

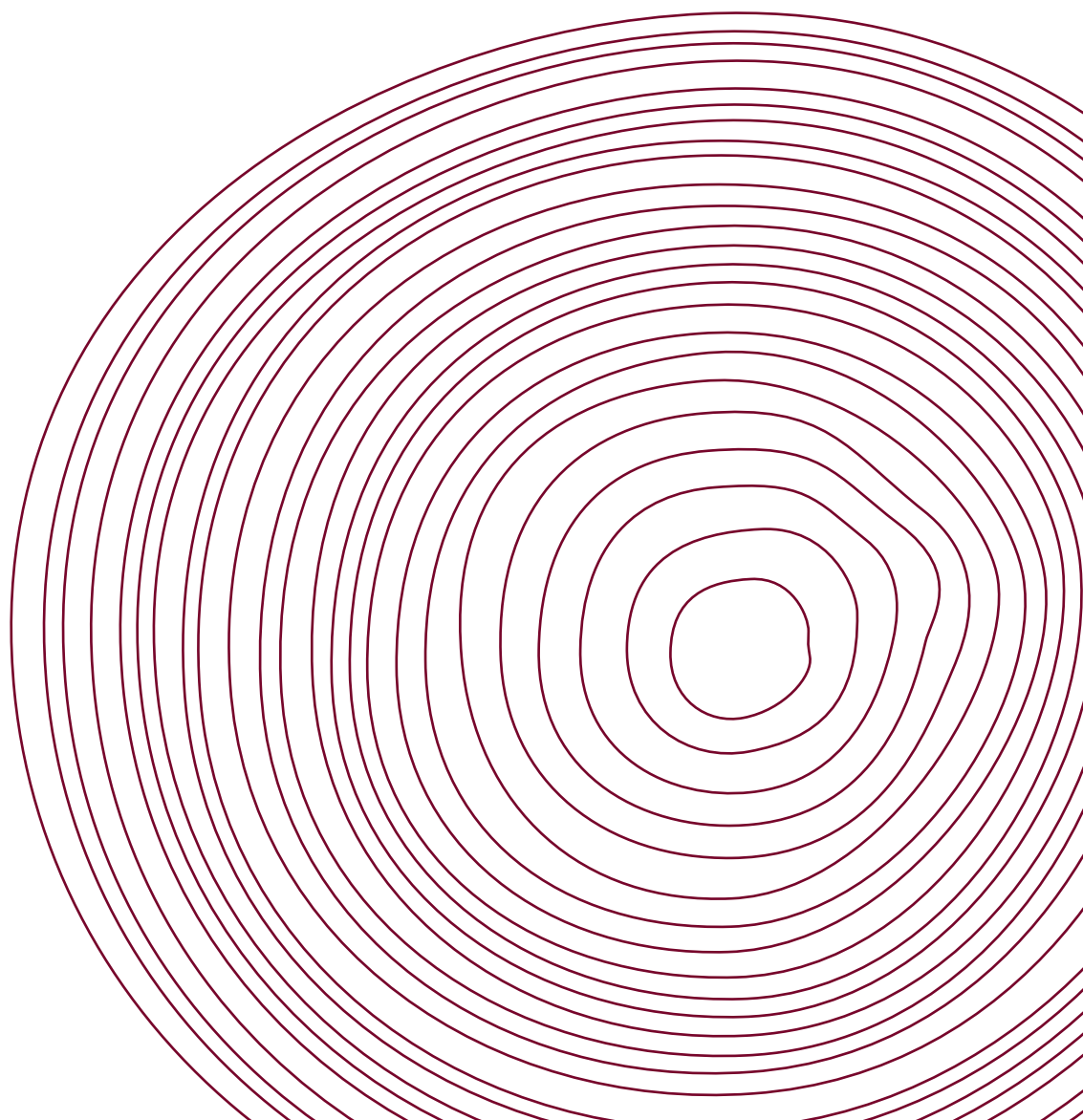


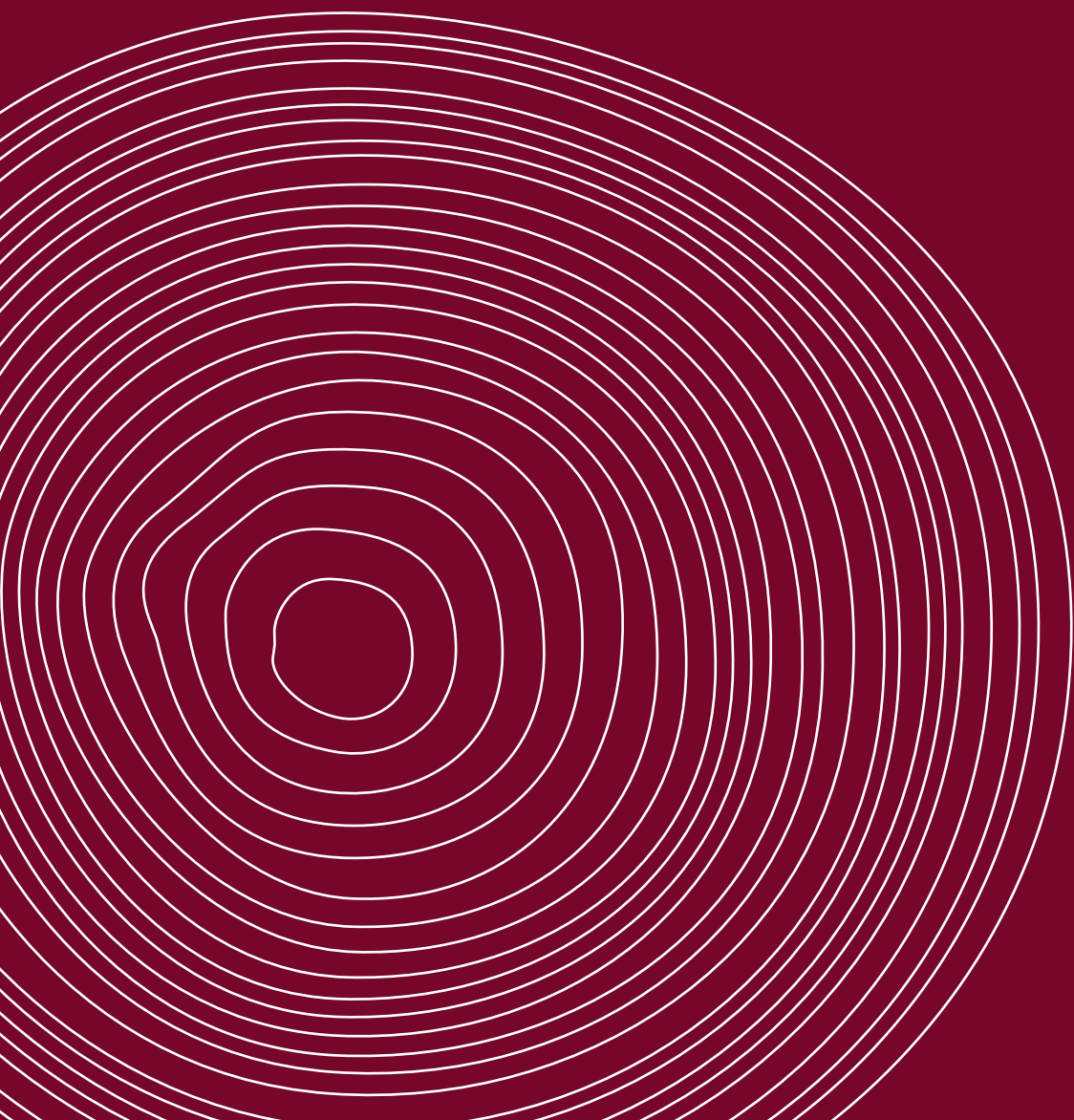
**Wissenschaftlicher Beirat  
für Waldpolitik**  
beim Bundesministerium für  
Ernährung und Landwirtschaft

# Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel

**Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik**

Oktober 2021





## Herausgeber

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik  
beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (WBW)  
Geschäftsstelle:  
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)  
Referat 513  
Postanschrift: 11055 Berlin  
Telefon: 030 / 18 529 – 3741  
E-Mail: 513@bmel.bund.de

## Redaktionsschluss

Oktober 2021

## Layout und Satz

WERNERWERKE GbR, Berlin

## Text

WBW Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik  
Zitierweise für diese Publikation: Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel. Berlin, 192 S.  
Autorinnen und Autoren: J. Bauhus, M. Dieter, N. Farwig, A. Hafner, R. Kätzel, B. Kleinschmit, F. Lang, M. Lindner, B. Möhring, J. Müller, M. Niekisch, K. Richter, U. Schraml, U. Seeling

