse zum Ausgangszeitpunkt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 166). Der Kommunalwald weist in allen Altersklassen hohe Nadelbaumanteile auf, insbesondere Kiefer und Fichte. In den jungen Altersklassen 21 bis 40 und 40 bis 61 sind auch Tannen- und Douglasien- und Lärchenanteile ersichtlich. Dieser Umstand lässt sich so interpretieren, dass der oft betonte Waldumbau in Richtung naturnaher Wald in der Vergangenheit bislang gar nicht stattgefunden hat.

⁷¹ Maß für Rohholz zur Abschätzung des nutzbaren Derbholzes aus einer Holzerntemaßnahme. Ein Erntefestmeter entspricht 1 m³ Holzmasse ohne Zwischenräume und Rinde. Der Erntefestmeter wird in der Praxis aus dem Vorratsfestmeter errechnet, in dem vom Vorratsfestmeter 20% Ernte- und Rindenverluste abgezogen werden (DFV o.J.b).

Abbildung 5.4 Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse für einen 1.000-ha-Kommunalwald in der Region Ost zum Ausgangszeitpunkt



Quelle: Welle et al. 2022, S. 166

Der Vergleich relevanter Kennzahlen in Bezug auf Waldentwicklung und Betriebswirtschaft zwischen den drei Bewirtschaftungstypen in Abhängigkeit von der Zeit ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Die Wälder in der Region Ost entwickeln in der PSW höhere Vorräte pro Hektar im Vergleich zur Bewirtschaftung beim Dauerwald- oder Altersklassenwaldkonzept. Insbesondere im Laubholz steigen in der PSW die Vorräte, da hier der Hiebsatz im Vergleich zu der DWW und der AKW reduziert ist. Daher entwickeln sich im zeitlichen Verlauf mehr Stammholz- und Starkholzsortimente, die hochpreisig zu vermarkten sind. Die höheren Vorratsfestmeter in den Laubholzbeständen garantieren eine gute Resilienz und Stabilität der Wälder.

Durch den reduzierten Hiebsatz wird in der PSW in den ersten 10 Jahren weniger Holz geerntet (3.895 Efm) als in der DWW (5.021 Efm) und der AKW (6.405 Efm). Die Unterschiede in den Erntemengen basieren in erster Linie auf unterschiedlichen Erntemengen im Laubholz. Die Erntemengen im Nadelholz variieren nicht so stark, zum Vergleich wird in der PSW 3.591 Efm Nadelholz, in der DWW 3.841 Efm und in der AKW 4.880 Efm Nadelholz geerntet. Nach 10 Jahren reduzieren sich die Erntemengen in allen Bewirtschaftungstypen, wobei in der DWW und der AKW vergleichbare Mengen geerntet werden. Das Betriebsergebnis ist für die ersten 10 Jahre nur in der PSW negativ. Nach 10 Jahren verschlechtert sich das Betriebsergebnis in allen Bewirtschaftungstypen, da weniger geerntet wird und die Kosten für den Waldumbau steigen bzw. auf einem ähnlich hohen Niveau liegen. Insgesamt schneidet die DWW als einzige Bewirtschaftungsform mit einem schwach positiven Betriebsergebnis ab.

Tabelle 5.4 **Entwicklung relevanter Kennzahlen für die drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) für die ersten 10 Jahre und nach 10 Jahren**

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Holzvorrat (Vfm/ha)	324,7	324,7	324,7	355,1	331,0	310,8
Stammholz (Efm)	136.899	136.899	136.899	160.054	150.449	138.114
Stammholz (Sortimente 4,5,6) (Efm)	14.360	14.360	14.360	18.000	15.260	12.640
Hiebsatz (Efm/ha)	5,2	5,8	7,2	4,1	5,7	5,5
Hiebsatz Laubholz (Efm/ha)	0,4	1,3	1,7	0,3	1,0	1,2
Hiebsatz Nadelholz (Efm/ha)	4,8	4,5	5,5	3,8	4,7	4,3
Erntemengen Laubholz Stammholz (EfM)	264 (7%)	740 (15%)	943 (15%)	229 (7%)	477 (10%)	599 (12%)
Erntemengen Laubholz Abschnitt und Palette (EfM)	0	43 (1%)	70 (1%)	0	30 (1%)	53 (1%)
Erntemengen Laubholz Industrieholz lang (EfM)	3	24	38 (1%)	0	18	27 (1%)
Erntemengen Laubholz Energie- und Brennholz (EfM)	37 (1%)	373 (7%)	474 (7%)	27 (1)	345 (7%)	397 (8%)
Erntemengen Nadelholz Stammholz (EfM)	2.778 (71%)	1.737 (35%)	1.890 (30%)	2.242 (72%)	1.559 (32%)	1.075 (22%)
Erntemengen Nadelholz Abschnitt und Palette (EfM)	0	1.883 (38%)	2.708 (42%)	0	2.208 (45%)	2.462 (50%)
Erntemengen Nadelholz Industrieholz lang (EfM)	813 (21%)	221 (4%)	282 (4%)	624 (20%)	234 (5%)	285 (6%)

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Erntemengen Nadelholz Energie- und Brennholz (Efm)	0	0	0	0	0	0
Erntemengen gesamt (Efm)	304 LH (8%)	1.180 LH (24%)	1.525 LH (24%)	256 LH (8%)	870 LH (18%)	1.076 LH (22%)
LH und NH	3.591 NH (92%)	3.841 NH (76%)	4.880 NH (76%)	2.866 NH (92%)	4.001 NH (82%)	3.822 NH (78%)
	3.895 LH+NH (100%)	5.021 LH+NH (100%)	6.405 LH+NH (100%)	3.122 LH+NH (100%)	4.871 LH+NH (100%)	4.898 LH+NH (100%)
erntekostenfreier Laubholzerlös (Euro/Efm)	104	60	50	103	50	48
erntekostenfreier Nadelholzerlös (Euro/Efm)	43	44	43	44	43	41
erntekostenfreier Holzerlös (Euro/ Efm) und (Euro/ha)	48 187	48 240	45 289	49 153	44 216	43 208
erntekostenfreier Holzerlös gesamt (Euro)	186.630	240.371	288.954	153.311	215.768	208.353
sonstige Erlöse (Euro)	12.432	16.646	18.440	12.314	16.304	17.586
sonstige Erlöse (Euro/ha)	12	17	18	12	16	18
Betriebskosten (Euro)	199.982	210.879	277.014	187.602	225.109	251.087
Betriebskosten (Euro/ha)	200	211	277	188	225	251
Betriebsergebnis (Euro)	-920	46.138	30.380	-21.977	6.963	-25.148
Betriebsergebnis (Euro/ha)	-1	46	30	-22	7	-25

Vfm = Vorratsfestmeter; Efm = Erntefestmeter; LH = Laubholz; NH = Nadelholz

Quelle: Welle et al. 2022, S. 166 ff.

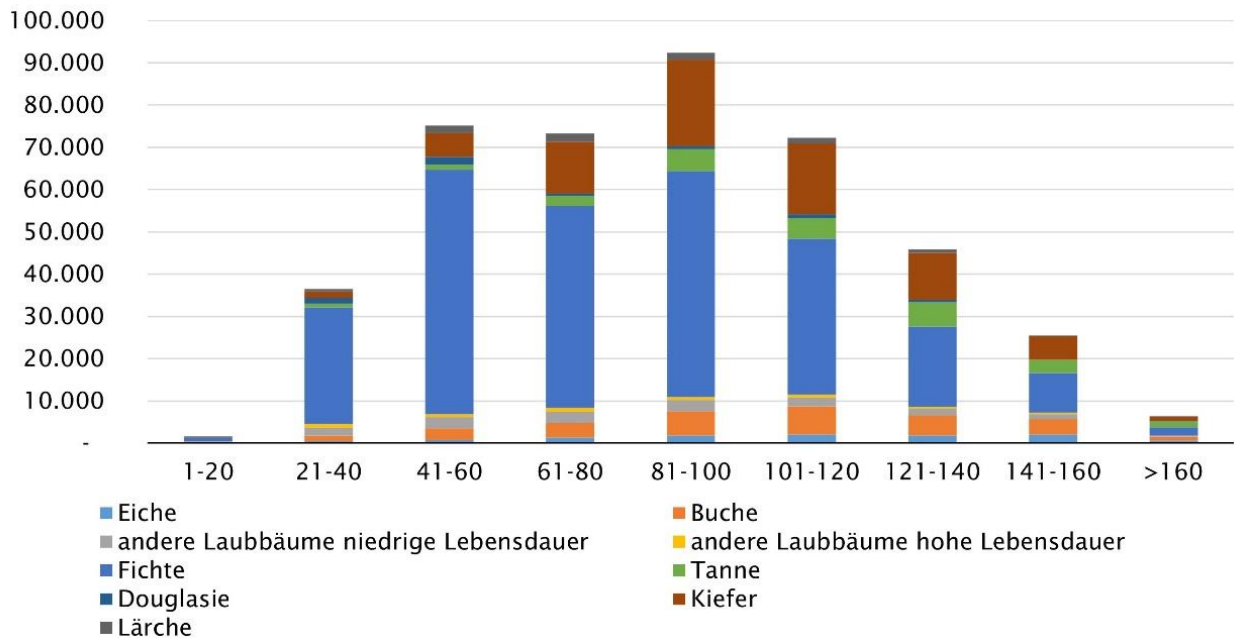
Privatwald mit 1.000 ha in der Region Süd

Abbildung 5.5 gibt einen Überblick über die Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse zum Ausgangszeitpunkt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 169). Der Privatwald weist in allen Altersklassen hohe Nadelbaumanteile auf (insbesondere Fichte). In den jungen Altersklassen 21 bis 40 und 40 bis 61 sind neben hohen Fichten- auch Tannen- und Douglasienanteile ersichtlich. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Waldumbau in Richtung naturnaher Wald in der Vergangenheit nicht stattgefunden hat.

Relevante Kennzahlen in Bezug auf Waldentwicklung und Betriebswirtschaft zwischen den drei Bewirtschaftungstypen in Abhängigkeit von der Zeit sind in Tabelle 5.5 abgebildet (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 171 f.). Die Wälder in der Region Süd haben als Ausgangsbasis einen recht hohen Vorrat von 431 Vfm/ha

im Vergleich mit dem bundesdeutschen Durchschnitt von 336 Vfm/ha (Stand: 2014 3. BWI). Allerdings beziehen sich diese Vorräte primär auf die Nadelholzanteile. Daher entwickeln sich in der PSW auch wiederum höhere Vorräte pro Hektar, was auf die Zunahme im Laubholz zurückzuführen ist. Im Unterschied dazu bleiben die Vorräte in der DWW auf gleichem Niveau, während sie in der AKW sogar sinken. Diese Entwicklung ist ein Resultat der unterschiedlichen Hiebsätze. Folglich entwickeln sich im zeitlichen Verlauf in der PSW mehr Stammholz- und Starkholzsortimente, bei zugleich hohen Vermarktungspreisen.

Abbildung 5.5 Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse für einen 1.000-ha-Privatwald in der Region Süd zum Ausgangszeitpunkt



Quelle: Welle et al. 2022, S. 169

Tabelle 5.5 Entwicklung relevanter Kennzahlen für die drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) für die ersten 10 Jahre und nach 10 Jahren

Kennzahl	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Holzvorrat (Vfm/ha)	431	431	431	455	436	401
Stammholz (Efm)	235.107	235.031	234.923	256.412	249.180	223.192
Stammholz (Sortimente 4,5,6) (Efm)	35.850	35.850	35.790	42.870	39.680	32.030
Hiebsatz (Efm/ha)	8,1	8,7	11,1	8,6	8,3	7,3
Hiebsatz Laubholz (Efm/ha)	0,4	0,9	1,1	0,4	0,8	0,9
Hiebsatz Nadelholz (Efm/ha)	7,7	7,8	10,0	8,2	7,5	6,4

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Erntemengen Laubholz Stammholz (EfM)	230 (4%)	542 (7,4%)	576 (6,6%)	250 (4%)	437 (6,2%)	468 (7%)
Erntemengen Laubholz Abschnitt und Palette (EfM)	0	28 (0,4%)	44 (0,4%)	0	26 (0,4%)	44 (1%)
Erntemengen Laubholz Industrieholz lang (EfM)	0	10	35	4	4	40 (1%)
Erntemengen Laubholz Energie- und Brennholz (EfM)	50 (1%)	218 (3,2)	288 (3%)	44 (1%)	209 (3%)	290 (4%)
Erntemengen Nadelholz Stammholz (EfM)	4.961 (82%)	2.823 (39%)	3.129 (32%)	5.254 (82%)	2.587 (36%)	1.905 (29%)
Erntemengen Nadelholz Abschnitt und Palette (EfM)	0	3.418 (46%)	5.139 (52%)	0	3.458 (48%)	3.277 (50%)
Erntemengen Nadelholz Industrieholz lang (EfM)	832 (14%)	441 (6%)	596 (6%)	876 (14%)	424 (6%)	514 (8%)
Erntemengen Nadelholz Energie- und Brennholz (EfM)	0	0	0	0	0	0
Erntemengen gesamt (EfM) LH und NH	284 LH (5%) 5.793 NH (95%) 6.077 (100%)	798 LH (11%) 6.682 NH (89%) 7.480 (100%)	943 LH (10%) 8.864 NH (90%) 9.807 (100%)	298 LH (5%) 6.130 NH (95%) 6.428 (100%)	676 LH (9,6%) 6.459 NH (90,4%) 7.145 (100%)	842 LH (13%) 5.696 NH (87%) 6.538 (100%)
erntekostenfreier Laubholzerlös (Euro/Efm)	87	72	52	98	66	45
erntekostenfreier Nadelholzerlös (Euro/Efm)	59	47	46	59	45	44
erntekostenfreier Holzerlös (Euro/ Efm) und (Euro/ha)	60 367	49 368	46 454	61 389	47 336	44 290

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
erntekostenfreier Holzerlös gesamt (Euro)	367.352	367.847	454.456	389.421	336.056	289.894
sonstige Erlöse (Euro)	12.933	19.348	17.525	12.812	19.465	17.571
sonstige Erlöse (Euro/ha)	13	19	18	13	19	18
Betriebskosten (Euro)	285.781	349.806	372.055	250.869	292.583	289.960
Betriebskosten (Euro/ha)	286	350	372	251	293	290
Betriebsergebnis (Euro)	94.504	37.389	99.926	151.364	62.938	17.505
Betriebsergebnis (Euro/ha)	95	37	100	151	63	18

Vfm = Vorratsfestmeter; Efm = Erntefestmeter; LH = Laubholz; NH = Nadelholz

Quelle: Welle et al. 2022, S. 169 ff.

Die höheren Vorratsfestmeter in den Laubholzbeständen garantieren eine gute Resilienz und Stabilität der Wälder. Durch den reduzierten Hiebsatz wird in der PSW in den ersten 10 Jahren weniger Holz geerntet (6.077 Efm) als in der DWW (7.480 Efm) und der AKW (9.807 Efm). Die Unterschiede in den Erntemengen basieren in erster Linie auf unterschiedlichen Mengen in der Laubholzernte und sind in den ersten 10 Jahren groß. Danach reduzieren sich die Erntemengen in der DWW und der AKW, während sie in der PSW ansteigen. Nach 10 Jahren kann in der PSW mehr Nadelholz geerntet werden als in der AKW. Die höchsten Erntemengen verzeichnet die DWW im Nadelholz. Das Betriebsergebnis ist in allen Bewirtschaftungstypen positiv und obwohl sich die Erntemengen zwischen der AKW und der PSW stark unterscheiden, beträgt die Differenz nur 5 Euro/ha, da die Betriebskosten in der PSW um 86 Euro/ha geringer sind. Nach 10 Jahren ist das Betriebsergebnis in der PSW am höchsten, gefolgt von der DWW und der AKW, die über 80 Euro/ha Gewinneinbußen im Vergleich zur ersten Dekade verzeichnet.

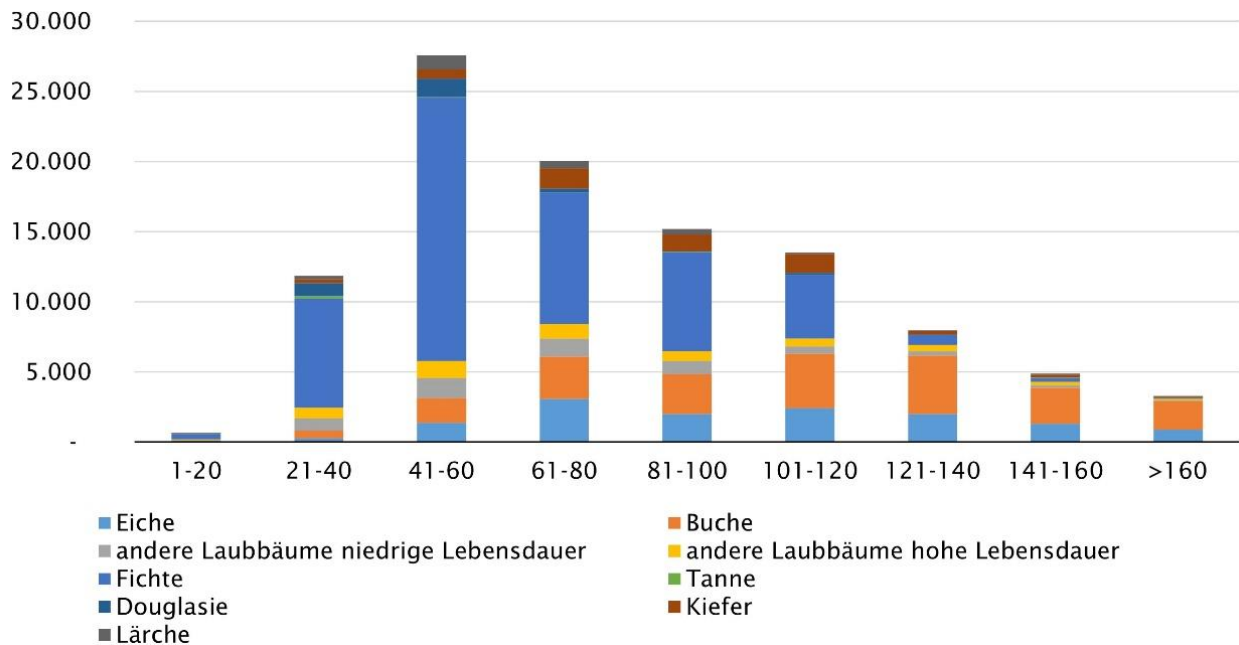
Privatwald mit 300 ha in der Region West

Abbildung 5.6 gibt einen Überblick über die Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse zum Ausgangszeitpunkt. Der Privatwald weist in allen Altersklassen hohe Nadelbaumanteile auf, insbesondere an Fichte. In den Altersklassen 21 bis 40 und 40 bis 61 sind neben hohen Fichten- auch Tannen-, Douglasien- und Lärchenanteile ersichtlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Waldumbau in Richtung naturnaher Wald in der Vergangenheit nicht stattgefunden hat.

Relevante Kennzahlen in Bezug auf Waldentwicklung und Betriebswirtschaft für die drei Bewirtschaftungstypen in Abhängigkeit von der Zeit sind in Tabelle 5.6 dargestellt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 174 f.). Die Wälder in der Region West entwickeln in der PSW höhere Vorräte pro Hektar im Vergleich zur Bewirtschaftungsweise mittels Dauerwald- oder Altersklassenwaldkonzept. Insbesondere im Laubholz steigen in der PSW die Vorräte, da hier der Hiebsatz im Vergleich mit der DWW und der AKW reduziert ist. Interessanterweise sind nach 10 Jahren in der DWW und der AKW die Vorräte pro Hektar geringer als in der Ausgangssituation. Das wirkt sich auch auf die Hiebsatzplanung aus, wodurch diese im Vergleich zur Dekade vorher reduziert und in der PSW mit 3,4 Efm/ha im Nadelholz am höchsten ist. Analog zu den anderen Regionen entwickeln sich auch im Westen im zeitlichen Verlauf in der PSW mehr Stammholz- und Starkholzsortimente. Die höheren Vorratsfestmeter in den Laubholzbeständen garantieren eine gute Resilienz und Stabilität der Wälder. In den ersten 10 Jahren wird in der PSW weniger Holz geerntet (1.038 Efm) als in der DWW (1.573 Efm) und der AKW (1.897 Efm). Die Unterschiede in den Erntemengen basieren in erster Linie auf unterschiedlichen Erntemengen im Laubholz. Hinzu kommt, dass bei der AKW die Nutzung über dem Zuwachs liegt. Nach 10 Jahren reduzieren sich die Erntemengen in der DWW und der AKW, während sie in der PSW auf gleichem Niveau bleiben. Nach 10 Jahren ist

die Erntemenge im Nadelholz in allen drei Bewirtschaftungstypen nahezu gleich. Erst nach 50 Jahren kann in allen Bewirtschaftungstypen mehr geerntet werden, am meisten in der AKW, folgend DWW und danach PSW. Das Betriebsergebnis ist in allen Bewirtschaftungstypen positiv. Innerhalb der ersten 10 Jahre schneidet die DWW mit 89 Euro/ha am besten ab, gefolgt von der AKW mit 66 Euro/ha und der PSW mit 45 Euro/ha. Nach 10 Jahren hat die AKW das beste Betriebsergebnis, gefolgt von der PSW und der DWW. Nach 50 Jahren liegt die PSW mit 156 Euro/ha vorne, dann mit 142 Euro/ha die DWW und mit 139 Euro/ha die AKW.

Abbildung 5.6 Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse für einen 300-ha-Privatwald in der Region West zum Ausgangszeitpunkt



Quelle: Welle et al. 2022, S. 172

Tabelle 5.6 Entwicklung relevanter Kennzahlen für die drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) für die ersten 10 Jahre, nach 10 und nach 50 Jahren

Kennzahl	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren			nach 50 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Holzvorrat (Vfm/ha)	348	348	348	359	325	337	472	468	447
Stammholz (Efm)	43.020	43.020	43.020	50.142	44.416	45.163	76.570	75.445	76.658
Stammholz (Sortimente 4,5,6 Efm)	7.345	7.345	7.345	8.640	7.199	6.304	23.208	20.777	19.260
Hiebsatz (Efm/ha)	4,6	6,2	7,1	4,6	4,7	5,2	7,1	7,3	8,4
Hiebsatz Laubholz (Efm/ha)	1,0	2,9	3,3	1,2	1,9	2,2	2,4	2,6	2,7
Hiebsatz Nadelholz (Efm/ha)	3,6	3,2	3,8	3,4	2,8	3,0	4,7	4,7	5,7

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren			nach 50 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
Erntemengen Laubholz Stammholz (EfM)	187 (18 %)	525 (33 %)	587 (31 %)	220 (21 %)	350 (29 %)	369 (27 %)	444 (28 %)	485 (26 %)	469 (21 %)
Erntemengen Laubholz Abschnitt und Palette (EfM)	0	29 (2 %)	35 (2 %)	0	26 (2 %)	32 (2 %)	15 (1 %)	30 (2 %)	47 (2 %)
Erntemengen Laubholz Industrieholz lang (EfM)	2	11 (1 %)	25 (1 %)	3	5	13 (1 %)	3	5	7
Erntemengen Laubholz Energie- und Brennholz (EfM)	35 (3 %)	176 (11 %)	227 (12 %)	47 (5 %)	120 (10 %)	168 (12 %)	69 (4 %)	140 (7 %)	202 (9 %)
Erntemengen Nadelholz Stammholz (EfM)	623 (60 %)	552 (35 %)	534 (28 %)	587 (56 %)	458 (38 %)	429 (31 %)	792 (49 %)	671 (36 %)	508 (23 %)
Erntemengen Nadelholz Abschnitt und Palette (EfM)	0	163 (10 %)	368 (19 %)	0	150 (12 %)	285 (21 %)	0	378 (20 %)	848 (38 %)
Erntemengen Nadelholz Industrieholz lang (EfM)	191 (18 %)	117 (7 %)	121 (6 %)	183 (18 %)	100 (8 %)	82 (6 %)	281 (18 %)	160 (9 %)	149 (7 %)
Erntemengen Nadelholz Energie- und Brennholz (EfM)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erntemengen gesamt (EfM) LH und NH	224 LH (22 %)	741 LH (47 %)	874 LH (46 %)	270 LH (26 %)	501 LH (41 %)	582 LH (42 %)	531 LH (33 %)	660 LH (35 %)	724 LH (32 %)
	814 NH (78 %)	832 NH (53 %)	1.023 NH (54 %)	770 NH (74 %)	708 NH (59 %)	796 NH (58 %)	1.073 NH (67 %)	1.209 NH (65 %)	1.505 NH (685)
	1.038 (100 %)	1.573 (100 %)	1.897 (100 %)	1.040 (100 %)	1.209 (100 %)	1.378 (100 %)	1.604 (100 %)	1.869 (100 %)	2.229 (100 %)
erntekostenfreier Laubholzerlös (Euro/Efm)	87	64	52	88	60	51	86	79	54
erntekostenfreier Nadelholzerlös (Euro/Efm)	52	51	49	52	50	50	51	48	43

Kennzahl Betriebstyp	erste 10 Jahre			nach 10 Jahren			nach 50 Jahren		
	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW	PSW	DWW	AKW
erntekostenfreier Holzerlös (Euro/ Efm) und (Euro/ha)	59 206	57 299	50 319	61 212	54 217	51 233	62 333	59 369	46 344
erntekostenfreier Holzerlös gesamt (Euro)	61.674	89.664	95.657	63.532	65.213	69.760	99.864	110.652	10.3271
sonstige Erlöse (Euro)	4.734	8.692	10.205	5.078	7.109	8.526	5.800	7.768	9.893
sonstige Erlöse (Euro/ha)	16	29	34	17	24	28	19	26	33
Betriebskosten (Euro)	52.787	71.589	86.111	49.354	53.967	52.689	58.890	75.716	71.598
Betriebskosten (Euro/ha)	176	239	287	165	180	176	196	252	239
Betriebsergebnis (Euro)	13.621	26.767	19.751	19.256	18.355	25.597	46.774	42.704	41.566
Betriebsergebnis (Euro/ha)	45	89	66	64	61	85	156	142	139

Vfm = Vorratsfestmeter; Efm = Erntefestmeter; LH = Laubholz; NH = Nadelholz

Quelle: Welle et al. 2022, S. 172 ff.

5.2.2 Diskussion weiterer Ergebnisse

Im Folgenden werden anhand der Simulationsergebnisse sowohl waldbauliche Auswirkungen als auch ökonomische Auswirkungen der drei unterschiedlichen Bewirtschaftungstypen in kurz- und langfristiger Perspektive diskutiert. Erörtert werden die Entwicklung der Waldumbauflächen, der Holzvorräte, der Starkholzsportimente und der Erntemengen. Außerdem werden zur Diskussion der betriebsökonomischen Auswirkungen verschiedene Aspekte von Erlösen und Kosten betrachtet. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse findet sich in Kasten 5.2.

Kasten 5.2 Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick

Waldentwicklung

- Waldumbauflächen: Der dringlichste Bedarf an Waldumbau besteht für 2,87 Mio. ha oder 28 % der gesamten deutschen Waldfläche. Kurzfristig (nach 10 Jahren) werden den Simulationen zufolge in der DWW in den meisten Regionen die größten Waldflächen umgebaut, gefolgt von der PSW. Das gilt im Mittel auch langfristig (nach 50 Jahren).
- Holzvorräte: PSW ist beim Aufbau des Gesamtvorrats, des Laubholzvorrats und des Starkholzvorrats den anderen Bewirtschaftungsweisen in praktisch allen simulierten Fällen überlegen. Bei AKW ist die Vorratsentwicklung in mehreren Regionen negativ und insgesamt am schwächsten. DWW nimmt eine Mittelstellung ein.
- Holzerntemengen: Im Mittel wird in der AKW am meisten geerntet, gefolgt von DWW.
- Baumartenzusammensetzung: Unter der PSW verändert sich die Bestockung zugunsten von standortheimischen Laubbaumarten mit Abstand am schnellsten, da in der DWW mehr auf standortgerechte und zum Teil gepflanzte Nadelbaumarten fokussiert wird.

Wirtschaftlichkeit

- Holzerlöse: Kurzfristig erzielt die AKW in der Mehrzahl der Simulationen die höchsten Holzerlöse, langfristig die DWW. In der PSW sind die Holzerlöse über alle Zeiträume hinweg am geringsten, entsprechend den reduzierten Erntemengen. Allerdings schrumpft der Unterschied mit der Zeit, weil das erlösintensive Starkholz am meisten zulegt.
- Holzerntekosten: Die PSW ist die mit Abstand kostengünstigste Bewirtschaftungsart, da auf Pflanzungen verzichtet werden und diese in der Regel sehr kostenintensiv sind (einerseits für die Pflanzen und andererseits für die Pflanzungen). In den ersten Jahren ist AKW überall am teuersten, später fallweise dann die DWW.
- Erntekostenfreie Erlöse: Die Erlöse abzüglich Erntekosten fallen kurzfristig bei der AKW am höchsten aus und langfristig bei der DWW. Die PSW ist der AKW langfristig überlegen.
- Betriebskosten: Die Betriebskosten (welche die Erntekosten einschließen) sind in der PSW in allen Regionen sowohl kurz- als auch langfristig am niedrigsten, gefolgt von den Betriebskosten innerhalb der DWW.
- Betriebsergebnisse: Kurzfristig variieren die Betriebskosten im Vergleich der Regionen stark. Langfristig und im Überschlagsmittel erbringt die PSW die besten Betriebsergebnisse aufgrund von Starkholzvermarktung und geringeren Betriebskosten.

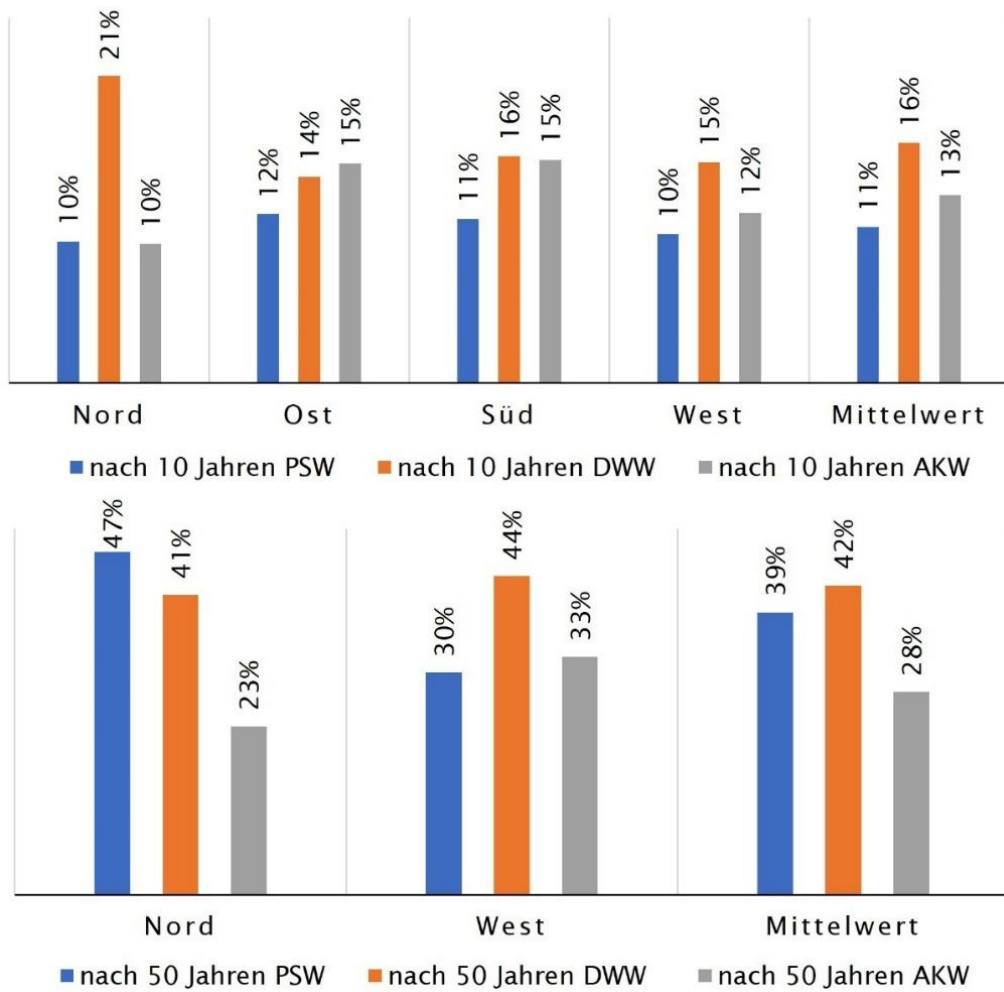
Quelle: Welle et al. 2022, S. 199 f.

Entwicklung der Waldumbaupläche

Simuliert wurden für den vorliegenden Bericht Waldumbaupläche mit sehr schlechter Naturnäheklasse (ca. 6 Mio. ha in Deutschland), hier ist der Anteil an naturfernen Standflächen mit 56 % recht hoch (ca. 3,4 Mio. ha) (Welle et al. 2018; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 200). Zum größten Teil sind diese Flächen mit Fichten und Kiefern bestockt. In Hochlagen können Fichten von Natur aus vorkommen, daher fokussiert die Untersuchung nur auf die Standorte in der planaren, kollinen und submontanen Höhenstufe, die mit naturfernen Baumarten bestockt sind. Daraus ergibt sich für Deutschland eine umzubauende Fläche von 2,87 Mio. ha oder 28 % der gesamten Waldfläche. Zwischen 2000 und 2017 wurden im Schnitt 22.000 ha Wald pro Jahr umgebaut (Bolte et al. 2021b), entsprechend müssten bis 2050 2,85 Mio. ha Wald umgebaut werden (ca. 95.000 ha/Jahr), eine Vervierfachung der bisherigen Umbaugeschwindigkeit.

In der DWW werden den waldbaulichen Simulationen zufolge in den ersten 10 Jahren in allen Regionen die größten Waldflächen umgebaut, im Mittel 16 % (1,6 %/Jahr), in der AKW mit 13 % die zweitmeisten Waldflächen innerhalb von 10 Jahren und in der PSW sind es 11 % aller Waldflächen (Abb. 5.7; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 200 f.). Nach 50 Jahren wurden in der DWW im Mittel 42 % aller Waldflächen umgebaut, in der PSW 39 % und in der AKW 28 %. Das bedeutet, dass pro Jahr im Mittel in der DWW 0,84 %, in der PSW 0,78 % und in der AKW 0,56 % der Waldfläche umgebaut werden. Damit erreicht nur die DWW grob die geforderte Umbaurate von 0,87 %/Jahr, allerdings unter Inkaufnahme eines höheren Anteils naturferner Baumarten und damit einhergehenden höheren Kosten. Die Ergebnisse für den Waldumbau ergeben sich primär aus den Flächen, die dafür geeignet sind. Das heißt, Faktoren wie Altersstruktur und Erntezustand werden dabei berücksichtigt. Bäume wachsen langsam und man kann einen Systemwandel nicht sofort vollziehen, sondern die wachstumskundlichen, standorttypischen und ökologischen Gegebenheiten und Prozesse beim Waldumbau sind zu berücksichtigen.