## Druck

BMEL

## Bildnachweise

XII Siegfried Fink, Forstbotanik, Univ. Freiburg  
6 Siegfried Fink, Forstbotanik, Univ. Freiburg  
47 Siegfried Fink, Forstbotanik, Univ. Freiburg  
70 Siegfried Fink, Forstbotanik, Univ. Freiburg  
124 Siegfried Fink, Forstbotanik, Univ. Freiburg  
128 Jürgen Bauhus, Waldbau, Univ. Freiburg  
132 Birgit Kleinschmit, ILU, TU Berlin  
134 Rüdiger Unseld, Waldbau, Univ. Freiburg  
137 Jürgen Bauhus, Waldbau, Univ. Freiburg  
138 Friederike Lang, Bodenkunde, Univ. Freiburg  
140 Annette Hafner, Ruhr-Universität Bochum  
142 Ulrich Schraml, FVA Baden-Württemberg  
144 Jürgen Bauhus, Waldbau, Univ. Freiburg  
147 Julian Frey, FELIS, Univ. Freiburg  
150 Daten- und Kartendienst der LUBW  
151 Ulrich Schraml, FVA Baden-Württemberg  
154 Tobias Modrow, Waldbau, Univ. Freiburg  
155 Kyle Kovach, Geobotanik, Univ. Freiburg  
158 Siegfried Fink, Forstbotanik, Univ. Freiburg

## Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

## ISBN 978-3-00-070408-6

Die Vervielfältigung und Verbreitung originären Text- und Bildmaterials des WBW ist, auch auszugsweise, mit Quellenangabe für nicht-kommerzielle Zwecke gestattet. Text- und Bildmaterial aus Quellen Dritter unterliegt den urheberrechtlichen Bedingungen der jeweiligen Quellen.

Zur sprachlichen Gleichbehandlung: Als Mittel der sprachlichen Darstellung aller sozialen Geschlechter und Geschlechtsidentitäten wird in diesem Gutachten bei Bezeichnungen, die auf Personen bezogen sind, auf Verlaufsform, Doppelnennungen oder bei Aufzählungen auf die abwechselnde Nennung der Geschlechter zurückgegriffen.

## **Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik beim BMEL**

### **Prof. Dr. Jürgen Bauhus (Vorsitzender);**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Institut für Forstwissenschaften

### **Prof. Dr. Ute Seeling (stellvertretende Vorsitzende);**

Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL

### **Prof. Dr. Matthias Dieter;**

Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie, Hamburg

### **Prof. Dr. Nina Farwig;**

Philipps-Universität Marburg, Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Biologie

### **Prof. Dr. Ing. Annette Hafner;**

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

### **Prof. Dr. Ralf Kätzel;**

Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Fachbereich Waldökologie und Monitoring

### **Prof. Dr. Birgit Kleinschmit;**

Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung

### **Prof. Dr. Friederike Lang;**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Institut für Forstwissenschaften

### **Dr. Marcus Lindner;**

European Forest Institute, Bonn, und Universität Ostfinland, Fakultät für Naturwissenschaften und Forstwirtschaft

### **Prof. Dr. Bernhard Möhring;**

Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Institut für Forstökonomie

### **Prof. Dr. Jörg Müller;**

Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Biozentrum, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie

### **Prof. Dr. Manfred Niekisch;**

Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Ökologie, Evolution und Diversität

### **Prof. Dr. Klaus Richter;**

Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzwissenschaft

### **Prof. Dr. Ulrich Schraml;**

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

## **Geschäftsführung des WBW**

BMEL, Referat 513, 513@bmel.bund.de

## **Wissenschaftliche Mitarbeit**

### **Dr. Regina Rhodius; Dr. Rüdiger Unseld**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen,  
Institut für Forstwissenschaften

## **Danksagung**

Der WBW dankt den Vertreterinnen und Vertretern aus Behörden, Wissenschaft und Gesellschaft, die mit ihren Fachkenntnissen und konstruktiven Anmerkungen die Erstellung des Gutachtens unterstützt haben:

### **Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft:**

Dirk Alfter, Juliane Beez, Jan Focke, Dr. Sebastian Glasenapp, Josef Kröger, Dr. Stefanie von Scheliha

### **Albert-Ludwigs-Universität Freiburg:**

Prof. Dr. Siegfried Fink, Dr. Markus Herbener, Prof. Dr. Scherer-Lorenzen, PD Dr. Dirk Schindler,  
Dr. Andy Selter

### **European Forest Institute:**

Alexander Held, Lindon Pronto

### **Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg:**

Dr. Stephanie Bethmann

### **Thünen-Institut:**

Prof. Dr. Peter Elsasser, Dr. Kristin Franz, Dr. Mirko Liesebach

### **University of Wisconsin-Madison:**

emeritus Prof. Kenneth F. Raffa

### **USDA Forest Service:**

Andrew Liebhold

Die Mitglieder des WBW übernehmen die volle Verantwortung für das vorliegende Gutachten.

# Zusammenfassung

Der Klimawandel verändert unsere Wälder auf vielfältige Weise. Dabei werden negative Auswirkungen auf die Wälder, ihre Ökosystemleistungen und die Waldwirtschaft höchstwahrscheinlich überwiegen. Neben dem Anstieg der Temperatur und Änderung der Niederschlagsverteilung sind es vor allem die Zunahme von Extremereignissen und ihren Interaktionen, die zu erheblichen Störungen der Wälder führen werden. Die weit verbreiteten, massiven Waldschäden infolge der trockenen und heißen Jahre 2018 – 2019 haben bereits angedeutet, mit welcher Geschwindigkeit diese Veränderungen auch in Deutschland voranschreiten können. Daher erscheint es dringend geboten, umfassende Konzepte zu entwickeln, um die Wälder und ihre Bewirtschaftung so anzupassen, dass negative Folgen möglichst weit abgepuffert werden können, um auch in Zukunft die vielfältigen Ökosystemleistungen der Wälder für unsere Gesellschaft bereitzustellen. Wie beim Klimaschutz ist auch bei der Anpassung an den Klimawandel die Politik gefordert, Rahmenbedingungen zu schaffen, die im Sinne der Generationengerechtigkeit zukünftigen Generationen die gleichen Optionen für die Nutzung der Wälder bieten wie der heutigen Generation. Ebenso wie der Klimaschutz stellt die Anpassung der Wälder eine dringliche und massive Herausforderung für alle Beteiligten dar, die Paradigmenwechsel auf vielen Ebenen erfordert. Vor diesem Hintergrund hat der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik (WBW) das vorliegende Gutachten erstellt.

Die Erstellung des Gutachtens erfolgte auf der Basis geprüfter wissenschaftlicher Erkenntnisse und richtet mit seinen Handlungsempfehlungen den Fokus auf die wesentlichen Einflussmöglichkeiten zur Aufrechterhaltung und Verbesserung der Bereitstellung der Ökosystemleistungen des Waldes im Klimawandel. In dem Gutachten werden zunächst die derzeit bekannten Auswirkungen der Klimaänderungen auf Wälder und ihre Ökosystemleistungen skizziert und die Anpassungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Bereichen der Bewirtschaftung und Nutzung der Wälder aufgezeigt. Diese Bereiche umfassen die Waldwirtschaft, Holzverarbeitung, Bioökonomie, Naturschutz, Bodenschutz, Gewässerschutz, Gesundheitsvorsorge, Erholung und Tourismus. Die daraus gezogenen Schlussfolgerungen münden in konkrete Handlungsempfehlungen für die Anpassung in insgesamt 13 Handlungsfeldern. Ziel der Empfehlungen ist es, Bedingungen dafür zu schaffen, dass Ökosystemleistungen der Wälder auch zukünftig entsprechend des gesellschaftlichen Bedarfs bereitgestellt werden können.

Zu diesem Zweck sollten Wälder, wo nötig, durch waldbauliche Unterstützung hin zu diversen, resilienten und anpassungsfähigen Wäldern entwickelt werden. Dies umfasst die aktive und passive Förderung der Vielfalt standortangepasster Baumarten und ihrer funktionalen und genetischen Diversität ebenso, wie den Schutz der Waldböden und ihrer Funktionen, die mit angepassten Maßnahmen erhalten und verbessert werden müssen. Hierzu werden konkrete Maßnahmen zur Anpassung von Waldbeständen, insbesondere in den Phasen der Verjüngung und Bestandespflege empfohlen, die mit verbesserten regionalen und überregionalen Daten zur Standorts- und Baumarteneignung unterstützt werden müssen.

Biodiversität im Wald ist eine wichtige Grundlage für die Anpassungsfähigkeit und Vielfalt aller Prozesse, welche die Ökosystemfunktionen und -leistungen erst ermöglichen. Sie muss bei der Anpassung der Wälder an den Klimawandel daher von der genetischen bis zur Ökosystemebene umfassend berücksichtigt werden. Hier stellt sich insbesondere die Frage, welche Arten, Populationen und Lebensräume am stärksten gefährdet sind und in welchem Umfang sich diese mit dem Klimawandel verschieben werden bzw. verschieben können. Der Schutz der Biodiversität sollte daher auf ganzer Fläche, also auch außerhalb von Schutzgebieten berücksichtigt werden. Ein besonderes Augenmerk sollte daher auf die zukünftige Struktur und Baumartenzusammensetzung der Wälder gelegt werden. Natürliche Biotope, Habitate und Ökosysteme sind im Rahmen der Anpassung auf Landschaftsebene so weit wie möglich zu erhalten und zu fördern. Durch die Förderung von Biotopverbänden sollen die Bewegungsmöglichkeiten von Arten gewährleistet werden; bei wenig mobilen Arten sollte die Möglichkeit gezielter Ansiedlungen in zukünftigen Verbreitungsgebieten genutzt werden. Ein repräsentatives Biodiversitätsmonitoring und die Berücksichtigung des Klimawandels bei der Entwicklung von Schutzziele sollen einen möglichst effizienten Naturschutz im Wald ermöglichen.

Der Erhalt der Wälder und ihrer vielfältigen Ökosystemleistungen hängt ganz erheblich von ihrem Schutz gegenüber biotischen und abiotischen Risiken ab, die in Zukunft zunehmen werden. Daher bedarf es eines deutlich verbesserten Risikomanagements in enger Verknüpfung mit einem zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Monitoring, dem eine Schlüsselstellung im Anpassungsprozess der Wälder zugeschrieben wird. Zur Abwehr großflächiger Schäden in Wäldern bedarf es in Ergänzung des betrieblichen

Waldschutzes eines überregionalen Waldschutzmanagements, einer verbesserten Kontrolle von Schadorganismen und Waldkrankheiten, einer objektiven Schadensbewertung und Risikovorsorge aber auch der Forcierung restaurativer Maßnahmen zum Waldumbau.

Zunehmende Extremwetterereignisse, eine Reduktion der Produktivität der Wälder und Veränderungen im Baumartenspektrum werden bei gleichzeitig steigenden Kosten für Anpassung, Risikomanagement, Monitoring und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen die Erträge aus der traditionellen Waldbewirtschaftung mit Fokus auf Rohholzproduktion langfristig reduzieren. Diese Entwicklungen verschärfen die ohnehin schon bestehenden strukturellen Probleme vor allem im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald. Um vor diesem Hintergrund Anpassungsmaßnahmen effektiv umsetzen zu können, bedarf es der Schaffung stabiler institutioneller Strukturen, die die angemessene Betreuung des Nichtstaaatswaldes einschließt, und einer effizienteren Gestaltung der forstlichen Förderung. Dies sollte flankiert werden durch den Aufbau von Informationsplattformen, der Schaffung von Anreizen zur aktiven Waldbewirtschaftung und Bildung von größeren Bewirtschaftungseinheiten.

Mit der zu erwartenden Verringerung der Produktivität der Wälder und Verschiebung der Baumartenzusammensetzungen hin zu mehr Laubholz wird langfristig die Versorgung mit dem Rohstoff Holz insbesondere aus heimischen Wäldern eine große Herausforderung. Dies erfordert auch eine Anpassung der nachgelagerten Holzwirtschaft und Holzverwendung. Dafür müssen Wertschöpfungsketten etabliert werden, die die wirtschaftliche und klimawirksame Nutzung von Holzrohstoffen aus heimischer Waldbewirtschaftung optimieren und die Transformation zu einer Bioökonomie als Grundlage neuer umweltfreundlicher Produkte stützen. Anreizsysteme und technische Verfahren sollten entwickelt werden, die zur Erhöhung der stofflichen und Verringerung einer direkten energetischen Nutzung führen, insbesondere bei bisher schwer zu vermarktenden Holzsortimenten (Kalamitätsholz, Nadelstarkholz, Laubholz). Eine zentrale Rolle spielt dabei der Holzbau als unmittelbar verfügbare Brückentechnologie<sup>1</sup> im Klimaschutz und zur Schonung endlicher Rohstoffe. Um die in Zukunft

im Inland zurückgehende Bereitstellung von Nadelholzsortimenten teilweise ersetzen zu können, müssen Voraussetzungen für die Generierung neuer Holzstoffquellen aus Gebraucht- und Altholz geschaffen realisiert werden. Um langfristig eine ausreichende Versorgung mit Nadelholz sicherzustellen, sollte ein risikoarmer Anbau klimaangepasster Nadelbaumarten in Mischbeständen erfolgen. Temporäre Marktverwerfungen nach großflächigen Störungen sollte mit reaktionsfähigen Märkten und entsprechenden Logistik- und Lagerstrukturen entgegengewirkt werden.

Wälder sind eine wichtige Grundlage sogenannter kultureller Ökosystemleistungen. Die Attraktivität von Wäldern für die Freizeit- und Erholungsnutzung im Zuge der erwarteten klimatischen Veränderungen wird wahrscheinlich weiterhin zunehmen. Gleichzeitig kommt es zu Veränderungen gewohnter Wald- und Landschaftsbilder und zu veränderten Voraussetzungen für verschiedenste Freizeitaktivitäten im Wald. Die Bereitstellung von Erholungsleistungen und Reduktion möglicher Konflikte zwischen Erholungsnutzung und der Holzernte steigert den Aufwand der Waldbewirtschaftung, gerade in den urbanen Räumen. Eine Honorierung der Ökosystemleistungen für Erholung, Sport und Tourismus ist daher neben kommunikativen und konfliktmindernden Maßnahmen ein wichtiger Baustein zur zukünftigen Gestaltung von klimaresilienten Erholungswäldern.

Die notwendigen Maßnahmen zur Aufrechterhaltung und Verbesserung der Bereitstellung von Ökosystemleistungen der Wälder sind sehr umfangreich und kostenintensiv. Nach Einschätzung des WBW übersteigen die Aufwendungen für eine rasche und effektive Anpassung der Wälder an den Klimawandel deutlich ein Niveau, das man vom nicht-staatlichen Waldbesitz im Rahmen der Gemeinwohlverpflichtung des Eigentums erwarten kann. Gegenwärtig beruhen die Einnahmen der Forstbetriebe fast ausschließlich auf Erlösen aus dem Holzverkauf, wohingegen die Bereitstellung der bisher nicht honorierten, gesellschaftlich wichtigen Ökosystemleistungen für Klimaschutz, Wasserschutz, Naturschutz, Erholung etc. als Lasten wahrgenommen werden. Daher ist eine zentrale Empfehlung dieses Gutachtens, dass die öffentliche Hand Vergütungssysteme für die Ökosystemleistungen des Waldes schafft, die den Forstbetrieben langfristig planbare Einnahmen aus der Bereitstellung

---

1 Mit Brückentechnologie ist hier gemeint, dass der Holzbau aktuell die einzige anwendungsreife Technologie (*negative emission technology*) ist, die es ermöglicht, Kohlenstoff in nennenswertem Umfang außerhalb von Ökosystemen zu speichern. „Brücke“ bedeutet hierbei, dass diese Technologie deshalb ab sofort eingesetzt werden sollte, um diese Kohlenstoffspeicherung umzusetzen bis in der Zukunft möglicherweise andere Technologien wie beispielsweise *carbon capture and storage* oder *carbon capture and usage* Technologien in eine anwendungsreife (TRL 9) kommen. Dies bedeutet nicht, dass danach der Holzbau keine Bedeutung mehr hat, aber der Begriff unterstreicht die Dringlichkeit, diese Möglichkeit der Kohlenstoffspeicherung sofort einzusetzen.

von Ökosystemleistungen ermöglichen. Eine grundsätzliche und effiziente Möglichkeit hierfür sehen wir darin, nicht einzelne Ökosystemleistungen separat zu honorieren, sondern die Grundlage für die zukünftige Erbringung aller Ökosystemleistungen, die Anpassungsfähigkeit<sup>2</sup> der Wälder an den Klimawandel, als Leistung zu betrachten. Empfohlen wird daher eine am Zustand der Wälder orientierte Zahlung, die als eine notwendige Ergänzung der derzeit gängigen maßnahmenorientierten Förderung gesehen wird.