Abbildung 5.7 Prozentuale Anteile der Waldumbauffläche im zeitlichen Verlauf, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW)

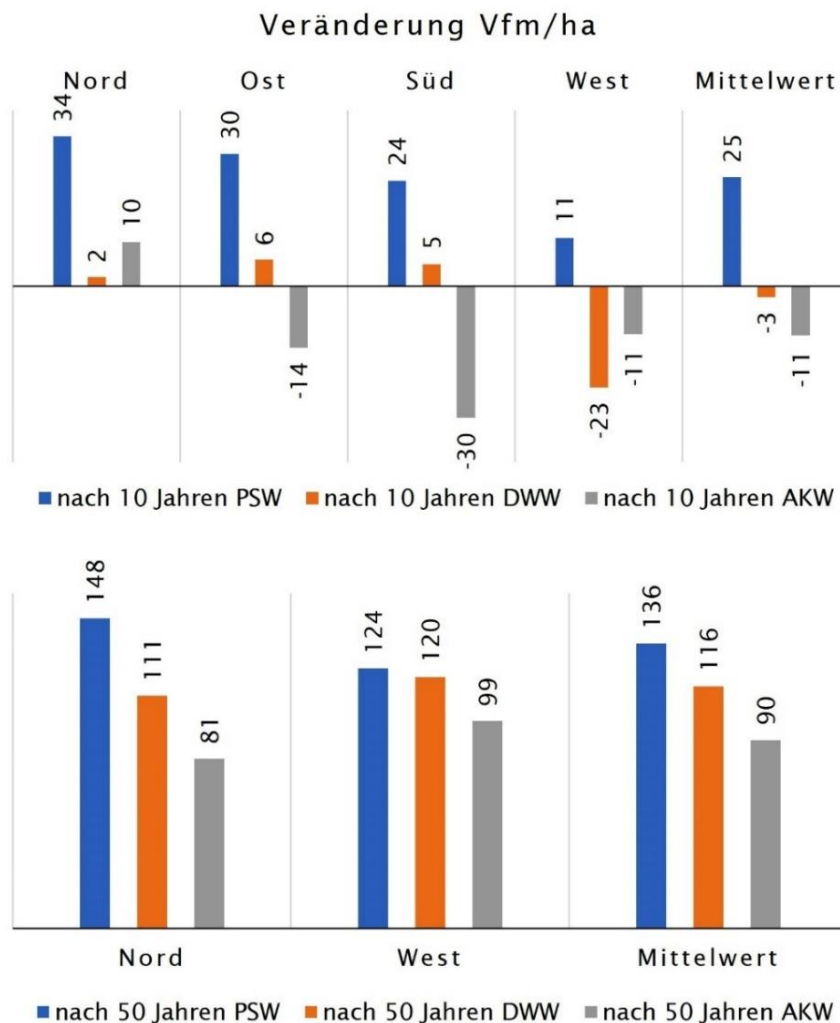


Quelle: Welle et al. 2022, S.201

Entwicklung der Holzvorräte

Bei der PSW steigen nach 10 Jahren in allen Regionen die Holzvorräte um durchschnittlich 25 Vfm/ha (2,5 Vfm/ha/a) und nach 50 Jahren um durchschnittlich 136 Vfm/ha (Abb. 5.8; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.201 f.).

Abbildung 5.8 Entwicklung der Holzvorräte, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen



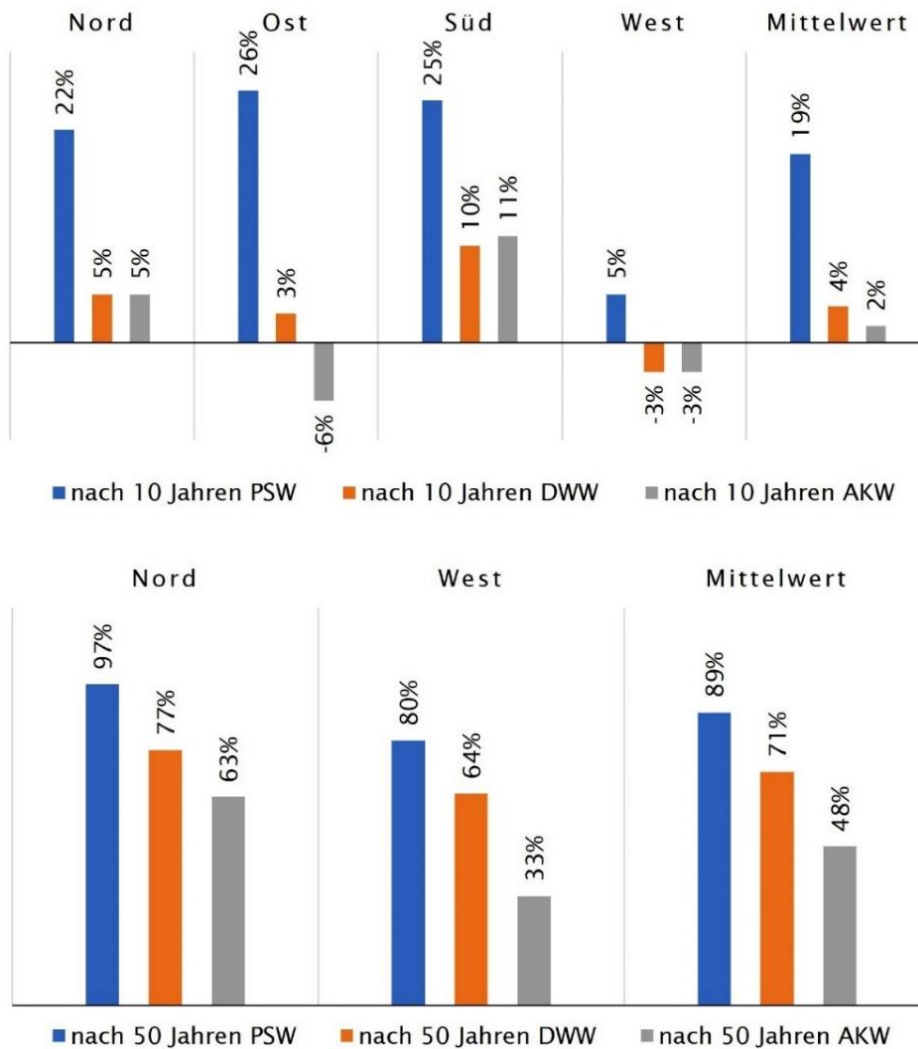
Quelle: Welle et al. 2022, S.201

In der DWW reduzieren sich die Holzvorräte im Mittel über alle Regionen um 3 Vfm/ha und halten damit nach 10 Jahren das anfängliche Niveau. Nach 50 Jahren allerdings steigen die Holzvorräte in der DWW stark an, im Mittel um 116 Vfm/ha. In der AKW wird der Holzvorrat in allen Regionen außer der Region Nord in den ersten 10 Jahren reduziert, im Mittel um 11 Vfm/ha, um hohe Erntemengen erzielen zu können. Nach 50 Jahren steigen die Holzvorräte pro ha in der AKW ebenfalls wieder an, allerdings nicht so hoch wie in der PSW oder der DWW (im Schnitt um 90 Vfm/ha).

Mit der Zielvorgabe, Wälder mit mehr Laubholz zu entwickeln, schneidet die PSW bei der Entwicklung der Laubholzanteile nach 10 Jahren am besten ab (Abb. 5.9; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 202). Die DWW und AKW hingegen setzen beim Waldumbau nicht primär auf standortheimische Laubbaumarten, sondern auch stark auf Nadelbaumarten wie beispielsweise die Douglasie. Nach 10 Jahren sind die Laubholzvorräte in der Region Nord durch die PSW um mehr als ein Fünftel angestiegen, während sie in der DWW und AKW um lediglich 5% gewachsen sind. Im Schnitt über alle vier Regionen erhöhen sich die Laubholzvorräte nach 10 Jahren in der

PSW um 19%, in der DWW um 4% und in der AKW um 2%. Nach 50 Jahren entwickeln sich die Laubholzvor-
räte in der AKW und in der DWW noch positiver, allerdings schneidet auch hier die PSW mit 89% Anstieg im
Durchschnitt am besten ab.

Abbildung 5.9 Entwicklung der Laubholzvorräte, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen



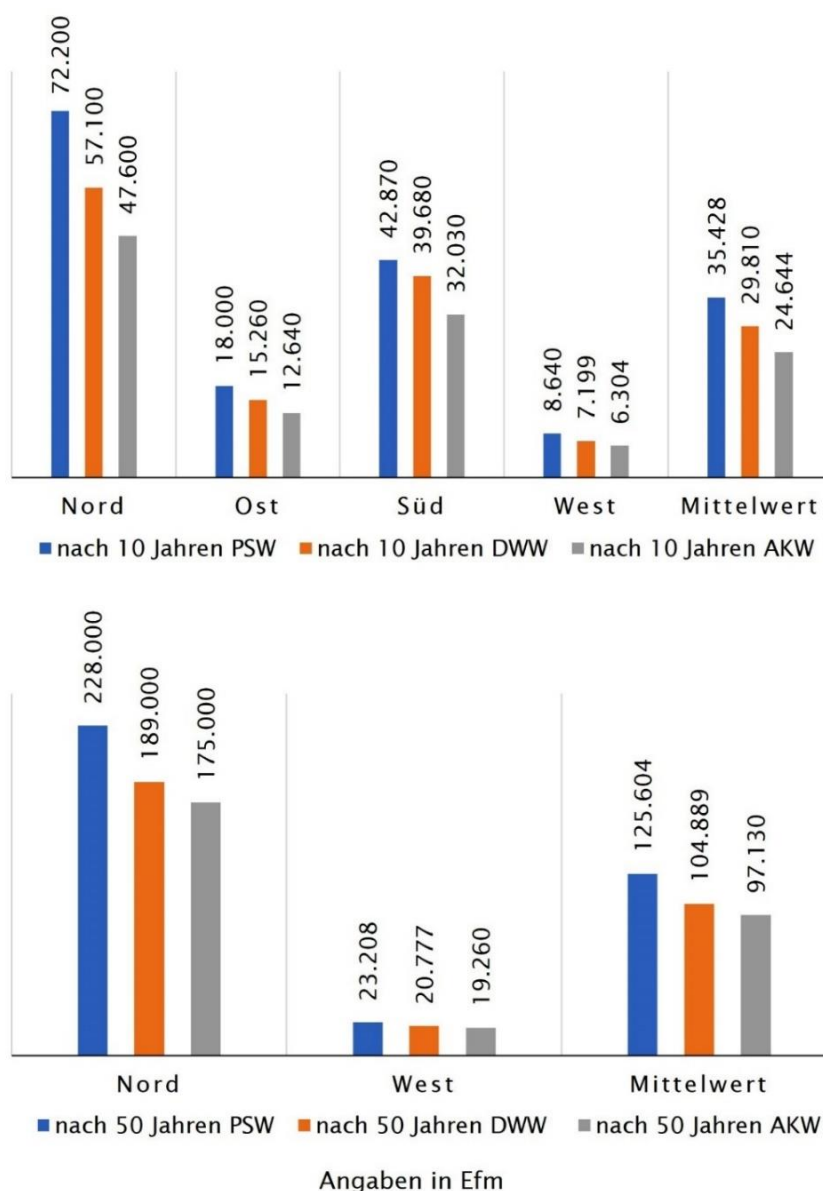
Quelle: Welle et al. 2022, S.202

Entwicklung der Starkholzsortimente

Die Entwicklungen der Vorräte im Laub- und Nadelholz haben Auswirkungen auf das Stammholzvolumen und somit auch auf die Entwicklung der Holzsortimente (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 202 f.).

Da auch die Anzahl alter, dicker Bäume für die Biodiversität sowie für den Klimaschutz von großer Relevanz ist (Wohlgemuth et al. 2022), wird hier auf die Entwicklung der Starkholzsortimente eingegangen. Starkholzsortimente bestehen aus den Klassen 4, 5 und 6, welche einen Mitteldurchmesser⁷² von 40 bis 49 cm (Klasse 4), 50 bis 59 cm (Klasse 5) und 60 bis 69 cm (Klasse 6) haben. Nach 10 Jahren entwickeln sich in der PSW in allen Regionen sowie im Durchschnitt – im Vergleich der Bewirtschaftungstypen – im Starkholz die größten Holzvolumina (Abb. 5.10). Die DWW verzeichnet im Mittel 16% weniger Erntefestmeter in den Starkholzsortimenten als die PSW, bei der AKW beträgt die Differenz 31%. Nach 50 Jahren zeichnen sich ähnliche Ergebnisse ab, hierbei fallen in der DWW weiterhin 16% und in der AKW 23% weniger Starkholz an als bei der PSW.

Abbildung 5.10 Entwicklung der Starkholzsortimente (Klassen 4, 5 und 6), aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen



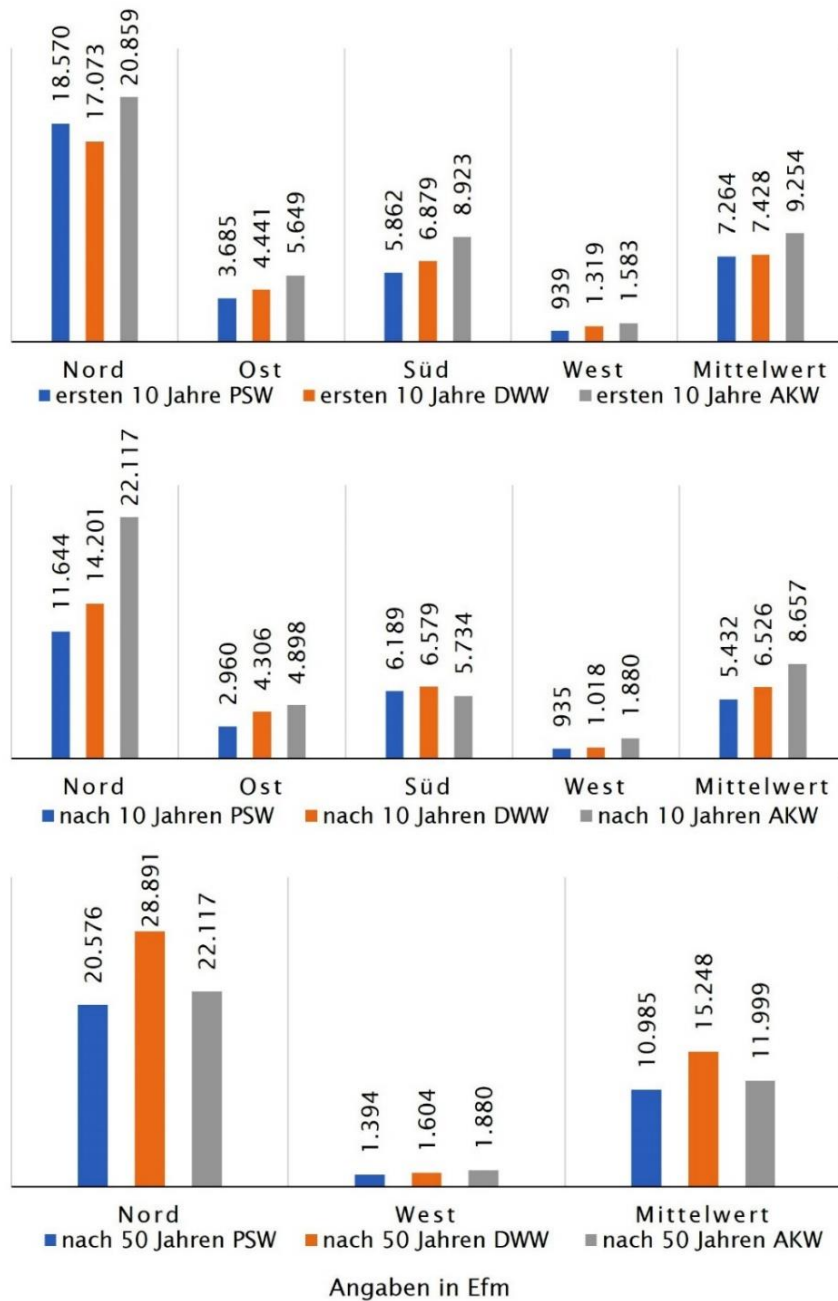
Quelle: Welle et al. 2022, S.203

⁷² Der Mitteldurchmesser ist der Durchmesser des liegenden Baumstammes, der genau in dessen Mitte gemessen wird.

Entwicklung der Erntemenge

Die Entwicklung der Erntemengen ist abhängig vom Betriebsziel des jeweiligen Bewirtschaftstyps (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.203). Durch die geringeren Hiebsätze fallen in den ersten 10 Jahren in der PSW und der DWW ca. 20% weniger Holz an als in der AKW (Abb. 5.11). Dieses Verhältnis verschiebt sich nach den ersten 10 Jahren zu 37% weniger Erntemenge in der PSW als in der AKW und 25% weniger in der DWW verglichen mit der AKW. Nach 50 Jahren wird in der DWW am meisten geerntet.

Abbildung 5.11 Entwicklung der Holzerntemengen, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftstypen

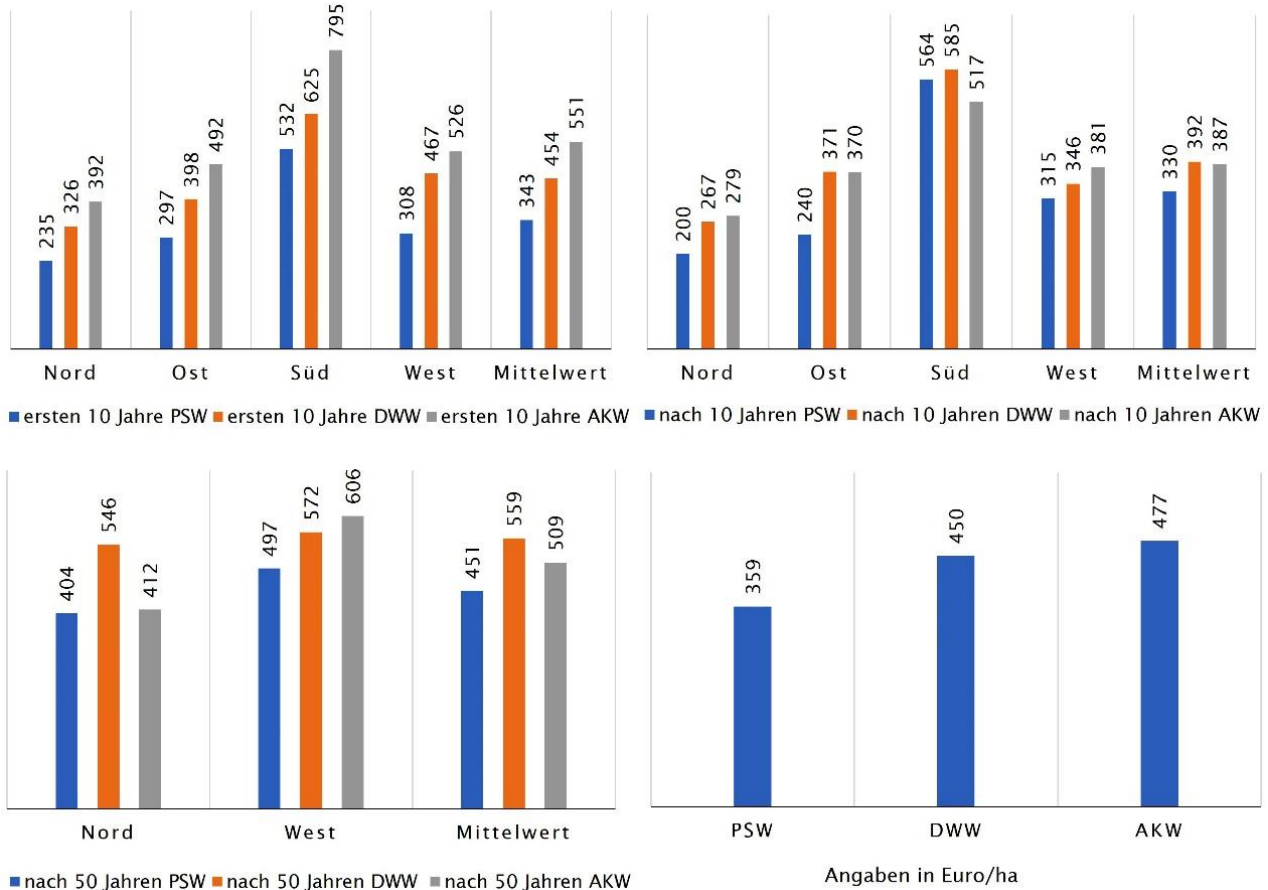


Quelle: Welle et al. 2022, S.203

Entwicklung der Holzerlöse

Da die zukünftige Entwicklung der Holzpreise nicht vorhersehbar ist, wurde in den Planungen mit konstanten Preisen für die unterschiedlichen Holzsortimente gerechnet (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 204). Die Holzerlöse je ha fallen in der PSW über alle Zeiträume hinweg am geringsten aus, da auch am wenigsten geerntet wird (Abb. 5.12). Im Laufe der Zeit werden die Unterschiede zu den anderen Bewirtschaftungstypen geringer, da im Starkholz höhere Erlöse erzielt werden.

Abbildung 5.12 Entwicklung der Holzerlöse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen

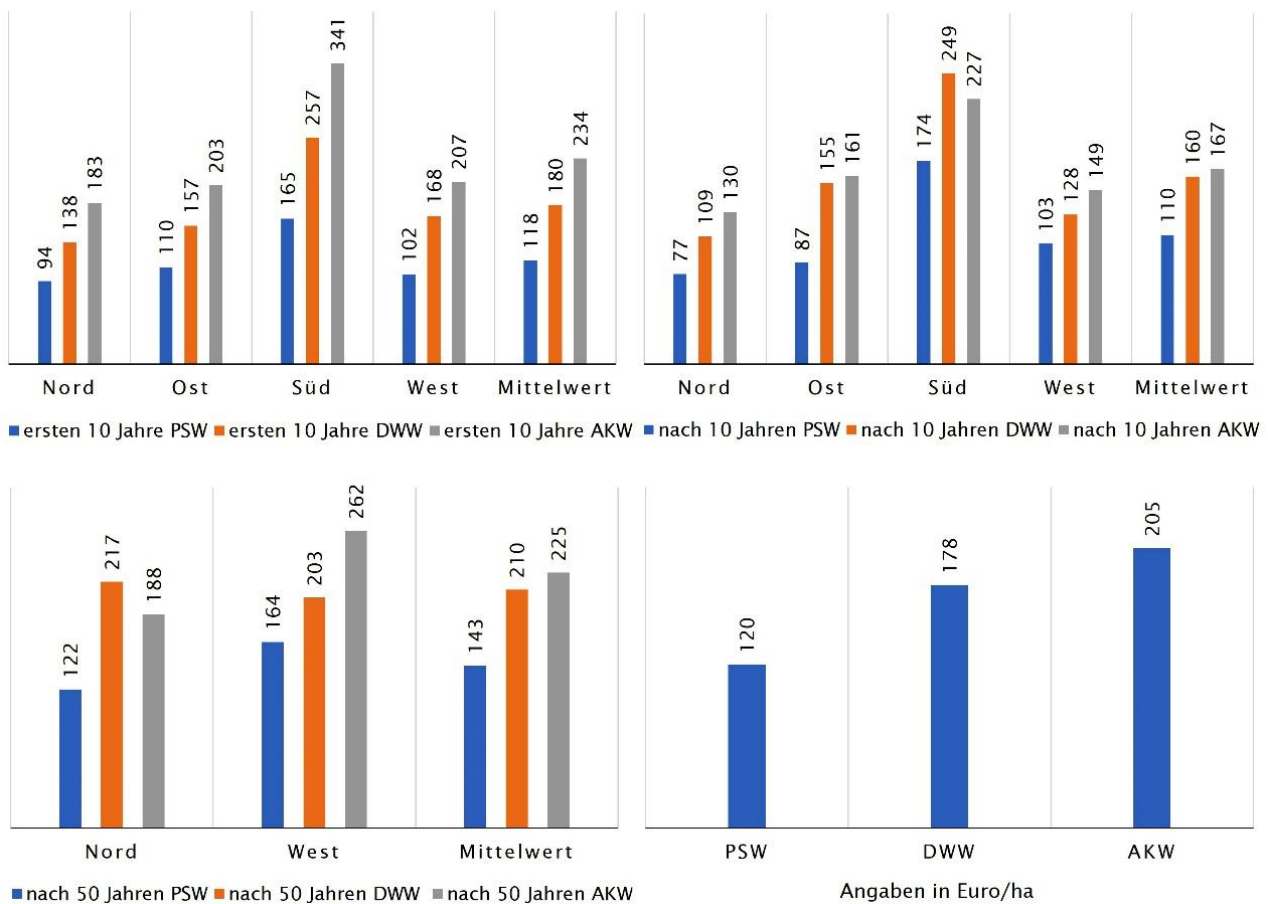


Quelle: Welle et al. 2022, S.204

Entwicklung der Holzerntekosten

Bei den Holzerntekosten wurden die gleichen Annahmen getroffen wie bei den Holzerlösen, es wurde mit konstanten Kosten gerechnet (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.204 f.). Die Holzerntekosten sind bei der PSW über alle Zeiträume hinweg am geringsten, gefolgt von der DWW und der AKW (Abb. 5.13). Im Mittel belaufen sich die Holzerntekosten über alle Regionen und alle Zeitschnitte in der PSW auf 120 Euro/ha, in der DWW auf 178 Euro/ha und in der AKW auf 205 Euro/ha. Eine Erklärung für die geringeren Holzerntekosten je Hektar bei der PSW im Vergleich zur DWW und AKW sind auch hier zum Teil die geringeren Erntemengen.

Abbildung 5.13 Entwicklung der Holzerntekosten, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen

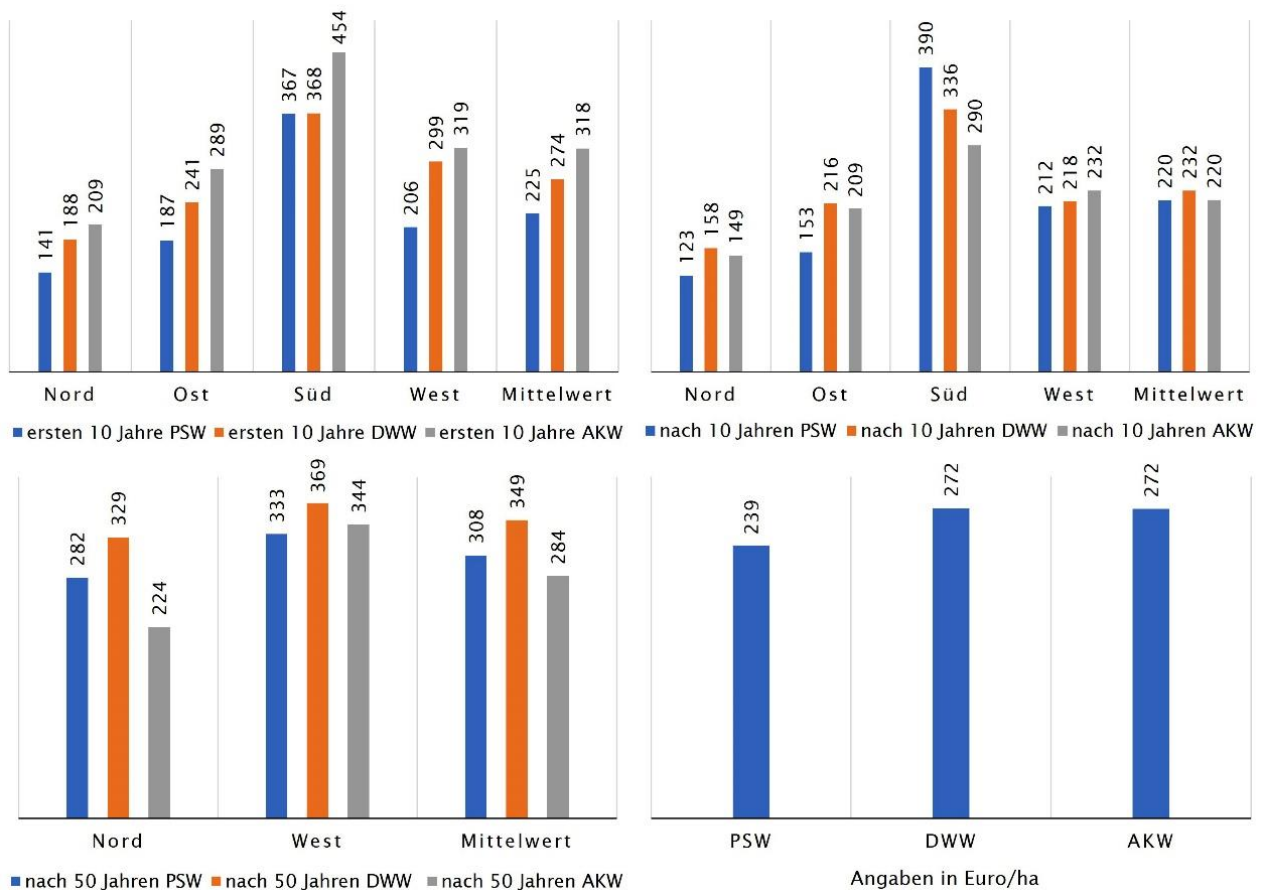


Quelle: Welle et al. 2022, S.205

Entwicklung der erntekostenfreien Erlöse

Die Entwicklung der erntekostenfreien Erlöse errechnet sich aus der Differenz der Holzerlöse und der Holzerntekosten (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.205). Aufgrund der geringsten Erntemengen fallen die erntekostenfreien Erlöse bei der PSW in den ersten 10 Jahren im Mittel am geringsten aus. Aber schon nach 10 Jahren sind die PSW-Ergebnisse im Mittel mit denen der AKW vergleichbar und schneiden in der Region Süd sogar am besten ab (Abb. 5.14). Über alle Regionen und Zeiträume gemittelt sind die erntekostenfreien Erlöse in der AKW und DWW mit 272 Euro/ha gleich hoch, gefolgt von der PSW mit 239 Euro/ha.

Abbildung 5.14 Entwicklung der erntekostenfreien Erlöse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen

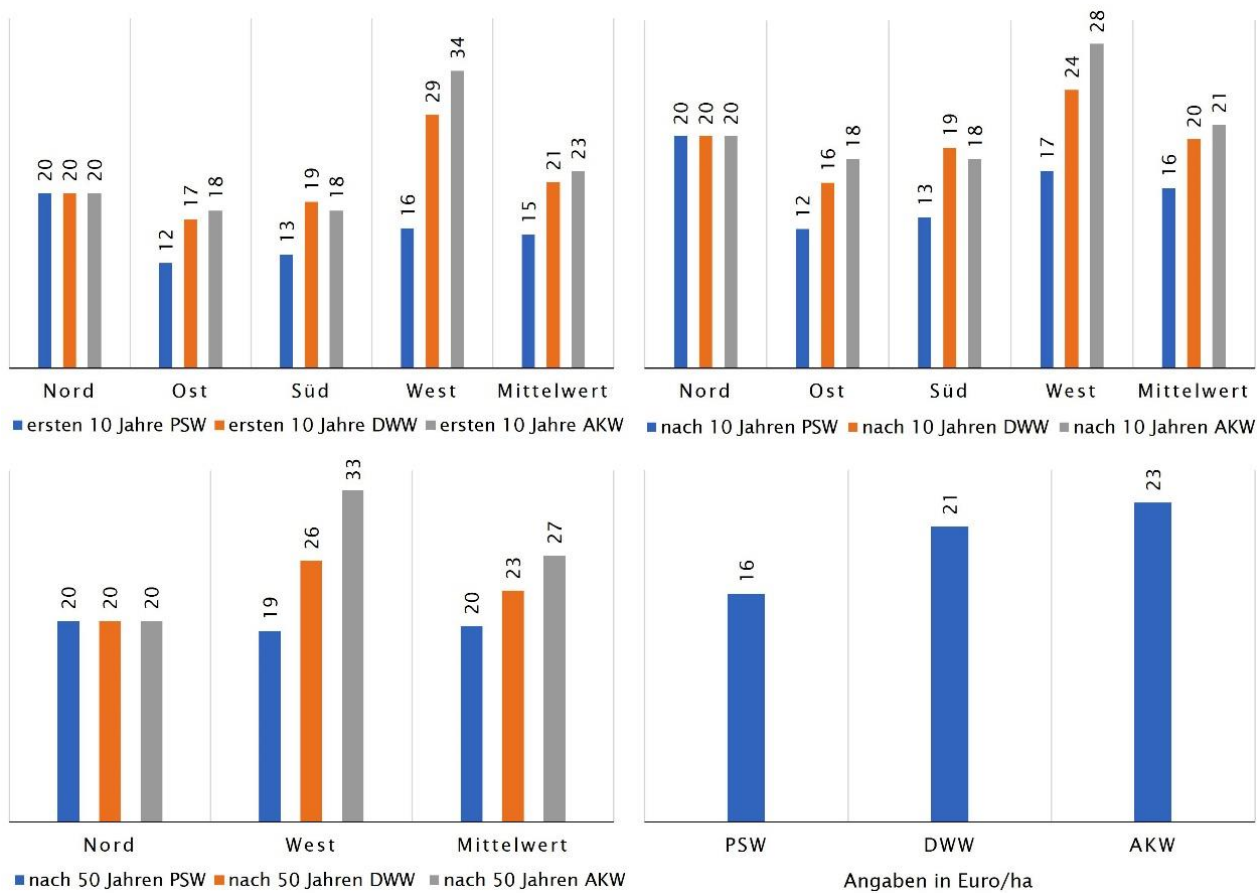


Quelle: Welle et al. 2022, S.206

Entwicklung der sonstigen Erlöse

Die sonstigen Erlöse beinhalten Jagderlöse, Erlöse aus der Selbstwerbung sowie der Saatgutgewinnung (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 206). Unterschiede zwischen den Eigentumsarten betreffen insbesondere die Entwicklung der Erlöse aus der Selbstwerbung⁷³, welcher in Kommunal- und Privatwäldern mehr Bedeutung eingeräumt wird als im Staatswald. Die Entwicklung der sonstigen Erlöse ist in der AKW über alle Regionen und Zeiträume hinweg am höchsten (23 Euro/ha), gefolgt von der DWW mit 21 Euro/ha und der PSW mit 16 Euro/ha (Abb. 5.15).

Abbildung 5.15 Entwicklung der sonstigen Erlöse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen



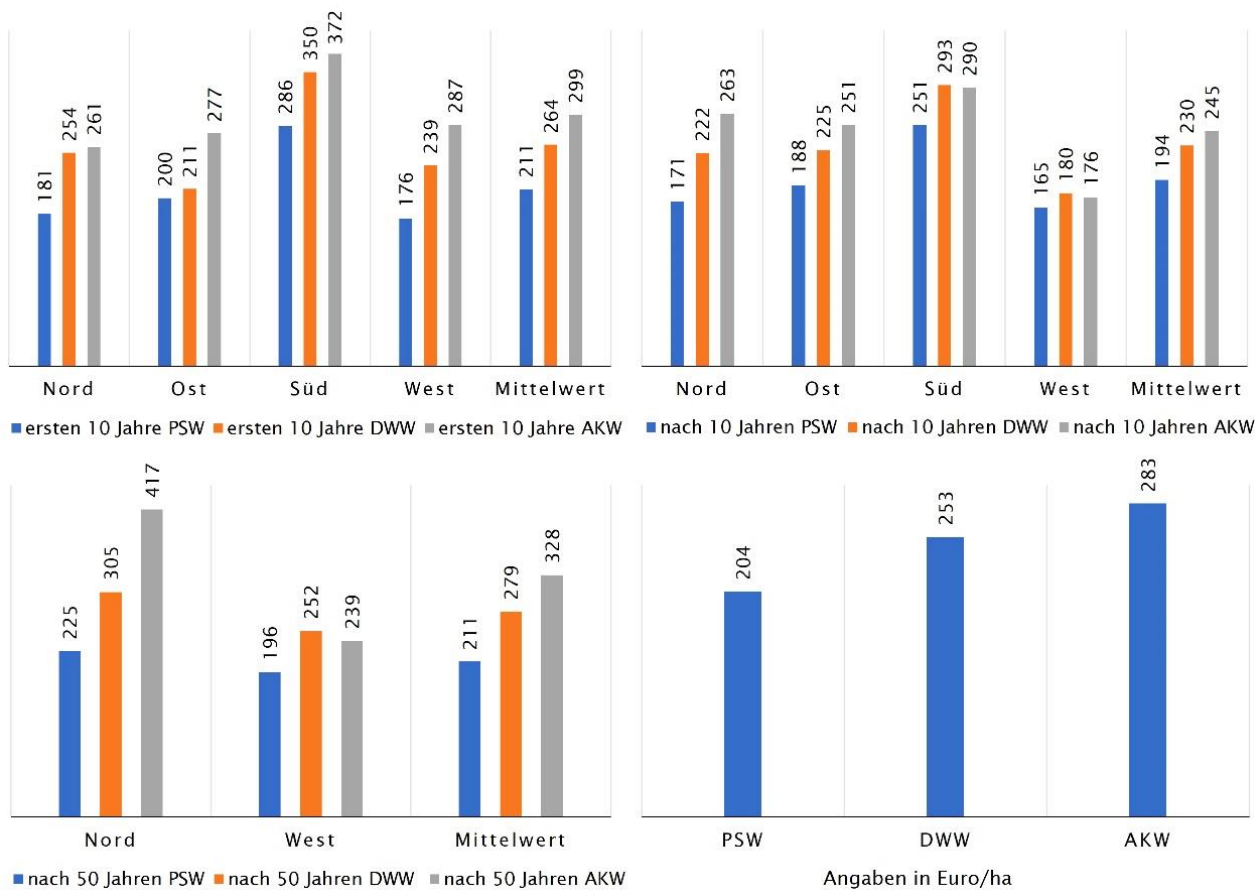
Quelle: Welle et al. 2022, S. 206 f.

⁷³ Als Selbstwerbung wird die Aufbereitung und teilweise auch vorherige Fällung von Holz durch die Käufer/innen bezeichnet (z. B. bei Brennholz).