Der rasch voranschreitende Klimawandel beschleunigt die Erosion der Relevanz des bisherigen Erfahrungswissens und führt zu einer Zunahme von Unsicherheiten. Um die Anpassung von Wäldern, Wald- und Holzwirtschaft und anderen relevanten Sektoren an den Klimawandel effektiv und effizient zu gestalten, wird eine Stärkung forstwissenschaftlicher, wald- und holzproduktbezogener Forschung empfohlen. Dabei geht es insbesondere um eine strategische Ausrichtung und die Entwicklung neuer Forschungsansätze im Sinne einer Nachhaltigkeitsforschung, die sich an Dringlichkeit, Lösungsorientierung und Implementierung ausrichtet. Dafür werden entsprechend langfristig angelegte Forschungsinfrastrukturen und Kapazitäten ebenso benötigt wie eine bessere Vernetzung und Kooperation zwischen bestehenden Forschungseinrichtungen.

Zur Beförderung des Transformationsprozesses spricht der WBW darüber hinaus Empfehlungen zu Änderungen in der Aus- und Weiterbildung, den Kommunikationsstrategien, sowie zur Beseitigung von Anpassungshemmnissen und -konflikten in den verschiedenen Bereichen aus.

---

2 Anpassungsfähigkeit ist die Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und andere Lebewesen, sich auf potentielle Schädigungen einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren (IPCC (2013/14)).



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Präambel</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Klimawandel und Waldökosysteme – eine Einführung</b> .....	<b>7</b>
1.1 <b>Entwicklungen und Projektionen der Klimaänderungen</b> .....	<b>7</b>
1.1.1 Klimamodelle, Klimaszenarien, Klimaprojektion .....	8
1.1.2 Durchschnittliche Lufttemperatur und Niederschlagsmengen .....	9
1.1.3 Extremwetterereignisse .....	12
1.1.3.1 Dürre / Trockenheit .....	12
1.1.3.2 Heiße Tage und Hitzewellen .....	13
1.1.3.3 Spätfrost .....	15
1.1.3.4 Starkregen .....	16
1.1.3.5 Sturm und Sturmböen .....	17
1.2 <b>Auswirkungen der Klimaänderungen auf Wälder und ihre Ökosystemleistungen</b> .....	<b>19</b>
1.2.1. Struktur, Zusammensetzung, unterstützende Ökosystemleistungen und Biodiversität... ..	19
1.2.1.1 Resistenz, Resilienz, und Anpassungsfähigkeit als Komponenten der Ökosystemstabilität .....	19
1.2.1.2 Standorteignung und Grenzen der Klimaanpassung einzelner Baumarten, Verschiebungen der Artenareale und Veränderungen der Baumartenzusammensetzungen .....	21
1.2.1.3 Veränderungen der Störungsregime und Naturgefahren .....	24
1.2.1.4 Auswirkungen auf die Biodiversität und ihre Funktionen .....	28
1.2.1.5 Veränderungen des Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalts.....	31
1.2.1.6. Veränderungen im Wasserkreislauf.....	32
1.2.1.7 Veränderungen der Biomasseproduktivität von Wäldern.....	34
1.2.2 Bereitstellung von Ökosystemleistungen.....	36
1.2.2.1 Holz/Rohstoffe .....	36
1.2.2.2 Tierische und pflanzliche Nichtholzwaldprodukte .....	39
1.2.2.3 Klimaschutz .....	41
1.2.2.4 Bodenschutz .....	43
1.2.2.5 Trinkwasser, Gewässer- und Hochwasserschutz .....	44
1.2.2.6 Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus .....	44
<b>2 Relevante Grundlagen und Politiken für die Anpassung von Wäldern und Forstbetrieben</b> .....	<b>48</b>
2.1 <b>Grundlagen der nachhaltigen Waldbewirtschaftung</b> .....	<b>48</b>
2.1.1 Eigentums- und Betriebsstruktur, Forstorganisation .....	48
2.1.2 Wirtschaftsergebnisse .....	50
2.1.3 Eingetretene Schäden der Jahre 2018/19/20 und ihre wirtschaftlichen Folgen .....	52
2.2 <b>Übergeordnete Strategien und Politiken</b> .....	<b>53</b>
2.2.1 Strategien und Politiken der EU .....	53
2.2.2 Strategien und Politiken des Bundes .....	55
2.3 <b>Rechtliche Instrumente</b> .....	<b>58</b>
2.3.1 Waldgesetzliche Regelungen .....	58

2.3.2	Naturschutzrecht, Pflanzenschutzrecht, Bodenschutz, Wasserrecht .....	60
2.3.3	Wirtschafts- und Kartellrecht .....	61
2.3.4	Brennstoffemissionshandelsgesetz.....	62
2.3.5	Forstschäden-Ausgleichsgesetz .....	62
2.3.6	Bundes-Klimaschutzgesetz .....	63
<b>2.4</b>	<b>Finanzielle Instrumente .....</b>	<b>64</b>
2.4.1	Finanzielle Förderung der Waldbewirtschaftung.....	64
2.4.2	Steuerliche Regelungen .....	65
2.4.3	Honorierung von Ökosystemleistungen von Wäldern .....	66
<b>2.5</b>	<b>Kommunikation, Beratung, Ausbildung und Forschung .....</b>	<b>67</b>
<b>3</b>	<b>Anpassung an den Klimawandel in unterschiedlichen Bereichen .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1</b>	<b>Nachhaltige Waldwirtschaft und Forstbetriebe .....</b>	<b>71</b>
3.1.1	Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen.....	73
3.1.1.1	Waldbauliches Risikomanagement .....	73
3.1.1.2	Waldschutz .....	84
3.1.1.3	Betriebliches Risikomanagement .....	87
3.1.1.4	Bodenschutz und Wasserhaushalt .....	91
3.1.1.5	Anpassung von Holzernte und Waldarbeit .....	92
3.1.2	Wechselbeziehungen und Anpassungshemmnisse .....	93
<b>3.2</b>	<b>Holzverarbeitende Industrie und Bioökonomie .....</b>	<b>95</b>
3.2.1	Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen.....	95
3.2.1.1	Einfuhr von Holz und Produkten auf Basis Holz .....	96
3.2.1.2	Erschließung neuer Rohstoffquellen.....	96
3.2.1.3	Verarbeitungstechnologien und Produkte sowie Holz als dezentral verfügbaren Rohstoff der Bioökonomie und Bio-Energie .....	98
3.2.1.4	Stoffliche Nutzung im Gebäudebereich .....	99
3.2.1.5	Erforderliche Instrumente .....	100
3.2.1.6	Veränderung von Wertschöpfungsketten.....	100
3.2.2	Wechselbeziehungen und Anpassungshemmnisse .....	102
<b>3.3</b>	<b>Naturschutzmanagement .....</b>	<b>105</b>
3.3.1	Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen .....	105
3.3.1.1	Arten- und Biotopschutz.....	105
3.3.1.2	Design und Management von Schutzgebieten .....	107
3.3.1.3	Biotopverbund .....	108
3.3.1.4	Assisted Migration, Umsiedlung und Neuansiedlung von Arten.....	108
3.3.1.5	Management invasiver Arten .....	109
3.3.2	Wechselbeziehung und Anpassungshemmnisse .....	111
<b>3.4</b>	<b>Erholung, Sport, Gesundheitsvorsorge und Tourismus .....</b>	<b>113</b>
3.4.1	Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen.....	113
3.4.1.1	Erwartete Veränderungen im waldbezogenen Freizeitverhalten .....	113
3.4.1.2	Nachfrage nach Gesundheitsförderung im Wald.....	115
3.4.1.3	Gesundheitsgefährdungen .....	116
3.4.2	Wechselbeziehung und Anpassungshemmnisse .....	118
<b>3.5</b>	<b>Monitoring .....</b>	<b>120</b>

<b>4 Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>125</b>
4.0 Einführung und Zusammenfassung der wichtigsten Empfehlungen .....	125
4.1 Resiliente und anpassungsfähige Wälder erhalten und entwickeln .....	128
4.2 Den Waldschutz gegenüber biotischen Risiken verbessern .....	132
4.3 Risikomanagement zum Umgang mit Extremereignissen weiterentwickeln .....	134
4.4 Biodiversität sichern und erhöhen.....	137
4.5 Boden und Wasser schützen .....	138
4.6 Nachhaltige Holzverwendung fördern .....	140
4.7 Wälder als Orte für Erholung, Sport und Tourismus entwickeln .....	142
4.8 Ökosystemleistungen honorieren .....	144
4.9 Monitoring optimieren.....	147
4.10 Institutionelle Strukturen anpassen .....	150
4.11 Anpassungsstrategien kommunizieren, Konfliktmanagement gestalten .....	151
4.12 Ausbildung und lebenslanges Lernen neu aufstellen .....	154
4.13 Forschungskapazitäten stärken, besser vernetzen und neu ausrichten .....	155
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>159</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>184</b>