Entwicklung der Betriebskosten

In den Betriebskosten sind beispielsweise Kosten für die Reviere (Mitarbeitende) und die laufenden Kosten von Bürogebäuden enthalten (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.207). Ein wesentlicher Punkt in den Simulationen und Berechnungen fokussiert auf den Waldumbau bzw. die Entwicklung in Richtung naturnahe Strukturen. Viele Forstbetriebe haben diese Kosten nicht eingeplant. Daher können die Betriebskosten im Vergleich zu den Angaben beispielsweise im »Testbetriebsnetz Forst« höher ausfallen. Die Betriebskosten sind in der PSW in allen Regionen sowohl kurz- als auch langfristig am niedrigsten und betragen – über alle Regionen und Zeiträume gemittelt – 204 Euro/ha (DWW: 253 Euro/ha; AKW: 283 Euro/ha) (Abb. 5.16).

Abbildung 5.16 Entwicklung der Betriebskosten, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen



Quelle: Welle et al. 2022, S.207 f.

Entwicklung der flächenbezogenen Betriebsergebnisse

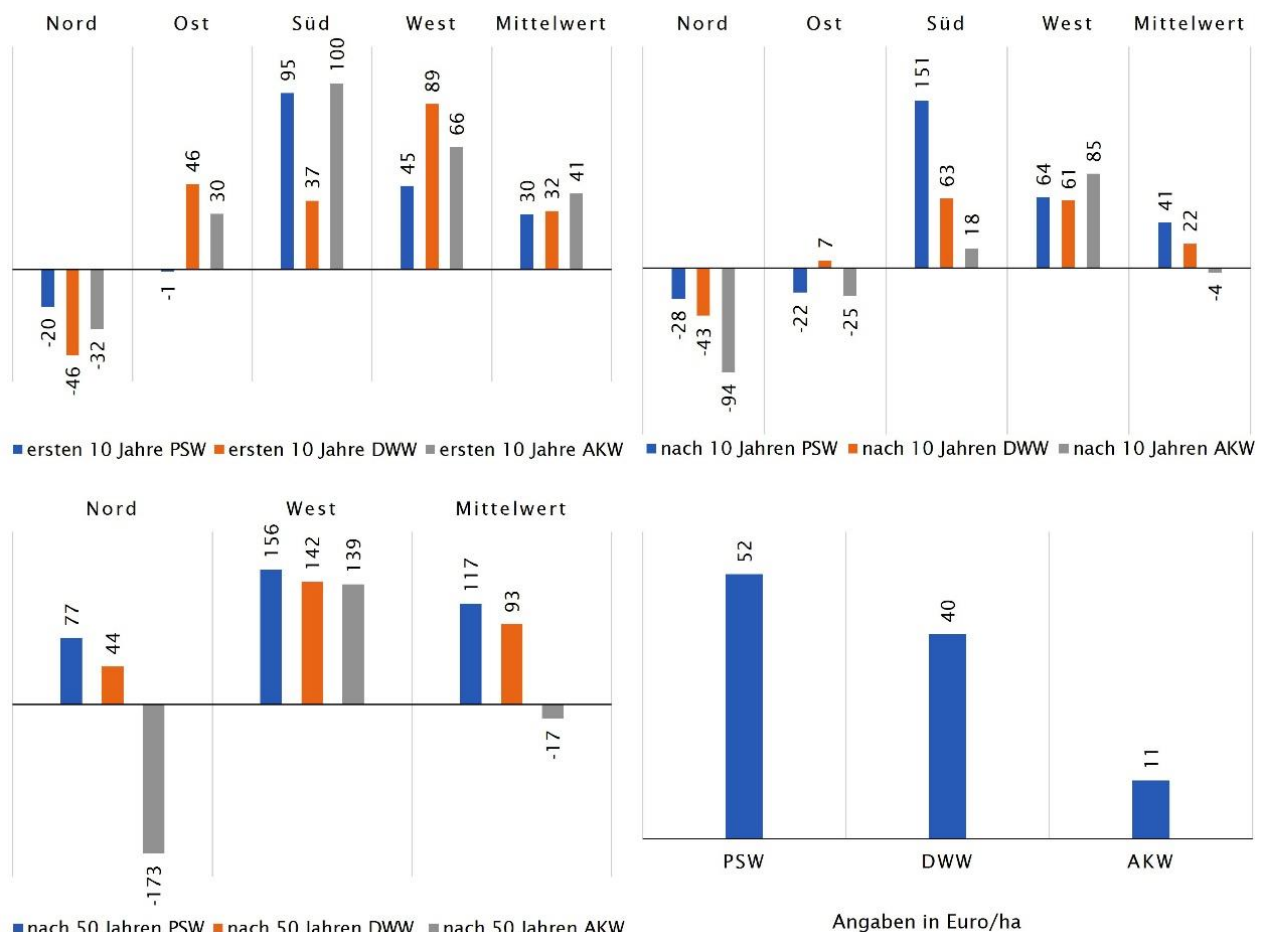
Eine relevante betriebswirtschaftliche Vergleichsgröße ist das flächenbezogene Betriebsergebnis (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.208). In den ersten 10 Jahren erreicht über alle Regionen und Eigentumsarten die AKW mit einem Betriebsergebnis von 41 Euro/ha das beste Ergebnis, gefolgt von der DWW mit 32 Euro/ha und der PSW mit 30 Euro/ha (Abb. 5.17). Nach 10 Jahren Waldumbau ändern sich die Betriebsergebnisse in allen Regionen und Eigentumsarten. Im Mittel erreicht hierbei die PSW mit 41 Euro/ha das beste Ergebnis, gefolgt von der DWW mit 22 Euro/ha und einem knapp negativen Ergebnis in der AKW von -4 Euro/ha.

Generell schwankt das Betriebsergebnis relativ stark zwischen den Regionen, was auf die unterschiedliche Ausgangssituation der Betriebe im Bereich der Baumartenzusammensetzung zurückzuführen ist. Grob zusammengefasst sind in der Region Nord und Ost die Kiefernanteile am höchsten (Nord: 47,3% und Ost: 37,2%) und in der Region Süd mit 52,7% und der Region West mit 39,1% die Fichtenanteile. Auch die Eigentumsarten haben einen Einfluss. Interessant ist, dass durch die AKW nach 50 Jahren in der Region Nord, also dem Staatswald, die Ergebnisse kontinuierlich schlechter werden, angefangen bei -32 Euro/ha, über -94 Euro/ha bis auf -173 Euro/ha,

während in den gleichen Zeiträumen und mit der gleichen Bewirtschaftungsweise im Privatwald West mit 300 ha das Betriebsergebnis immer besser wird, zuerst bei 66 Euro/ha, dann bei 85 Euro/ha und nach 50 Jahren bei 139 Euro/ha. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass im Privatwald weniger Fixkosten durch Gebäude und Verwaltung anfallen und die Personalkosten durch Drittanbieter für die Holzernte gesenkt werden können, während im Staatsbetrieb die Kostenstruktur für die eigenen Mitarbeiter/innen höher ausfallen.

Zusammengefasst und über alle Regionen, Eigentumsarten und Zeiträume gemittelt, weist die PSW mit 52 Euro/ha das höchste flächenbezogene Betriebsergebnis auf, gefolgt von der DWW mit 40 Euro/ha und der AKW mit 11 Euro/ha.

Abbildung 5.17 Entwicklung der Betriebsergebnisse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen



Quelle: Welle et al. 2022, S.209

5.2.3 Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen

Die Resultate der Simulationen und Kalkulationen für den vorliegenden Bericht basieren auf realistischen waldbaulichen und betriebsökonomischen Entscheidungen für die Bewirtschaftung fiktiver Forstbetriebe. Um die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der unterschiedlichen waldbaulichen Herangehensweisen im Kontext des naturnahen Waldumbaus einzuordnen, ist der Vergleich der erzielten Daten mit anderen vorliegenden Studien hilfreich bzw. sinnvoll.

Die über alle vier Regionen für die Ausgangssituation gemittelten Vorräte (354 Vfm/ha) entsprechen beinahe exakt dem in der 3. BWI festgestellten Wert (358 Vfm/ha) (BMEL 2021b; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.211). Es sind also die Holzvorräte, die aus den BWI-Daten für eine sehr schlechte Naturnäheklasse gefiltert wurden, mit denen für ganz Deutschland praktisch identisch. Die sich aus den waldbaulichen Simulationen ergebende positive Entwicklung des Holzvorrats beläuft sich in 50 Jahren auf 18% (AKW), 26% (DWW) bzw.

32 % (PSW), was 0,36 bis 0,64%/Jahr entspricht. In der Vergangenheit wurden zwischen 2002 und 2008 Vorratssteigerungen von 8 % gemessen (also etwas mehr als 1%/Jahr), und zwischen 2012 und 2017 (in 6 Jahren) von 6 %, also 1%/Jahr (BMEL 2021b). Die Differenz zwischen den Vorratszunahmen in der Vergangenheit und den für die Zukunft simulierten Zunahmen erklärt sich zum einen aus der Notwendigkeit, den Waldumbau zukünftig stärker zu forcieren und dafür Raum in der Hauptbestandesschicht zu schaffen, und zum anderen aus der Annahme, dass Fichtenbestände durch ein Fortschreiten von Kalamitäten sukzessive zurückgehen werden. Tatsächlich hat dieser Rückgang mit den flächigen Zusammenbrüchen der Fichtenforsten, vor allem von 2018 bis 2020, bereits begonnen. Seither dürfte der Holzvorrat (aller Baumarten) gar nicht mehr zugenommen, sondern insgesamt sogar abgenommen haben.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse bietet sich außerdem mit zwei empirischen Langzeituntersuchungen an, die regelmäßig ökonomische Daten einer statistisch möglichst belastbaren und repräsentativ ausgewählten Zahl von Forstbetrieben in Deutschland erheben (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 211). Beide Untersuchungen, das »Testbetriebsnetz Forst« und der »BB-Forstvergleich« (z. B. Blomberg et al. 2022), werden jährlich wiederholt. Als Bezugsjahr für den Vergleich mit den Resultaten der Simulation im Gutachten von Welle et al. (2022) für den vorliegenden Bericht wurde 2017 gewählt, also das letzte von den folgenden großflächigen Zusammenbrüchen der Fichtenforsten unbeeinflusste Jahr. Eine relativ gute Vergleichbarkeit ist auch deshalb gegeben, weil die Simulationen auf Daten aus der 3. BWI beruht, die vor 2017 abgeschlossen wurde. Die Daten, die in diesen beiden Untersuchungen erhoben werden, basieren zwar auf Durchschnittswerten aller Bewirtschaftungsweisen, aber der Anteil von Altersklassenwaldflächen lag laut »Testbetriebsnetz Forst« zufolge 2017 in Privatwaldbetrieben bei 96 % und in Kommunalwäldern bei 94 % (BMEL 2019). Deswegen können die Ergebnisse aus den empirischen Untersuchungen mit den Simulationsergebnissen für Altersklassenwaldwirtschaft aus Welle et al. (2022) verglichen werden. Die betriebsökonomischen Kennziffern erntekostenfreier Holzerlöse (auch Teilaspekte) und der Aufwand im Produktbereich Holz sind insgesamt ähnlich (Tab. 5.7). Bedeutsame Ausnahmen bestehen in den Unterschieden bei den Reinerträgen bzw. Betriebsergebnissen. Das ist dem besonderen Aufwand, den der Waldumbau (besonders in fichtendominierten Betrieben) notwendig macht, geschuldet. Auch der augenfällige Unterschied bei den Hiebsätzen in Fichtenbetrieben hängt mit den Erfordernissen des Waldumbaus zusammen, da besonders in Fichtenforsten die Reduktion der Standflächenanteile der Fichte ansteht, um Verjüngungsflächen (im Wesentlichen mit anderen Baumarten) zu entwickeln.

Tabelle 5.7 Vergleich der betriebsökonomischen Simulationsergebnisse mit Daten aus »Testbetriebsnetz Forst« und »BB-Forstvergleich«

	»Testbetriebsnetz Forst« (2017)	»BB-Forstvergleich«	Welle et al. 2022, Ausgangssituation	
	<i>fichtendominierte Privatwälder</i>	<i>»Fichtengruppe«-Privatwälder</i>	<i>fichtendominierte Privatwälder unter AKW im Süden/Westen</i>	
Hiebsatz (Efm/ha)		7,2	6,8	11,1/7,1
erntekostenfreie Holzerlöse, alle Holzarten (Euro/Efm)		50,8	45	46/50
Ertrag/erntekostenfreie Holzerlöse (Euro/ha)		593	461 (ohne Jagd)	454/319 (mit Jagd)
Aufwand/Betriebskosten (Euro/ha)		236	285	372/287
Reinertrag/Betriebsergebnis		143	187 (ohne Jagd)	100/66 (mit Jagd)

	»Testbetriebsnetz Forst« (2017)	»BB-Forstvergleich«	Welle et al. 2022, Ausgangssituation
	<i>kieferndominierte Kommunalwälder</i>	<i>»Kieferngruppe«-Privatwälder</i>	<i>kieferndominierte Staats- und Kommunalwälder unter AKW im Norden/Osten</i>
erntekostenfreie Holzerlöse, alle Holzarten (Euro/Efm)	39,5	36	39/45
Ertrag/erntekostenfreie Holzerlöse (Euro/ha)	257	284 (ohne Jagd)	210/289 (mit Jagd)
Aufwand Produktbereich Holz und andere Erzeugnisse/Aufwand/Betriebskosten (Euro/ha)	180	163	261/277
Reinertrag I/Betriebsergebnis (Euro/ha)	54	130 (ohne Jagd)	-32/30 (mit Jagd)

Quelle: Welle et al. 2022, S.212

Abschließend lohnt sich noch ein Vergleich der vorliegenden Simulationsergebnisse mit drei anderen Studien (Berner 2016; Duda 2006; Knoke 2009). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.8 vergleichend dargestellt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S.214).

Tabelle 5.8 Vergleich wichtiger Ergebnisse von Welle et al. 2022 mit Ergebnissen aus anderen Studien

	Welle et al. 2022	Duda 2006	Berner 2016	Knoke 2009
Methode	Simulation	Simulation	Simulation	Review vor allem von empirischen Studien
Betrachtungszeitraum	50 Jahre	40 Jahre	60 Jahre	keine Angaben
betrachtete Bewirtschaftungsweisen	AKW, DWW, PSW	»ERTRAG« (ungefähr: AKW), »LÖWE« (ungefähr: DWW)	AKW, DWW	AKW, DWW
Untersuchungsgegenstand	naturnaher Waldumbau	naturnaher Waldumbau	Betrachtet wird nicht naturnaher Waldumbau, sondern starke Durchforstungen und anschließende alternative Verjüngungsverfahren ohne Umbauziel.	Betrachtet wird nicht Waldumbau, sondern die Wirtschaftlichkeit des Status quo.

	Welle et al. 2022	Duda 2006	Berner 2016	Knoke 2009
<i>Waldentwicklung</i>				
Holzvorrat gesamt	»Holzvorräte«: PSW > DWW > AKW	»Derbholzvorrat«: PSW = DWW > AKW	keine Angaben	keine Angaben
Starkholzvorrat	»Starkholz«: PSW > DWW > AKW	keine Angaben	»Starkholz«: DWW > AKW	keine Angaben
Holzerntemengen	»Holzerntemengen«: DWW > AKW > PSW	»Vornutzungsmasse«: AKW ≈ DWW > PSW »Endnutzungsmasse«: AKW > PSW > DWW	»Erntemenge«: AKW > DWW	keine Angaben
Naturnähe der Baumartenzusammensetzung	»Laubholzvorräte«: PSW > DWW > AKW	»Zielerreichungsprozent«: DWW > AKW (keine Aussagen zu PSW)	keine Angaben	keine Angaben
<i>Wirtschaftlichkeit</i>				
erntekostenfreie Erlöse	»erntekostenfreie Erlöse«: DWW > PSW > AKW	»erntekostenfreie Holzerlöse Vornutzungen«: DWW ≈ PSW ≈ AKW »erntekostenfreie Holzerlöse Endnutzungen«: AKW > PSW > DWW	»Deckungsbeitrag«: AKW > DWW	»Nettoholzerlöse«: DWW > AKW (Ammon 1951, Schütz 1985, Schulz 1993, Knoke 1997, in Knoke 2009); »Gesamterfolg pro Fm Holzeinschlag (ohne Ausgaben für Verwaltungspersonal und Unternehmerleistungen)«: DWW > AKW (Mohr/Schori 1999, in Knoke 2009)
Betriebsergebnis	»Betriebsergebnis«: PSW > DWW > AKW	keine Angaben	keine Angaben	»Betriebserfolg«: Ertrag – Aufwand): DWW > AKW (Mayer 1968, Siegmund 1973, Hanewinkel 2001, in Knoke 2009) DWW ≈ AKW (Hanewinkel 1998, Knoke 2009)

Quelle: Welle et al. 2022, S.215 f.

Duda (2006) nahm ebenfalls eine Simulation vor, wichtige Befunde zur Waldentwicklung stimmen mit den vorliegenden Simulationsergebnissen überein: Bei PSW oder DWW werden höhere Holzvorräte als in der AKW aufgebaut, bei der Holzerntemenge ist die AKW zumindest der PSW überlegen. Außerdem kommt Duda (2006) ebenso zum Ergebnis, dass sich die Naturnähe bei der DWW günstiger als bei der AKW entwickelt. Knoke (2009), der die Ergebnisse einer Vielzahl von Publikationen auswertete, befasste sich mit der Wirtschaftlichkeit von der DWW im Vergleich zu der AKW. Die Studie zeigt wie auch die hier zugrunde liegende Simulation für die erntekostenfreien Erlöse im eindeutigen Ergebnis, dass die DWW der AKW überlegen ist. Duda (2006) und Berner (2016) schlussfolgern dagegen, dass sich mit der AKW höhere erntekostenfreie Erlöse als bei der DWW erzielen lassen. Zumindest bei letztgenannter Untersuchung wird Verzinsung als wesentlicher Faktor für die Überlegenheit der AKW gegenüber der DWW kalkuliert. Verzinsungseffekte wurden aus den in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Gründen in Welle et al. (2022) nicht berücksichtigt.

Obwohl die erwähnten Untersuchungen methodisch sehr unterschiedlich sind und teilweise auch unterschiedlichen Aspekten nachgehen, sprechen die Ergebnisse insgesamt dafür, dass die DWW und die PSW gegenüber der AKW in waldbaulicher sowie langfristiger betriebswirtschaftlicher Hinsicht im Vorteil sind. Kurzfristig lassen sich mit der AKW in der Regel zwar die höheren Holzerlöse erzielen, langfristig betrachtet scheint jedoch eine Überführung in Dauerwald eher finanzielle Vorteile gegenüber der Bewirtschaftung von Altersklassenwald aufzuweisen. Dabei ist das höhere Risiko (Sturm, biotische Schäden) der Altersklassenwaldwirtschaft noch nicht mit einbezogen (Spathelf 2022, S. 63). Was den Umbaufortschritt angeht (Diversifizierung und Naturnähe der Bestockungszusammensetzung), sind die DWW und die PSW der AKW überlegen. Beim Aufbau des Gesamt-, Laub- und Starkholzvorrats ist die PSW den anderen Bewirtschaftungsweisen überlegen, da hier der Hiebsatz im Vergleich reduziert ist.

5.3 Forstliche Förderung

Laut Bolte et al. (2021b) könnten sich die Gesamtkosten für den Waldumbau in Deutschland bis 2050 auf 14 bis 43 Mrd. Euro belaufen. Auch wenn es sich dabei nur um grobe Schätzungen handeln kann, macht diese Summe die riesige finanzielle Herausforderung deutlich, vor der die Forstbetriebe in den nächsten Jahren und Jahrzehnten stehen. Klar ist, dass viele Privatwaldbesitzende diese Aufgabe ohne staatliche Förderung nicht werden stemmen können.

Zu beachten ist, dass der Förderbedarf in den ersten Jahren am höchsten ist und mit fortschreitendem Waldumbau allmählich nachlassen wird (Welle et al. 2022, S. 217). Zudem bleibt im Blick zu behalten, dass der Umbaufortschritt zwischen den Bewirtschaftungsweisen variiert, sowohl in Bezug auf die umgebaute Fläche als auch in Bezug auf die Klimaanpassung der Bestände (Holzvorrat, Bestockung). Gemäß den hier durchgeführten Simulationen schneidet die AKW – beim größten Förderbedarf – in diesen entscheidenden Umbauparametern nach 50 Jahren im Durchschnitt am schwächsten ab. Umso wichtiger erscheint also, dass die Förderprogramme, neben einer ausreichenden finanziellen Ausstattung, auch möglichst zielgerichtet ausgestaltet sind. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel ein Überblick über die Architektur der forstlichen Förderung (Kap. 5.3.1), existierende Förderprogramme (Kap. 5.3.2) sowie innovative Konzepte zur Honorierung von Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen im Wald (Kap. 5.3.3) gegeben.

5.3.1 Zur Architektur der forstlichen Förderung

Die Unterstützung der Wald-, Forst- und Holzwirtschaft beim Waldumbau findet auf verschiedenen Regelungsebenen (EU, Bund, Land) und dort jeweils auf sehr unterschiedlichen Wegen statt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 176). Die Förderstruktur ist höchst komplex und in der konkreten Maßnahmenausgestaltung unübersichtlich und kleinteilig. Die Förderlandschaft beinhaltet allgemeinere Strategien, die die politische Richtung in dem Feld festlegen und Programme und Aktionspläne nach sich ziehen (Kap. 2.4.2), sowie konkrete Förderlinien für spezifische Akteure aus der Wissenschaft, der forstlichen und holzwirtschaftlichen Praxis bis hin zu kleinteiligen Maßnahmen für vor allem Privat- und Körperschaftswaldbesitzende.

Obwohl Waldpolitik in Deutschland Ländersache ist, setzt zunächst einmal das Bundeswaldgesetz den Rahmen, um die »Forstwirtschaft wegen der vielschichtigen Bedeutung des Waldes für Mensch und Natur« zu fördern (§ 1) (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 176 f.). Gemäß § 41 Bundeswaldgesetz soll »die Förderung insbesondere auf die Sicherung der allgemeinen Bedingungen für die Wirtschaftlichkeit von Investitionen zur Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung des Waldes abzielen«. Die Bundesländer konkretisieren in den Landeswaldgesetzen die Umsetzung in verschieden ausgeführten und unterschiedlich bezeichneten Richtlinien, Konzepten oder Programmen. Ziele wie z. B. der klimastabile Mischwald sowie Maßnahmen und Verfahren für den

Waldbau sind genauer beschrieben. Sie umfassen aber auch Förderrichtlinien für forstwirtschaftliche Maßnahmen, z. B. für Durchforstungen oder Anpflanzungen. Wald(umbau)programme skizzieren in der Regel die Leitlinien des Waldbaus und der Waldentwicklung. Es herrscht bundesweit eine große Vielfalt an Richtlinien, Konzepten und Programmen, die letztlich alle zur Orientierung bei der Waldbewirtschaftung und Förderung von Waldbauzielen dienen. Sie gelten für den Staatswald, jedoch wird ihre Anwendung auch für den Privat- und Körperschaftswald empfohlen. Die EU ist zum Teil über die Förderung der 2. Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik an der forstlichen Förderung in den Bundesländern beteiligt. Aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) stammten in der Vergangenheit (2007 bis 2013, 2014 bis 2020) beispielsweise 90 % der EU-Mittel für die Wälder. Für Deutschland waren von 2014 bis 2020 jährlich EU-Mittel in Höhe von ca. 1,35 Mrd. Euro aus ELER abrufbar, die mit nationalen Mitteln (Bund, Länder, Kommunen) aufgestockt werden mussten (BMEL 2022b). Diese Gelder sind hauptsächlich für forstliche Zielgruppen vorgesehen.

Alle diese Aktivitäten haben einen Einfluss auf den Wald und die Waldwirtschaft, der in der Gesamtschau allerdings schwierig zu beurteilen und bislang kaum untersucht ist. So hat der Wissenschaftliche Dienst zwar eine Zusammenstellung der Konzepte zum Waldumbau in Deutschland und deren Art und Weise der Förderung vorgelegt (Wissenschaftliche Dienste 2019). Dort kann nachgelesen werden, in welchem Bundesland welche Waldbaurichtlinien und Fördermaßnahmen gelten bzw. eingesetzt sind, es wird jedoch keine Bewertung vorgenommen. Auch wird aufgelistet, welche Mittel an wen abgeflossen sind. Mit Blick auf die Wirkungsebenen (auf den Wald oder die Waldbesitzenden) fehlen jedoch entsprechende Daten. Im Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats Waldpolitik (WBW 2021) zur Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel sind ebenfalls walddrelevante politische Strategien, Programme und forstliche Förderinstrumente beschrieben. Zu manchen wird an einigen Stellen auch eine Einschätzung abgegeben. Dennoch ist keine Untersuchung bekannt, die umfassend evaluiert hat, wie sich die Förderaktivitäten auf das Handeln der Waldbesitzenden auswirken.

Lange Zeit hatten Fördermittel wohl für den Gesamtertrag der mittleren und großen Forstbetriebe insgesamt eine nachgeordnete Bedeutung (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 180). Darauf verweisen zumindest die Ergebnisse des »Testbetriebsnetzes Forst« des BMEL (Ermisch et al. 2016). Das hat sich 2018 mit Sicherheit verändert, als klimawandelbedingte Insektenkalamitäten Schadereignisse von ungeahnter Größenordnung hervorriefen und mit der Bundeswaldprämie eine flächendeckende Finanzspritze eingeführt wurde, die vor allem den großen Waldbesitzenden erhebliche Finanzausschüsse ermöglichte. Eine hohe Bedeutung haben Fördermittel in den Produktbereichen »Schutz und Sanierung« und »Erholung und Umweltbildung« sowie ab 2010 auch für den Produktbereich »Hoheitliche und sonstige behördliche Aufgaben« für die Körperschafts- und Privatwaldbetriebe (Ermisch et al. 2016).

5.3.2 Überblick über existierende Förderprogramme

In Zusammenhang mit der Klimaanpassung von Wäldern spielt vor allem das Instrument der *direkten Förderung*, d. h. die Förderung konkreter Maßnahmen über forstliche Förderprogramme, eine zentrale forstpolitische Rolle (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 177). Sie ist allerdings im Vergleich zur Landwirtschaft mit einem fünfzigfach niedrigeren Finanzvolumen ausgestattet (WBW 2021, S. 49). Adressiert werden insbesondere Besitzende von Privat- und Körperschaftswald oder forst-/holzwirtschaftliche Unternehmen und Zusammenschlüsse. Im staatlichen Wald hat die Förderung eine untergeordnete Bedeutung. Diese direkte forstliche Förderung soll dazu beitragen, einen gewissen Ausgleich zwischen den Interessen der Allgemeinheit am Wald und den Belangen der Waldeigentümer/innen zu erreichen. Im Folgenden werden die relevantesten direkten Förderinstrumente vorgestellt und anhand von vorliegenden Evaluationen bewertet.

ELER

Voraussetzung für eine Förderung über den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) (bisher gab es drei Förderperioden: 2000 bis 2006, 2007 bis 2013 sowie 2014 bis 2020) sind die von den Bundesländern erarbeiteten ELER-Länderprogramme (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 180). Darin werden ausgehend von einer Analyse der jeweiligen Ausgangssituation unter Berücksichtigung der regionalen Stärken und Schwächen im Agrar- und Forstbereich die regionalspezifischen Ziele und Maßnahmen zur Förderung der ländlichen Entwicklung festgelegt werden. Die forstliche ELER-Förderung wurde ab 2007 stärker auf die Erbringung von Ökosystemdienstleistungen ausgerichtet. So sind nach der ELER-Verordnung für die Förderperiode 2007 bis 2013 der Ausgleich von zusätzlichen Kosten und Einkommensverlusten aufgrund von Natura 2000 (Artikel 46) und Zahlungen für Waldumweltmaßnahmen (Artikel 47) förderbar. Im Rahmen des Artikels 49 sind darüber hinaus investive Naturschutzmaßnahmen und Maßnahmen zur Steigerung des öffentlichen Wertes (z. B. Einrichtung von Waldlehrpfaden) der Wälder förderfähig. Ein Ziel im Rahmen der ländlichen

Entwicklungsprogramme war es, Waldbesitzenden mit der forstlichen Förderung bei der naturnahen und nachhaltigen Bewirtschaftung ihrer Wälder zu unterstützen. Die wichtigsten Maßnahmen der Länder, um dieses Ziel zu erreichen, sind der Waldum- und -wiederaufbau, die Bodenschutzkalkung und der forstliche Wegebau. Daneben werden u. a. verschiedene Naturschutzmaßnahmen und die Holzverarbeitung gefördert. Die Mittel wurden jedoch nicht umfassend ausgeschöpft. So wurden etwa in der Förderperiode 2007 bis 2013 nur 13 % der für Waldumweltsleistungen vorgesehenen ELER-Mittel abgerufen, was eventuell auch mit den komplizierten Antragsmodalitäten zu tun hatte (DFWR 2014).

Ex-post-Evaluationen der forstlichen ELER-Förderung werden seit der ersten ELER-Förderphase nahezu ausschließlich vom Thünen-Institut durchgeführt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 181). In der Förderperiode von 2014 bis 2020 gibt es erstmalig eine vergleichende Gesamtevaluation aller teilnehmenden Bundesländer (Grajewski 2016). Alle anderen Evaluationen des Thünen-Instituts waren stets bundeslandspezifisch. Die forstliche Förderung über ELER bzw. deren Wirkungen einzuschätzen ist nach Welle et al. (2022, S. 185) ein schwieriges Unterfangen. Denn die dazugehörigen Evaluationsberichte des Thünen-Instituts sind zwar umfangreich, aber in ihrer Kleinteiligkeit und Zuordnung zu den verschiedenen bundesländerspezifischen Zusammenschlüssen kompliziert und nicht einfach nachvollziehbar. Grundsätzlich werden die Maßnahmen von den Evaluator/innen positiv eingeschätzt. Einige beschreiben den bürokratischen Aufwand für die Antragstellenden jedoch als zum Teil hoch und unflexibel. Daneben erscheint die Analyse der Wirkungen forstlicher Förderung noch nicht zufriedenstellend gelöst. So ist nicht gut nachvollziehbar, nach welchen Kriterien eine Zuordnung des Beitrags der jeweiligen Maßnahme in die Wirkungskategorien (u. a. Schutz der biologischen Vielfalt, Bodenschutz, Wasserschutz, Klimaschutz) erfolgte. Hier könnte etwa eine transparente Darlegung der Bilanzierung von Kosten und Umsetzungserfolgen zielführend sein. Das würde bedeuten, auch die eingesetzten Mittel in ihrer Höhe stärker ins Verhältnis zu den Wirkungen der einzelnen Maßnahmen zu setzen. Sinnvoll erscheinen auch die Formulierung von klaren Wirkungszielen und die Verdeutlichung sowohl der Synergieeffekte als auch der Konflikte zwischen den Maßnahmen, die das Erreichen von spezifischen Wirkungszielen beeinflussen.

Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz

Die GAK ist in Deutschland das Hauptinstrument – gemeinsame Bund- und Landesförderung – für eine leistungsfähige, auf künftige Anforderungen ausgerichtete und wettbewerbsfähige Land- und Forstwirtschaft, den Küstenschutz sowie vitale ländliche Räume (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 187). Die GAK bildet den inhaltlichen und finanziellen Kern vieler Länderprogramme. Der Bund trägt mindestens 50 % der Ausgabenlast. Die Durchführung der Maßnahmen liegt jedoch allein in der Zuständigkeit der Bundesländer und für Antragsteller sind deshalb die Richtlinien des jeweiligen Bundeslandes maßgebend. Die Förderbedingungen und Fördergegenstände der GAK haben sich seit 2003 kaum verändert. Folgende Bereiche und Maßnahmen sind förderfähig⁷⁴ (zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 187 f.):

- Naturnahe Waldbewirtschaftung: Gutachten und fachliche Stellungnahmen zur Umstellung auf naturnahe Waldwirtschaft, Vorarbeiten (z. B. Untersuchungen, Standortgutachten), Waldumbau, Jungbestandspflege
- Bodenschutzkalkung
- Forstwirtschaftliche Infrastruktur: Wegebau (Neubau, Befestigung, Grundinstandsetzung forstwirtschaftlicher Wege), Holzkonservierungsanlagen
- Forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse: Maßnahmen zur Entwicklung gemeinschaftlicher Bewirtschaftungsmodelle, Waldpflegevertrag, Mitgliederinformation, Zusammenfassung des Holzangebots (bisherige Mobilisierungsprämie), Professionalisierung von Zusammenschlüssen
- Erstaufforstung: Kulturbegründung (Kulturvorbereitung, Saat, Pflanzung, Erhebungen, Sicherung der Kultur), Nachbesserungen
- Vertragsnaturschutz im Wald: Bewirtschaftung, Pflege oder Nutzungsverzicht auf forstlich genutzten/nutzbaren Flächen

Die Gesamtförderung durch die GAK beläuft sich seit 2010 (gemittelte Jahreswerte) auf 9,2 Euro/ha im Privatwald und 12,4 Euro/ha im Körperschaftswald (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 177 u. 188). 2018 wurde auf Vorschlag des BMEL für die Bewältigung der Waldschäden durch Extremwetterereignisse eine weitere GAK-Förderlinie eingerichtet (Förderung von Maßnahmen zur Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald). Der Deutsche Bundestag stellte hierfür als zusätzliche GAK-Aufgabe im Haushalt 2019 25 Mio. Euro für einen Zeitraum von 5 Jahren zur Verfügung. Aufgrund der besonderen Kalamitätssituation

⁷⁴ <https://privatwald.fnr.de/foerderung/> (30.5.2024)

wird dieser Betrag von 2020 bis 2023 jährlich auf 10 Mio. Euro erhöht. Dabei kann Folgendes zur Bezuschussung kommen (zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 188):

- Maßnahmen zur bestandes- und bodenschonenden Kalamitätsflächenräumung,
- Waldschutzmaßnahmen: Überwachung, Vorbeugung und Bekämpfung von Schadorganismen (z. B. Borkenkäfer), Bekämpfung von Schadorganismen durch Auffinden und Aufarbeitung von befallenem Holz, Anlage von Holzlagerplätzen (Nass- und Trockenlager) zur Lagerung von Kalamitätsholz, Wiederherstellung von infolge von Starkregenereignissen beschädigten Waldwegen, Maßnahmen zur Prävention und Bekämpfung von Waldbränden,
- Wiederaufforstung, Vor-/Unterbau, Nachbesserung in lückigen Beständen.

Eine umfassende Evaluation der GAK-Förderung liegt bisher nicht vor (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 189). Mit Blick auf die Wirksamkeit der Maßnahmen für den Waldumbau wäre es jedoch gerade angesichts der großen Fördersummen wichtig zu wissen, in welcher Größenordnung die verschiedenen Maßnahmen (z. B. Pflanzung/Wiederaufforstung, Zaunbau, Naturdynamik) gefördert wurden und mit welchen Folgen für den Waldumbau.

Zuwendungen für ein klimaangepasstes Waldmanagement

Vom BMEL wurde im November 2022 das neue Förderprogramm »Klimaangepasstes Waldmanagement« zur Entwicklung von klimaresilienten Wäldern aufgelegt, was zum Programmbereich »Honorierung der Ökosystemleistung des Waldes und von klimaangepasstem Waldmanagement« gehört (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 178 u. 194). Dafür standen aus dem Klima- und Transformationsfonds 900 Mio. Euro im Rahmen der Finanzplanung bis 2026 für kommunale und private Waldbesitzende bereit. Die Finanzierung erfolgt seit 2024 aus dem ANK des BMUV. Fördervoraussetzung ist die Verpflichtung, 12 Kriterien eines klimaangepassten Waldmanagements über 10 oder 20 Jahre zu erfüllen und ein anerkanntes Zertifizierungssystem über die klimaangepasste Waldbewirtschaftung nachweisen zu können. Mit dem Programm führt das BMEL eine langfristige Förderung ein, mit der zusätzliche Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen finanziert werden. Gefördert werden Betriebe, die ihre Wälder nach Kriterien bewirtschaften, die sowohl über den gesetzlichen Standard als auch über bestehende Zertifizierungen wie PEFC und FSC nachweislich hinausgehen. Die Kriterien, die für die Förderung erfüllt werden müssen, sind (BMEL 2023c):

- Vorausverjüngung ist Pflicht,
- Vorfahrt für Naturverjüngung geben,
- standortheimische Baumarten verwenden,
- natürliche Entwicklung auf kleinen Freiflächen zulassen,
- größere Baumartendiversität schaffen,
- große Kahlfelder vermeiden,
- Mehr Totholz für mehr Leben,
- mehr Lebensräume mit Habitatbäumen schaffen,
- größerer Rückegassenabstand: Begrenzung der Bodenverdichtung,
- Pflanzen natürlich gesund erhalten,
- Wasserhaushalt verbessern.

Auch zu diesem neuen Förderprogramm gibt es stark widerstreitende Meinungen und Einschätzungen (Koch 2022b; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 195). Während einige es begrüßen, dass eine Förderung an bestimmte waldbauliche Inhalte geknüpft wird, finden andere diese 12 Kriterien entweder nicht ausreichend, weil damit keine zentralen waldbaulichen Ziele erreicht würden, oder viel zu aufwendig und bürokratisch, was vor allem für Kleinwaldbesitzende als problematisch angesehen wird (Proplanta 2022; Schmoll 2022). Teilweise wird die zu geringe finanzielle Ausstattung des Programms bemängelt, die für den Waldumbau in klimastabile Mischwälder unzureichend sei (Koch 2022b). Kritisch gesehen wird von einigen auch die Kopplung der Förderung an Nutzungsverzicht – das Programm sieht ab mehr als 100 ha Waldfläche die Stilllegung von 5 % Waldflächen verpflichtend vor – und eine zu starke Ausrichtung auf Naturschutz und Extensivierung (Hagge et al. 2023; Proplanta 2022). Die Vergütung von Ökosystemdienstleistungen im Wald an die Nichtnutzung der heimischen Ressource zu knüpfen, gilt manchen als falsches Signal, stattdessen müsse die Waldförderung verstärkt die nachhaltige Holznutzung in den Blick nehmen (Kubatta-Große 2022). Andere wiederum sehen in dieser Form der

Honorierung von Ökosystemleistungen eine Chance, zusätzliche Leistungen für kleinere Waldbesitzende zu aktivieren (Koch 2022b). Ein zusätzlich strittiger Punkt ist im Zuge periodischer Flächenstilllegungen der anfallende hohe Totholzanteil. Er gilt den einen als unverzichtbar für den Waldumbau und eine naturdynamische Selbstregulation des Ökosystems. Für andere ist er CO₂-Quelle und erhöht das Risiko für Waldbrände. Ob und in welchem Ausmaß Totholz das Risiko von Waldbränden erhöht, ist wissenschaftlich umstritten und zum Teil auch situationsabhängig zu beurteilen. So zeigte ein Gutachten der TU Dresden (Müller 2022) im Ergebnis, dass Totholz im Nationalpark Sächsische Schweiz zwar die Intensität der Waldbrände im Sommer 2022 erhöhte, aber nicht die Brandausbreitung beeinflusste.

Letztlich zeigen sich auch in der Diskussion um das neue Förderprogramm Klimaangepasstes Waldmanagement die typischen Grundzüge und Argumentationsmuster der deutschen Walddebatte (Kap. 2.4.1). In der Zusammenschau schlussfolgern Welle et al. (2022, S. 195 f.), dass dieses Programm gute Ansätze aufzeigt, Fördermaßnahmen an Ziele zu koppeln, die konkret überprüfbar sind, auch wenn manches freiwillig bleibt (Ausweis einer 5%igen Stilllegungsfläche ab 100 ha), zu wenig mit Schwellenwerten unterlegt (Totholzanteil, Habitatbäume) oder vage formuliert ist. Zu wünschen wäre, dass im Programm eine Evaluation der Wirksamkeit der Maßnahmen von vornherein mit verfolgt und dafür Kriterien transparent aufgestellt und kommuniziert würden.

Konjunktur- und Zukunftspaket für den Bereich Wald

Im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets der Bundesregierung (130 Mrd. Euro) zur Stärkung der Wirtschaft in Deutschland in der COVID-19-Pandemie wurden 700 Mio. Euro für den Bereich Wald- und Holzwirtschaft bereitgestellt (AGDW 2020; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 177 f.). Das Geld wurde im Wesentlichen über drei Förderprogramme ausgeschüttet. Das *Investitionsprogramm Wald* adressiert die nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes einschließlich der Förderung der Digitalisierung in der Forstwirtschaft und die Unterstützung von Investitionen in moderne Betriebsmaschinen und -geräte (BMEL 2020b). Gefördert werden private und kommunale Forstbetriebe, forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse, forstliche Lohnunternehmer, forstliche Sachverständige und Forstbauschulen. Für 2020 und 2021 standen hier rund 50 Mio. Euro bereit. Das *Investitionsprogramm Holz* (35 Mio. Euro in 2021) bezieht sich auf die Förderung einer modernen Holzwirtschaft einschließlich der stärkeren Nutzung von Holz als Baustoff (BLE 2021a). Es zielte auf Unternehmen der Holzwirtschaft beziehungsweise Unternehmen, die mehr als 50 % ihres jahresbezogenen Umsatzes durch unternehmerische Tätigkeit in der Produktion, im Handel, in der Verarbeitung und/oder der Reparatur von Holzprodukten erzielen. Zusätzlich wurde angesichts massiver Waldschäden durch Insektenkalamitäten die *Bundeswaldprämie* (insgesamt 500 Mio. Euro) als einmalige flächenbezogene Prämie für private und kommunale Waldbesitzende eingerichtet.⁷⁵

Zu keiner der drei Förderlinien liegen dezidierte Evaluationen vor (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 184). In vereinzelt Stellungnahmen verlaufen die Kritiklinien zumeist entlang der Positionen der Verfechter/innen von stärkerer Holznutzung gegenüber denen, die eine stärkere Nutzungsreduktion befürworteten. Unter den Waldbesitzenden und ihren Verbänden findet die als Flächenprämie bezeichnete Bundeswaldprämie⁷⁶ von 100 Euro/ha (PEFC) bzw. 120 Euro/ha (FSC) überwiegend positive Resonanz, auch wegen der unbürokratischen Form der Unterstützung. Mit einer Einmalförderung sei laut dem Präsidenten der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Waldbesitzerverbände (AGDW 2021) und dem Vorsitzenden der Familienbetriebe Land und Forst allerdings noch kein nachhaltiger Weg aus der schweren Krise für den Waldbesitz beschritten. Um die Wälder bzw. die Waldwirtschaft langfristig zu stabilisieren, brauche es weitergehende und steigende Hilfen zur Wiederbewaldung, die unbürokratisch (z. B. über die Finanzämter) verteilt werden sollten, statt über komplizierte Förderprogramme, deren Gelder im Zweifel bei Sägewerken oder Maschinenherstellern landeten. Außerdem werde als weitere Einnahmequelle eine Honorierung der Klimaschutzleistungen benötigt. Umweltverbände und Wissenschaftler/innen der ökologischen Waldforschung kritisieren hingegen die flächenbezogene Ausrichtung der Förderung nach dem Gießkannenprinzip, die die größten Flächenbesitzenden einseitig bevorzuge und wenig wirksam sei (z. B. Ibisch 2020; Maráz 2021; NABU 2020). Sie fordern stattdessen eine Kopplung von staatlicher Unterstützung an inhaltliche Zielvorgaben. Kritisiert wird auch, dass Waldbesitzende, die resilientere und angepasstere Bewirtschaftungsweisen verfolgen, durch diese Art der schadbezogenen Flächenprämie benachteiligt würden.

⁷⁵ <https://www.bundeswaldpraemie.de/> (30.5.2024)

⁷⁶ Der Anteil der Prämie ist abhängig von der schad betroffenen Waldflächengröße (FNR 2020b).

Fördersparte Forstwirtschaft der Landwirtschaftlichen Rentenbank

Diese bis Juni 2024 befristete Förderung soll Waldbesitzende, forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse und Waldgenossenschaften sowie Pächter/innen von Waldflächen über zinsgünstige Darlehen und Zuschüsse unterstützen (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 178). Bezuschusst werden forstwirtschaftliche Investitionen vor allem in den klima- und standortangepassten Waldumbau, die Erstaufforstung sowie die Beseitigung von Schäden und Wiederaufforstung bei extremen Wetterereignissen. Die Darlehen und Förderzuschüsse aus diesem Programm dürfen mit anderen öffentlichen Fördermitteln kombiniert werden. Gefördert werden u. a. auch Ausgaben für den klima- und standortangepassten Waldumbau, für Waldschutzmaßnahmen einschließlich Wildschutz und Vorbeugung von Waldbränden und Ausgaben für die Räumung, Lagerung und Wiederaufforstung.

Indirekte forstliche Förderung und Beratung

Neben der an die Durchführung konkreter Maßnahmen gebundenen direkten Förderung findet im Forstbereich auch eine *indirekte Förderung* statt (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 178 f.). Sie betrifft insbesondere den kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald und bezieht sich auf dessen Betreuung. Eine entsprechende Unterstützung der Besitzenden dieser Wälder wurde vor allem von den Verwaltungen bzw. Betrieben der Bundesländer übernommen. Diese indirekte Förderung beinhaltete vergünstigte staatliche Dienstleistungen wie Beratung und gemeinsame Holzvermarktung und belief sich z. B. für das Jahr 2017 mit rund 250 Mio. Euro auf weit mehr als das, was im Rahmen der GAK an Förderung ausgegeben wird (60 Mio. Euro/Jahr). Allerdings wurden diese (kostengünstigen) Dienstleistungen des Staates für Privatwaldbesitzende inzwischen in vielen Bundesländern nach einem Urteil des Kartellgerichts gekippt. Entsprechend haben sich die Bundesländer aus dem Angebot nicht kostendeckender Beratung und Betreuung der Privat- und Körperschaftswaldbesitzenden zurückgezogen oder es wettbewerblich angepasst, was die Rahmenbedingungen der indirekten Förderung für den überwiegend kleinstrukturierten Privat- und Kommunalwald verschlechtert hat. Zu befürchten ist, dass infolge dessen vor allem für Kleinwaldbesitzende forstliche Maßnahmen zur Pflege, Nutzung und Verjüngung sowie zum Schutz der Wälder wirtschaftlich zunehmend unattraktiv und deswegen nicht mehr nachgefragt werden (WBW 2018).

Die zuvor genannte Entwicklung wird insbesondere vom Wissenschaftlichen Beirat für Waldbau (WBW 2018 u. 2021, S. 61 f.) mit Blick auf die derzeitigen waldbaulichen Herausforderungen durch den Klimawandel als kontraproduktiv kritisiert. Diese bedürfen eigentlich einer Unterstützung der Beratung von Privat- und Kommunalwaldbesitzenden, und insbesondere von Kleinwaldbesitzenden (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 186). Kleinwaldbetriebe tragen laut 3. BWI immerhin 55 % des Holzvorrates zum Privatwald bei und sind bezogen auf ihre Gesamtfläche in Deutschland eine bedeutsame Größe (die Größenklasse bis 20 ha umfasst bundesweit rund 95 % der privaten Forstbetriebe mit rund 50 % der Privatwaldfläche). Zugleich plädiert der WBW aber für einen Verbleib der Beratung bei den staatlichen forstlichen Stellen und argumentiert mit dem hohen Vertrauen, das diese Form der Beratung bei einem Großteil der Privatwaldbesitzenden genießen würde. Weitere Gründe liegen darin, dass dies lange Zeit eine funktionierende und zugleich kostengünstige Variante war.

Nach Welle et al. (2022, S. 186 ff.) wäre aber ein größeres Spektrum an Beratungsmöglichkeiten – auch außerhalb der Forstverwaltung – wünschenswert, das verschiedene Bedarfe zu bedienen vermag. So sind laut einer neueren Untersuchung vor allem auch Kleinwaldbesitzende dazu bereit, mehr in eine Verbesserung von ökologischen Qualitäten zu investieren (Juutinen et al. 2022). Hierfür sollten Berater/innen ausgebildet werden, die die Vielfalt an klimasensiblen waldbaulichen Ansätzen kennen und zugleich von einem institutionell unabhängigen Standpunkt aus entsprechend ergebnisoffen beraten können. Daher ist es laut Welle et al. (2022, S. 187) wichtig, das bisherige System der forstlichen Beratung einer kritischen Prüfung hinsichtlich seiner Interessenskonflikte und -kollisionen, Zielgenauigkeiten und Wirksamkeiten zu unterziehen und mehr Vielfalt in die Beratungslandschaft im Forstbereich zu bringen. Der Klimawandel und die geänderten gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald und seine Bewirtschaftung würden die Entwicklung alternativer Bewirtschaftungskonzepte notwendig machen, die nicht alleine von der Wirtschaftlichkeit der Holznutzung abhängen, sondern den Erhalt von Gemeinwohl und Ökosystemleistungen in den Vordergrund stellen. Dies würde eine vorsorgende und zurückhaltende Waldgestaltung in den Mittelpunkt von Beratung rücken, die stärker darauf ausgerichtet ist, die materiellen und ideellen Interessen der Waldeigentümer/innen mit den Ansprüchen der Gesellschaft (Erhalt von stabilen klimaangepassten Wäldern, Erhöhung von Diversität, Naturschutz und nachhaltigkeitsorientierte Holznutzung) in Einklang zu bringen. Gemäß der Stellungnahme des WBW (2018, S. 6) existieren dafür bereits Modelle wie die treuhänderische Waldbewirtschaftung beispielsweise durch Waldpflegeverträge. Demzufolge sollte die forstliche Beratung sowohl von der institutionellen Verankerung her als auch inhaltlich eine größere Bandbreite als bislang abbilden und etwa auch die Anliegen einer naturdynamischen natürlichen Waldbewirtschaftung oder einer stärkeren Ausrichtung an Gemeinwohl und Naturschutz bedienen können.

5.3.3 Konzepte zur Honorierung von Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen im Bereich Wald

Die Menge an Literatur zur Honorierung von Ökosystemleistungen (ÖSL) ist in den letzten 10 Jahren geradezu explodiert (TAB 2014; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 191). Inzwischen gibt es auch mit Fokus auf den Wald dazu einiges an Publikationen aus Deutschland. So stammen alleine vom Thünen Institut drei Ausarbeitungen, die letztlich alle der Entwicklung eines Konzepts zur Honorierung von ÖSL dienen (Elsasser et al. 2020b; Elsasser et al. 2020a; Elsasser et al. 2020c). In etlichen weiteren nationalen und internationalen Studien wurden in den letzten Jahren ganz unterschiedliche Optionen für die Entwicklung und Umsetzung von Anreizsystemen für Waldklima- und Biodiversitätsschutz diskutiert (Böttcher et al. 2022). Zur besseren Vergleichbarkeit schlugen Elsasser et al. (2020b) eine Reihe von Kriterien vor. Dazu zählen die Lenkungswirkung des Modells, die Zugänglichkeit der Honorierung, die Auswirkungen auf Forstbetriebe und nachgelagerte Märkte, Wechselwirkungen mit bestehenden Fördermöglichkeiten, Administrierbarkeit, Vereinbarkeit mit Regeln des internationalen Klimaregimes sowie Abbildung der CO₂-Bilanz im Wald. Vor allem bezüglich der Anforderungen zur Erfüllung der Förderwürdigkeit gibt es sehr unterschiedliche Vorstellungen davon, wie diese auszugestalten sind.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat in einem Positionspapier 2021 Eckpunkte vorgeschlagen, die anspruchsvolle Ziele und konkrete Kriterien beinhalten (BMU 2021; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 191 f.). Zentral ist die Idee einer integrierten Honorierung von Klimaschutzleistungen und ambitionierten Biodiversitätsstandards. Das bedeutet, »dass die Klimaschutzleistung und die Biodiversitätsleistung des Waldes untrennbar miteinander verknüpft honoriert werden«, um sicherzustellen, »dass die gesamtgesellschaftlichen Bedarfe an Klima- und Biodiversitätsschutz von privaten und kommunalen Waldbesitzenden gleichermaßen bedient werden« (BMU 2021, S. 2). Für das BMU stehen drei wesentliche Punkte im Fokus: der Waldumbau mit überwiegend heimischen Baumarten, weitere Flächenstilllegungen und der Aufbau einer finanziellen Förderung für die Bewirtschaftung, die eine Lenkungswirkung hin zu mehr Naturnähe und Biodiversität entfaltet. Im Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung ist ein Auftrag zur Entwicklung eines langfristigen Ansatzes für die Honorierung der Ökosystemleistungen von Wäldern formuliert (SPD et al. 2021). Das Eckpunktepapier des BMU dient dafür als Grundlage, das Förderprogramm Klimaangepasstes Waldmanagement ist ein Ergebnis aus diesem Weiterentwicklungsprozess.

Eine der Hauptherausforderungen bei der der Honorierung von ÖSL besteht darin, geeignete und akzeptierte Kriterien für eine Bewertung der Leistungen zu finden (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 192). Zwar werden schon seit vielen Jahren im Rahmen der Waldfunktionenkartierung ökologische Funktionen (z. B. Arten- und Biotopschutz, Ökosystem- und Prozessschutz, Ressourcenschutz), Schutzfunktionen sowie soziale Funktionen (Erholung, Naturerlebnis, Umweltbildung, Forschung) in allen Landesforstbetrieben aufgenommen (Volk/Schirmer 2003). Anhand dieser Funktionen lassen sich jedoch kaum Aussagen über die tatsächliche Funktionalität und Leistungsfähigkeit des betreffenden Waldbestandes treffen, es wird lediglich die Nachfrageseite abgebildet. Zudem ist eine Abbildung der Funktionalität bzw. Wirkung bislang kaum in der forstlichen Praxis zu finden. In dieser Hinsicht geht der Ansatz der Ökosystemleistungen anders als über Waldfunktionen vom Beitrag des Ökosystems für das menschliche Wohlergehen aus. Mittlerweile wächst das Interesse, die Berichterstattung zu den Leistungen der Waldwirtschaft stärker auf ihren Gemeinwohlbeitrag abzustellen. Aktuell gehen gemeinwohlorientierte ÖSL des Waldes nur unzureichend in die Bewertung der Produktivität von walddwirtschaftlichen Systemen ein. Allerdings lassen die dabei zugrunde gelegten Parameter (z. B. Naturnähe, Waldnaturschutz, Zuwachs oder biodiversitätsfördernde Leistungen des Waldes) einen breiten Interpretationsspielraum zu und bilden die jeweiligen Vor-Ort-Verhältnisse nur unzureichend ab. Dies erschwert einerseits eine Vergleichbarkeit der Systeme, andererseits beanspruchen bestehende Ansätze zur Erfassung von ÖSL eine enorme Datenfülle, was sie sehr aufwendig und für viele Forstbetriebe nicht praktikabel macht.

In einer Machbarkeitsanalyse haben aufsetzend auf das beschriebene BMU-Eckpunktepapier von 2021 mit den darin vorgeschlagenen Anreizsystemen zur Honorierung von ÖSL des Waldes einige Expert/innen die dortigen Parameter präzisiert sowie mögliche Indikatoren detailliert beschrieben (Böttcher et al. 2022, S. 57 ff.; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 193 f.). Die Datengrundlage, der Aufwand für die Nachweisführung und bestehende Fördertatbestände wurden ebenfalls identifiziert. Aus den Ausarbeitungen wurde ein Konzept für die Entwicklung eines modularen Anreizsystems zur Honorierung von Biodiversitäts- und Senkenleistungen skizziert. Im Zentrum dieses Anreizsystems steht der Aufbau eines Zwei-Säulen-Modells für die Honorierung von Biodiversitäts- und Senkenleistung, das zum einen die Förderung ökologischer Waldwirtschaft und zum anderen die Schaffung eines marktwirtschaftlichen Zertifikatehandels beinhaltet. Deutlich wird laut Welle et al. (2022, S. 194), dass bei einer Förderung von ÖSL u. a. folgendes zu beachten ist:

- klare Formulierung von Anforderungen an klimaresiliente Wälder (auf der Bestandesebene);

- über die Güter/Leistungen und ihre Erfassbarkeit durch Kriterien sollte (politische und) gesellschaftliche Einigkeit erzielt werden;
- die Honorierung von Leistungen sollte auch mit Anforderungen an die Forstbetriebe verbunden werden;
- die rechtliche Vereinbarkeit (mit dem EU-Beihilferecht) sollte geprüft werden;
- die Auswirkungen auf die Wertschöpfungskette Wald/Holz sollten mit betrachtet werden;
- die Vielfalt der ÖSL und deren Zusammenspiel sollten beachtet werden;
- die finanzielle Honorierung sollte sich auf öffentliche Güter beschränken, die nicht hinreichend über Märkte bereitgestellt werden können;
- die finanzielle Honorierung seitens des Bundes sollte unbürokratisch organisiert sein, um die praktische Umsetzung zu erleichtern, und
- sie sollte nicht auf jeden möglichen Spezialfall abzielen, sondern sich zunächst auf einige Leistungen konzentrieren (was wiederum die Förderung praktikabler machen könnte).

5.4 Fazit

Das zentrale Ziel des Waldumbaus ist die Herstellung naturnäherer Waldökosysteme. Die Diversifizierung der Bestockungszusammensetzung ist jedoch mit Aufwendungen z. B. in Zusammenhang mit Voranbauten verbunden und hat Mindererträge aufgrund von Hiebsunreifeverlusten zur Folge (Spathelf 2022, S. 63). Daher wurden von Welle et al. (2022) die ökonomischen Implikationen eines naturnahen Waldumbaus anhand von Simulationen beleuchtet, die mögliche Pfade des naturnahen Waldumbaus sowie seine kurzfristigen und langfristigen Auswirkungen auf die Einkommenssituation von Forstbetrieben aufzeigen. Als Testobjekte dienten vier fiktive Forstbetriebe: ein staatlicher Forstbetrieb in der Wuchsregion Nord, ein kommunaler Betrieb im Osten und jeweils ein privater Forstbetrieb im Süden und im Westen, die die Diversität bezüglich Standortbedingungen, Einkommensart (Staatswald, Kommunalwald, Privatwald) und Betriebsgröße abbilden sollen. Zudem differenzieren die Simulationen zwischen PSW, DWW und AKW in allen vier Forstbetrieben. Die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen lassen sich wie folgt zusammenfassen (zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 16 f.):

- Waldumbauflächen: Der dringlichste Bedarf an Waldumbau besteht für 2,87 Mio. ha oder 28 % der gesamten deutschen Waldfläche. Kurzfristig werden den Simulationen zufolge in der DWW in den meisten Regionen die größten Waldflächen umgebaut, gefolgt von der PSW. Das gilt im Mittel auch langfristig.
- Baumartenzusammensetzung: Im Zuge von PSW verändert sich die Bestockung zugunsten von Laubbaumarten mit Abstand am schnellsten.
- Holzvorräte: Die PSW ist beim Aufbau des Gesamtvorrats, des Laubholzvorrats und des Starkholzvorrats den anderen Bewirtschaftungsweisen in nahezu allen simulierten Fällen überlegen. Bei der AKW ist die Vorratsentwicklung in mehreren Regionen negativ und insgesamt am schwächsten. Die DWW nimmt eine Mittelstellung ein.
- Holzerntemengen: Über den Zeitraum von 50 Jahren wird in der DWW am meisten geerntet. Die AKW liegt hier knapp vor der PSW.
- Holzerlöse: Kurzfristig erzielt die AKW in der Mehrzahl der Simulationen die höchsten Holzerlöse, langfristig die DWW. In der PSW sind die Holzerlöse über alle Zeiträume hinweg am geringsten, entsprechend den reduzierten Erntemengen. Allerdings verringert sich der Unterschied mit der Zeit, weil das erlösintensive Starkholz am meisten zulegt.
- Holzerntekosten: Die PSW ist die mit Abstand kostengünstigste Bewirtschaftungsart. In den ersten Jahren ist AKW überall am teuersten, später fallweise dann die DWW.
- Erntekostenfreie Erlöse: Die Erlöse abzüglich Erntekosten fallen kurzfristig bei der AKW am höchsten aus und langfristig bei der DWW. Die PSW ist der AKW langfristig überlegen.
- Betriebskosten: Die Betriebskosten (welche die Erntekosten einschließen) sind in der PSW in allen Regionen kurz- sowie langfristig am niedrigsten, gefolgt von den Betriebskosten innerhalb der DWW. Zudem würden die Betriebskosten in der PSW von zukünftigen Anstiegen der Kraftstoff- und Personalkosten am wenigsten beeinflusst.
- Betriebsergebnisse: Kurzfristig variieren die Betriebskosten im Vergleich der Regionen stark. Langfristig und im Überschlagsmittel erbringt die PSW die besten Betriebsergebnisse. Bei weiter steigenden Lohn- und

Kraftstoffkosten verändern sich die Betriebsergebnisse in der AKW am stärksten negativ, während sie sich bei der PSW am stabilsten verhalten.

Zwar sind mit solchen Simulationen zwangsläufig größere Unsicherheiten verbunden. Der Vergleich mit ähnlichen Analysen und betriebsökonomischen Langzeiterhebungen lässt die Ergebnisse zumindest von der Tendenz her aber durchaus plausibel erscheinen. Obwohl geeignete Betriebsvergleiche selten sind, deutet die vorliegende Studienlage darauf hin, dass der naturnahe Waldumbau mittels AKW am teuersten würde. Zudem ginge der Waldumbau mit der AKW am langsamsten vonstatten und letztlich verblieben die im Vergleich noch immer naturfernsten Waldbestände. Das bedeutet, dass auch das notwendige Fördervolumen für einen solchen Waldumbau bei der DWW und der PSW deutlich kleiner ausfällt bzw. sich mit demselben Umfang an Mitteln ein größerer Effekt erzielen lässt.

Der Überblick über die Maßnahmen zur forstlichen Förderung macht deutlich, dass die Förderlandschaft sehr komplex und kleinteilig ausgestaltet ist. Evaluationen der Programme liegen kaum vor. Somit ist auch eine klare Zuordnung der Maßnahmen zu waldbaulichen Wirkungen kaum möglich, was jedoch für eine langfristige Politikgestaltung im Bereich Waldumbau äußerst wichtig wäre. Angesichts der riesigen finanziellen Herausforderung, die der Waldumbau insbesondere für die Kleinwaldbesitzenden mit sich bringt, kommen Welle et al. (2022, S. 197) zum Schluss, dass bestehende Programme und Maßnahmen der forstlichen Förderung umfassend und in ihrem Bezug zueinander evaluiert werden sollten, um Synergien, Schwachstellen und Widersprüche zu identifizieren.

6 Resümee und Handlungsfelder

Seit einigen Jahren leiden die Wälder besonders stark unter klimawandelbedingten Veränderungen. Angesichts ihres schlechten Zustands und um eine möglicherweise fortschreitende Destabilisierung der Waldökosysteme zu verhindern, ist ein Umbau der Wälder zu naturnäheren, vielfältigeren und stabileren Mischwäldern unumgänglich. Doch angesichts unterschiedlicher Nutzungsinteressen sowie hoher Kosten eines umfangreichen Waldumbaus sind die möglichen Wege einer zielführenden Umsetzung umstritten. Wie ist am sinnvollsten mit dem Wald umzugehen, damit einerseits die Forst- und Holzwirtschaft ökonomisch dauerhaft Bestand haben, andererseits aber Waldökosysteme und deren Beiträge für das Gemeinwohl erhalten bleiben?

Klar ist, dass der naturnahe Waldumbau ein sehr großes und komplexes Handlungsfeld darstellt, das unterschiedliche, teils konfligierende Ziele (Natur- und Artenschutz, Klimaschutz und -anpassung, nachhaltige Rohstoffnutzung, Erholungsfunktionen etc.), verschiedene Handlungsebenen sowie Maßnahmenoptionen umfasst und ein langfristiges, strategisches Vorgehen erfordert. Heterogene Eigentumsstrukturen und Bewirtschaftungsgrößen wie auch unterschiedliche Nutzungsinteressen und teils begrenzte finanzielle Handlungsmöglichkeiten der Eigentümer/innen sind zusätzliche Herausforderungen. Ob und wie der naturnahe Umbau und die Steigerung der Anpassungsfähigkeit der Wälder – beides eine Daueraufgabe – langfristig gelingen, hängt zum einen vom richtigen forstlichen Management, zum anderen von der Gestaltung der ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ab.

6.1 Forstliche Aspekte

Im grundsätzlichen Umgang mit den Wäldern ist der bereits eingeleitete Wandel hin zu einem naturnahen Waldumbau unter stärkerer Beachtung der Ökosystemintegrität fortzusetzen und zu beschleunigen, um den Auswirkungen des Klimawandels (Biodiversitäts- und Ökosystemverluste) entgegenzuwirken (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 228 f.). Viele der bisherigen Maßnahmen der konventionellen Forstwirtschaft, z. B. die Altersklassenbewirtschaftung, Reinbestände mit einer Fokussierung auf Nadelbäume (u. a. Fichte und Kiefer) oder die übermäßige Befahrung der Waldstandorte, sind aus heutiger Sicht Fehlentwicklungen und für angepasste Wälder im Klimawandel nicht zuträglich. Sichtbare Resultate dieser Fehlentwicklungen sind z. B. die großflächig abgestorbenen und geräumten Fichtenwälder in den deutschen Mittelgebirgen. Aufgrund der Langfristigkeit der forstlichen Entscheidungen, die im Falle der labilen Fichtenwälder vor Jahrzehnten unter anderen sozioökonomischen Rahmenbedingungen gefällt wurden, sind diese forstlichen Hinterlassenschaften noch in größerem Umfang relevant. Zwar sollte und muss die Holzbereitstellung auch zukünftig grundsätzlich eine große Rolle spielen und es gibt auch eine breite Evidenz, dass die Holznutzung bei einem schonenden Eingriff den Aufbau vielfältiger gemischter Wälder mit hoher Strukturvielfalt befördern kann. Oberstes Ziel in den nächsten Jahren und Jahrzehnten sollte jedoch sein, gesunde und funktionstüchtige Wälder zu erhalten und zu entwickeln, die alle regulierenden und unterstützenden Ökosystemleistungen (Biodiversitätsschutz, Klimaregulierung, Wasserregulierung-, -reinigung und -bereitstellung etc., aber auch den Schutz vor Naturgefahren sowie Erholungsmöglichkeiten) erbringen. Der naturnahe Waldumbau ist hierbei eine zentrale Strategie.

Der Begriff naturnaher Waldumbau ist fachlich nicht eindeutig definiert (zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 10 f.). Naturnah (bzw. naturgemäß) heißt in der Regel, dass bei Bewirtschaftungsmaßnahmen die Nutzung natürlicher Prozesse (wie Naturverjüngung) sowie die Orientierung an der natürlichen Baumartenzusammensetzung im Vordergrund stehen. Während auf Kahlschläge möglichst verzichtet wird, sollen natürlicherweise ablaufende Prozesse möglichst effizient und risikosenkend genutzt werden, und zwar in ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Das grundlegende Ziel ist, in den zukünftigen Wäldern die Baumarten, die gegenwärtig auch natürlicherweise den Wald prägen würden, angemessen zu berücksichtigen und gleichzeitig ungleichaltrige, strukturierte und stufige Mischwälder mit hoher Stabilität aufzubauen. Dabei können seltenere heimische Baumarten sowie trockenstresstolerante Provenienzen aus wärmeren Regionen ggf. ein gewisses Reservoir zur Erhöhung der Baumartendiversität darstellen. Das gilt unter Umständen und als Beimischung in geringem Umfang auch für zum Teil bereits bewährte, nicht gebietsheimische Arten (z. B. Douglasie oder Roteiche), um auch so die Klimaresilienz der Wälder zu erhöhen (Spathelf 2022, S. 38). Darüber hinaus kann das zukünftige Baumartenportfolio, das von Natur aus den Wald prägen wird, klimawandelbedingt weitere Arten beinhalten, die bislang in den Wäldern Deutschlands noch keine Rolle spielten.

In vielen Wäldern Deutschlands findet mittlerweile der Waldumbau statt (teilweise schon seit Jahrzehnten), jedoch nach Ansicht vieler Expert/innen noch zu langsam und in zu geringem Ausmaß (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 64). Insbesondere in den Landes- und Körperschaftswäldern sollen die noch verbliebenen Fichten- und Kiefernreinbestände in den nächsten 2 bis 3 Jahrzehnten umgebaut werden. Zunehmend geraten auch weitgehend ungemischte und trockenstressgefährdete Buchenwälder in den Fokus. Auch diese sollten ggf. durch

einen Umbau oder auch durch eine Rückführung zur Naturnähe in Sinne einer eher prozessschutzartigen Waldbewirtschaftung (PSW) hin zu vielfältigen Mischwäldern besser an den Klimawandel angepasst werden. Es ist aber nicht davon auszugehen, dass es einen ganz bestimmten Zielwald geben wird, der dauerhaft resistent und resilient gegenüber Umweltveränderungen ist. Waldumbau und auch eine eher passive Rückführung zur Naturnähe als Anpassung an den Klimawandel werden vielmehr zu einer kontinuierlichen Aufgabe. Von besonderer Bedeutung für die Etablierung naturnaher und vielfältiger Wälder ist insbesondere die Regulierung der Wildbestände (Wildtiermanagement).

6.1.1 Waldmanagement

Eine zentrale, aber auch kontrovers diskutierte Fragestellung für die forstliche Praxis des naturnahen Waldumbaus lautet, ob für die Erreichung der angestrebten waldbaulichen Ziele ein aktives Waldmanagement zwingend erforderlich ist. Nach der vorliegenden forstwissenschaftlichen Evidenz (Kap. 3) scheint ein grundlegender Paradigmenwechsel in der (naturnahen) Waldbewirtschaftung, also die großflächige und gänzliche Herausnahme von Wäldern aus der forstlichen Nutzung oder aber eine Abkehr vom bereits eingeleiteten naturnahen Waldbau, nicht notwendig (oder ggf. auch kontraproduktiv). Genutzte bzw. gepflegte Wälder können häufig ebenso stabil, vielfältig und unter Einbeziehung des Holzproduktespeichers und der Substitutionseffekte fast so kohlenstoffreich sein wie ungenutzte Wälder, sofern die Bewirtschaftung naturschutzgerecht und nachhaltig im Sinne ihrer gesamten Ökosystemleistungen erfolgt (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 52 u. 67). Hier haben sich Konzepte der naturnahen Waldbewirtschaftung (Dauerwald, Prozessschutzwald) bewährt.

Das zentrale Ziel des Waldumbaus, nämlich die Herstellung naturnäherer Waldökosysteme, lässt sich mit naturnahen Bewirtschaftungsformen am besten erreichen (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 220). Mehr ältere und dicke Bäume, natürliche Waldentwicklungsflächen (z. B. Trittsteine), mehr Biomasse (vor allem von Laubbaumarten), höhere waldökosystemare Biodiversität und geringere Störungsintensität sind die Folgen. Von ähnlicher Bedeutung ist die im Vergleich besonders hohe Klimaschutzwirkung durch Akkumulation von Kohlenstoff (z. B. Thom et al. 2019; Thom/Spathelf 2023). Die beschriebene Naturnähe geht einher mit einem hohen Grad an Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit im Klimawandel (z. B. Luick et al. 2021). Vor diesem Hintergrund lassen sich in Anlehnung an Spathelf (2022, S. 64 ff.) folgende Leitprinzipien für das Waldmanagement formulieren:

- *Sicherung der Waldökosystemresilienz*: Stärkung der allgemeinen Störungsresistenz und -resilienz sowie der Anpassungsfähigkeit der Wälder durch artenreiche Ökosysteme sowie bestandes- und bodenschonende Bewirtschaftung.
- *Funktionelle Vielfalt durch angepasste Baumartenwahl*: Sicherung eines funktional diversen Waldes mit hoher genetischer Vielfalt. Dabei Gewährleistung von idealerweise mindestens drei, besser vier standorts- und klimawandelangepassten Baumarten (auch Nadelbaumarten) in stabiler Mischung. Nicht gebietsheimische Baumarten sind dabei eine Option als kleinflächige Beimischung zu heimischen Baumarten.
- *Natur- und Vorausverjüngung*: Verzicht auf großflächige oder kahlschlagsartige Verjüngung, stattdessen Anwendung von langfristigen Naturverjüngungsverfahren zur Entwicklung von vertikal strukturieren Dauermischwäldern. Sicherung einer frühzeitigen Vorausverjüngung als wichtiges Element der Ökosystemresilienz bei Störungen. Falls erforderlich, Verjüngung durch Pflanzung.
- *Bodenschutz*: Beschränkung der Befahrung (vor allem von empfindlichen Böden) auf die Rückelinien, Bodenschonung durch Minimierung der Bodenbearbeitung auf notwendige bzw. sinnvolle Maßnahmen. Durch Laubbaumanbau Förderung des Humusaufbaus, dadurch Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit (Nährelementverfügbarkeit), Kohlenstoff- und Wasserspeicherfähigkeit des Bodens.
- *Partielle Segregation*: In einem integrativen Ansatz zum Biodiversitätserhalt auf Landschaftsebene sollten unterschiedlich intensiv genutzte Wälder sowie auch ungenutzte vorkommen. Hier bieten Ansätze des integrativen Waldmanagements Raum für Schwerpunktsetzungen bei der Sicherung verschiedener Waldleistungen (partielle Segregation).