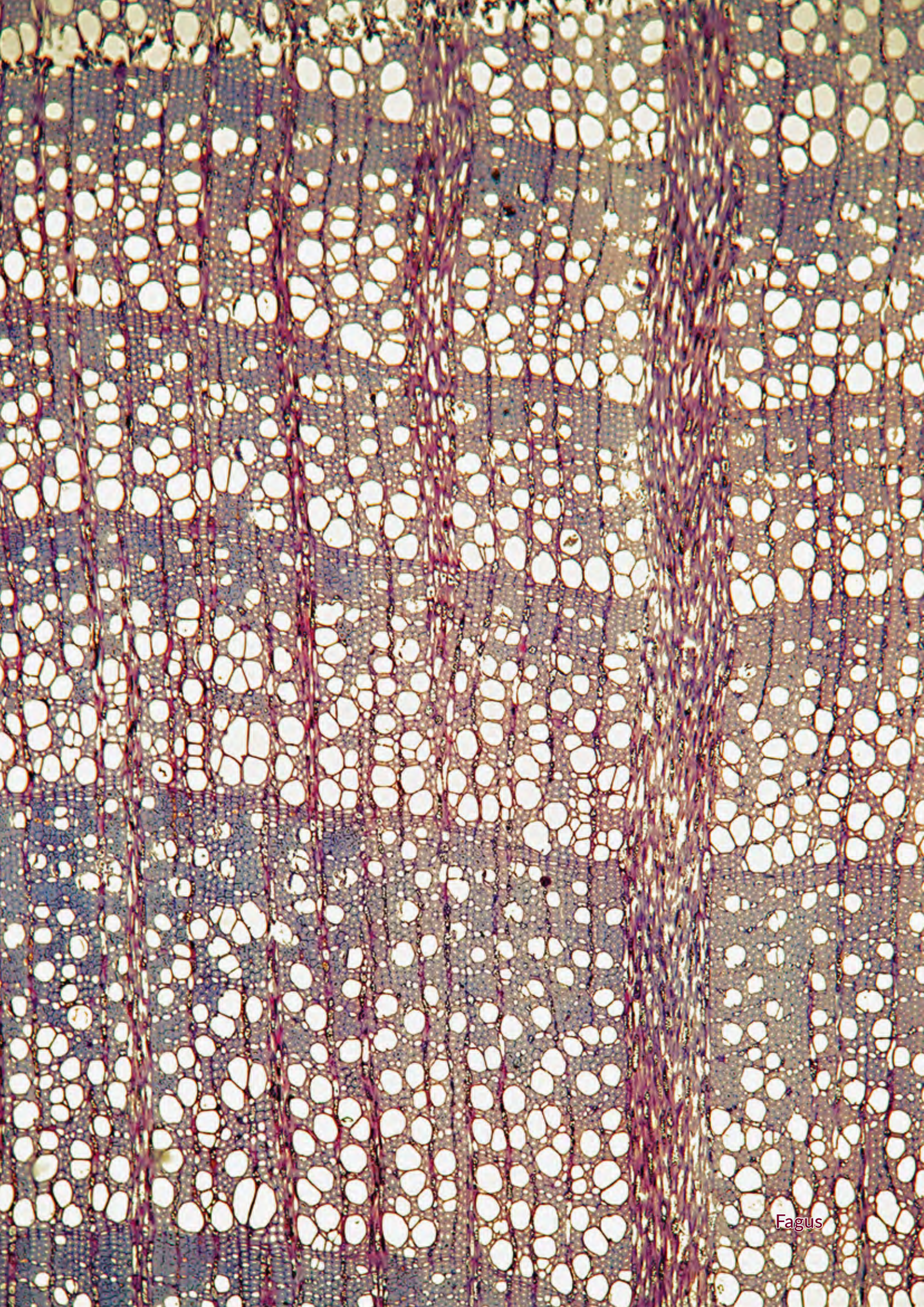
# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Zugrundeliegendes Konzept der Ökosystemleistungen (ÖSL) .....	2
Abb. 2:	Optionen für die Anpassung unterschiedlich intensiv bewirtschafteter Wälder an den Klimawandel .....	4
Abb. 3:	Abweichung der mittleren jährlichen Lufttemperatur vom vieljährigen Mittel 1901 – 2000 global .....	7
Abb. 4:	Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) in der Atmosphäre .....	7
Abb. 5:	Weltweite jährliche Häufigkeit extremer Temperaturen, Dürre und Stürme während der Jahrzehnte von 1950 bis 2015 .....	8
Abb. 6:	Jährliche Abweichung der Lufttemperatur vom Mittelwert in Deutschland und zu erwartende Zunahme bis 2100 .....	9
Abb. 7:	Jährliche Niederschlagsmengen 1881 – 2019 in Deutschland .....	10
Abb. 8:	Veränderung der Niederschlagsmenge 1881 – 2019 in Deutschland .....	10
Abb. 9:	Dauer der phänologischen Vegetationsperiode in Tagen zwischen 1961 – 2017 .....	10
Abb. 10:	Entwicklung der Jahresmitteltemperatur der Luft im Vergleich zum Normalwert ...	11
Abb. 11:	Klimatische Wasserbilanz heute und zukünftig .....	11
Abb. 12:	Temperaturbezogene Kenntage 1951 – 2019 Sommertage und Heiße Tage .....	13
Abb. 13:	Änderung der Anzahl Heiße Tage zum Normalwert in den Bundesländern .....	14
Abb. 14:	Gemessene und modellierte Sommertemperaturen April-September in der Schweiz .....	15
Abb. 15:	Blattentfaltung der Rotbuche 1992 – 2020 in Deutschland .....	16
Abb. 16:	Mittlere Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlägen > 20 mm in Deutschland .....	17
Abb. 17:	Ensemble-Ergebnisse zur relativen Änderung der mittleren Böe .....	19
Abb. 18:	Resistenz, Erholung und Resilienz am Beispiel der Wachstumsreaktion zweier unterschiedlicher Baumarten .....	20
Abb. 19:	Anpassung an Trockenheit als multiskaliger Prozess .....	22
Abb. 20:	Interaktionen zwischen Störungsfaktoren .....	25
Abb. 21:	Außenhandelsaldo Deutschlands mit Nadelholz, Laubholz und Brennholz im Zeitablauf .....	38
Abb. 22:	Entwicklung des Holzvorrates zwischen 2002 und 2012 nach Durchmesserklassen .....	39
Abb. 23:	Wirtschaftsergebnisse des Testbetriebsnetzes Forst .....	50
Abb. 24:	Durchschnittliche Erlöse und jährlicher Einschlag der Hauptbaumartengruppen nach Testbetriebsnetz Forst .....	51
Abb. 25:	Differenzen zwischen der modellierten THG-Emissionsbilanz und der eingeforderten Treibhausgasenke .....	63
Abb. 26:	Kombinationsmöglichkeiten der Finanzierung der forstlichen Förderung .....	64
Abb. 27:	Risiko als Produkt von Gefährdungen, Vulnerabilität und Auswirkungen .....	75

<b>Abb. 28:</b>	Ergebnisse von Risikoanalysen in einer Risiko-Matrix .....	88
<b>Abb. 29:</b>	Der 4-phasige Krisen-Management-Zyklus .....	89
<b>Abb. 30:</b>	Anpassungsfähige Wälder als Schnittmenge von gesellschaftlichen Werten und Ökosystemleistungen .....	125

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b>	Anzahl heißer Tage pro Jahr in den Bundesländern und Gesamtdeutschland im langfristigen Mittel .....	14
<b>Tab. 2:</b>	Synopse der forstbetrieblichen Schadenskomponenten für die Schadensjahre 2018 – 2020.....	53
<b>Tab. 3:</b>	Bewertung von Klimawirkung, Anpassungsdauer und Handlungserfordernis im Bereich Wald.....	55
<b>Tab. 4:</b>	Erträge nach Produktbereichen und Eigentumsarten 2018 .....	73
<b>Tab. 5:</b>	Zusammenhang zwischen Störungsfaktoren und Faktoren der Vulnerabilität in Phasen der Bestandesentwicklung .....	76