Für die Umsetzung dieser Leitprinzipien in die forstliche Praxis ist ein Governanceansatz sinnvoll, der einen breiteren Instrumentenmix umfasst. Ein solches Konzept wurde u. a. vom Wissenschaftlichen Beirat für Waldpolitik vorgeschlagen (WBW 2022). Es beinhaltet zum einen die Konkretisierung von Mindeststandards für die Waldwirtschaft (im Sinne einer guten fachlichen Praxis bzw. ordnungsgemäßen Forstwirtschaft). Diese sind im aktuellen Waldgesetz nicht verankert. Für die Einführung von entsprechenden bundeseinheitlichen Standards bedürfte es einer Novellierung des Bundeswaldgesetzes, die auf politischer Ebene und bei einzelnen Stakeholdern umstritten ist. Zum anderen sind aber auch Maßnahmen gezielt zu fördern, die über diese Grundanforderungen

hinausgehen (Kap. 6.2). Schließlich ist die »Bereitstellung geeigneter Information inklusive der dafür erforderlichen Forschung« (WBW 2022, S. 1) Teil des Governancekonzepts. Denn wohl erscheint eine naturnahe Waldwirtschaft, wie sie momentan in zahlreichen Forstbetrieben Deutschlands durchgeführt wird, überwiegend kompatibel mit den zuvor beschriebenen Anpassungserfordernissen. Beim naturnahen Waldumbau und der Anpassung des Waldes an den Klimawandel sind jedoch Entscheidungen und Maßnahmen zu treffen, für die nicht immer eine vollständige wissenschaftliche Evidenz gegeben ist. Es ist deshalb weiterhin von einem erheblichen Forschungsbedarf auszugehen, der sich laut Spathelf (2022, S. 26 f. u. 66 f.) u. a. auf die folgenden Fragen erstreckt:

- Welche Baumarten und Herkünfte sind geeignet für den Wald der Zukunft und wie steht es um die ökologische Verträglichkeit von gebietsfremden Baumarten?
- Wie können Naturwaldcharakteristika (z. B. reife Waldentwicklungsstadien, Totholz oder Habitatbäume) in die Waldbewirtschaftung, u. a. auch im Sinne einer Prozessschutzbewirtschaftung des Waldes, integriert werden? Welchen Flächenanteil sollen diese haben?
- Welche Flächenanteile sollen die Wälder ohne forstliche Nutzung haben? Wie funktioniert Selbsterneuerung (Verjüngung) des Waldes, insbesondere nach starken Störungen, und welche Bedeutung soll kahlschlagsfreien Verjüngungsverfahren zukommen?
- Welche Rolle spielt das Mikrobiom bei der Stabilisierung von Waldökosystemen?
- Wie kann die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens in der Landschaft erhöht werden? Gibt es – neben dem vielfachen Kollaps insbesondere von naturfernen Fichtenmonokulturen – Indikatoren, die darauf hinweisen, dass Kippunkte von Waldökosystemen überschritten werden?

Angesichts der weiterhin bestehenden Unsicherheit und zahlreicher Forschungsdefizite mit Bezug zum Waldmanagement ist das *adaptive Management* ein vielversprechender Ansatz (Kap. 3.5.4; zum Folgenden Spathelf 2022, S. 64 ff.). Ziel ist es, die Unsicherheit bezüglich des Verhaltens von Waldökosystemen durch einen stetigen Zugewinn an Wissen (z. B. über Monitoring oder Forschung) iterativ zu verringern. Dazu werden, basierend auf dem aktuellen Verständnis des Ökosystems und seiner prognostizierten Entwicklung, Maßnahmen zur Umsetzung identifiziert und durch ein geeignetes Monitoring überprüft. Eine wichtige Weiterentwicklung von adaptiven Managementmodellen in der waldbezogenen Forschung stellt die Integration des Risikos bzw. der Unsicherheit in Entscheidungsmodelle dar. Damit lassen sich z. B. ökonomisch optimale Baumartenmischungen⁷⁷ unter Einbeziehung von Unsicherheit modellieren (Messerer/Knoke 2017), ebenso wie nachhaltig erzeugte Holznutzungsmengen (Hahn et al. 2014).

Ein aktuell viel diskutiertes Beispiel für Praxistests, die eine gezielte Beteiligung von Stakeholdern ermöglichen, sind Waldreallabore (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 64; Welle et al. 2022, S. 225). Analog zu den aus der TA bekannten Ansätzen der Reallabore sollte es mit Blick auf einen tatsächlichen Wandel in der Waldwirtschaft darum gehen, sozialökologisch tragfähige und innovative Lösungen gemeinsam gesellschaftlich auszuhandeln. Dies geht nur in Kooperation zwischen verschiedenen Akteuren aus Wissenschaft, Politik, Praxis, Verwaltung und Zivilgesellschaft und in der Gewinnung eines gemeinsamen Problemverständnisses. In großflächigen Versuchen auf Landschaftsebene könnten verschiedene Bewirtschaftungsvarianten in ihren Auswirkungen auf Ökosystemleistungen (z. B. Biodiversität, Kohlenstoffspeicherung) miteinander verglichen werden. Waldreallabore können zudem aktuelle und zukünftige Aspekte der Waldbewirtschaftung und -nutzung für die Gesellschaft erlebbar machen.

6.1.2 Wildtiermanagement

Hohe Wilddichten im Wald führen zu Schäden, wie Wachstumseinbußen und Mortalität bei Bäumen, sowie zur Entmischung ganzer Bestände (Kap. 3.4.1; Seifert et al. 2022, S. 195; Spathelf 2022, S. 55). Der Waldumbau zu klimaresilienten Wäldern und vor allem die Wiederbewaldung großer Schadflächen ist deshalb nur erfolgreich, wenn habitatangepasste Wildbestände vorherrschen. Prinzipiell sind technische Lösungen zur Vermeidung von Wildschäden wie Zäune, Wuchshüllen oder chemische Mittel ausgereift. Für die großflächige Anwendung sind sie jedoch generell zu aufwendig und teuer und in einem strukturreichen Wald mit flächiger Verjüngung auch unpraktikabel. Eine zukünftig mögliche Kombination von Verfahren der Waldmesskunde und -inventur mit Methoden des Populationsmonitorings von Wildtieren auf der Basis eines gezielten Einsatzes von Drohnentechnologien könnte einen wesentlichen Informations- und Erkenntnisfortschritt bringen. Hierdurch könnten zeitnah die

⁷⁷ So haben etwa die Baumartenwahl und die Mischung unterschiedlichste Auswirkungen auf Erträge, Totholzakкумуляtion, Trinkwasserspende oder die Stabilität des Waldes (Spathelf 2022, S. 65).

Wirkungen von wildbiologischen und waldbaulichen Ansätzen hinsichtlich der Verjüngungsentwicklung und Raum-Zeit-Nutzung des Wildes erfasst werden und in die waldbauliche und jagdliche Planung einfließen.

Allerdings liegen die heutigen Probleme meistens nicht an fehlenden technischen Lösungen, sondern an den zum Teil unterschiedlichen Interessenlagen von Forstwirtschaft und Jagd (Kap. 3.4.1; dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 110). Im Sinne des notwendigen Waldumbaus erscheint eine Entschärfung des Wald-Wild-Konflikts im Sinne eines konstruktiven Miteinanders erforderlich bzw. zielführend. Dafür werden Moderator/innen und/oder Mediator/innen in Person universitär qualifizierter Wildbiologen/innen benötigt, und zwar auf allen Ebenen der zuständigen Verwaltungen. Um im Wildtiermanagement handlungsfähig zu werden, sollte der Staat, ähnlich wie in den Bereichen Forst-/Landwirtschaft sowie Naturschutz, zudem entsprechende eigene Fachkompetenzen in seinen Behördenstrukturen aufbauen. Dadurch wäre er in die Lage versetzt, neben der Umsetzung rechtlicher Vorgaben auch einen eigenen fachlichen, wissenschaftlich fundierten Beitrag im gesellschaftlichen Diskurs über Wald und Wild zu leisten bzw. eine evidenzbasierte Diskussion anzustoßen.

Im Kontext eines künftigen Wildtiermanagements erscheinen hinsichtlich der jagdlichen Perspektiven nach Ansicht von Seifert et al. (2022, S. 116) vor allem folgende Ansatzpunkte relevant bzw. erfolgversprechend:

- Erfüllung der Abschusspläne und strukturelle Durchführung der Bejagung mit einem Schwerpunkt auf weibliches Schalenwild, dessen Zahl häufig unterschätzt wird. Zweck ist, so zu einer Stabilisierung der Populationen mit gleichzeitig hohem Anteil gewünschter männlicher Tiere zu gelangen.
- Durchführung der Bejagung von Rehen etwa im Rahmen einer Intervalljagd, die sich an den Aktivitätsphasen der Rehe orientiert (Jagdzeiten zwischen Mai und Mitte Juni, zur Brunftzeit im September sowie im Winter bis Ende Januar).
- Einstellung der Fütterung von Rehen sowie von allen anderen Schalenwildarten in den Bereichen, wo das Schalenwild natürliche Überwinterungsgebiete aufsuchen kann, um natürliche Selektionsprozesse zu ermöglichen.

Heutige Anforderungen an die Jagd setzen Kenntnisse der Populationsökologie und -kontrolle sowie der allgemeinen Wildtierernährung voraus. Auf beiden Fachgebieten werden Jäger aktuell nicht ausgebildet (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 117). Um präventiv das Risiko für die Entstehung von Wildschäden zu reduzieren, erscheint eine entsprechende Aus- bzw. Weiterbildung der Jägerschaft sinnvoll und die konstruktive Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten sollte intensiviert werden.

6.2 Ökonomische Aspekte

Die Ausgangssituation für eine naturnahe Waldbewirtschaftung unter Beachtung der Anpassungsfähigkeit des Waldes an den Klimawandel ist in Deutschland sehr unterschiedlich je nach walddeschiedlicher Prägung, standörtlichen Voraussetzungen und Waldeigentumsart (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 60). Während seit längerem naturnah wirtschaftende Betriebe bereits eine hohe Baumarten- und Strukturvielfalt und damit gute Voraussetzungen für die Anpassung an den Klimawandel aufweisen, haben andere Betriebe immer noch größere Waldteile, die von einer risikoprägen Altersklassenwaldwirtschaft mit Reinbeständen gekennzeichnet sind. Letztere stehen heute, da von den extremen Schadereignissen der vergangenen Jahre besonders betroffen, vor gewaltigen Herausforderungen beim naturnahen Waldumbau und bei der Wiederbewaldung von Katastrophflächen. Einer zielgerichteten staatlichen Förderung des Waldumbaus (und begleitender forstlicher Beratung), die auf einer fundierten Einschätzung zu den Vor- und Nachteilen verschiedener Bewirtschaftungskonzepte basiert, kommt deshalb eine Schlüsselrolle zu.

6.2.1 Vergleich der Bewirtschaftungsverfahren

Der Waldumbau und die Anpassung des Waldes an den Klimawandel sind grundsätzlich mit hohen Kosten verbunden, die u. a. durch die Aufwendungen für den Waldumbau (z. B. Aufforstung oder Voranbauten⁷⁸ zur Diversifizierung der Bestockungszusammensetzung) sowie die durch den Umbau entstehenden Mindererträge verursacht werden (Spathelf 2022, S. 62). Dabei hat die Bewirtschaftungsform der Wälder – Altersklassenwald, Dauerwald, Prozessschutzwald – nicht nur Auswirkungen auf die Geschwindigkeit des Waldumbaus in naturnahe Mischwälder, sondern auch große ökonomische Implikationen. Die für den vorliegenden Bericht durchgeführten Modellierungen (Kap. 5) deuten darauf hin, dass die prozessschutzorientierte Waldwirtschaft sowie die Dauer-

⁷⁸ Unter Voranbau wird die künstliche Begründung eines Bestandes (z. B. durch Saat und Pflanzung) unter dem Kronenschirm eines Altbestandes verstanden.

waldbewirtschaftung auch betriebswirtschaftlich mittel- bis langfristig vorteilhafter sind als die bisher vorherrschende Altersklassenwaldwirtschaft (Welle et al. 2022, S. 220). Basierend auf der langfristigen Waldumbauperspektive von 50 Jahren zeigt sich, dass die Betriebsergebnisse der Altersklassenwaldwirtschaft am ungünstigsten sind, der Waldumbau mittels AKW also am kostspieligsten wäre. Diese Berechnungen sind zwar mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet. So enthalten sie beispielsweise Annahmen zu zukünftigen Energie- und Holzpreisen. Außerdem können sie die Vielfalt der lokalen Wuchsbedingungen (besonders unter zukünftigen klimatischen Bedingungen) nicht abbilden (Kap. 5.1.4). Für einen Vergleich zwischen den verschiedenen Bewirtschaftungstypen sind sie dennoch geeignet. Zudem stimmen die zentralen Aussagen mit den Ergebnissen empirischer Untersuchungen überein (Kap. 5.2.3) (Berner 2016; Duda 2006; Knoke 2009).

Einer der entscheidenden ökonomischen Vorteile von Dauer- und Prozessschutzwäldern im Vergleich zu Altersklassenwäldern, bei denen alle Bäume innerhalb eines kurzen Zeitraumes endgenutzt werden, ist die Möglichkeit, die Bäume individuell nach ihrer Hiebsreife und somit zum Zeitpunkt des Maximums ihres Wertzuwachses zu ernten (dazu und zum Folgenden Spathelf 2022, S. 62 f.). Frühzeitig freigestellte Bäume haben längere Kronen und damit bessere Stabilitätseigenschaften als relativ dicht wachsende Bäume im Altersklassenwald. Das ermöglicht die Ernte in einem optimalen Zeitfenster bei guten Marktbedingungen und verringert zudem den vorzeitigen Schadholzanfall. Zudem werden über die verstärkte Nutzung der natürlichen Prozesse in strukturierten Wäldern Aufwendungen bei der Waldpflege reduziert. Deshalb erscheint beim aktuell angestrebten Waldumbau eine frühzeitige Überführung eines gleichaltrigen Reinbestandes in strukturierte Dauer- oder Prozessschutzwälder sinnvoll, weil durch die Entnahme von starken, alten Bäumen mehr Einnahmen als durch die Endnutzung eines Altersklassenwaldes alle 40 oder 60 Jahre generiert werden können. Ungleichaltrige Dauer- und Prozessschutzwälder führen zu häufigeren, kontinuierlich anfallenden, aber etwas geringeren Einnahmen, während es beim Altersklassenwald viel seltenere, dann aber höhere Einnahmen gibt. Dazu kommt, dass die Naturverjüngung im Dauer- und Prozessschutzwald meist kostengünstiger ist als im Altersklassenwald (Knoke 2017), wo von höheren Pflanzungskosten auszugehen ist. Dies belegen Untersuchungen aus Skandinavien (Tahvonen/Rämö 2016).

Vor diesem Hintergrund erscheint es gerechtfertigt, dass bei Maßnahmen des naturnahen Waldumbaus die prozessschutzorientierte Bewirtschaftung und die Dauerwaldwirtschaft wegen ihres ökologischen bzw. ökosystemaren Ansatzes im Vergleich zu AKW bessere Chancen auf Förderung erhalten.

6.2.2 Förderstrategien und -maßnahmen

Die Förderung der Forstwirtschaft bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Zielkonflikte zwischen den Ökosystemleistungen Biodiversität und Holzproduktion ist Ziel zahlreicher Strategien und Programme in Deutschland auf Bund- und Länderebene (Wissenschaftliche Dienste 2019; dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 27 u. 176). Die Strategien legen zunächst die politische Marschrichtung in dem Feld fest und ziehen konkrete Programme und Aktionspläne nach sich. Die resultierende Förderstruktur ist sehr komplex und in der konkreten Maßnahmenausgestaltung oftmals unübersichtlich und kleinteilig. Sie reicht von konkreten Förderlinien für spezifische Akteur/innen aus der Wissenschaft, der forstlichen und holzwirtschaftlichen Praxis bis hin zu kleinteiliger Unterstützung von Privatwaldbesitzenden (Kap. 5.3). Die daraus resultierenden Maßnahmen haben beträchtliche Auswirkungen auf den Wald und die Forstwirtschaft. Inwiefern sie einander verstärken oder aber konterkarieren, ist nicht einfach zu beantworten und bislang auch noch nicht (ausreichend) untersucht.

In Deutschland wird die wesentliche Ausrichtung der nationalen Wald- und Forstpolitik in den Waldstrategien vorgegeben (Kap. 2.4.2). Die erste »Waldstrategie 2020« wurde von der Bundesregierung 2011 veröffentlicht. Sie umfasste jedoch weder konkrete Vorschläge für ein koordiniertes Vorgehen noch Zielkonkretisierungen. In den 2021 veröffentlichten Entwürfen einer »Waldstrategie 2050« ist dieses Manko zum Teil behoben, indem zu 10 verschiedenen Handlungsfeldern (darunter »Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel«, »Biodiversität und Waldnaturschutz«, »Holzerzeugung und Verwendung«, »Waldentwicklung, nachhaltige Bewirtschaftung und Jagd«) zentrale Meilensteine bis 2030 formuliert wurden. Übergeordnetes Ziel ist es, »die Wälder in Deutschland mit ihren vielfältigen Ökosystemleistungen für den einzelnen Menschen und die Gesellschaft, die Natur sowie die Wirtschaft zu erhalten und an die sich ändernden klimatischen Bedingungen anzupassen« (BMEL 2021c, S. 3). Das der Strategie zugrunde liegende Leitbild sieht eine integrative Bewirtschaftung vor, sodass Stabilität, biologische Vielfalt, Produktivität und die vielfältigen Schutzleistungen der Wälder sowie ihre Erlebbarkeit zum Wohl der gesamten Gesellschaft nachhaltig gewährleistet werden (BMEL 2021c, S. 6).

Insgesamt kann zwar konstatiert werden, dass die naturnahe Waldbewirtschaftung sowie der Umbau »von reinen Nadelwäldern zu stabileren und artenreicheren Mischwäldern« (BMEL 2021c, S. 24) seit Jahren zu den fest etablierten forstpolitischen Zielen in Deutschland gehören (dazu und zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 28 u. 196 f.),

auch die »Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel« sieht die »stabile, strukturreiche und standortgerechte Entwicklung von Mischwäldern« vor (Bundesregierung 2020b, S. 55). Aktuell wirken die politischen Bemühungen zur Förderung eines waldbirtschaftlichen Wandels zum Teil aber noch widersprüchlich und umfassen eine Vielfalt an Programmen und Maßnahmen, die auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen (z. B. ELER, GAK, Klimaangepasstes Waldmanagement; Kap. 5.3.2). Dies erschwert letztlich auch eine Bilanzierung von einzelnen Maßnahmen, etwa welche forstliche Förderung zum Klima- bzw. Biodiversitätsschutz wie viel oder überhaupt beiträgt. Um eine positive Gesamtwirkung zu erzielen, müssen die Maßnahmen in der Regel gut aufeinander abgestimmt sein.

Die forstliche Förderung bedarf entsprechend neben einer ausreichenden finanziellen Ausstattung einer klaren politischen Zielsetzung und Ausrichtung. Dabei sollten auch Widersprüche und Konflikte offengelegt und mehreren Perspektiven Raum gegeben werden. Ziel sollte eine kohärente Gesamtpolitik sein, in der die zentralen Ziele der einzelnen Strategien und der darauf aufbauenden Fördermaßnahmen danach ausgerichtet sind, die Nachhaltigkeits- bzw. Gemeinwohlorientierung der Waldnutzung, den Schutz der Biologischen Vielfalt und wichtige Klimaschutzziele nicht zu gefährden. Im Bereich der forstlichen Förderung bieten sich folgende Handlungsoptionen (zum Folgenden Welle et al. 2022, S. 197 u. 225 f.):

- *Bestehende Programme und Maßnahmen der forstlichen Förderung sollten umfassend und in ihrem Bezug aufeinander evaluiert werden*, um Synergien und Widersprüche sowie Stellschrauben für eine zukunftsfähige Umgestaltung der forstlichen Förderung für einen naturnahen Waldumbau zu identifizieren. Insbesondere sollten existierende Förderungs- und Subventionsprogramme auf Inhalte, die den Zielen eines naturnahen Waldumbaus entgegenstehen, kritisch geprüft werden. Regularien, die im Konflikt mit diesen Zielen stehen, wären auszusetzen.
- Notwendig wäre ein *langfristig angelegtes und finanziell ausreichend ausgestattetes Förderprogramm* für ökologischen oder ökosystembasierten Waldumbau, das die Umwandlung in naturnahe Wälder möglichst unbürokratisch, jedoch anhand klarer und überprüfbarer Kriterien honoriert und für eine Beschleunigung der Waldumbauaktivitäten sorgt. Ein langfristiges Waldumbauprogramm müsste die verwundbarsten Waldbestände mittels entsprechend abgestufter Förderkriterien priorisieren (Eingrenzung des Gießkanneneffektes). Bei der Gestaltung einer entsprechenden Förderrichtlinie sollte darauf geachtet werden, dass eine dynamische Feinsteuerung in kurzfristiger Reaktion auf nicht ausreichend genau vorhersehbare Änderung der Bedingungen (z. B. klimatische) möglich ist. Um die jeweilig spezifischen Standortbedingungen besser berücksichtigen zu können, erscheint der Ansatz zielführend, über Referenzflächen Forschungs- und Lernräume anzulegen (wie es im Prozessschutzansatz des Lübecker Modells seit Jahren praktiziert wird und im Förderprogramm Klimaangepasstes Waldmanagement angelegt ist).
- Das neue Förderprogramm »Klimaangepasstes Waldmanagement« hat viele Synergien mit den Zielen des naturnahen Waldumbaus (z. B. Förderung der Vorausverjüngung, Vorrang von Naturverjüngung, Zulassen von Stadien der natürlichen Waldentwicklung, Belassen von Derbholz auf Kalamitätsflächen). Dementsprechend wäre eine Möglichkeit, *ein Modul »Naturnaher (ökologischer oder ökosystembasierter) Waldumbau« in dieses Förderprogramm zu integrieren*, das noch strengere Anforderungen als bislang beinhaltet (beispielsweise sollte auf Kalamitätsflächen eine größere Menge Totholz belassen werden). Die Integration eines neuen Moduls in ein bestehendes Förderprogramm hätte den Vorteil, dass die Antragstellung und die behördliche Betreuung effizient gestaltet werden könnten.
- Die großen waldbirtschaftlichen Herausforderungen sind ohne eine qualitativ *hochwertige forstliche Beratung* nicht zu bewältigen. Die Betreuung und Beratung von (Klein-)Waldbesitzenden sollte intensiviert und stärker auf die Herausforderungen und (normativen) Ziele des naturnahen Waldumbaus ausgerichtet werden. Sinnvoll erscheint beispielsweise, dass für Fördermittelempfangende kontinuierliche Beratung mit aktuellen Inhalten zu waldbiologischen Erkenntnissen etc. zur Verfügung steht. Insgesamt erscheint eine vielfältigere Beratungslandschaft wünschenswert, die auch Angebote außerhalb der Forstverwaltungen umfasst und inhaltlich eine größere Bandbreite an Perspektiven abdeckt.

6.3 Technologische Aspekte

Verschiedene Technologien bieten große Potenziale für die Unterstützung des naturnahen Waldumbaus (Kap. 4). Vor allem vier Technikbereiche stehen dabei im Fokus (zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 4 ff.):

- *Waldmonitoring*: Neuartige Monitoringansätze und -methoden, vor allem satelliten- und drohnengestützte Sensorplattformen sowie bodengestütztes Laserscanning, können wertvolle Informationen über den Umbauerfolg generieren, bei der Umsetzungskontrolle helfen und eine objektive Vergleichsgrundlage schaffen (Welle et al. 2022, S. 227).
- *Innovative maschinelle Ansätze zur Waldbewirtschaftung*: Hier steht das zielgerichtete Anpassen von Maschinenkomponenten an die typischen Erfordernisse im Mischwald im Vordergrund, etwa ein optimierter Harvesterkopf für Laub- wie Nadelholz, ein verbesserter Kranarm sowie innovative Raupen mit geringen Bodendrücken. Fortschritte in Sensorik und IT ermöglichen es des Weiteren, vermehrt Assistenzsysteme zur Unterstützung der Maschinenbedienung zu etablieren, wodurch die Produktivität erhöht, aber auch umweltschonendere Verfahren etabliert werden können.
- *Neue Möglichkeiten im Bereich biotischer Waldschutz*: Um die Resilienz der Wälder für die Zukunft nachhaltig und umweltschonend zu erhöhen und einen guten Gesundheitszustand dauerhaft zu garantieren, müssen die präventiven Möglichkeiten, insbesondere die Überwachung und Prognose von Schadinsekten, optimiert und auch die Entwicklung neuer biologischer Verfahren vorangetrieben werden.
- *Genetisches Monitoring* dient dazu, Veränderungen in der genetischen Ausstattung von Waldbeständen zu erkennen. Es liefert insbesondere durch die Analyse klimaresilienter und stressrelevanter Baumartenmerkmale wichtige Kriterien für Waldumbaumaßnahmen und hilft dabei, etwa durch die Bewertung der Saatgutqualität, Risiken zu erkennen und zu vermeiden.

Alle diese Bereiche bedürfen der weiteren Förderung. So unterliegt etwa das genetische Monitoring im Forstbereich noch vielfältigen Hürden (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 196). Wünschenswert wäre eine konzertierte Aktion von Bund und Ländern, um genetisches Monitoring wichtiger Baumarten auf Dauer zu etablieren. Dazu sollte die routinemäßige Anwendung molekulargenetischer Verfahren zur Bewertung der Saatgutqualität sowie zum Nachweis von Merkmalen gehören, die für den Waldumbau und das langfristige Überleben der Wälder bedeutsam sind.

Auch in der Waldbewirtschaftung sowie im Waldzustandsmonitoring kommen hierzulande neuartige Technologien kaum zum Einsatz (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 194 ff.). Das hat verschiedene Gründe. Zum einen hängt es damit zusammen, dass die vorhandenen technischen Lösungen entweder generell für forstliche Anwendungen noch nicht ausgereift oder nur unzureichend an die hiesigen waldbaulichen Anforderungen (naturnahe, gemischte Wälder) angepasst sind. Wichtige Grundlagentechnologien wie Sensoren, Drohnen und Roboter oder KI-basierte Datenverarbeitung werden in der Regel für andere Anwendungsbereiche entwickelt und müssen erst für den Forstbereich adaptiert werden, was aber oft noch nicht zielführend genug oder in ausreichendem Maße geschieht. Zum anderen fehlt es an forstspezifischen Softwarelösungen, um datenbasierte Technologien effektiv beim Waldumbau zum Einsatz zu bringen und in integrierte Gesamtsysteme einbinden zu können.

Grundsätzlich hängen Entwicklungen und Implementierungen neuer Technologien im Bereich Forst zunächst von Innovationen in Grundlagentechnologien ab, die meist von der akademischen Forschung bereitgestellt werden, sowie von entsprechend positionierten Firmen, die diese Technologien in marktrelevante Produkte umzusetzen vermögen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 65 f.). Die Ausstattung und Qualität der deutschen Hochschulen und Forschungsinstitutionen, die alle relevanten Felder vom Maschinenbau über Elektrotechnik, Informatik bis hin zu Forstwissenschaften abdecken, ist als gut einzuschätzen. Um forstspezifische Entwicklungen voranzubringen, braucht es jedoch verstärkt interdisziplinäre Kooperationen (insbesondere zwischen Maschinenbau, Informatik und Forstwissenschaft). Erforderlich ist zudem eine marktnahe Forschungsförderung, die neben Hochschulen auch private Firmen in die Entwicklungsprojekte einbezieht. Denn bei produktbezogenen Entwicklungen, an denen alleine Hochschulen beteiligt sind, besteht die Gefahr, dass sie als teure Prototypen ohne Marktrelevanz enden.

Technologieübergreifend ist festzustellen, dass bestimmte typische Hemmnisse die Implementierung innovativer Technologien im Forstbereich behindern. Dazu gehören gesetzliche sowie institutionelle Hürden, aber auch strukturelle Barrieren. Zu deren Überwindung bieten sich Handlungsoptionen in den folgenden Bereichen (dazu und zum Folgenden Seifert et al. 2022, S. 196 ff.):

- *Abbau von Hürden bei der Forschungsförderung*: Die Möglichkeiten, Fördermittel für Forschung und Entwicklung zu innovativen Technologien zu beantragen, sind breit gestreut (EU, Bundesministerien, DFG,

Bundesländer). Häufig aber fehlt es an Vernetzung und Kontinuität der Programme. Auf Landesebene gibt es derzeit kaum relevante Forstforschungsprogramme für lokalisierte Schwerpunktforschung, die kompetitiv für Universitäten und Hochschulen zugänglich sind. Meist dominieren hier Ressortforschungseinrichtungen der Länder (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalten). Idealerweise wären aber alle Forschungseinrichtungen an solchen Forschungsprogrammen beteiligt. Der Status quo behindert den Übergang von Grundlagenforschung zur angewandten Forschung und eine Bündelung der Kräfte auf Landesebene.

- *Schaffung standortübergreifender Cluster*: Sinnvoll wäre, die Fähigkeiten und Möglichkeiten, die verschiedene Akteure im Kontext des notwendigen klimaresilienten Umbaus der Wälder und Forsten zu bieten haben, stärker zu bündeln. Hierfür bietet sich die Bildung standortübergreifender Cluster zu bestimmten Innovationsthemen an, um die verschiedenen Forschungsakteure, aber auch private Firmen und Praxisakteure gezielt miteinander zu vernetzen und für die Entwicklung praxisnaher Lösungen zusammenzubringen. Vorbilder sind hier das Kompetenzzentrum Wald und Holz 4.0 sowie die digitalen Experimentierfelder, wie sie das BMEL (2023b) im Bereich der Landwirtschaft eingerichtet hat. Bei allen entsprechenden Aktivitäten sollten möglichst die Partnerschaft und enge Absprache mit den von den gleichen Problemen betroffenen unmittelbaren Nachbarn (etwa in der DACH-Region) gesucht werden, da sich auch dort ähnliche forstpolitische, klimatische und waldstrukturelle Probleme wiederfinden.
- *Beseitigung strukturbedingter Barrieren im Waldbesitz für den Einsatz innovativer Technologien*: Damit die Innovationen in der forstlichen Praxis auch ankommen, braucht es gut ausgerüstete Betriebe mit gut ausgebildeten Mitarbeiter/innen, was nicht in ausreichendem Maße gegeben ist. Die Möglichkeiten, innovative Technologien einzusetzen, sind wesentlich durch strukturbedingte Barrieren begrenzt. Die Waldbesitzstruktur stellt ein gewisses Hemmnis bei der Adaption neuer Technologien dar, weil viele kleine Privatwaldbesitzende finanziell kaum zu Technologieinvestitionen fähig sind. Insbesondere die kleineren Forstbesitzenden sind dadurch größtenteils von Innovationen ausgeschlossen. Dieses Manko kann durch staatliche Unterstützung und die verstärkte Einbindung von Forstbetriebsgemeinschaften abgemildert werden. Es fehlt hier vor allem auch an Strukturen auf Länderebene, durch die die von Versuchsanstalten, Universitäten bzw. Hochschulen und der Industrie entwickelten Innovationen in die Praxis implementiert und so für den Kleinprivatwald und den Kommunalwald verfügbar gemacht werden. Hier sollte ein Schwerpunkt der Förderung im praktischen Forstbereich ansetzen.
- Schließlich stehen vielfach auch *rechtliche und organisatorische Hürden* dem Einsatz neuer Technologien zum Waldumbau im Wege. Dazu gehören beispielsweise die noch geltenden Einschränkungen bei Drohnenflügen außer Sicht. Problematisch ist auch die mangelnde Verfügbarkeit von Daten: So behandeln etwa insbesondere die Vermessungsämter vieler Bundesländer ihre mit öffentlichen Mitteln erhobenen Daten (z. B. aus Laserscanningbefliegungen) proprietär und verlangen Bereitstellungsgebühren für ihre Produkte. Rohdaten sind normalerweise nicht verfügbar. Aber auch an Universitäten und Forschungsanstalten werden viele Daten erhoben, die für weitere Auswertungen oftmals nur schwer zugänglich sind. Diese Gegebenheiten und Strukturen verhindern eine Zusammenführung und übergreifende Auswertung der Daten, die im Zuge des Waldumbaus von großer Bedeutung wären (Isermeyer et al. 2021).

7 Literatur

7.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Seifert, S.; Ziesak, M.; König, A.; Müller-Starck, G.; Seifert, T.; Schumacher, J.; Linde, A.; Bayer, S. (2022): Technische Innovationen für Waldumbau und nachhaltiges Waldmanagement. Scientes Mondium UG; IFOS GmbH; TU München; Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde; Altomünster u. a. O.

Spathelf, P. (2022): Anforderungen an den naturnahen Waldumbau aus forstwissenschaftlicher Sicht. Mühlenbeck

Welle, T.; Kreft, S.; Sturm, K.; Katz, C. (2022): Ökonomische Aspekte des naturnahen Waldumbaus. Naturwaldakademie; Stadtwald Lübeck; diversu e. V. Lübeck/Lüneburg

7.2 Weitere Literatur

AGDW (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Waldbesitzerverbände e. V.) (2020): Konjunkturpaket: 700 Millionen Euro für den Wald. <https://www.waldeigentuemmer.de/konjunkturpaket-700-millionen-euro-fuer-den-wald/> (2.1.2024)

AGDW (2021): AGDW und Familienbetriebe fordern Mindestlohn für den Wald. <https://www.waldeigentuemmer.de/agdw-und-familienbetriebe-fordern-mindestlohn-fuer-den-wald/> (10.4.2024)

AGRA-Europe (2023): Forstwirtschaft begrüßt Beibehaltung von Holz als erneuerbarer Quelle. RED-III Einigung. In: AGRA-Europe 14, S. 11

Albrecht, A.; Michiels, H.-G.; Kohnle, U. (2019): Baumarteneignung 2.0 und Vulnerabilitätskarten – Konzept und landesweite Hauptergebnisse. In: FVA-einblick 2, S. 9–14

Albrecht, A.; Schindler, D.; Grebhan, K.; Kohnle, U.; Mayer, M. (2008): Klimawandel und Stürme über Europa – eine Literaturübersicht. In: FVA-einblick 1, S. 20–23

Aldinger, E.; Kenk, G. (2000): Natürliche Wiederbewaldung von Sturmwurfflächen. FVA-Merkblatt 51, https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/merkblatt/mb_51.pdf (20.3.2024)

Ammer, C. (1996): Impact of ungulates on structure and dynamics of natural regeneration of mixed mountain forests in the Bavarian Alps. In: Forest Ecology and Management 88(1–2), S. 43–53

Ammer, C. (2017): Unraveling the Importance of Inter- and Intraspecific Competition for the Adaptation of Forests to Climate Change. In: Canovas, F.; Lüttge, U.; Matyssek, R. (Hg.): Progress in Botany. Vol. 78, Cham, S. 345–367

Ammer, C.; Vor, T.; Knoke, T.; Wagner, S. (2010): Der Wald-Wild-Konflikt. Analyse und Lösungsansätze vor dem Hintergrund rechtlicher, ökologischer und ökonomischer Zusammenhänge. Göttinger Forstwissenschaften 5, Göttingen

Ammer, C.; Bolte, A.; Herberg, A.; Höltermann, A.; Krüß, A.; Krug, A.; Nehring, S.; Schmidt, O.; Spellmann, H.; Vor, T. (2016): Vertreterinnen und Vertreter von Forstwissenschaft und Naturschutz legen gemeinsame Empfehlungen für den Anbau eingeführter Waldbaumarten vor. Gemeinsames Papier des DVFFA und des BfN. In: Natur und Landschaft 91(3), S. 141

Ammon, W. (1951): Das Plenterprinzip in der Waldwirtschaft. Folgerungen aus 40 Jahren schweizerischer Praxis. Bern

Anderegg, W.; Wu, C.; Acil, N.; Carvalhais, N.; Pugh, T.; Sadler, J.; Seidl, R. (2022): A climate risk analysis of Earth's forests in the 21st century. In: Science 377(6610), S. 1099–1103

Anke, M.; Dittrich, G.; Groppe, B.; Schäfer, U.; Müller, R.; Hoppe, C. (2007): Zusammensetzung und Aufnahme von Winteräsung durch Reh-, Muffel-, Dam- und Rotwild. In: Stubbe, C. (Hg.): Beiträge zur Jagd- und Wildforschung, S. 379–398

ANW (2013): Grundsätze der ANW für Naturgemäße Waldwirtschaft. Schmallenberg, www.anw-deutschland.de/eip/media/grundsätze-13-12-13.pdf?fl=27238212 (20.3.2024)

Arens, D. (2011): Der deutsche Wald. Köln

- AWG (Bayerisches Amt für Waldgenetik) (o. J.a): Forstgenetisches Versuchswesen.
<https://www.awg.bayern.de/279591/index.php> (30.5.2023)
- AWG (o. J.b): GenMon - Genetische Systeme von Waldbäumen im zeitlichen und räumlichen Wandel.
<https://www.awg.bayern.de/179989/index.php> (30.5.2023)
- AWG (o. J.c): LIFE GENMON – Life for European Forest Genetic Monitoring System (LIFE13 ENV/SI/000148). <https://www.awg.bayern.de/114635/index.php> (30.5.2023)
- AWG (o. J.e): SUSTREE – Forstliches Saatgut über Grenzen hinweg.
<https://www.awg.bayern.de/201144/index.php> (30.5.2023)
- AWG (o. J.d): sensFORclim - Klimasensitivität von Forstgenressourcen in Deutschland.
<https://www.awg.bayern.de/258538/index.php> (30.5.2024)
- Balla, A.; Silini, A.; Cherif-Silini, H.; Chenari Bouket, A.; Moser, W.; Nowakowska, J.; Oszako, T.; Benia, F.; Belbahri, L. (2021): The Threat of Pests and Pathogens and the Potential for Biological Control in Forest Ecosystems. In: *Forests* 12(11), S. 1579
- Bandt, O. (2021): Kommentar zur BUND zu Waldstrategie 2050: Klöckner schützt Interessen der Forstlobby statt den Wald. <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/kommentar-zur-bund-zu-waldstrategie-2050-kloeckner-schuetzt-interessen-der-forstlobby-statt-den-wald/> (20.2.2024)
- Barth, M. (2013): Biologische Bekämpfung des Eichenprozessionsspinners mit Nematoden. In: *Julius-Kühn-Archiv* 440, S. 79–80
- Bauhus, J. (2022): Die Anpassung der Wälder an den Klimawandel – eine waldwirtschaftliche Perspektive. In: *Natur und Landschaft* 97(07), S. 318–324
- Bauhus, J.; Forrester, D.; Pretzsch, H. (2017a): From Observations to Evidence About Effects of Mixed-Species Stands. In: Pretzsch, H.; Forrester, D.; Bauhus, J. (Hg.): *Mixed-species forests. Ecology and management*. Berlin/Heidelberg, S. 27–71
- Bauhus, J.; Forrester, D.; Pretzsch, H.; Felton, A.; Pyttel, P.; Benneter, A. (2017b): Silvicultural Options for Mixed-Species Stands. In: Pretzsch, H.; Forrester, D.; Bauhus, J. (Hg.): *Mixed-species forests. Ecology and management*. Berlin/Heidelberg, S. 433–501
- BaySF (Bayerische Staatsforsten) (o. J.): Waldumbau: Bäumchen wechsel dich! <https://www.baysf.de/de/wald-verstehen/waldumbau.html> (30.5.2024)
- Bedding, R. (2009): Controlling the Pine-Killing Woodwasp, *Sirex noctilio*, with Nematodes. In: Hajek, A. (Hg.): *Use of Microbes for Control and Eradication of Invasive Arthropods*. Dordrecht, S. 213–235
- Bender, S.; Wieseahn, J.; Jánosi, K.; Bolte, A. (2019): Bundesweite Projektion der Überlebensraten wichtiger Baumarten. In: *AFZ – DerWald* 2, S. 18–20
- Berner, C. (2016): Wie wirkt sich eine starke Durchforstung ökonomisch aus? In: *Forstzeitung* 11, S. 14–15
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2020): Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Positionspapier, Bonn, <https://www.bundestag.de/resource/blob/818868/af42b23ef7aea9cf2e34132c2cef2dbe/Positionspapier-vom-Bundesamt-fuer-Naturschutz-data.pdf> (20.3.2024)
- BfN (o. J.): Neuauflage der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. <https://www.bfn.de/neuauflage-der-nationalen-strategie-zur-biologischen-vielfalt> (30.5.2024)
- BfN; NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) (2019): Aktuelle Daten zur natürlichen Waldentwicklung in Deutschland. <https://www.bfn.de/pressemitteilungen/aktuelle-daten-zur-natuerlichen-waldentwicklung-deutschland> (20.3.2024)
- Biedermann, P.; Müller, J.; Grégoire, J.-C.; Gruppe, A.; Hagge, J.; Hammerbacher, A.; Hofstetter, R.; Kandasamy, D.; Kolarik, M.; Kostovcik, M.; Krokene, P. et al. (2019): Bark Beetle Population Dynamics in the Anthropocene: Challenges and Solutions. In: *Trends in ecology & evolution* 34(10), S. 914–924
- BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2021a): Bundesprogramm Holzwirtschaft: 25 Millionen Euro Antragssumme. https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/210610_BuPro_Holzwirtschaft.html (20.3.2024)

- BLE (2021b): Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2020.
<https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Waldbrandstatistik/Waldbrandstatistik-2020.pdf> (20.2.2024)
- Von Blomberg, M.; Volckens, F.; Möhring, B. (2022): Ergebnisse aus dem BB-Forstbetriebsvergleich 2021. In: AFZ – DerWald 23, S. 21–25
- Blumröder, J.; May, F.; Härdtle, W.; Ibisch, P. (2021): Forestry contributed to warming of forest ecosystems in northern Germany during the extreme summers of 2018 and 2019. In: Ecological Solutions and Evidence 2(3), S. e12087
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2014): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin,
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (20.2.2024)
- BMEL (2016): Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012.
https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/BMEL_BWI_Bericht_Ergebnisse_2012_RZ02_web-4.pdf (30.5.2024)
- BMEL (2019): Die wirtschaftliche Lage der forstwirtschaftlichen Betriebe, Buchführungsergebnisse des Forstwirtschaftsjahres 2017. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/testbetriebsnetz/testbetriebsnetz-forst-buchfuehrungsergebnisse/archiv-buchfuehrungsergebnisse-forstwirtschaft/buchfuehrungsergebnisse-forstwirtschaft-2017> (19.2.2024)
- BMEL (2020a): Referentenentwurf des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundesjagdgesetzes und des Bundesnaturschutzgesetzes.
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Glaeserne-Gesetze/Referentenentwuerfe/ref-entw-b-jagd-g.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (20.2.2024)
- BMEL (2020b): »Investitionsprogramm Wald« gestartet. 3.11.2020,
<https://www.bmel.de/SharedDocs/Meldungen/DE/Presse/2020/201103-investitionsprogramm-wald.html> (2.1.2024)
- BMEL (2021a): Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0.
https://www.charta-fuer-holz.de/fileadmin/charta-fuer-holz/dateien/service/mediathek/Web_Broschuere_Charta-fuer-Holz_4._Auflage_2021_bf.pdf (20.2.2024)
- BMEL (2021b): Waldbericht der Bundesregierung 2021. Bonn
- BMEL (2021c): Waldstrategie 2050. Bonn,
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Waldstrategie2050.pdf;jsessionid=71CC6DF4B95B2841AC7930A0E69A34D3.live921?__blob=publicationFile&v=9 (20.3.2024)
- BMEL (2022a): Statistisches Bundesamt über die praktische Berufsausbildung in der Landwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland. BLE (414), <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ausbildung> (30.5.2024)
- BMEL (2022b): Umsetzung der ELER-Förderperiode 2014 bis 2022 für ländliche Räume in Deutschland.
<https://www.bmel.de/DE/themen/laendliche-regionen/foerderung-des-laendlichen-raumes/eu-foerderung/eler-2014-2020-umsetzung.html> (10.4.2024)
- BMEL (2022c): Waldstrategie. Strategische Ausrichtung der nationalen Waldpolitik in Zeiten des Klimawandels. <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/waldstrategie.html> (17.8.2023)
- BMEL (2023a): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2022. Bonn,
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldzustandserhebung-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (20.2.2024)
- BMEL (2023b): Digitale Experimentierfelder – ein Beitrag zur Digitalisierung in der Landwirtschaft.
<https://www.bmel.de/DE/themen/digitalisierung/digitale-experimentierfelder.html> (20.3.2024)
- BMEL (2023c): Förderprogramm klimaangepasstes Waldmanagement. 900 Mio. Euro für starke Wälder.
<https://www.bmel.de/DE/themen/wald/klimaangepasstes-waldmanagement.html> (20.3.2024)

- BMEL (2023d): Massive Schäden – Einsatz für die Wälder. <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html> (10.4.2024)
- BMEL (o. J.): Archiv der Buchführungsergebnisse Forstwirtschaft. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/testbetriebsnetz/testbetriebsnetz-forst-buchfuehrungsergebnisse/archiv-buchfuehrungsergebnisse-forstwirtschaft> (20.3.2024)
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2011): Waldstrategie 2020. Nachhaltige Waldbewirtschaftung – eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung. Bonn, https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Waldstrategie2020.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (20.2.2024)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (o. J.): Für eine naturnahe und klimastabile Waldzukunft. Position des BMU für die Fortführung und Aktualisierung der Waldstrategie 2020. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/klimastabile_waldzukunft_bf.pdf (20.2.2024)
- BMU (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (20.3.2024)
- BMU (2021): Ökosystemleistungen von Wäldern – Honorierung von Klimaschutzleistungen mit ambitionierten Biodiversitätsstandards. Vorschlag für Eckpunkte des Bundesumweltministeriums. Berlin, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/oekosystemleistungen_waelder_positionspapier_bf.pdf (20.3.2024)
- BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2007): Die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationale_strategie_biologische_vielfalt_2015_bf.pdf (20.2.2024)
- BMUB (2014): Indikatorenbericht 2014 zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. https://biologischevielfalt.bfn.de/fileadmin/NBS/indikatoren/diagramme2014/NBS-Indikatorenbericht-2014_Internet_barrierefrei.pdf#%5B%7B%22num%22%3A305%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22XYZ%22%7D%2C0%2C842%2C0%5D (14.10.2022)
- BMUB (2015): Naturschutz-Offensive 2020. Für biologische Vielfalt! Berlin, https://www.bbn-online.de/fileadmin/Service/8_2%20Infomaterial/Fachmaterialien/naturschutz-offensive_2020_broschuere_bf.pdf (20.2.2024)
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) (2024): Bundesumweltministerium und BImA schützen alte Buchenwälder im Bundesforst. 4.3.2024, <https://www.bmu.de/pressemitteilung/bundesumweltministerium-und-bima-schuetzen-alte-buchenwaelder-im-bundesforst> (24.05.2024)
- BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2023): Durchbruch für ambitionierten Ausbau erneuerbarer Energien bis 2030: neue EU-Richtlinie für erneuerbare Energien beschlossen. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/03/20230330-durchbruch-fur-ambitionierten-ausbau-erneuerbarer-energien-bis-2030.html> (16.8.2023)
- BMWK; BMEL; BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/nabis-eckpunktepapier-nationale-biomassestrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (17.8.2023)
- BMWSB (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen) (2021): Bundesbauministerin Geywitz und Bundeslandwirtschaftsminister Özdemir legen Strategie für den Holzbau vor. <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/pressemitteilungen/Webs/BMWSB/DE/2023/06/holzbauinitiative.html> (20.3.2024)
- BMWSB; BMEL (2023): Holzbauinitiative. Handreichung. Berlin, https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauinitiative.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (20.3.2024)

- Bode, W. (2019): Systemische Waldwirtschaft. Zum Paradigmenwechsel in der Forstwirtschaft. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 51(5), S. 226–234
- Böhmer, H. (2022): Beim nächsten Wald wird alles anders. Das Ökosystem verstehen. Stuttgart
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Reise, J.; Benndorf, A.; Welle, T.; Kreft, S.; Endres, E.; Eberl, J.; Unseld, R.; Günther-Dieng, K. (2022): Entwicklung eines finanziellen Anreizsystems für zusätzliche Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen im Wald. Teilprojekt: Klimaschutzpfad Waldsenke im Rahmen des UBA Projekts »CARE: Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland«. Dessau-Roßlau
- Bolte, A.; Ammer, C.; Annighöfer, P.; Bauhus, J.; Eisenhauer, D.-R.; Geissler, C.; Leder, B.; Petercord, R.; Rock, J.; Seifert, T.; Spathelf, P. (2021a): Fakten zum Thema: Wälder und Klimaschutz. In: AFZ – DerWald 11, S. 12–15
- Bolte, A.; Höhl, M.; Hennig, P.; Schad, T.; Kroihner, F.; Seintsch, B.; Englert, H.; Rosenkranz, L. (2021b): Zukunftsaufgabe Waldanpassung. In: AFZ – DerWald 4, S. 12–16
- Bolte, A.; Sanders, T.; Natkhin, M. (2021): Junge Fichten aus trockenen Regionen leiden weniger unter Trockenstress. Project brief 16. Thünen-Institut für Waldökosysteme, Braunschweig
- Borchers, J. (2010): Segregation versus Multifunktionalität in der Forstwirtschaft. Forst und Holz 65(7-8), S. 44–49
- Bose, A.; Gessler, A.; Bolte, A.; Bottero, A.; Buras, A.; Cailleret, M.; Camarero, J.; Haeni, M.; Hereş, A.-M.; Hevia, A.; Lévesque, M. et al. (2020): Growth and resilience responses of Scot pine to extreme droughts across Europe depend on predrought growth conditions. In: Global Change Biology 26(8), S. 4521–4537
- Brandl, S.; Falk, W. (2019): Mortalität von Fichte und Buche – Einfluss von Klima und Mischung. In: AFZ – DerWald 2, S. 10–13
- Brang, P.; Pluess, A.; Bürgi, A.; Born, J. (2016): Potenzial von Gastbaumarten bei der Anpassung an den Klimawandel. In: Pluess, A.; Augustin, S.; Brang, P. (Hg.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern, S. 385–406
- Brang, P.; Spathelf, P.; Larsen, J.; Bauhus, J.; Boncćina, A.; Chauvin, C.; Drossler, L.; Garcia-Guemes, C.; Heiri, C.; Kerr, G.; Lexer, M. et al. (2014): Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. In: Forestry 87(4), S. 492–503
- Brown, M.; Ghaffariyan, M.; Berry, M.; Acuna, M.; Strandgard, M.; Mitchell, R. (2020): The progression of forest operations technology and innovation. In: Australian Forestry 83(1), S. 1–3
- Brühl, C.; Bakanov, N.; Köthe, S.; Eichler, L.; Sorg, M.; Hörren, T.; Mühlethaler, R.; Meinel, G.; Lehmann, G. (2021): Direct pesticide exposure of insects in nature conservation areas in Germany. In: Scientific reports 11(1), Art. 24144
- Büntgen, U.; Urban, O.; Krusic, P.; Rybníček, M.; Kolář, T.; Kyncl, T.; Ač, A.; Koňasová, E.; Čáslavský, J.; Esper, J.; Wagner, S. et al. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. In: Nature Geoscience 14(4), S. 190–196
- BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V.) (2010): Zehn Forderungen zum Bundeswaldgesetz.
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/_migrated/publications/20100400_naturschutz_waldgesetz_novelle_forderungen.pdf (20.2.2024)
- BUND (2020): Waldwende statt Waldsterben! Neun BUND-Forderungen zu Deutschlands Wäldern in der Klimakrise.
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/waelder/waelder_waldwendestatt_waldsterben.pdf (20.2.2024)
- BUND (o. J.): Waldsterben durch die Klimakrise. <https://www.bund.net/waelder/waldkrise/> (30.5.2024)
- Bundesregierung (2020a): Nationale Bioökonomiestrategie. Berlin,
https://biooekonomie.de/sites/default/files/2022-04/bmbf_nationale_biooekonomiestrategie_langfassung_DE_22.pdf (20.2.2024)

- Bundesregierung (2020b): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf (20.3.2024)
- Bundesregierung (2021): Aktiv für die biologische Vielfalt. Rechenschaftsbericht 2021 der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/rechenschaftsbericht_2021_bf.pdf (20.2.2024)
- BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) (2019): Fachmeldungen – Widerruf der Zulassung des Pflanzenschutzmittels Novodor FC mit dem Wirkstoff *Bacillus thuringiensis subspecies tenebrionis* Stamm NB 176 (TM14-1) zum 30. April 2019. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Fachmeldungen/04_pflanzenschutzmittel/2019/2019_04_04_Fa_Widerruf_Novodor_FC.html (20.3.2024)
- Carl, C. (2018): Kurzportrait Robinie (*Robinia pseudoacacia*). Waldwissen.net, <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/waldbau/kurzportrait-robinie> (20.3.2024)
- Dännart, K. (2015): Waldbrandarten: Von Kronenfeuern und Stammbränden. Waldwissen.net, <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/schadensmanagement/waldbrand/waldbrandarten> (20.2.2024)
- Dara, S.; Montalva, C.; Barta, M. (2019): Microbial Control of Invasive Forest Pests with Entomopathogenic Fungi: A Review of the Current Situation. In: *Insects* 10(10), Art. 341
- De Avila, A.; Albrecht, A. (2018): Alternative Baumarten im Klimawandel. Artensteckbriefe – eine Stoffsammlung. Freiburg
- Depardieu, C.; Gérardi, S.; Nadeau, S.; Parent, G.; Mackay, J.; Lenz, P.; Lamothe, M.; Girardin, M.; Bousquet, J.; Isabel, N. (2021): Connecting tree-ring phenotypes, genetic associations and transcriptomics to decipher the genomic architecture of drought adaptation in a widespread conifer. In: *Molecular ecology* 30(16), S. 3898–3917
- DFV (Deutscher Forstverein e. V.) (2016): Thüringen ist Geburtsland der modernen Forstwissenschaft. <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/aktuelles/news-detailansicht/news/thueringen-ist-geburtsland-der-modernen-forstwissenschaft/> (10.4.2024)
- DFV (o. J.a): Buchensterben. <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/wald-im-klimastress/klimawandel/buchensterben> (30.5.2024)
- DFV (o. J.b): Forstliches Glossar. <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/waelder-entdecken/forstliches-glossar/> (29.5.2024)
- Deutz, A.; Gasteiner, J.; Buchgraber, A. (2009): Fütterung von Reh- und Rotwild. Ein Praxisratgeber. Graz
- DFWR (Deutscher Forstwirtschaftsrat) (2014): Finanzielle Instrumente zur Umsetzung von Naturschutzleistungen im Wald. Gemeinsame Arbeitsgruppe des Ausschusses für Betriebswirtschaft und des Ausschusses für Recht, Raumordnung und Umwelt, https://dfwr.de/wp-content/uploads/2022/01/2_Finanzielle_Instrumente_zur_Umsetzung_von_Naturschutzleistungen_im_Wald.pdf (20.2.2024)
- DFWR (2021): DFWR begrüßt BMEL-»Waldstrategie 2050«: Bewirtschafteter Wald leistet Beitrag zum Gemeinwohl. <https://www.dfwr.de/pressemitteilungen/dfwr-begruesst-bmel-waldstrategie-2050-bewirtschafteter-wald-leistet-beitrag-zum-gemeinwohl/> (20.3.2024)
- DKK (Deutsches Klima-Konsortium); DMG (Deutsche Meteorologische Gesellschaft); DWD (Deutscher Wetterdienst); Extremwetterkongress Hamburg; Helmholtz-Klima-Initiative; klimafakten.de (2020): Was wir heute über das Klima wissen. Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. Berlin u. a. O.
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) (2022): Sorge um den deutschen Wald. https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/01/20220221_sorge-um-den-deutschen-wald.html (20.2.2024)
- DNR (Deutscher Naturschutzring); WWF (World Wildlife Fund); Greenpeace; NABU (Naturschutzbund Deutschland e. V.); BUND; Forum Umwelt und Entwicklung (2021): Offener Verbändebrief zur

- Waldstrategie 2050.
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/waelder/waelder_waldstrategie_2050_verbaende_offener_brief.pdf (20.3.2024)
- Dobor, L.; Hlásny, T.; Rammer, W.; Zimová, S.; Barka, I.; Seidl, R. (2020): Is salvage logging effectively dampening bark beetle outbreaks and preserving forest carbon stocks? In: *Journal of Applied Ecology* 57(1), S. 67–76
- Dobrowolska, D. (2015): Forest regeneration in northeastern Poland following a cata-strophic blowdown. In: *Canadian Journal of Forest Research* 45(9), S. 1172–1182
- D’Odorico, P.; Schönbeck, L.; Vitali, V.; Meusburger, K.; Schaub, M.; Ginzler, C.; Zweifel, R.; Velasco, V.; Gisler, J.; Gessler, A.; Ensminger, I. (2021): Drone-based physiological index reveals long-term acclimation and drought stress responses in trees. In: *Plant, cell & environment* 44(11), S. 3552–3570
- Duan, J.; van Driesche, R.; Schmude, J.; Quinn, N.; Petrice, T.; Rutledge, C.; Poland, T.; Bauer, L.; Elkinton, J. (2021): Niche partitioning and coexistence of parasitoids of the same feeding guild introduced for biological control of an invasive forest pest. In: *Biological Control* 160, Art. 104698
- Duda, H. (2006): Vergleich forstlicher Managementstrategien. Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Wachstumssimulator. Dissertation. Göttingen
- DWD (2020): Nationaler Klimareport. Klima – Gestern, heute und in Zukunft. Offenbach
- Eckard, S.; Ansari, M.; Bacher, S.; Butt, T.; Enkerli, J.; Grabenweger, G. (2014): Virulence of in vivo and in vitro produced conidia of *Metarhizium brunneum* strains for control of wireworms. In: *Crop Protection* 64, S. 137–142
- Einride (2018): All-electric, autonomous logging truck revealed at Goodwood Festival of Speed.
<https://einride.tech/press/all-electric-autonomous-logging-truck-revealed-at-goodwood-festival-of-speed/> (30.5.2024)
- Einzmann, K.; Atzberger, C.; Pinnel, N.; Glas, C.; Böck, S.; Seitz, R.; Immitzer, M. (2021): Early detection of spruce vitality loss with hyperspectral data: Results of an experimental study in Bavaria, Germany. In: *Remote Sensing of Environment* 266, Art. 112676
- EK (Europäische Kommission) (2019): Brief on biomass for energy in the European Union.
https://www.researchgate.net/profile/Manjola-Banja/publication/331358228_Brief_on_biomass_for_energy_in_the_European_Union/links/5c75c71292851c695043aff2/Brief-on-biomass-for-energy-in-the-European-Union.pdf?origin=publication_detail&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bmxvYWQiLCJwcmV2aW91c1BhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbjI9fQ (20.3.2024)
- EK (2020): EU-Biodiversitätsstrategie für 2030. Mehr Raum für die Natur in unserem Leben. COM(2020) 380 final. Brüssel
- EK (o. J.): EFFIS Estimates for European Union: Burned area.
<https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/estimates/EU/2022/2006/2022> (30.5.2024)
- Elliott, K.; Hendrick, R.; Major, A.; Vose, J.; Swank, W. (1999): Vegetation dynamics after a prescribed fire in the southern Appalachians. In: *Forest Ecology and Management* 114(2-3), S. 199–213
- Elsasser, P.; Altenbrunn, K.; Köthke, M.; Lorenz, M.; Meyerhoff, J. (2020a): Regionalisierte Bewertung der Waldleistungen in Deutschland. Thünen Report 79, Braunschweig
- Elsasser, P.; Rock, J.; Rüter, S. (2020b): Ein Vergleich unterschiedlicher Vorschläge zur Honorierung der Klimaschutzleistung der Wälder. Thünen Working Paper 151, Braunschweig
- Elsasser, P.; Köthke, M.; Dieter, M. (2020c): Ein Konzept zur Honorierung der Ökosystemleistungen der Wälder. Thünen Working Paper 152, Braunschweig
- Engel, F.; Meyer, P.; Demant, L. (2019): Wälder mit natürlicher Entwicklung in Deutschland. In: *AFZ – DerWald* 13, S. 30–33
- Engel, J. (2020): »Waldsterben 2.0«: Zur Entstehung einer neuen (alten) Debatte. In: *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 69*. Potsdam/Eberswalde, S. 9–21

- Ermisch, N.; Franz, K.; Seintsch, B.; Englert, H.; Dieter, M. (2016): Bedeutung der Fördermittel für den Ertrag der TBN-Forstbetriebe. In: AFZ – DerWald 17, S. 22–25
- Felton, A.; Smith, M. (2017): Integrating plant ecological responses to climate extremes from individual to ecosystem levels. In: Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 372, Art. 1723
- Feng, Y.; Audy, J.-F. (2020): Forestry 4.0: a framework for the forest supply chain toward Industry 4.0. In: Gestão & Produção 27(4), Art. e5677
- Fenske, D.; Einzel, D. (2022): Forstexperte Ibisch: Umbau macht den Wald verwundbar. BR24, 15.1.2022, <https://www.br.de/nachrichten/deutschland-welt/forstexperte-ibisch-umbau-macht-den-wald-verwundbar,SuTpWZW> (31.1.2022)
- Fernandes, P.; Botelho, H. (2003): A review of prescribed burning effectiveness in fire hazard reduction. In: International Journal of Wildland Fire 12(2), S. 117–128
- Filotas, E.; Parrot, L.; Burton, P.; Chazdon, R.; Coates, K.; Coll, L.; Haeussler, S.; Martin, K.; Nocentini, S.; Puettmann, K.; Putz, F. et al. (2014): Viewing forests through the lens of complex system science. In: Ecosphere 5(1), Art. 1
- Finkeldey, R.; Hattemer, H. (2010): Genetische Variation in Wäldern – wo stehen wir. In: Forstarchiv 81, S. 123–129
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (2017): Förderung nachhaltiger Forstwirtschaft. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Booklet_Forschungsfoerderung_Holz_web.pdf (30.5.2024)
- FNR (2020a): Standortansprüche der wichtigsten Baumarten. <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/archiv/archiv-nachricht/neu-standortansprueche-der-wichtigsten-waldbaumarten> (20.3.2024)
- FNR (2020b): Waldeigentümer werden mit 500 Millionen Euro unterstützt. <https://www.bundeswaldpraemie.de/service/presse/presse/waldeigentuemmer-werden-mit-500-millionen-euro-unterstuetzt> (10.4.2024)
- FNR (2021a): Auf einen Blick: Alle Leistungen des Ökosystems Wald. <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/archiv/archiv-nachricht/auf-einen-blick-alle-leistungen-des-oekosystems-wald> (20.3.2024)
- FNR (2021b): Holzernte 4.0: Digitale Zwillinge erlauben maßgeschneiderten Mensch-Technik-Einsatz. <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/holzernte-40-digitale-zwillinge-erlauben-massgeschneiderten-mensch-technik-einsatz> (20.3.2024)
- FNR (o. J.): Förderprogramm »Klimaangepasstes Waldmanagement«. <https://www.fnr.de/projektfoerderung/foerderprogramm-klimaangepasstes-waldmanagement> (30.5.2024)
- Fontúrbel, T.; Carrera, N.; Vega, J.; Fernández, C. (2021): The Effect of Repeated Prescribed Burning on Soil Properties: A Review. In: Forests 12(6), Art. 767
- ForestFireWatch; Erling Verlag GmbH & Co. KG (2020): Grundlagen Vegetationsbrandbekämpfung. Clenze
- Forster, M.; Falk, W.; Reger, B.; Blaschke, M.; Dimke, P.; Enzenbach, B.; Ewald, J.; Franz, C.; Kanold, A.; Kudernatsch, T.; Lauterbach, M. et al. (2019): Praxishilfe-Klima-Boden-Baumartenwahl. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hg.), Freising
- Forstpraxis (2020): Landesforsten RLP: Einschlagstopp für alte Buchen im Staatswald. <https://www.forstpraxis.de/landesforsten-rlp-einschlagstopp-fuer-alte-buchen-im-staatswald-20006> (20.3.2024)
- Forzieri, G.; Dakos, V.; McDowell, N.; Ramdane, A.; Cescatti, A. (2022): Emerging signals of declining forest resilience under climate change. In: Nature 608(7923), S. 534–539
- Franić, I.; Prospero, S.; Hartmann, M.; Allan, E.; Auger-Rozenberg, M.-A.; Grünwald, N.; Kenis, M.; Roques, A.; Schneider, S.; Sniezko, R.; Williams, W.; Eschen, R. (2019): Are traded forest tree seeds a potential source of nonnative pests? In: Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America 29(7), Art. e01971

- Frank, A.; Brang, P.; Heiri, C.; Sperisen, C. (2017): Waldbau mit Weißtanne in der Schweiz: Heutiger Stand, Potenziale und Risiken. In: *Der Dauerwald – Zeitschrift für Naturgemäße Waldwirtschaft* 55(1), S. 36–41
- Frank, G.; Büchsenmeister, R. (2016): Weißtanne (*Abies alba*). In: Bundesforschungszentrum für Wald (Hg.): *BFW Praxisinformation 41 – Mischwälder – weniger Risiko, höhere Wertschöpfung*. Wien, S. 24–28
- Fritz, P. (Hg.) (2006): *Ökologischer Waldumbau in Deutschland*. München
- FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) (o.J.): Klimakarten 2.0.
https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/klimakarten/klimakarten-20?tx_gdfvascripts_scriptwrapper%5Bscript_file%5D=klimakarten2019_download.php&tx_gdfvascripts_scriptwrapper%5Bscript_query%5D%5Beinheit%5D=lkr&cHash=ad42e81a591af085c7725e8c944d0a76
(30.5.2024)
- Gabriel, O. (2022): Tannensaat mit dem Harvester. *Forstpraxis*, <https://www.forstpraxis.de/tannensaat-mit-dem-harvester-19281> (20.3.2024)
- Gehrke, A.; Hercher, W. (2017): Testbetriebsnetze der Waldwirtschaft in Baden-Württemberg. In: *FVA-einblick* 2, S. 4–9
- Geiger, C.; Maier, N.; Kalinke, F.; Geimer, M. (2020): Assistance system for an automated log-quality and assortment estimation based on data-driven approaches using hydraulic signals of forestry machines. In: *Volume 3 – Conference. 12th International Fluid Power Conference 2020*. In: Technische Universität Dresden, S. 83–92
- Grajewski, R. (2016): Vier ländliche Entwicklungsprogramme im Vergleich: PFEIL Niedersachsen-Bremen, LPLR Schleswig-Holstein, NRW-Programm Ländlicher Raum und EPLR Hessen. 5-Länder-Evaluation 1/16. Thünen-Institut für Ländliche Räume, Braunschweig
- Gregory, R.; Ohlson, D.; Arvai, J. (2006): Deconstructing adaptive management: criteria for applications to environmental management. In: *Ecological Applications* 16(6), S. 2411–2425
- Grüll, M. (2014): Grundlagen für ein Bodenschutzkonzept des Landesbetriebs Forst Brandenburg. In: Landesbetrieb Forst Brandenburg; Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hg.): *Wissenstransfer in die Praxis – Beiträge zum 9. Winterkolloquium*. Potsdam/Eberswalde, S. 49–58
- Guericke, M.; Spathelf, P. (2018): Naturnahe Waldwirtschaft im Spannungsfeld zwischen steigendem Holzbedarf, nachhaltiger Sicherung der Waldökosystemleistungen und gesellschaftlichen Ansprüchen an den Wald. In: *Ibisch P.; Molitor, A.; Conrad, A.; Walk, J.; Mihotovic, V.; Geyer, J.; (Hg.): Der Mensch im globalen Ökosystem. Eine Einführung in die nachhaltige Entwicklung*. München, S. 155–158
- Hagge, J.; Mölder, A.; Meyer, P. (2023): Waldflächen ohne Nutzung – wozu? In: *Land & Forst* 4/2023, S. 46–47
- Hahn, W.; Härtl, F.; Irland, L.; Kohler, C.; Moshammer, R.; Knoke, T. (2014): Financially optimized management planning under risk aversion results in even-flow sustained timber yield. In: *Forest Policy and Economics* 42(10), S. 30–41
- Hajek, A.; Bauer, L. (2009): Use of Entomopathogens against Invasive Wood Boring Beetles in North America. In: *Hajek, A.; Glare, T.; O’Callaghan, M. (Hg.): Use of Microbes for Control and Eradication of Invasive Arthropods*. Dordrecht, S. 159–179
- Hajek, A.; van Frankenhuyzen, K. (2017): Use of Entomopathogens Against Forest Pests. In: *Lacey, L. (Hg.): Microbial control of insect and mite pests. From theory to practice*. Amsterdam u. a. O. S. 313–330
- Hanewinkel, M. (1998): *Plenterwald und Plenterwaldüberführung*. Schriften 9, Freiburg
- Hanewinkel, M. (2001): Financial Results of Selection Forest Enterprises with High Proportions of Valuable Timber – Results of an Empirical Study and their Application. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 152(8), S. 343–349
- Hanewinkel, M.; Cullmann, D.; Schelhaas, M.-J.; Nabuurs, G.-J.; Zimmermann, N. (2013): Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. In: *Nature Climate Change* 3(3), S. 203–207
- Hanewinkel, M.; Hummel, S.; Cullmann, D. (2010): Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. In: *Forest Ecology and Management* 259(4), S. 710–719

- Häsler, H.; Senn, J. (2012): Ungulate browsing on European silver fir *Abies alba*: the role of occasions, food shortage and diet preferences. In: *Wildlife Biology* 18(1), S. 67–74
- Hastreiter, H. (2017): Kleinprivatwald – lohnt sich das? In: *LWF aktuell* 2, S. 37–39
- Hattemer, H.; Ziehe, M. (2018): Erhaltung forstgenetischer Ressourcen. Grundlagen und Beispiele. Göttingen
- Heger, T. (2016): Can we predict whether a species will become invasive? In: Vítková, L.; Krumm, F. (Hg.): *Introduced tree species in European forests. Opportunities and challenges*. Joensuu, S. 78–84
- Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Köhler, B.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2021): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie – Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE. *Climate Change* 12/2022, Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau
- Herrmann, M. (o. J.): Waldbrände und das »Totholz-Dilemma«. *Waldhilfe.de*, <https://www.waldhilfe.de/waldbraende-und-das-totholz-dilemma/> (23.1.2022)
- Höltermann, A. (Hg.) (2021): Sind unsere Wälder noch zu retten? Eine Tagung zur Zukunft unserer Wälder. BfN-Skripten 600, Bonn
- Husqvarna AB (o. J.): Forstfreischneider. <https://www.husqvarna.com/de/forstfreischneider/535fbx> (30.5.2024)
- Ibisch, P. (2019): Stellungnahme des Einzelsachverständigen Prof. Dr. Pierre Ibisch für die 41. Sitzung des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft. Ausschussdrucksache 19(10)280-A, <http://waldproblematik.de/wp-content/uploads/2019/11/ausf%C3%BChrl-Stellungnahme-Prof-Ibisch-Bundestag-Waldanh%C3%B6rung-11-11-2019.pdf> (20.2.2024)
- Ibisch, P. (2020): Ökologischer Zustand und Umbau der Wälder zur Förderung von Klimaresilienz und Biodiversität. Schriftliche Stellungnahme anlässlich der 89. Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit am Mittwoch, dem 25. November 2020 des Deutschen Bundestages. Eberswalde
- Ibisch, P. (2022): Ein ökosystembasierter Ansatz für den Umgang mit der Waldkrise in der Klimakrise. In: *Natur und Landschaft* 97(7), S. 325–333
- Ibisch, P.; Welle, T.; Blumröder, J.; Sommer, J.; Sturm, K. (2021): Wie das Klimaschutznarrativ die Wälder bedroht. In: Knapp, H.; Klaus, S.; Fähser, L.: *Der Holzweg. Widerstreit der Interessen*. München, S. 175–200
- IDiv (Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung) (2013): *Inwertsetzung von Biodiversität. Wissenschaftliche Grundlagen und politische Perspektiven*. Universität Leipzig, Leipzig
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012): *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge
- Isermeyer, F.; Nieberg, H.; Banse, M.; Bolte, A.; Christoph, I.; Dauber, J.; de Witte, T.; Dehler, M.; Döring, R.; Elsasser, P.; Fock, H. et al. (2020): Auswirkungen aktueller Politikstrategien (Green Deal, Farm-to-Fork, Biodiversitätsstrategie 2030; Aktionsprogramm Insektenschutz) auf Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei. Thünen Working Paper 156, Braunschweig
- Isermeyer, F.; Teutsch, T.; Ammer, C.; Bauhus, J.; Böckmann, T.; Bolte, A.; Farwig, N.; Hafner, A.; Höltermann, A.; Kasal, B.; Knapp, S. et al. (2021): Stärkung der Wald- und Holzforschung in Deutschland. Abschlussbericht der Arbeitsgruppe. Braunschweig/Leipzig, https://www.ufz.de/export/data/2/256640_AG%20Wald-%20und%20Holzforschung%20Abschlussbericht_plus_Anhang.pdf (20.2.2024)
- Itter, M.; Finley, A.; D’Amato, A.; Foster, J.; Bradford, J. (2016): Variable effects of climate on forest growth in relation to climate extremes, disturbance, and forest dynamics. In: *Ecological Applications* 27(4), S. 1082–1095
- Jactel, H.; Bauhus, J.; Boberg, J.; Bonal, D.; Castagneyrol, B.; Gardiner, B.; Gonzalez-Olabarria, J.; Koricheva, J.; Meurisse, N.; Brockerhoff, E. (2017): Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. In: *Current Forestry Report* 3(3), S. 223–243