Fagus

# Präambel

## Anpassung von Wäldern und deren Bewirtschaftung an den Klimawandel zur Sicherung ihrer Ökosystemleistungen

Der Klimawandel wird unsere Wälder in vielfältiger Weise verändern, wobei negative Auswirkungen auf die Funktionen und Ökosystemleistungen von Wäldern und ihre Bewirtschaftung sehr wahrscheinlich überwiegen werden. Daher sollte es zum Schutz unserer Lebensgrundlagen oberste Priorität sein, die Auswirkungen auf Wälder und Ökosystemleistungen so gering wie möglich zu halten und uns auf unvermeidbare Änderungen vorzubereiten. Anstrengungen für den Klimaschutz müssen folglich in den meisten Bereichen erhöht werden, um massive Schäden zu vermeiden. Dieses Ziel liegt auch den internationalen Vereinbarungen für den Klimaschutz zugrunde. Doch selbst wenn es gelingen sollte, diese Ziele national wie international zu erreichen, ist es weitgehend unbestritten, dass Veränderungen unserer Ökosysteme eintreten werden (IPCC 2019, IPBES 2019). Bereits jetzt beobachten wir deutliche Verschiebungen in der Baumartenzusammensetzung und die Zunahme oder Änderung von biotischen und abiotischen Störungen in Form von Borkenkäfermassenvermehrungen, neuen Waldkrankheiten, Dürren, Waldbränden und Stürmen. Auf großer Fläche werden Waldökosysteme und ihre Pflanzen- und Tiergemeinschaften in diesem Jahrhundert neuartige klimatische Bedingungen erfahren und auch neuen Krankheiten und Schadorganismen ausgesetzt sein, an die sie sich in ihrer langen Entwicklungsgeschichte bisher nicht anpassen konnten (Fei et al. 2019, Hoffmann et al. 2019). Daher werden in unseren Wäldern Arten verschwinden und neue hinzukommen. Mit den Modifikationen der Artengemeinschaften und der klimatischen Bedingungen wird in vielen Fällen auch eine Veränderung der Ökosystemfunktionen eintreten. Die Frage ist daher nicht ob, sondern wie gravierend und rasch sich unsere Wälder und damit die Bereitstellung von Ökosystemleistungen verändern werden.

Die Wälder sind Hort der Biodiversität und die deutsche Gesellschaft ist in vielfältiger Weise auf die diversen Ökosystemleistungen von Wäldern angewiesen. Unsere Wälder dienen als Räume für Erholung, Freizeit und Inspiration, als Rohstofflieferanten, Wasserspeicher, Kohlenstoffspeicher und -senken, Klimaregulatoren und vieles andere mehr. Viele dieser

Ökosystemleistungen könnten ohne aktive Waldbewirtschaftung nicht in der gewünschten Menge und Zusammensetzung bereitgestellt werden.

Mit dem Klimawandel ändern sich nicht nur die Umweltbedingungen und Wälder, sondern auch die gesellschaftlichen Erwartungen an die Wälder. Diese Änderungen verlaufen möglicherweise auch so schnell, dass die institutionelle Kapazität der Forstbetriebe und -verwaltungen sich anzupassen, damit nicht Schritt halten kann. Zusätzlich steigt die gesellschaftliche Erwartungshaltung an die Wälder kontinuierlich an und es bestehen deutlich unterschiedliche Vorstellungen darüber, wie die Wälder an den Klimawandel angepasst werden sollen.

Dieses Gutachten beschäftigt sich mit den wichtigsten Ökosystemleistungen und analysiert, wie sich der Klimawandel auf ihre Bereitstellung und Nutzung auswirkt. Gleichzeitig werden in diesem Gutachten Vorschläge entwickelt, wie trotz dieser Veränderungen auch in Zukunft die Biodiversität geschützt wird, Ökosystemleistungen der Wälder auf hohem Niveau bereitgestellt werden können, und die von ihnen abhängigen Sektoren wie Wald- und Holzwirtschaft, Wasserwirtschaft oder Tourismus ihre wichtigen Funktionen für die Gesellschaft erbringen können.

### Zentrale Konzepte

#### Ökosystemleistungen im Kontext von Klimaanpassung

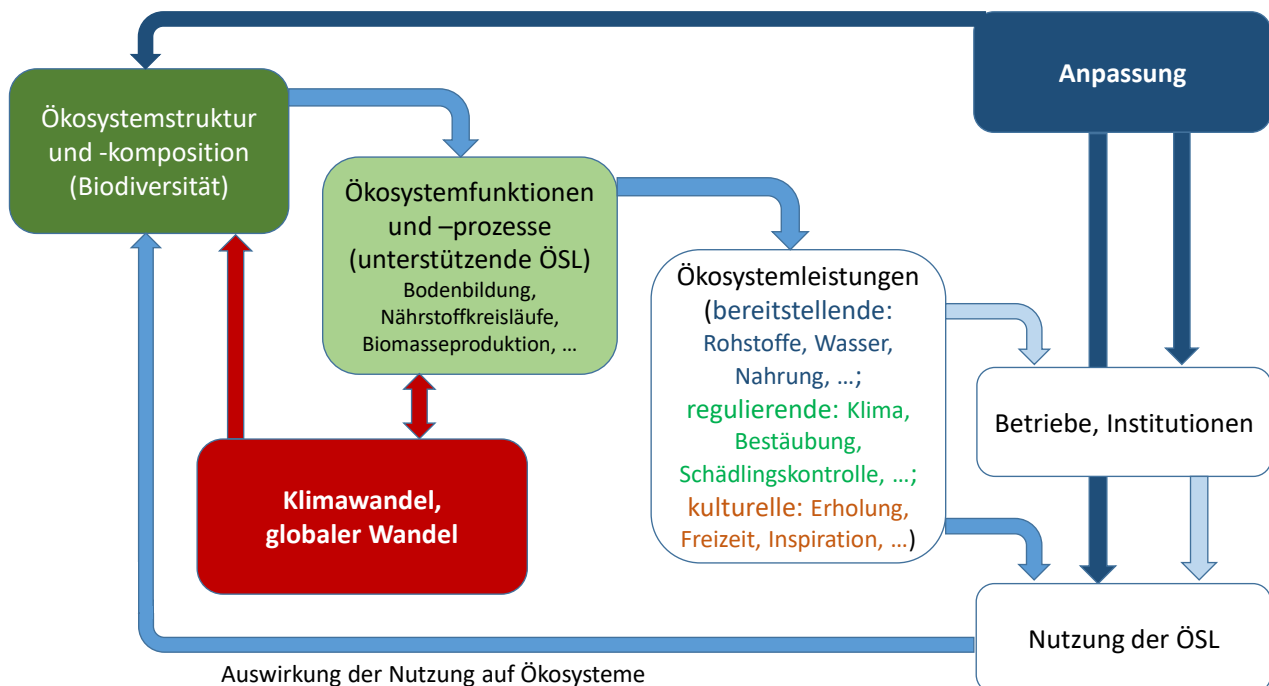
Multifunktionalität ist ein Leitbild, dem sich weite Teile der Forstwirtschaft in Deutschland verpflichtet fühlen und dem viele Forstbetriebe auch tatsächlich folgen. Darin steht die Erfüllung aller wichtigen Funktionen des Waldes für die Gesellschaft im Fokus. In den Forstwissenschaften wurde in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts ein Konzept der Waldfunktionen als eine systematische Erfassung aller Leistungen des Waldes für menschliche Bedürfnisse entwickelt (Dieterich 1953). Neben der Rohstoff-Funktion wurden dabei auch Flächenfunktionen ausgewiesen (Beeinflussung des Klimas, Einwirkung auf den Wasserhaushalt, Schutz gegen Erosionen, u. a.), die

die sogenannten Wohlfahrtswirkungen des Waldes begründen (Dieterich 1953).

International hat sich etwa zur Zeit des Millenniumswechsels ein vergleichbares Konzept entwickelt, das der Ökosystemleistungen (ÖSL). In der Einteilung des Millennium Ecosystem Assessments (2005) werden unterstützende (supporting), bereitstellende (provisioning), regulierende (regulating) und kulturelle (cultural) Ökosystemleistungen unterschieden.

Beiden Konzepten, dem der Multifunktionalität sowie dem der Ökosystemleistungen ist der umfassende Blick auf den Wald zu eigen, bei dem sowohl der Wald mit dem, was er zur Verfügung stellt als auch der Mensch mit seinen Bedürfnissen Berücksichtigung findet. Auch wenn eine stringente Überführung der Konzepte ineinander und deren Abgrenzung zueinander noch aussteht (Benz et al. 2020), erscheinen sie so ähnlich, dass sie nebeneinander bestehen können und wahlweise auf das eine oder andere Konzept Bezug genommen werden kann. Multifunktionalität, so wie sie in diesem Gutachten verstanden wird, bedeutet daher die gleichzeitige Bereitstellung vieler Ökosystemleistungen. Dabei bezieht sich die Gleichzeitigkeit nicht auf den einzelnen Waldbestand, sondern größere räumliche Einheiten wie Betriebe oder Landschaften.