- Jehle, J. (2008): The Future of *Cydia pomonella* Granulovirus in Biological Control of Codling Moth. In: Boos, M. (Hg.): Ecofruit, 13th International Conference on Cultivation Technique and Phytopathological Problems in Organic Fruit-Growing: Proceedings to the Conference 18.–20.2.2008, Weinsberg, S. 265–270
- Jenssen, M. (2009): Der klimaplastische Wald im Nordostdeutschen Tiefland – forstliche Anpassungsstrategie an einen zu erwartenden Klimawandel. In: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 42. Potsdam/Eberswalde, S. 101–117
- John Deere (2021): Neue Version der IBC führt Funktionen zur Fahrassistenz ein.
<https://www.deere.de/de/unser-unternehmen/news-und-medien/presse-meldungen/2021/october/ibc-3-0.html> (20.3.2024)
- Joshi, R.; Wani, S.; Singh, B.; Bohra, A.; Dar, Z.; Lone, A.; Pareek, A.; Singla-Pareek, S. (2016): Transcription Factors and Plants Response to Drought Stress: Current Understanding and Future Directions. In: *Frontiers in plant science* 14(7), Art. 1029
- Juutinen, A.; Haeler, E.; Jandl, R.; Kuhlmeier, K.; Kurttila, M.; Mäkipää, R.; Pohjanmies, T.; Rosenkranz, L.; Skudnik, M.; Triplatt, M.; Tolvanen, A. et al. (2022): Common preferences of European small-scale forest owners towards contract-based management. In: *Forest Policy and Economics* 144, Art. 102839
- Kapeller, S.; Lexer, M.; Geburek, T.; Hiebl, J.; Schueler, S. (2012): Intraspecific variation in climate response of Norway spruce in the eastern Alpine range: Selecting appropriate provenances for future climate. In: *Forest Ecology and Management* 271, S. 46–57
- Kätzel, R.; Becker, F.; Schröder, J.; Glatthorn, J.; Höltnen, A.; Löffler, S. (2012): Flaum- und Zerr-Eiche in Brandenburg – Alternative Baumarten im Klimawandel. In: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 49. Wissenstransfer in die Praxis – Beiträge zum 7. Winterkolloquium. Potsdam/Eberswalde, S. 23–36
- Kätzel, R.; Löffler, S.; Möller, K.; Heydeck, P.; Kallweit, R. (2006): Das Eichensterben als Komplexkrankheit. In: *Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg*. Potsdam, S. 94–100
- Kätzel, R.; Schröder, J.; Becker, F.; Leinemann, L.; Grüll, M.; Hosius, B.; Löffler, S. (2020): Die Rot-Eiche (*Quercus rubra* L.) – Von der Ersatzbank ins Spielfeld? In: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 69. Wissenstransfer in die Praxis – Tagungsband zum 15. Winterkolloquium. Potsdam/Eberswalde, S. 95–106
- Kenis, M.; Hurley, B.; Hajek, A.; Cock, M. (2017): Classical biological control of insect pests of trees: facts and figures. In: *Biological Invasions* 19(11), S. 3401–3417
- Kirchner, S. (2023): EU einigt sich auf höheres Erneuerbaren-Ziel. *Klimareporter.de*,
<https://www.klimareporter.de/europaeische-union/eu-einigt-sich-auf-hoeheres-erneuerbaren-ziel> (20.3.2024)
- Kittl, B. (2023): Wie sich nicht-einheimische Baumarten auf die biologische Vielfalt auswirken. <https://idw-online.de/de/news808383> (28.10.2024)
- KIWUH (Kompetenz- und Informationszentrum Wald und Holz) (o. J.): Die 4. Bundeswaldinventur.
<https://www.kiwuh.de/service/wissenswertes/wissenswertes/die-vierte-bundeswaldinventur> (30.5.2024)
- Klädtker, J. (2017): Zum Wachstum eingeführter Baumarten in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 187(5/6), S. 81–92
- Knapp, H. (2021): Der Holzweg. In: Knapp, H.; Klaus, S.; Fähser, L.: *Der Holzweg. Wald im Widerstreit der Interessen*. München, S. 17–32
- Knapp, H.; Klaus, S.; Fähser, L. (Hg.) (2021): *Der Holzweg. Wald im Widerstreit der Interessen*. München
- Knoke, T. (1997): Ökonomische Aspekte der Holzproduktion in ungleichaltrigen Wäldern: einführende Untersuchungen zur Forstbetriebsplanung im Kreuzberger Gemeindewald. In: *European Journal of Forest Research* (116), S. 178–196
- Knoke, T. (2009): Zur finanziellen Attraktivität von Dauerwaldwirtschaft und Überführung: eine Literaturanalyse. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 160(6), S. 152–161

- Knoke, T. (2017): Dauer- versus Altersklassenwald. In: Forstzeitung 01, S. 11–13
- Koch, J. (2022a): Hat Brennholz noch Platz in der Biomassestrategie? Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, <https://www.wochenblatt-dlv.de/politik/hat-brennholz-noch-platz-biomassestrategie-570695> (20.3.2024)
- Koch, J. (2022b): Waldförderung: Wo nachgebessert werden sollte. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, <https://www.wochenblatt-dlv.de/politik/waldumbau-nachgebessert-sollte-571090> (20.3.2024)
- König, A. (1996): Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. Ein Erklärungs- und Prognosemodell, Frankfurt am Main
- König, A. (2019): Simulation der Rotwildpopulation im Oberallgäu. Vortrag, Sonthofen
- Konnert, M.; Bastien, J.-C. (2019): Genecology of Douglas-fir and tree improvement strategies. In: Spiecker, H.; Lindner, M.; Schuler, J. (Hg.): Douglas-fir. An option for Europe. Joensuu, S. 46–56
- KONRAD Forsttechnik GmbH (o. J.): WOODY.
<https://www.forsttechnik.at/de/produkte/harvesterkoepfe>(30.5.2024)
- Kovarik, I. (2016): Das Konzept der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) und seine Bedeutung für Naturschutz und Landschaftspflege. In: Natur und Landschaft 91(9/10), S. 429–435
- Kraus, D.; Krumm, F. (Hg.) (2013): Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity. European Forest Institute, Joensuu
- Kubatta-Große, M. (2022): Wald-Klima-Paket startet und erntet Kritik. Forstpraxis, <https://www.forstpraxis.de/wald-klima-paket-startet-und-erntet-kritik-21616> (20.3.2024)
- Kunz, J.; Löffler, G.; Bausch, J. (2018): Minor European broadleaved tree species are more drought-tolerant than *Fagus sylvatica* but not more tolerant than *Quercus petraea*. In: Forest Ecology and Management 414, S. 15–27
- Leder, B.; von Wolff-Metternich, C. (2017): Kurzportrait Libanonzeder (*Cedrus libani*). Waldwissen.net, <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/waldbau/kurzportrait-libanonzeder> (20.3.2024)
- Leonhardt, P.; Pießkalla, M. (2021): Jagdrecht. Bundesjagdgesetz, Bayerisches Jagdgesetz, Ergänzende Bestimmungen. München
- Leroy, B.; Seibold, S.; Morinière, J.; Bozicevic, V.; Jaworek, J.; Roth, N.; Vogel, S.; Zytynska, S.; Petercord, R.; Eichel, P.; Weisser, W. (2022): Metabarcoding of canopy arthropods reveals negative impacts of forestry insecticides on community structure across multiple taxa. In: Journal of Applied Ecology 59(4), S. 997–1012
- Leuschner, C. (2020): Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) – A review. In: Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 47, Art. 125576
- Liesebach, M. (Hg.) (2020): Forstpflanzenzüchtung für die Praxis: 6. Tagung der Sektion Forstgenetik/Forstpflanzenzüchtung 2019 in Dresden. Tagungsband. Thünen Report 76, Braunschweig
- Liesebach, M.; Wolf, H.; Beez, J.; Degen, B.; Erley, M.; Haverkamp, M.; Janßen, A.; Kätzel, R.; Kahlert, K.; Kleinschmit, J.; Paul, M.; Voth, W. (2021): Identifizierung von für Deutschland relevanten Baumarten im Klimawandel und länderübergreifendes Konzept zur Anlage von Vergleichsanbauten – Empfehlungen der Bund-Länder-Arbeitsgruppe »Forstliche Genressourcen und Forstsaatgutrecht« zu den Arbeitsaufträgen der Waldbaureferenten. Thünen Working Paper 172, Braunschweig
- Lipp, S. (2015): Erfassung und Analyse von Schlagschäden durch Rothirsche im »Retterschwanger Wald« (Allgäuer Hochalpen). Bachelor-Thesis, Freising
- Liu, Q.; Piao, S.; Janssens, I.; Fu, Y.; Peng, S.; Lian, X.; Ciais, P.; Myneni, R.; Peñuelas, J.; Wang, T. (2018): Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. In: Nature Communications 9(1), Art. 426
- Lockow, K.-W. (2002): Ergebnisse der Anbauversuche mit amerikanischen und japanischen Baumarten. In: Landesforstanstalt Eberswalde (Hg.): Ausländische Baumarten in Brandenburgs Wäldern. Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. Potsdam/Eberswalde, S. 41–101

- Lockow, K.-W. (2015): Grundlagen der Kiefernwirtschaft. Versuchsflächenergebnisse und Entscheidungshilfen. In: Schriftenreihe agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse 59, Hamburg
- Lockow, K.-W.; Lockow, J. (2009): Die Hainbuche im nordostdeutschen Tiefland. Wuchsverhalten und Bewirtschaftungshinweise. In: MLUV (Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg); LFE (Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 41, Potsdam/Eberswalde
- Luick, R.; Hennenberg, K.; Leuschner, C.; Grossmann, M.; Jedicke, E.; Schoof, N.; Waldenspuhl, T. (2021): Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz – Teil 1: Funktionen für die biologische Vielfalt und als Kohlenstoffspeicher. In: Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL) 53(12), S. 12–25
- LWF (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) (2011): Wälder im Klimawandel – Weißtanne und Küstentanne. LWF Wissen 66/2011, Freising
- LWF (2018): Beiträge zur Edelkastanie. LWF Wissen 81/2018, Freising
- LWF (o. J.): Überlebenszeit-Wald-Klimawandel – SURVIVAL-KW (Projekt C 25).
<https://www.lwf.bayern.de/boden-klima/baumartenwahl/144530/index.php> (30.5.2024)
- LWF (o. J.): Wie alt werden Bäume? <https://www.lwf.bayern.de/wissenstransfer/forstcastnet/234251/index.php> (30.5.2024)
- MacLachlan, M.; Liebhold, A.; Yamanaka, T.; Springborn, M. (2021): Hidden patterns of insect establishment risk revealed from two centuries of alien species discoveries. In: Science Advances 7(44), Art. eabj1012
- Maier, C.; Hengst-Ehrhard, Y. (2022): Umgang der Forstwirtschaft mit Waldbrand. In: AFZ – DerWald 2, S. 25–29
- Maktoubian, J.; Taskhiri, M.; Turner, P. (2021): Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) in Forestry: A Review of Challenges and Opportunities. In: Forests 12(11), Art. 1495
- Mally, R.; Ward, S.; Trombik, J.; Buszko, J.; Medzihorský, V.; Liebhold, A. (2021): Non-native plant drives the spatial dynamics of its herbivores: the case of black locust (*Robinia pseudoacacia*) in Europe. In: NeoBiota 69, S. 155–175
- Manderino, R.; Crist, T.; Haynes, K. (2014): Lepidoptera-specific insecticide used to suppress gypsy moth outbreaks may benefit non-target forest Lepidoptera. In: Agricultural and Forest Entomology 16(4), S. 359–368
- Manner, J.; Ersson, B. (2021): Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. In: Journal of Forest Science 67(5), S. 242–246
- Maráz, L. (2021): Waldpolitik: Julia Klöckners Ablenkmanöver. Robin Wood,
<https://www.robinwood.de/magazin/waldpolitik-julia-kl%C3%B6ckners-ablenkman%C3%B6ver> (20.3.2024)
- Maschler, J.; Atzberger, C.; Immitzer, M. (2018): Individual Tree Crown Segmentation and Classification of 13 Tree Species Using Airborne Hyperspectral Data. In: Remote Sensing 10(8), Art. 1218
- Mayer, H. (1968): Langfristige waldbauliche Betriebsrationalisierung. In: Allgemeine Forstzeitung 23, S. 687–689, 711–713, 725–728, 742–743, 754–757, 770–771
- Mc Namara, L.; Kapranas, A.; Williams, C.; O’Tuama, P.; Kavanagh, K.; Griffin, C. (2018): Efficacy of entomopathogenic fungi against large pine weevil, *Hylobius abietis*, and their additive effects when combined with entomopathogenic nematodes. In: Journal of Pest Science 91(4), S. 1407–1419
- Meaclem, C.; Chen, X.; Gutschmidt, S.; Hann, C.; Parker, R. (2015): K-Means Partitioned Space Path Planning (KPSPP) for Autonomous Robotic Harvesting. In: International Journal of Advanced Robotic Systems 12(11), Art. 165
- Mederski, P.; Schweier, J.; Đuka, A.; Tsioras, P.; Bont, L.; Bembenek, M. (2022): Mechanised Harvesting of Broadleaved Tree Species in Europe. In: Current Forestry Reports 8(1), S. 1–19
- Mergner, U. (2021): Das Trittsteinkonzept. Naturschutz-integrative Waldbewirtschaftung schützt die Vielfalt der Waldarten. Rauhenebrach

- Mergner, U.; Kraus, D. (2020): Ebrach – learning from nature: Integrative forest management. In: Krumm, F.; Schuck, A.; Rigling, A. (Hg.): How to balance forestry and biodiversity conservation – A view across Europe, S. 204–217
- Messerer, K.; Knoke, T. (2017): Unsicherheiten verringern durch Portfolio-Optimierung. In: AFZ – DerWald 19, S. 22–24
- Messier, C.; Bauhus, J.; Doyon, F.; Maure, F.; Sousa-Silva, R.; Nolet, P.; Mina, M.; Aquilué, N.; Fortin, M.-J.; Puettmann, K. (2019): The functional complex network approach to foster forest resilience to global Changes. In: Forest Ecosystems 6, Art. 21
- Mette, T.; Kölling, C. (2020): Die Zukunft der Kiefer in Franken. Eine Zeitreise in den Klimawandel. In: LWF aktuell 2, S. 14–17
- Mettendorf, B. (2016): Eingeführte Baumarten als Alternativen zur Esche. In: AFZ – DerWald 8, S. 13–17
- Meyer, P.; Spînu, A.; Mölder, A.; Bauhus, J. (2022): Management alters drought-induced mortality patterns in European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. In: Plant Biology 24(7), S. 1157–1170
- Michiels, H.-G. (2009): Standörtliche Schwerpunkte und Grenzen der Sand-Birke. In: AFZ – DerWald 13, S. 699
- Michiels, H.-G.; Cullmann, D. (2015): Naturschutzfachliche Ergebnisse der BWI3 – Biodiversität, Naturnähe, Totholz. In: FVA-einblick 1, S. 14–17
- Milad, M.; Storch, S.; Schaich, H.; Konold, W.; Winkel, G. (2012): Wälder und Klimawandel. Künftige Strategien für Schutz und nachhaltige Nutzung; Ergebnisse des gleichnamigen F+E-Vorhabens (FKZ 3508 83 0600). Naturschutz und Biologische Vielfalt 125, Bonn-Bad Godesberg
- Milrem Robotics (o. J.): Multiscope Forester Planter. <https://milremrobotics.com/product/robotic-forester-planter/> (30.5.2024)
- Mohan, M.; Richardson, G.; Gopan, G.; Aghai, M.; Bajaj, S.; Galgamuwa, G.; Vastaranta, M.; Arachchige, P.; Amorós, L.; Dalla Corte, A.; de-Miguel, S. et al. (2021): UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. In: Remote Sensing 13, Art. 2596
- Mohr, C.; Schori, C. (1999): Femelschlag oder Plenterung – Ein Vergleich aus betriebswirtschaftlicher Sicht. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 150(2), S. 49–55
- Mori, A.; Lertzman, K.; Gustafsson, L. (2017): Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. In: Journal of Applied Ecology 54(1), S. 12–27
- Müller, M. (2019): Waldbrände in Deutschland, Teil 1. In: AFZ – DerWald 18, S. 27–31
- Müller, M. (2022): Gutachterliche Stellungnahme auf der Grundlage der Beauftragung vom 30.09.2022 gemäß der Vorhabensbeschreibung vom 23.09.2022 auf der Grundlage des Kabinettsbeschlusses vom 23.08.2022 mit dem Kernthema der Analyse des Einflusses von Totholz auf das Brandgeschehen im Nationalpark Sächsische Schweiz. <https://www.wald.sachsen.de/Gutachten-Waldbrandgefahr.pdf> (30.5.2024)
- MULNV-NRW (Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW) (2019): Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen. Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. Düsseldorf
- Mutke, J.; Quandt, D. (2018): Der Deutsche Wald – Seine Geschichte, seine Ökologie. In: Forschung und Lehre, S. 650–652
- NABU (2008): Waldwirtschaft 2020. Perspektiven und Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/wald/4.pdf> (20.3.2024)
- NABU (2013): Ausrichtung der Jagd in Deutschland. Positionspapier. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/jagd/131212-nabu-positionspapier-jagd.pdf> (20.3.2024)
- NABU (2020): Waldprämie an ökologische Leistungen knüpfen. <https://www.nabu.de/news/2020/11/28902.html> (20.3.2024)

- Nopp-Mayr, U.; Muralt, G.; Kempfer, I. (2009): Samen- und Keimlingsfraß als sukzessionale Elemente in der Bergwaldodynamik – Ergebnisse des Forschungsprojekts FUST-Tirol. In: Fonds für Umweltstudien Tirol (Hg.): Forschungsberichte aus dem alpinen Raum. Berlin, S. 15–61
- NW-FVA (Norddeutsche Forstliche Versuchsanstalt) (o. J.a): GenMon. <https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/genmon> (30.5.2023)
- NW-FVA (o. J.b): MultiRiskSuit. <https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/multirisksuit> (30.5.2024)
- Nykvist, B.; Olsson, O. (2020): Fossil-free freight options for forest industries. Stockholm Environment Institute, <https://www.sei.org/publications/fff-forest-industries/> (20.3.2024)
- Otto, H.-J. (1994): Waldökologie. Stuttgart
- Paczkowski, S.; Datta, P.; Irion, H.; Paczkowska, M.; Habert, T.; Pelz, S.; Jaeger, D. (2021): Evaluation of Early Bark Beetle Infestation Localization by Drone-Based Monoterpene Detection. In: *Forests* 12(2), Art. 228
- Panka, S. (2014): Der Riesen-Lebensbaum (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) – Wachstum einer bisher unterschätzten Baumart in Brandenburg. In: Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 55. Potsdam/Eberswalde, S. 77–87
- Parker, R.; Bayne, K.; Clinton, P. (2016): Robotics in forestry. In: *NZ Journal of Forestry* 60(4), S. 8–14
- Paul, A. (2019): Aspekte der Baumschulwirtschaft bei der zukünftigen Pflanzgutversorgung. Vortrag, https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Presse/Arnsberger_Waldforum/Dokumente/2019/4_ARNSBERG_VDF_Alain_Pai1.pdf (20.3.2024)
- Paulin, M.; Hirka, A.; Eötvös, C.; Gáspár, C.; Fürjes-Mikó, Á.; Csóka, G. (2020): Known and predicted impacts of the invasive oak lace bug (*Corythucha arcuata*) in European oak ecosystems – a review. In: *Folia Oecologica* 47(2), S. 131–139
- Petersen, R. (2015): Waldbaulicher Umgang mit der Spätblühenden Traubenkirsche. In: *AFZ – DerWald* 4, S. 18–21
- Pfenninger, M.; Reuss, F.; Kiebler, A.; Schönnenbeck, P.; Caliendo, C.; Gerber, S.; Cocchiarraro, B.; Reuter, S.; Blüthgen, N.; Mody, K.; Mishra, B. et al. (2021): Genomic basis for drought resistance in European beech forests threatened by climate change. In: *eLife* 10, Art. e65532
- Plantma Forestry (o. J.): What ist PlantMax? <https://plantmaforestry.com/what-is-plantma-x> (30.5.2024)
- Popkin, G. (2021): Forest fight. In: *Science* 374(6572), S. 1184–1189
- Pratsch, S.; Lieberth, U. (2019): Klimakrise erfordert neue Antworten. *LWF aktuell* 123(4), S. 10–13
- PresseBox (2021): Materna gewinnt beim GAIA-X Förderwettbewerb des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/materna-information-communications-se/Materna-gewinnt-beim-GAIA-X-Foerderwettbewerb-des-Bundesministeriums-fuer-Wirtschaft-und-Energie-BMWi/boxid/1066415> (20.3.2024)
- Prestel, J. (2022): Rehwild-Fütterungskonzept: Verbiss vermindern. In: *Jagd in Bayern* 1, S. 8–11
- Proplanta (2022): Kritik an der Verpflichtung zur Stilllegung von Waldflächen. https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/wald-forst/kritik-an-der-verpflichtung-zur-stilllegung-von-waldflaechen_article1656850406.html (20.3.2024)
- Puhlmann, H.; Schmidt-Walter, P.; Hartmann, P.; von Wilpert, K.; Meesenburg, H. (2017): Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: *AFZ – DerWald* 2, S. 37–39
- Reimoser, F.; Reimoser, S.; Klansek, E. (2006): Wild-Lebensräume. Zentralstelle Österreichischer Landesjagdverbände (Hg.), Wien
- Reitz, J.; Schluse, M.; Roßmann, J. (2019): Industry 4.0 beyond the Factory: An Application to Forestry. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Roßmann, J. (Hg.): Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin/Heidelberg, S. 107–116

- Rellstab, C.; Zoller, S.; Walthert, L.; Lesur, I.; Pluess, A.; Graf, R.; Bodénès, C.; Sperisen, C.; Kremer, A.; Gugerli, F. (2016): Signatures of local adaptation in candidate genes of oaks (*Quercus* spp.) with respect to present and future climatic conditions. In: *Molecular ecology* 25(23), S. 5907–5924
- Renaud, V.; Innes, J.; Dobbertin, M.; Rebetez, M. (2011): Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland for different types of forests over 10 years (1998–2007). In: *Theoretical and Applied Climatology* 105(1), S. 119–127
- Riek, W.; Russ, A.; Kühn, A. (2015): Waldbodenbericht Brandenburg. Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden. Band 1, MLUV; LFE, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 60, Potsdam/Eberswalde
- Riek, W.; Russ, A. (2019): Zustand der Waldböden im Land Brandenburg. Praxisempfehlung für die nachhaltige und bodenpflegende Bewirtschaftung der Wälder. Band 2, MLUL; LFE, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 68. Potsdam/Eberswalde
- Rigling, A.; Gessler, A.; Feichtinger, L.; Queloz, V.; Wohlgemuth, T. (2016): Können Ökosystemleistungen in einer heißeren und trockeneren Zukunft durch eingeführte oder heimische Baumarten gewährleistet werden? In: Krumm, F.; Vítková, L. (Hg.): *Eingeführte Baumarten in europäischen Wäldern: Chancen und Herausforderungen*, S. 252–263
- Rudow, A.; Bugmann, H. (2021): Waldlabor Zürich: Das Reallabor für angewandte Forschung und umfassenden Wissenstransfer zu Waldthemen nimmt Gestalt an. In: *GAIA* 30(3), S. 200–203
- Salvatori, E.; Pallante, G. (2021): Forests as Nature-Based Solutions: Ecosystem Services, Multiple Benefits and Trade-Offs. In: *Forests* 12(6), Art. 800
- Sanders, T.; Spathelf, P.; Bolte, A. (2019): The response of forest trees to abiotic stress. In: Stanturf, J. (Hg.): *Achieving sustainable management of boreal and temperate forests*. Sawston, S. 99–128
- Schirmer, R. (2017): Slawonische Eichen im Fokus. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. LWF aktuell 144(3), S. 36
- Schmiedinger, A.; Bachmann, M.; Kölling, C.; Schirmer, R. (2009): Gastbaumarten für Bayern gesucht. LWF aktuell 74, S. 47–51
- Schmitz, J. (2021): *DJV-Handbuch Jagd 2021*. Berlin
- Schmoll, A. (2022): Naturschutz und Klimaschutz im Widerstreit? Der Wald ist viel mehr als nur ein Kohlenstoffspeicher. BundesBürgerInitiative WaldSchutz, <https://www.bundesbuergerinitiative-waldschutz.de/2022/08/23/naturschutz-und-klimaschutz-im-widerstreit-der-wald-ist-viel-mehr-als-nur-ein-kohlenstoffspeicher/> (20.3.2024)
- Schnabel, F.; Liu, X.; Kunz, M.; Barry, K.; Bongers, F.; Bruelheide, H.; Fichtner, A.; Hårdtle, W.; Li, S.; Pfaff, C.-T.; Schmid, B. et al. (2021): Species richness stabilizes productivity via asynchrony and drought-tolerance diversity in a large-scale tree biodiversity experiment. In: *Science Advances* 7(51), Art. eabk1643
- Schröder, J.; Panka, S.; Degenhardt, A. (2021): Exoten wieder im Fokus – Erkenntnisse zu nichtheimischen Baumarten von langfristigen Versuchsflächen. In: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg; Landesbetrieb Forst Brandenburg (Hg.): *Wissenstransfer in die Praxis. Tagungsband zum Jubiläumskolloquium »150 Jahre Waldforschung in Brandenburg« am 9. Juni 2021*. Potsdam/Eberswalde, S. 13–24
- Schubert, M. (2022): Entwicklung der Verjüngung standorttypischer Baumarten auf der Brandfläche Treuenbrietzen bei verschiedenen Totholzvorräten. Masterarbeit
- Schulz, G. (1993): Betriebswirtschaftliche Aspekte des Plenterwaldes. In: *Allgemeine Forstzeitung* 48, S. 731–733
- Schulzki-Haddouti, C. (2022): EU-Parlament: Holz aus dem Wald sollte besser nicht direkt verheizt werden. VDI Nachrichten, <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/energie/eu-parlament-holz-aus-dem-wald-sollte-besser-nicht-direkt-verheizt-werden/> (24.10.2022)
- Schumacher, J. (2016): Monitoring im Bereich der Quarantäne bzw. bei invasiven Schadorganismen. In: *FVA-einblick* 1, S. 22–25

- Schütz, J. (1985): La production de bois de qualité dans la forêt jardinée. In: *Annales de Gembloux* 91, S. 147–161
- Šeho, M.; Huber, G.; Frischbier, N.; Schölch, M. (2017): Kurzportrait Baumhasel (*Corylus colurna* L.). *Waldwissen.net*, <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/waldbau/kurzportrait-baumhasel> (20.3.2024)
- Šeho, M.; Janßen, A. (2019): Alternativbaumarten im Klimawandel. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. *LWF aktuell* 123, S. 19–22
- Senf, C.; Müller, J.; Seidl, R. (2019): Post-disturbance recovery of forest cover and tree height differ with management in Central Europe. In: *Landscape Ecology* 34(12), S. 2837–2850
- Senf, C.; Seidl, R. (2021): Persistent impacts of the 2018 drought on forest disturbance regimes in Europe. In: *Biogeosciences* 18(18), S. 5223–5230
- Shimazu, M. (2009): Use of Microbes for Control of *Monochamus alternatus*, Vector of the Invasive Pinewood Nematode. In: Hajek, A. (Hg.): *Use of Microbes for Control and Eradication of Invasive Arthropods*. Dordrecht, S. 141–157
- Siegmund, E. (1973): Aufwand und Ertrag bei waldbaulichen Betriebsformen. Dissertation. München
- SMC (Science Media Center Germany) (2023): Wie gelingt der klimaresiliente Umbau der Wälder? <https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/science-response/details/news/wie-gelingt-der-klimaresiliente-umbau-der-waelder/> (20.3.2024)
- Sohn, J.; Saha, S.; Bauhus, J. (2016): Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. In: *Forest Ecology and Management* 380, S. 261–273
- Spathelf, P. (2023): Die Mischung macht's – Herausforderungen für den naturnahen Waldumbau nach den Katastrophenjahren 2018–19. In: *Nationalpark-Jahrbuch Unteres Odertal 2022*, Schwedt, S. 83–88
- Spathelf, P.; Ammer, C.; Annighöfer, P.; Bolte, A.; Seifert, T.; Weimar, H. (2022): Fakten zum Thema: Wälder und Holznutzung. In: *AFZ – DerWald* 7, S. 39–44
- Spathelf, P.; Bolte, A.; Riek, W. (2016): Waldmanagement im Klimastress 2.0. In: *AFZ – Der Wald* 3, S. 10–14
- Spathelf, P.; Linde, A. (2020): Gebietsfremde Baumarten in unserem Wald – Chance oder Risiko? In: *Nationalpark-Jahrbuch Unteres Odertal 2020*, Band II. Schwedt, S. 8–17
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (20.3.2024)
- Spektrum (o. J.): Hochwald. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/hochwald/32140> (30.5.2024)
- Stark, H.; Gärtner, S.; Reif, A. (2019): Naturnähe der Baumartenzusammensetzung in Deutschland: Einfluss von Referenz, Bewertungsmethodik und Klimawandel. Band 1, BfN-Skripten 531, Bonn
- Stark, H.; Nothdurft, A.; Block, J.; Bauhus, J. (2015): Forest restoration with *Betula* ssp. and *Populus* ssp. nurse crops increases productivity and soil fertility. In: *Forest Ecology and Management* 339, S. 57–70
- Staupendahl, K.; Fehrmann, L.; Fuchs, H.; Kleinn, C.; Magdon, P. (2020): Neue Wege in der Forsteinrichtung. In: *AFZ – DerWald* 15, S. 27–31
- Stereńczak, K.; Kraszewski, B.; Mielcarek, M.; Piasecka, Ż.; Lisiewicz, M.; Heurich, M. (2020): Mapping individual trees with airborne laser scanning data in an European lowland forest using a self-calibration algorithm. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 93, Art. 102191
- STIHL Vertriebszentrale AG & Co. KG (o. J.): Smart Connector 2 A. <https://www.stihl.de/de/p/connected-smart-products-smart-connector2a-135009> (30.5.2024)
- Strugholtz, A. (2010): Ein forstbetriebliches Simulationsmodell zur ökonomischen Bewertung strategischer forstlicher Produktionsentscheidungen. Masterarbeit, Göttingen
- Stubbe, C. (1997): *Das Rehwild (The Roe Deer)*. Berlin
- Stubenazy, T.; Kohnle, U.; Klädtke, J. (2020): Kiefernwachstum in einer warm-trockenen Klimakulisse. In: *AFZ – DerWald* 2, S. 46–49

- Sturm, K.; Kaiser, M. (1999): Dem Öko-Wald gehört die Zukunft. Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Waldbaustrategien (in Mitteleuropa). Hamburg
- Suck, R.; Bushart, M.; Hofmann, G.; Schröder, L. (2014): Karte der potentiellen natürlichen Vegetation Deutschlands. Erläuterungen, Auswertungen, Anwendungsmöglichkeiten, Vegetationstabellen. Band 3, BfN-Skripten 377, Bonn
- Süssner, B. (2020): Wald- und Vegetationsbrände. Prävention, Einsatzvorbereitung, Bekämpfung. Die roten Hefte, Band 107, Stuttgart
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2014): Inwertsetzung von Biodiversität. (Kehl, C.; Sauter, A.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 161, Berlin
- TAB (2023): Waldbrandbekämpfungstechnologien. (Czerniak-Wilmes, J.; Jetzke, T.) TAB-Themenkurzprofil Nr. 60, Berlin
- Tahvonen, O.; Rämö, J. (2016): Optimality of continuous cover vs. clear-cut regimes in managing forest resources. In: Canadian Journal of Forest Research 46(7), S. 891–901
- Technische Hochschule Wildau (o.J.): Mini Harvester. <https://www.th-wildau.de/forschung-transfer/forschung/verkehrslogistik/projekte/abgeschlossene-projekte/mini-harvester> (30.5.2023)
- Thiede, J. (2021): Leitfaden zur Vitalitätsansprache der eingeführten Baumarten *Abies grandis* (Douglas ex D. Don) Lindley und *Betula maximowicziana* Regel sowie Handlungsempfehlungen für die waldbauliche Praxis in Nordrhein-Westfalen. Bachelorarbeit, Eberswalde
- Thom, D.; Golivets, M.; Edling, L.; Meigs, G.; Gourevitch, J.; Sonter, L.; Galford, G.; Keeton, W. (2019): The climate sensitivity of carbon, timber, and species richness covaries with forest age in boreal-temperate North America. In: Global Change Biology 25(7), S. 2446–2458
- Thom, D.; Spathelf, P. (2023): Adaptive Waldbewirtschaftung zur Minderung von Störungen. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 174(2), S. 70–75
- Thomasius, H. (1996): Geschichte, Anliegen und Wege des Waldumbaus in Sachsen. In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten 6, Graupa, S. 11–53
- Thorn, S.; Bässler, C.; Svoboda, M.; Müller, J. (2017): Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity – Lessons from the Bohemian Forest. In: Forest Ecology and Management 388, S. 113–119
- Thorn, S.; Chao, A.; Georgiev, K.; Müller, J.; Bässler, C.; Campbell, J.; Castro, J.; Chen, Y.-H.; Choi, C.-Y.; Cobb, T.; Donato, D. et al. (2020): Estimating retention benchmarks for salvage logging to protect biodiversity. In: Nature Communications 11(1), Art. 4762
- Thorn, S.; Müller, J.; Leverkus, A. B. (2019): Preventing European forest diebacks. In: Science 365(6460), S. 1388
- Torr, P.; Wilson, M.; Heritage, S. (2005): Forestry applications. In: Grewal, P.; Ehlers, R.; Shapiro-Ilan, D. (Hg.): Nematodes as biocontrol agents. Wallingford, S. 281–293
- UBA (Umweltbundesamt) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf (20.3.2024)
- UBA (2021): Waldbrände. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende#waldbrande-in-deutschland> (20.3.2024)
- UFZ (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung) (2023): Zur geplanten Novelle des Bundeswaldgesetzes: »Wir brauchen ökologische Mindestanforderungen als gute forstliche Praxis«. https://www.ufz.de/index.php?de=36336&webc_pm=05/2023 (20.3.2024)
- UFZ (o.J.): Dürremonitor Deutschland. <https://www.ufz.de/index.php?de=37937> (30.5.2024)
- Uni Göttingen (Georg-August-Universität Göttingen) (o.J.): ForestCare. <https://www.uni-goettingen.de/de/647748.html> (30.5.2024)

- Van der Maaten-Theunissen, M.; Kahle, H.-P.; van der Maaten, E. (2013): Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an altitudinal gradient in southwestern Germany. In: *Annals of Forest Science* 70(2), S. 185–193
- Verheyden, H.; Ballon, P.; Bernard, V.; Saint-Andrieux, C. (2006): Variations in bar-stripping by red deer *Cervus elaphus* across Europe. In: *Mammal Review* 36(3), S. 217–234
- Volk, H.; Schirmer, C. (2003): Leitfaden zur Kartierung der Schutz- und Erholungsfunktionen des Waldes: Waldfunktionenkartierung (WFK). Projektgruppe Forstliche Landespflege (Hg.), Frankfurt a. M.
- Volk, H.; Spathelf, P. (2023): Kulturwald in Mitteleuropa – Schwarzwald und Choriner Wald. In: *AFZ – DerWald* 23, S. 48–51
- Völk, F.; Hochrainer, F. (2009): Rehwildfütterung und Verbissminderung. In: FUST-Tirol (Hg.): Leitlinien für integratives Wildtiermanagement. Beiträge zur Umweltgestaltung A 164. Berlin, S. 79–83
- Von Arx, G.; Dobbertin, M.; Rebetez, M. (2012): Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 166–167, S. 144–155
- Von Carlowitz, H. (2013): *Sylvicultura oeconomica*. Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Hamberger, J. (Hg.), München
- Vor, T.; Nehring, S.; Bolte, A.; Höltermann, A. (2016): Assessment of invasive tree species in nature conservation and forestry – contradictions and coherence. In: Krumm, F.; Vítková, L. (Hg.): *Introduced tree species in European forests. Opportunities and challenges*. Joensuu, S. 148–156
- Vor, T.; Spellmann, H.; Bolte, A.; Ammer, C. (Hg.) (2015): *Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten. Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung*. Göttinger Forstwissenschaften Band 7, Göttingen
- Vorfelder, A. (2022): *Rechtsfragen einer nachhaltigen Forstwirtschaft – Eine Untersuchung zum waldrechtlichen Instrumentenverbund in Zeiten von Klimawandel und Artensterben*. Dissertation, Tübingen
- Wagner, T.; Wiese, P.; Späthe, T. (2021): *Smart Forest Work: Ideen für die Arbeitssicherheit von Morgen*. In: *AFZ – DerWald* 10, S. 36–39
- Wang, X.; Wang, X.-Y.; Kenis, M.; Cao, L.-M.; Duan, J.; Gould, J.; Hoelmer, K. (2021): Exploring the potential for novel associations of generalist parasitoids for biological control of invasive woodboring beetles. In: *BioControl* 66(1), S. 97–112
- WBW (Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik) (2018): *Betreuung und Förderung im kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald*. Berlin
- WBW (2020): *Eckpunkte der Waldstrategie 2050*. Berlin
- WBW (2021): *Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel*. Berlin
- WBW (2022): *Mehr als »Gute fachliche Praxis«. Vorschlag für eine anpassungsfähige Governance zum Erhalt resilienter Wälder und ihrer Ökosystemleistungen in Zeiten des globalen Wandels*. Berlin
- WBW (2023): *Zum Umgang mit alten, naturnahen Laubwäldern in Deutschland im Spannungsfeld zwischen Biodiversitätsschutz, Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel*. Berlin
- Welle, T.; Sturm, K.; Bohr, Y.; Hofmann, S. (2018): *Alternativer Waldzustandsbericht. Eine Waldökosystemtypen-basierte Analyse des Waldzustandes in Deutschland anhand naturschutzfachlicher Kriterien*. https://naturwald-akademie.org/wp-content/uploads/2020/06/Alternativer-Waldzustandsbericht_Stand_24_04_2018_1.pdf (20.3.2024)
- Wilkes Center for Climate Science and Policy (o. J.): *Global forest climate risk*. <https://wilkescenter.utah.edu/tools/globalforestclimaterisk/> (30.5.2024)
- Williams, B.; Brown, E. (2014): Adaptive management: from more talk to real action. In: *Environmental management* 53(2), S. 465–479

- Wissenschaftliche Dienste (2019): Waldumbaukonzepte und forstliche Fördermaßnahmen in Deutschland. WD 5 – 3000 – 070/19, <https://www.bundestag.de/resource/blob/657276/fe3b5754e5ef9999c6f2ef01a47bd997/WD-5-070-19-pdf-data.pdf> (20.3.2024)
- Wohlgemuth, T.; Gossner, M.; Campagnaro, T.; Marchante, H.; van Loo, M.; Vacchiano, G.; Castro-Díez, P.; Dobrowolska, D.; Gazda, A.; Keren, S.; Keserű, Z. et al. (2022): Impact of non-native tree species in Europe on soil properties and biodiversity: a review. In: *NeoBiota* 78, S. 45–69
- Wohlleben, P. (2015): *Das geheime Leben der Bäume. Was sie fühlen, wie sie kommunizieren – die Entdeckung einer verborgenen Welt.* München
- WWF (2021): Interview mit Peter Wohlleben: Schützt den Wald! <https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/schuetzt-den-wald-vor-der-motorsaege> (20.3.2024)
- Zeiler, H. (2009): *Rehe im Wald.* Wien
- Zellweger, F.; de Frenne, P.; Lenoir, J.; Vangansbeke, P.; Verheyen, K.; Bernhardt-Römermann, M.; Baeten, L.; Hédli, R.; Berki, I.; Brunet, J.; van Calster, H. et al. (2020): Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. In: *Science* 368(6492), S. 772–775
- Zemánek, T.; Filo, P. (2022): Influence of Intelligent Boom Control in Forwarders on Performance of Operators. In: *Croatian journal of forest engineering* 43(1), S. 47–64

8 Anhang**8.1 Abbildungen**

	Seite
Abbildung 2.1	Verbreitung von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche in Deutschland 27
Abbildung 3.1	Sommer- (a) und Winterschältschäden durch Rotwild (b), Fegeschlagschäden durch Reh (c) und Rothirsch (d) 56
Abbildung 4.1	Fäller-Bündler-Aggregat mit doppelten Greiferarmpaaren der schwedischen Firma Bracke Forest..... 76
Abbildung 4.2	Raupenharvester..... 76
Abbildung 5.1	Entwicklung der Reinerträge I in Großprivat-, Körperschafts- und Staatswaldbetrieben..... 92
Abbildung 5.2	Beispielbetriebe..... 95
Abbildung 5.3	Verteilung der Vorräte (in fm) je Baumart und Altersklasse für einen 5.000-ha-Staatswald in der Region Nord zum Ausgangszeitpunkt..... 100
Abbildung 5.4	Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse für einen 1.000-ha-Kommunalwald in der Region Ost zum Ausgangszeitpunkt 103
Abbildung 5.5	Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse für einen 1.000-ha-Privatwald in der Region Süd zum Ausgangszeitpunkt..... 106
Abbildung 5.6	Verteilung der Vorräte je Baumart und Altersklasse für einen 300-ha-Privatwald in der Region West zum Ausgangszeitpunkt 109
Abbildung 5.7	Prozentuale Anteile der Waldumbaufläche im zeitlichen Verlauf, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) 113
Abbildung 5.8	Entwicklung der Holzvorräte, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen.... 114
Abbildung 5.9	Entwicklung der Laubholzvorräte, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen 115
Abbildung 5.10	Entwicklung der Starkholzsortimente (Klassen 4, 5 und 6), aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen..... 116
Abbildung 5.11	Entwicklung der Holzerntemengen, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen 117
Abbildung 5.12	Entwicklung der Holzerlöse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen 118
Abbildung 5.13	Entwicklung der Holzerntekosten, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen 119
Abbildung 5.14	Entwicklung der erntekostenfreien Erlöse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen..... 120
Abbildung 5.15	Entwicklung der sonstigen Erlöse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen 121
Abbildung 5.16	Entwicklung der Betriebskosten, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen 122
Abbildung 5.17	Entwicklung der Betriebsergebnisse, aufgeschlüsselt nach Regionen und Bewirtschaftungstypen..... 123
8.2 Tabellen	
Tabelle 2.1	Modellierte Überlebensraten verschiedener Baumarten 2000, 2050 und 2070..... 32
Tabelle 3.1	Vielversprechende heimische Alternativbaumarten im Klimawandel 52
Tabelle 3.2	Vielversprechende nicht gebietsheimische Alternativbaumarten im Klimawandel..... 55
Tabelle 4.1	Typische multispektrale Satelliten, Betreiber, Frequenzspektrum, geometrische Auflösung je nach Spektrum, Datenverfügbarkeit..... 70

Tabelle 5.1	Waldflächenanteile in Deutschland, differenziert nach Naturnäheklasse und Naturnähestufe ..	94
Tabelle 5.2	Unterschiede zwischen den drei Bewirtschaftungsverfahren.....	97
Tabelle 5.3	Entwicklung relevanter Kennzahlen bei den drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) in den ersten 10 Jahren, nach 10 Jahren und nach 50 Jahren	100
Tabelle 5.4	Entwicklung relevanter Kennzahlen für die drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) für die ersten 10 Jahre und nach 10 Jahren.....	104
Tabelle 5.5	Entwicklung relevanter Kennzahlen für die drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) für die ersten 10 Jahre und nach 10 Jahren.....	106
Tabelle 5.6	Entwicklung relevanter Kennzahlen für die drei Bewirtschaftungstypen (PSW, DWW und AKW) für die ersten 10 Jahre, nach 10 und nach 50 Jahren	109
Tabelle 5.7	Vergleich der betriebsökonomischen Simulationsergebnisse mit Daten aus »Testbetriebsnetz Forst« und »BB-Forstvergleich«.....	124
Tabelle 5.8	Vergleich wichtiger Ergebnisse von Welle et al. 2022 mit Ergebnissen aus anderen Studien.	125

8.3 Kästen

Kasten 3.1	Beispiel Waldumbau Bayerische Staatsforsten.....	43
Kasten 3.2	Potenzielle natürliche Vegetation als Indikator für Naturnähe	44
Kasten 3.3	Strukturvielfalt verschiedener Waldtypen.....	48
Kasten 3.4	Projekt »MultiRiskSuit« der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt.....	51
Kasten 3.5	Auswirkungen nicht einheimischer Baumarten auf die Biodiversität	54
Kasten 3.6	Waldeigenschaften und Waldbrandrisiko	59
Kasten 3.7	Trittsteinkonzept	62
Kasten 4.1	Relevante Forschungsprojekte	74
Kasten 4.2	Relevante Forschungsprojekte	87
Kasten 5.1	Annahmen im Überblick	98
Kasten 5.2	Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick.....	111

8.4 Glossar

Abknickverfahren: händisches Abknicken zurückzudrängender Stämmchen in Brusthöhe.

Abschnitte: Stammholz, das zu Standardlängen geschnitten wird, üblicherweise in Abschnitten zwischen 2 und 7 m.

Allochthon: siehe nicht standortheimisch.

Altersklasse: Je nach Alter der führenden Baumart eines Bestandes werden Waldbestände Klassen von jeweils 20 Jahren zugeordnet und mit Ziffern bezeichnet (1 = 1 bis 20 Jahre, 2 = 21 bis 40 Jahre, 3 = 41 bis 60 Jahre etc.).

Altersklassenwald: Erfolgt Waldbau in einem Zyklus von Pflanzung, Pflege, Ernte (Kahlschlag) und erneutem Pflanzen, spricht man von Altersklassenwald. Die verschieden alten Bäume stehen nicht gemischt, sondern in etwa gleich alten Beständen räumlich getrennt.

Antagonismus: in der Ökologie jede Art gegenseitiger Beziehungen zwischen einzelnen Individuen, Arten oder Populationen, bei denen der eine oder auch beide Beteiligte beeinträchtigt werden.

Astung: Die Astung dient der Produktion von astreinem Wertholz. Geastet wird meist bis zu einer Stammhöhe von 6 m, gelegentlich auch 12 m. Zu den Baumarten, an denen eine Astung durchgeführt wird, gehören vor allem Nadelbäume.

Aufarbeitung: die Entastung und Entwipfelung des gefällten Baumes sowie die Aufteilung des Stammes in kürzere Teile zur Einteilung der Sortimente oder zur Erreichung der Transportfähigkeit. Im Falle von Rohholz erfolgt generell noch die Feststellung der Güteklasse sowie die Vermessung der aufgearbeiteten Stammenteile, sofern dies nicht erst im aufnehmenden Werk durchgeführt wird.

Aushaltung: Längen-, Durchmesser- und Güteeinteilung von Rundholz.

Auszeichnen: Markierung zu entnehmender bzw. (vorerst) zu schonender Bäume.

Autochthon: siehe standortheimisch.

Baumaltersklasse: Je nach Alter der führenden Baumart eines Bestandes werden Waldbestände Klassen von 20 Jahren zugeordnet und mit Ziffern bezeichnet (1 = 1 bis 20 Jahre, 2 = 21 bis 40 Jahre, 3 = 41 bis 60 Jahre etc.).

Baumartengruppe: in der Forsteinrichtung oder statistischen Auswertung genutzte, variable Zusammenfassung verschiedener Baumarten zu einer Gruppe, da seltenere Baumarten häufig keine sinnvollen Einzelbetrachtungen ermöglichen.

Bestockung: Bezeichnung für den aktuellen Baumbewuchs einer Waldfläche.

Bestockungsgrad: Der Bestockungsgrad gibt das Verhältnis der tatsächlichen Grundfläche eines Bestands je Hektar zu den entsprechenden Angaben der Ertragstafel (Vollbestockung, in der Regel mäßige Durchforstung) an. Der Bestockungsgrad ist ein Ausdruck für die Bestandesdichte.

Bewirtschaftungstyp/-weise: Es werden Altersklassenwald-, Dauerwald- und prozessschutzbasierte Waldbewirtschaftung unterschieden.

Biodiversität, biologische Vielfalt: Oberbegriff für die Variabilität der Ökosysteme (Lebensgemeinschaften, Lebensräume) der Arten und der genetischen Vielfalt innerhalb einer Art.

Bioökonomie: Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren für ein post-fossiles, zukunftsfähiges Wirtschaftssystem bereitzustellen.

Bodenverwundung (oberflächige): Entfernung oder Reduzierung der Bodenvegetation, die mit den Keimlingen um Nährstoffe oder Wasser in Konkurrenz steht, zwecks Schaffung eines Keimbettes, das Wurzelwachstum und Wasseraufnahme erleichtert. Auch chemische Bodeneigenschaften sowie das Mikroklima können verbessert werden.

Brusthöhendurchmesser: Durchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe.

Bundeswaldinventur (BWI): in ganz Deutschland einheitliches Verfahren zur Erfassung von großräumigen Waldverhältnissen und forstlichen Produktionsmöglichkeiten auf Stichprobenbasis in Form permanenter Probepunkte.

Dauerwaldbewirtschaftung: eine Form des Wirtschaftswaldes, bei der die Nutzung auf Dauer einzelbaum-, gruppen- oder kleinflächenweise erfolgt.

Deckungsbeitrag: siehe erntekostenfreier Holzerlös.

Derbholz: oberirdische Holzmasse von Bäumen mit über 7 cm Durchmesser mit Rinde

Durchforstung: waldbauliche Pflegemaßnahme. Eine Durchforstung ist die Entnahme von Bäumen in einem Waldbestand, um den verbleibenden Bäumen mehr Wuchsraum zu geben. Anders als bei Läuterungen fällt bei der Durchforstung Derbholz an.

Eigentumsart, Waldeigentumsart: Die Eigentumsart wird differenziert nach Staatswald (Bund, Land), Körperschaftswald (Kommunen) und Privatwald.

Elastizität: siehe Resilienz.

Endnutzung: die Ernte des Altbestandes nach Ende der Umtriebszeit.

Energetische Holznutzung: Verfeuern von Holz zur Gewinnung von Wärmeenergie (und ggf. sekundär für die Stromproduktion).

Erntefestmeter: Maß für Rohholz zur Abschätzung des nutzbaren Derbholzes aus einer Holzerntemaßnahme. Ein Erntefestmeter entspricht einem Kubikmeter (m³) Holzmasse ohne Zwischenräume und Rinde. Der Erntefestmeter wird in der Praxis aus dem Vorratsfestmeter errechnet, in dem vom Vorratsfestmeter 20 % Ernte- und Rindenverluste abgezogen werden.

Erntekostenfreier Holzerlös: Erlöse aus dem Holzverkauf abzüglich Erntekosten.

- Ertragsklasse:** relativer Maßstab der Wuchtleistung einer Holzart, der sich aus Alter und Höhe der standortgebundenen Leistung ergibt. Die Ertragsklasse wird in der Ertragstafel abgelesen.
- Ertragstafel:** Tabellenwerke aus der Forsteinrichtung, die dazu dienen, die Entwicklung eines Bestandes hinsichtlich z. B. der Höhe, dem Durchmesser oder dem Zuwachs in unterschiedlichen Lebensphasen und bei unterschiedlichen waldbaulichen Behandlungen zu bestimmen. Ertragstafeln geben durchschnittliche Bestandeswerte unterteilt nach Baumart, Bestandesalter, Durchforstungsart und Bonität (Leistungsfähigkeit des Standortes) an. Sie sind einfache empirische Wachstumsmodelle, die das durchschnittliche Wachstum einer Baumart in einem Reinbestand wiedergeben.
- Fallenstern:** siehe Pheromonfalle.
- Fangbaum:** Falle für zu bekämpfende Tiere, z. B. Borkenkäfer. Als Fangbäume dienen vom Sturm geworfene oder frisch gefällte Stämme.
- Forsteinrichtung:** mittelfristige, periodische (meist 10-jährige) Planung im Forstbetrieb. Die Forsteinrichtung beinhaltet die Erfassung des Waldzustandes (Waldinventur) und die Kontrolle der im vergangenen Forsteinrichtungszeitraum durchgeführten Maßnahmen. Des Weiteren wird für die folgenden Jahre der Hiebsatz festgelegt und die betrieblichen sowie waldbaulichen Ziele geplant.
- Forstwirtschaftlicher Zusammenschluss:** Eine nach § 15 des Bundeswaldgesetzes anerkannte Forstbetriebsgemeinschaft (Abschnitt II), einen Forstbetriebsverband (Abschnitt III) und anerkannte forstwirtschaftliche Vereinigung (Abschnitt IV).
- Forwarder:** Fahrzeug, das bei der Holzernte das Holz aus dem Bestand rücken, aufladen und an den Lkw-befahrbaren Waldweg transportieren kann. Auch: Rückezug, Tragrückeschlepper oder Tragschlepper.
- Funktionalität, Funktionstüchtigkeit:** Die Funktionstüchtigkeit biologischer bzw. ökologischer Systeme beschreibt die Fähigkeit, sich selbst zu organisieren sowie zu regulieren und so Störungen zu widerstehen oder aber sich an sich verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Zwar verändern sich auch funktionstüchtige Systeme permanent, ihre Zustandsveränderung geht aber nicht so abrupt und stark vonstatten, dass von einer Degradation oder Umwandlung gesprochen werden muss oder gar ein Kollaps eintritt.
- Gemeinwohlleistung:** Beiträge von Produktionsansätzen, Wirtschaftsstrategien, politische Entscheidungen etc. und auch Ökosystemen zum Gemeinwohl. Die Vorstellungen darüber, was zu Gemeinwohlleistungen zu zählen und wie es zu messen ist, variieren. Im Gegensatz zu Ökosystemleistungen (ÖSL), die (bis auf die kulturellen Leistungen) eher aus der Perspektive von Funktionen und Leistungen des Ökosystems formuliert werden (z. B. Grundwasserschutz, Biodiversität), vertritt Gemeinwohlleistung die Seite der Bewertung z. B. von ÖSL für das menschliche Wohlbefinden. Allerdings wird diese Trennung nicht durchgängig eingehalten, die Begriffe werden zudem oft synonym verwendet.
- Gradation:** Massenvermehrung einer Tierpopulation, z. B. von Borkenkäfern.
- Habitatbaum:** ein lebender oder toter, stehender Baum, der mindestens ein Mikrohabitat trägt. Mikrohabitat bezeichnet sehr kleinräumige oder speziell abgegrenzte Lebensräume. Baummikrohabitate sind vom Baum getragene, klar abgegrenzte Gebilde, auf die viele verschiedene, teils hochspezialisierte Tier-, Pflanzen-, Flechten- und Pilzarten während mindestens eines Teils ihres Lebens angewiesen sind.
- Heimisch:** siehe standortheimisch.
- Hiebsatz, Hiebssatz:** Er wird im Forstbetrieb durch die Forsteinrichtung festgelegt und gibt die flächenbezogene nachhaltige jährliche einschlagbare Holzmenge an. Er wird in Ernte- oder Vorratsfestmetern angegeben.
- Holzaufnahme:** Dokumentation der Güteklassen und Mengen geernteten Holzes.
- Holzboden(fläche):** eine dauernd zur Holzproduktion bestimmte Fläche. Dazu gehören auch Gräben, Leitungstrassen, Blößen sowie Wege und Schneisen unter 5 m Breite, deren Größe den Zusammenhang der Bestockung nicht wesentlich unterbricht.
- Holzücke:** eine nachgefragte Holzmenge abzüglich vermarktete Holzmenge in einem nationalen Markt. Die Differenz wird oft durch Holzimporte ausgeglichen.
- Holzproduktespeicher:** in auf längere Dauer angelegten Produkten aus Holz festgelegter Kohlenstoff.
- Holzrückung:** siehe Rücken, Rückung.

Holzsortiment: Sortierung eines Baumes in eine vordefinierte, marktfähige Kategorie, z. B. nach seiner Stärke oder Güte.

Hordengatter: rund 4 m lange Zaunsegmente, aus zumeist unbehandelten Holzlatten (Dachlatten) gefertigt.

Industrieholz: Rohholzsortiment, das wegen geringer Dimensionen oder Qualitätseinschränkungen zu schwach ist, um in Sägewerken verarbeitet zu werden. Industrieholz wird bei der weiteren stofflichen Verwertung mechanisch zerkleinert und/oder chemisch aufgeschlossen. Es wird dann für die Produktion von Holzschliff und Zellstoff als Grundstoffe der Papierherstellung, Holzwolle sowie für die Produktion von Holzwerkstoffen verwendet.

Industrielangholz: krumme Baumstämme, die häufig als Brennholz verkauft werden.

Industrieschichtholz, Schichtholz: Industrieholz kurz (1 bis 3 m).

Kalamität: ein großflächiger Ausfall von Waldbeständen. Generell handelt es sich um Massenerkrankungen ganzer Waldbestände durch Massenvermehrungen von Pflanzenfressern (u. a. Mäuse, Borkenkäfer, Nonnen, Kieferneulen, Schwammspinner) oder auch Witterungsextreme wie Sturmschäden, Schneebruch und Waldbrand.

Kalkung, Bodenkalkung, Bodenschutzkalkung: Ausbringung von Kalkpulver zur Neutralisierung von Säuren im Waldboden.

Kaskadennutzung: Rohstoffe (z. B. Holz) oder daraus hergestellte Produkte werden in zeitlich aufeinanderfolgenden Schritten so lange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich genutzt und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch verwertet.

Körperschaftswald: Wald im Eigentum von Körperschaften öffentlichen Rechts. Dazu gehören Städte, Gemeinden und Gemeindeverbände oder auch Zweckverbände, sonstige Körperschaften sowie Anstalten und Stiftungen des öffentlichen Rechts.

Kultur: Eine Kultur wird durch Saat oder Pflanzung von Bäumen begründet und ist die jüngste Altersstufe des Waldes.

Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF): Internationales Klimapolitikfeld zu menschlichen Aktivitäten der Landnutzung, die terrestrische Ökosysteme in ihrer Kohlenstoffsenkenfunktion beeinflussen und damit den Austausch von CO₂ (Kohlenstoffkreislauf) zwischen der terrestrischen Biosphäre und der Atmosphäre verändern.

Läuterung: waldbauliche Pflegemaßnahme in Jungbeständen/Dickungen. Gut gewachsene Bäume werden zur Förderung der Wertleistung durch Aushieb von Konkurrenten gefördert. Gleichzeitig wird die Mischung des Bestandes reguliert und die Stabilität des Restbestandes durch Standraumerweiterung gefördert. Teil der Läuterung ist heute oft auch die Anlage der Feinerschließung (Rückegassen).

Leistungsklasse: Einstufung eines Waldstandortes bezüglich seiner Ertragsfähigkeit für bestimmte Baumarten.

Mittelblock: mittlerer Bereich zwischen zwei Rückegassen.

Monokultur (in Forsten): Anbau von Wäldern in einem einheitlichen Aufbau mit nur einer Baumart.

Motormanuell: Holzernte mit der handgeführten Motorsäge.

Mutualismus: Bezeichnung für eine Form der Wechselbeziehung zwischen artverschiedenen Organismen, bei der beide Partner aus Strukturen, Produkten oder Verhaltensweisen Nutzen ziehen.

Naturnaher Waldumbau: alle natürlichen und vom Menschen angeführten Prozesse, die die natürliche Baumarten- und Strukturvielfalt in Waldökosystemen befördern.

Naturverjüngung: Verfahren im Waldbau, bei dem sich die Bäume natürlich reproduzieren. Naturverjüngung entsteht durch selbstständige Saat von Bäumen oder durch vegetative Vermehrung (Stockausschlag).

Negativauslese: siehe Läuterung.

Nesterpflanzung: eine partielle Waldbestandesverjüngung in Form von Pflanzplätzen, als Abwendung von der vollflächigen, meist reihenweisen Bepflanzung oder Saat.

Nicht standorthemisch: von außen in die natürliche biologische Lebensgemeinschaft eingetragen.

Ökosystem: ein sich selbst organisierendes biologisch-ökologisches örtliches Wirkungsgefüge, in dem für den Ort charakteristische Organismen, im Zusammenspiel mit der unbelebten Umwelt, interagieren.

Ökosystembasiertes Waldmanagement: Management eines Waldes zur bestmöglichen Erhaltung seiner Funktionalität und Leistungsfähigkeit.

Ökosystemleistung: Nutzen der Natur für den Menschen.

Palette: Holzsortiment, z. B. für Europaletten.

Herbizide, Pflanzenschutzmittel: Bezeichnung für chemische Stoffe, die Pflanzen abtöten.

Pflege: Beeinflussung der Konkurrenzverhältnisse im Jungwuchs zugunsten der qualitativ guten, erwünschten Baumarten unter Sicherung einer erfolgversprechenden, zukunftsfähigen Mischung.

Pheromonfalle: Falle für zu bekämpfende Tiere, z. B. Borkenkäfer, unter Nutzung flüchtiger Sexualhormone. Eine praxisübliche Form ist der Fallenstern.

Pionierwald: Jungbaumbestand ohne Kronenschluss.

Plastizität, Anpassungsfähigkeit: Fähigkeit eines Systems, z. B. eines Organismus oder eines Ökosystems, sich auf geänderte Anforderungen und Gegebenheiten einer Umwelt einzustellen.

Potenzielle natürliche Vegetation (pnV): Vegetation, die sich selbstständig in dem jeweiligen Gebiet und unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen ohne menschliches Zutun einstellen würde.

Primärproduktion, Ökologie: Produktion von Biomasse durch die Produzenten, d. h. durch Pflanzen und autotrophe Bakterien, mithilfe von Licht oder chemischer Energie aus anorganischen Substanzen. Im Lebensmittelrecht werden darunter auch die Aufzucht und Haltung von Nutztieren, die für die Herstellung von Lebens- und Futtermitteln bestimmt sind, verstanden. In der Waldwirtschaft zumeist gleichgesetzt mit Holzaufbau. Ökosystemar gesehen geht Primärproduktion jedoch darüber hinaus.

Privatwald: Wald, der weder Körperschaftswald noch Staatswald ist. Privatwald befindet sich im Eigentum von natürlichen oder juristischen Personen oder auch Personengesellschaften.

Prozessschutzbasierte Waldbewirtschaftung: Bei dieser Bewirtschaftungsweise stehen die natürliche Vielfalt und eine zieloffene Entwicklung des Waldes im Vordergrund. Die von menschlichem Einfluss weitgehend ungestörte, kontinuierliche Entwicklung des Waldbodens und der Waldvegetation wird als prioritäres Schutzziel erachtet.

Referenzfläche: von der Bewirtschaftung ausgenommene Waldflächen, die aufzeigen, wie sich der bewirtschaftete Wald ohne menschlichen Einfluss entwickeln würde.

Reinbestand: Waldbestand aus nur einer Baumart.

Reinertrag: Unternehmensertrag abzüglich Unternehmensaufwand einschließlich Lohnansatz. Der Reinertrag I (ohne Förderung) stellt ein Ergebnis der Forstbetriebe dar, das ohne staatliche Zuschüsse und Prämien sowie ohne die indirekte Förderung der Betriebe als Aufwandsreduzierung durch eine Betreuung auf Forstamtschicht erreicht worden wäre. Das heißt, die nicht abgedeckten kalkulatorischen Betreuungsleistungen sind im Betriebsaufwand enthalten.

Resilienz: die Fähigkeit eines Ökosystems, angesichts von ökologischen Störungen seine grundlegende Organisationsweise zu erhalten, anstatt in einen qualitativ anderen Systemzustand überzugehen.

Resistenz: siehe Widerstandsfähigkeit.

Ringelung: Die Rinde wird auf ausreichender Breite so bis auf den Holzkörper unter Entfernung des Bastes entfernt, dass die Wunde nicht mehr überwallt werden kann.

Rückegasse: unbefestigte Schneisen im Waldbestand, die im Zuge der Feinerschließung angelegt werden. Sie dienen Rückemaschinen, Harvestern und Forwardern zur Befahrung bei Holzerntemaßnahmen.

Rücken, Rückung: Abtransport der Stämme gefällter Bäume aus dem Bestand an einen Lkw-befahrbaren Weg. Das Holzrücken erfolgt überwiegend maschinell durch Rückeschlepper, Forwarder sowie Seilanlagen. An verschiedenen Orten wird auch mit Pferden gerückt.

Saatgutgewinnung: Sammeln von Zapfen, Fruchtstände, Früchten und Samen, die zur Aussaat im Wald oder zur Erzeugung von Pflanzgut bestimmt sind.

Schalenwild: jagdliche Bezeichnung für zu den Paarhufern zählende Wildarten (Rot-, Dam-, Reh-, Elch-, Muffel-, Gams-, Stein- und Schwarzwild), deren Hufe bzw. Klauen Schalen genannt werden.

Schicht, Bestandesschicht: Die Schichtung beschreibt den vertikalen Aufbau des Waldes. Eine Schicht bilden alle Bäume, die einen gemeinsamen Kronenraum haben und mindestens 10% Deckungsgrad aufweisen. Als zweischichtig gelten somit Wälder, die übereinander zwei Kronenräume haben, die sich nicht berühren. Das kann z. B. Jungwuchs unter dem Schirm eines Altholzes sein.

Schirm: oberste Laubdachschicht.

Schirmschlag: Holzeinschlag, bei der der Altbestand des Waldes allmählich und gleichmäßig aufgelichtet wird, sodass unter dessen aufgelockertem Schirm die jeweiligen mikroklimatischen Bedingungen für die angestrebte Naturverjüngung geschaffen werden.

Schlagweiser Hochwald: Hochwald, in dem Pflege-, Ernte- und Verjüngungsmaßnahmen räumlich getrennt ganze Bestände bzw. deren Teilflächen erfassen.

Selbstwerbung: Aufarbeitung von Holz durch den Käufer.

Staatswald: Wald, der im Alleineigentum des Bundes oder eines Landes steht, sowie Wald im Miteigentum eines Landes, soweit er nach landesrechtlichen Vorschriften als Staatswald angesehen wird.

Stammholz: Alles Langholz einschließlich Langholzabschnitte und Schwellen, außer Stangen- und Industrieholz lang.

Standortheimisch: am Standort beheimatet und ökologisch angepasst.

Stärke, Stammstärke: Einteilung der Baumstämme nach Dimension.

Stoffliche Holznutzung: jegliche Holzverwendung (außer Verbrennung), z. B. für Dachstühle, Möbel, Verpackungen, Papier.

Streifenpflug: Anbaugerät für Traktoren oder Pferde, der die oberste Bodenschicht durchbricht und das Bodenmaterial rechts und links neben dem freigelegten Mineralboden ablagert. Diese Bodenmanipulation ist äußerst schonend für den Humus.

Substitutionspotenzial: Das Potenzial zur Treibhausgasreduktion, energieintensive (klimaschädliche) Produkte im Gebäudebau (z. B. Stahl) durch weniger energieintensive oder klimaneutrale zu ersetzen (z. B. Holz).

Suffizienz: Orientierung an dem, was ausreicht, Genügsamkeit, das richtige Maß. In Zusammenhang mit Waldwirtschaft ist damit zweierlei gemeint: zum einen, sich auf der Produktionsseite an dem zu orientieren, was der Wald liefert, ohne dass darüber seine natürliche Reproduktivität und das Potenzial an Biodiversität und Ökosystemleistungen eingeschränkt werden (Berücksichtigung von Begrenzungen), und zum anderen, vorherrschende Konsummuster und Produktion für einen globalen Massenmarkt zu hinterfragen (Reduktion des Rohstoffverbrauchs).

Tragschlepper: siehe Forwarder.

Unplanmäßige, zwangsweise Walderneuerung: durch großflächige Störungen (z. B. Borkenkäferfraß) notwendige Holzernte und Neubegründung des Bestandes abseits des geplanten Hiebsatzes.

Verwundbarkeit: siehe Vulnerabilität.

Vollernter, Harvester: computerunterstützte Holzerntemaschine für das Fällen, Entasten, Vermessen und Zerschneiden von Bäumen.

Voranbau: Verjüngungsverfahren im Waldbau. Pflanzen von Schattenbäumen unter den Schirm des Altbestandes auf einer Fläche.

Vorliefern: Vorkonzentrieren der gefällten Stämme an der Rückegasse.

Vornutzung: Eine Nutzung von Bäumen vor ihrer Hiebsreife, also etwa bei einer Läuterung oder Durchforstung.

Vorrat: Derbholzmasse eines Bestandes oder einer Summe von Beständen, gemessen in Vorratsfestmetern oder Erntefestmetern.

Vorratsfestmeter: Maß für Rohholz, oberirdisches Holzvolumen ab 7 cm Durchmesser (Derbholz) mit Rinde.

Vorsorgeökonomie: ökonomischer Ansatz, der auf die langfristige Erhaltung des produktiven Potenzials ausgerichtet ist. In der Waldwirtschaft: Ermöglichung einer maximalen Natur(re)produktivität des

Systems auf der Fläche, um die Fähigkeit zur Selbstorganisation zu stärken, z.B. Aufbau einer großen Holzvorrats, Zulassen von ökologischen Störungen, Einrichtung von unbewirtschafteten Referenzflächen zur Beobachtung und als Lernorte.

Vulnerabilität: einem System innewohnende spezifische Veranlagung, unter einem schadhafte äußeren Einfluss auch tatsächlich Schaden zu nehmen. Die Vulnerabilität jedes Systems ist umso höher, je stärker die Expositionsänderung (Zunahme des potenziellen Schadeinflusses); umso höher, je höher seine Sensitivität (Empfindlichkeit gegenüber dem Schadeinfluss); umso niedriger, je höher die Anpassungskapazität (Anpassungsfähigkeit) an die durch die Wirkung des Schadeinflusses veränderte Situation ist.

Waldfunktion: Kategorie für den Nutzen eines Waldes für den Menschen. Unterschieden werden etwa Nutzfunktion, Schutzfunktion und Erholungsfunktion.

Waldgenossenschaft: gemeinschaftliche Bewirtschaftung von Waldeigentum mit verschiedenen Genossenschaftsanteilen. Es können sich auch mehrere Kleinwaldbesitzende zu einer solchen zusammenschließen und sie gemeinschaftlich bewirtschaften.

Waldgesellschaft: Begriff aus der Vegetationskunde für die Gesamtheit bzw. den Typus von Waldpflanzenbeständen, die eine sehr ähnliche Artenzusammensetzung haben.

Waldökosystemtyp: abstrakte Zusammenfassung konkreter Waldökosysteme ähnlichen Charakters.

Walddtyp: siehe Waldökosystemtyp.

Waldumbau: waldbauliche Maßnahme, meist in Reinbeständen aus Nadelhölzern, bei der durch (Vor-)Anbau oder Mischungsregulierung der Naturverjüngung die Baumartenzusammensetzung und die Altersklassenverhältnisse verändert werden.

Waldzustandsindex: aggregierte Zahl zur Beurteilung der Naturnähe von Wäldern, zusammengesetzt aus sechs Einzelindikatoren: Naturnähe der Baumartenzusammensetzung, Repräsentanz, Gefährdung, Alt- und Starkbäume, Schutzstatus und Waldmanagement.

Widerstandsfähigkeit: Fähigkeit von Arten, biologischen Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen, dem Einfluss von Störfaktoren ohne Veränderung zu widerstehen.

Zertifizierung: Verfahren, mit dessen Hilfe nachgewiesen wird, dass Holz- und Papierprodukte aus ökonomisch nachhaltig und/oder nach ökologischen Prinzipien bewirtschafteten Wäldern stammen.

Zielstärkennutzung: Einzelstammweise bis kleingruppenweise Nutzung von Bäumen, wenn sie eine bestimmte definierte Dimension (Zielstärke = erwünschter Durchmesser) erreicht haben. Die Zielstärke variiert, z. B. je nach Baumart oder forstwirtschaftlichen Zielsetzungen.

Zufällen: ein motormanuelles Fällen eines Baumstammes in die Reichweite von Forstmaschinen auf der Rückegasse.

Zuwachs: die Mehrung des Holzvolumens in einem Wald, ausgehend von der Primärproduktion der Bäume.

Zwangsnutzung: siehe unplanmäßige, zwangsweise Walderneuerung.