Im vorliegenden Gutachten bauen wir auf dem Konzept der Ökosystemleistungen in der Einteilung des Millennium Ecosystem Assessments (2005) auf. In diesem Konzept umfassen die unterstützenden Ökosystemleistungen zum Beispiel Bodenbildung, Aufrechterhaltung der Nährstoffkreisläufe, Produktion von Biomasse, Zersetzung organischer Substanz, oder den Erhalt der genetischen Vielfalt (Abb. 1). Diese unterstützenden Ökosystemleistungen, die das Funktionieren von Ökosystemen beschreiben, werden häufig auch als Ökosystemfunktionen bezeichnet (Garland et al. 2020). Die unterstützenden Ökosystemleistungen hängen ihrerseits von der Struktur und Komposition von Ökosystemen ab, also in erheblichem Umfang von der Biodiversität (Noss 1990). Sie stellen die Grundlage für die anderen drei Typen von Ökosystemleistungen, die auch als finale Ökosystemleistungen bezeichnet werden. Diese sind Bestandteile der Natur, die direkt genossen, konsumiert oder genutzt werden, um menschliches Wohlergehen zu erzeugen (Boyd und Banzhaf 2007) (Abb. 1).



**Abb. 1:** Das dem Gutachten zugrundeliegende Konzept der Ökosystemleistungen (ÖSL), ihre Wechselwirkungen mit dem Klimawandel und Stellgrößen für die Anpassung, um eine nachhaltige Bereitstellung der Ökosystemleistungen zu gewährleisten. Das Konzept der ÖSL baut auf dem Millennium Ecosystem Assessment (2005) auf; die unterstützenden ÖSL (supporting ecosystem services) werden hier als Ökosystemfunktionen betrachtet. Teile der Abbildung adaptiert von Kienast et al. (2009).



Bereitstellende (bzw. versorgende) Ökosystemleistungen umfassen zum Beispiel Rohstoffe wie Holz, Nahrung in Form von jagdbaren Tieren oder Trinkwasser. Regulierende Ökosystemleistungen beinhalten Bestäubungsleistungen, Klimaschutz, Boden- und Erosionsschutz, Schutz vor Steinschlag und Lawinen, Wasserrückhaltung oder die Kontrolle der Population von Schadorganismen. Erholung, ästhetischer Genuss, spirituelle Erfahrungen und Ähnliches fallen unter die kulturellen Ökosystemleistungen. Die Nutzung dieser Ökosystemleistungen kann wiederum Auswirkungen auf die Struktur und Zusammensetzung der Ökosysteme haben (Abb. 1).

Viele Ökosystemleistungen können von Menschen nicht direkt genutzt werden, sondern nur mittelbar. Häufig stehen zwischen den Ökosystemen und den Menschen, die ihre Leistungen in Anspruch nehmen wollen, Betriebe und Institutionen, die den Menschen diese Leistungen zugänglich machen. Dazu gehören zum Beispiel Betriebe der Wald- und Holzwirtschaft, die Holzprodukte für Endverbraucher bereitstellen, Wasserwerke, die das Trinkwasser aus Wäldern in die Haushalte leiten, oder Tourismusunternehmen. Auch diese Betriebe und Institutionen können in ihrer Funktionsfähigkeit und Profitabilität erheblich vom Klimawandel betroffen sein (z. B. Hall et al. 2011, Hanewinkel et al. 2013).

Der Klimawandel sowie die damit zum Teil verbundene Einschleppung von neuen Arten, darunter auch Krankheiten und Schadorganismen, führt zu direkten Veränderungen der Struktur und Zusammensetzung der Wälder einerseits und andererseits durch die Veränderungen der abiotischen Umwelt auch zu direkten Einflüssen auf Ökosystemprozesse.

Die Anpassung an den Klimawandel, sowie sie in diesem Gutachten verstanden wird, zielt darauf ab, den Bedarf aller Ökosystemleistungen des Waldes nachhaltig zu erfüllen. Ansatzpunkte für die Anpassung liegen daher auf den folgenden Ebenen (Abb. 1):

1.) des Ökosystems, wo durch Veränderungen der Struktur und Zusammensetzung die Aufrechterhaltung der Ökosystemfunktionen angestrebt wird. Je

nach adaptiver Kapazität des Ökosystems kann diese Anpassung entweder auf passive Weise erfolgen, d. h. basierend auf der natürlichen Anpassungsfähigkeit des Ökosystems, oder es ist eine aktive Steuerung erforderlich, z. B. durch Anbau klimatoleranter Baumarten und Erhöhung der Baumartendiversität.

2.) der Betriebe und Institutionen, die Ökosystemleistungen bereitstellen. Auch diese Einrichtungen, und die Wertschöpfungsketten, in die sie eingebunden sind, werden potenziell vom Klimawandel betroffen. Sie bedürfen resilienter Strukturen und Prozesse, um sich sowohl den langfristigen Veränderungen anpassen zu können als auch um in der Folge von Extremereignissen wie Dürren oder Feuer noch funktionsfähig zu sein und somit ihre Ziele noch erreichen zu können.

3.) der Nutzung der Ökosystemleistungen, die eine Rückkopplung auf Ökosysteme besitzt. Diese Nutzung kann die Resilienz und Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme sowohl reduzieren als auch verstärken. Zum Beispiel kann die Grundwasserentnahme unter Wäldern deren Widerstands- und Erholungsfähigkeit gegenüber klimatischen Trockenstress erheblich reduzieren.

Zwischen den verschiedensten Anpassungsoptionen auf diesen Ebenen können sowohl Synergien als auch Konflikte bestehen. Auch diese werden in diesem Gutachten behandelt.

Die Ziele der Anpassung liegen daher einerseits in der Aufrechterhaltung oder Erhöhung der Resistenz<sup>1</sup>, Resilienz<sup>2</sup> und Anpassungsfähigkeit der Wald-ökosysteme (siehe Kap. 1.2.1.1) und andererseits auch der gesellschaftlichen Systeme inklusive Betriebe und Institutionen, die von den Ökosystemleistungen der Wälder direkt oder indirekt abhängig sind. In beiden Fällen ist das Ziel der Anpassung die Reduktion der Vulnerabilität<sup>3</sup> und der Risiken<sup>4</sup>. Um dieses Ziel zu erreichen, werden sowohl kurz- wie auch langfristige Anpassungsmaßnahmen notwendig sein. Ein weiteres Ziel der Anpassungsbemühungen ist, mögliche

1 Resistenz beinhaltet die Widerstandsfähigkeit von Organismen, Ökosystemen gegenüber Stress und Störungen.

2 Nach IPCC (2013/14): Resilienz ist die Fähigkeit von sozialen, Wirtschafts- oder Umweltsystemen, ein gefährliches Ereignis bzw. einen solchen Trend oder eine Störung zu bewältigen und dabei derart zu reagieren bzw. sich zu reorganisieren, dass ihre Grundfunktion, Identität und Struktur erhalten bleiben und sie sich gleichzeitig die Fähigkeit zur Anpassung, zum Lernen und zur Transformation bewahren.

3 Nach IPCC (2013/14): Vulnerabilität ist die Neigung oder Prädisposition eines Systems, nachteilig betroffen zu sein. Vulnerabilität umfasst eine Vielzahl von Konzepten und Elementen, wie unter anderem Empfindlichkeit oder Anfälligkeit gegenüber Schädigung und die mangelnde Fähigkeit zur Bewältigung und Anpassung.

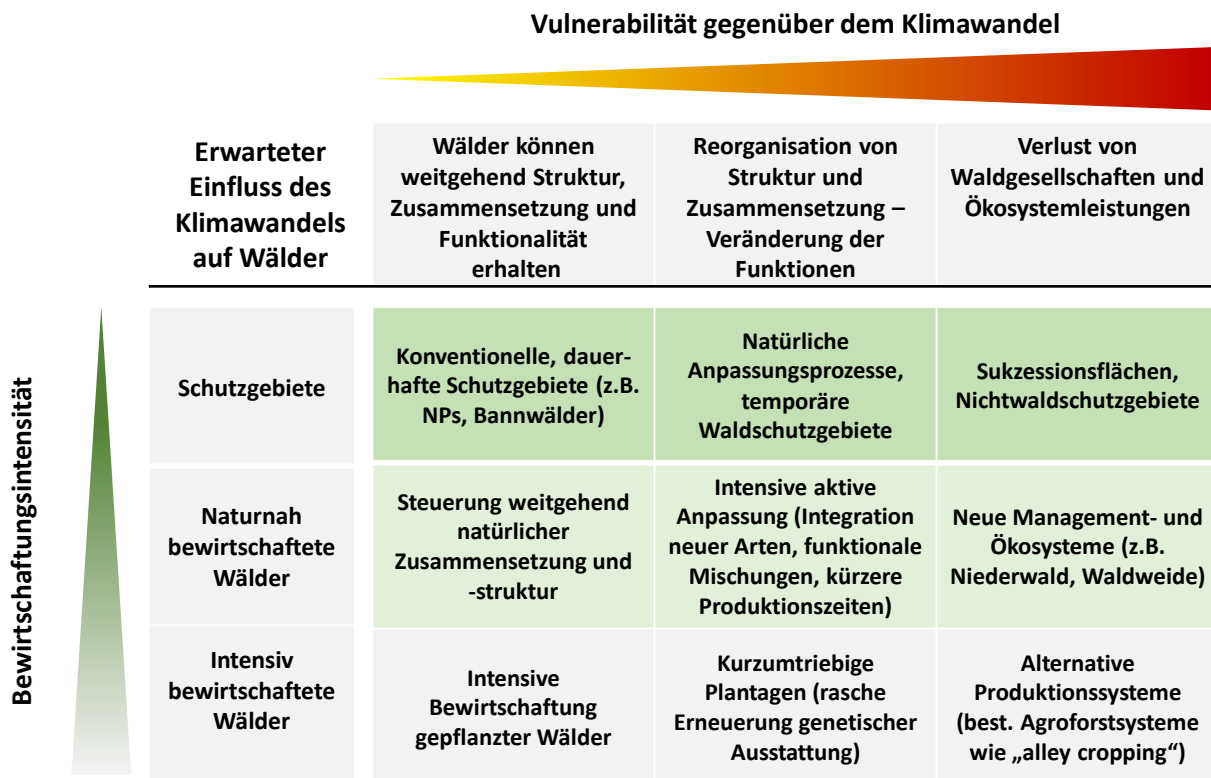
4 Fellmann (2012): In Zusammenhang mit spezifischen Eintrittswahrscheinlichkeiten für biophysikalische oder sozioökonomische Änderungen werden aus Vulnerabilitäten Klimarisiken.

Zielkonflikte zwischen verschiedenen Anpassungsoptionen bzw. den Anpassungsstrategien verschiedener Sektoren zu reduzieren und Synergien zu stärken.

**Anpassungsoptionen in Abhängigkeit von Waldbewirtschaftung und Vulnerabilität**

Vor dem Hintergrund zukünftiger Unsicherheiten und weil „keine einzige Lösung alle zu erwartenden Herausforderungen adressieren kann“ (Millar et al. 2007),

befürworten die meisten Ansätze zur Anpassung von Waldökosystemen an den Klimawandel die Entwicklung und Umsetzung eines Portfolios von Optionen (Millar et al. 2007, Aplet und Mckinley 2017, Dudney et al. 2018). Dabei orientieren sich die verschiedenen Anpassungsoptionen nicht nur an der Vulnerabilität der Ökosysteme, sondern auch an den übergeordneten Bewirtschaftungszielen, die unter anderem durch eine unterschiedliche Bewirtschaftungsintensität ausgedrückt werden (Abb. 2).



**Abb. 2:** Optionen für die Anpassung unterschiedlich intensiv bewirtschafteter Wälder an den Klimawandel. Die genannten Optionen für die jeweilige Kombination aus Vulnerabilität und Bewirtschaftungsintensität sind als Beispiele zu verstehen. Abbildung adaptiert von Royer-Tardif et al. (2021).

Die Bewirtschaftungsintensität reicht dabei von sehr gering, z. B. Waldschutzgebiete, insbesondere Prozessschutzgebiete wie Kernzonen von Nationalparks und Naturwaldreservate, bis hin zu intensiv, wie z. B. gleichaltrige Reinbestände nicht-heimischer Arten mit häufigen Pflegeeingriffen und kurzem Umtrieb (Kahl und Bauhus 2014). Im internationalen Kontext würden diese intensiv bewirtschafteten Wälder als Plantagen oder andere gepflanzte Wälder bezeichnet (FAO 2020). In Deutschland könnten produktive Wälder mit intensiver Pflege und geringen Zieldurchmessern und daher kurzen Produktionszeiten (< ca. 60 J.), z. B. Fichten-, Douglasien-, oder Edellaubholzbestände, in diese Kategorie fallen. Während Schutzgebiete und intensiv bewirtschaftete Flächen

in Deutschland nur einen geringen Teil der gesamten Waldfläche einnehmen, wird der Großteil der Fläche in Form von naturnahen Wäldern bewirtschaftet.

Ein Dreiklang dieser verschiedenen Bewirtschaftungsintensitäten wird auch als TRIADE bezeichnet und wurde von Waldökologen als ein System der nachhaltigen Bewirtschaftung von Waldlandschaften vorgeschlagen (Seymour und Hunter 1992, Côté et al. 2010). In Landschaften, die nach diesem Konzept bewirtschaftet werden, machen Schutzgebiete und intensive Waldnutzungssysteme in der Regel insgesamt nicht mehr als 20% der Landschaft aus, der Rest wird von naturnah bewirtschafteten Flächen eingenommen. Letztere dienen unter anderem als Matrix für die Schutzgebiete, um Populationen von Waldarten

miteinander zu vernetzen, und als Puffer für die intensiv bewirtschafteten Bestände. Dieses Konzept wurde bisher hauptsächlich in Nordamerika implementiert.

Im Kontext dieses Gutachtens dient diese Matrix in Abbildung 2 der Strukturierung von Anpassungsoptionen und -notwendigkeiten für unterschiedliche Wälder in der Landschaft. Eine Differenzierung der verschiedenen Anpassungsoptionen entlang dieser Matrix erscheint uns geboten, denn eine Bewertung der Maßnahmen oder möglicher damit verbundener Anpassungskonflikte erscheint ohne diesen Kontext nur schwerlich möglich. Anpassungsoptionen für naturnah bewirtschaftete Wälder werden in Kapitel 3.1 diskutiert und solche für intensiv bewirtschaftete Wälder, die sich von den zugrundeliegenden Prinzipien nicht unterscheiden, werden dabei mit behandelt. Optionen für Waldschutzgebiete werden in Kapitel 3.3 diskutiert. Die dritte Spalte dieser Matrix stellt für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsintensitäten Situationen dar, in denen die bisherigen Bewirtschaftungsziele und -formen langfristig nicht aufrechterhalten werden können. Dies führt zu einer Art von Systemwechsel. Die in diesem Gutachten diskutierten Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen zielen weitgehend auf die linke und mittlere Spalte dieser Matrix ab, wo durch Änderungen von Ökosystemstruktur und -zusammensetzung die Bereitstellung der Ökosystemleistungen von Wäldern noch möglich erscheint.

### **Aufbau und Adressaten des Gutachtens**

Um belastbare Vorschläge für die Anpassung unserer Wälder und der von ihnen abhängigen Sektoren zu entwickeln, wird im ersten Kapitel zunächst dargestellt, welche Klimaänderungen projiziert werden und wie sie sich auf Waldökosysteme auswirken könnten. In einem zweiten Schritt beleuchten wir die Evidenz für Veränderungen in den Ökosystemfunktionen und -leistungen. Da sich Empfehlungen an die Politik an den bestehenden Gegebenheiten orientieren sollten, werden im zweiten Kapitel die für die Anpassung der Wälder und der damit verbundenen Sektoren relevanten Politiken und Strategien dargestellt. Kernstück des Gutachtens ist das dritte Kapitel, indem wir die Anpassungsnotwendigkeit und Anpassungsoptionen an den Klimawandel in unterschiedlichen Bereichen wie Forstbetrieben, Holzverarbeitender Industrie und Bioökonomie, Naturschutzmanagement, Gesundheitsvorsorge, Erholungsmanagement und Tourismus diskutieren. Dabei beleuchten wir die Auswirkungen der Klimaänderungen auf diese Sektoren, die Anpassungsziele und Handlungsoptionen, mögliche Konflikte, Anpassungshemmnisse und Wechselbeziehungen mit anderen Sektoren. Darauf aufbauend formulieren wir

im vierten und letzten Kapitel des Gutachtens zentrale, sektorübergreifende Politikempfehlungen.

Die Adressaten dieses Gutachtens sind politische Akteure auf Ebene des Bundes sowie der Länder und Kommunen. Gleichzeitig sollen mit diesem Gutachten auch Impulse auf europäischer Ebene gesetzt werden, wo wichtige Aspekte der Anpassung an den Klimawandel in einer neuen Waldstrategie berücksichtigt werden könnten. Die wissenschaftlichen Grundlagen sowie die Vorschläge für Anpassungsoptionen sollten auch den Entscheidungsträgern in Forstbetrieben sowie den anderen direkt und indirekt vom Wald abhängigen Sektoren als Orientierungshilfe dienen.



Quercus

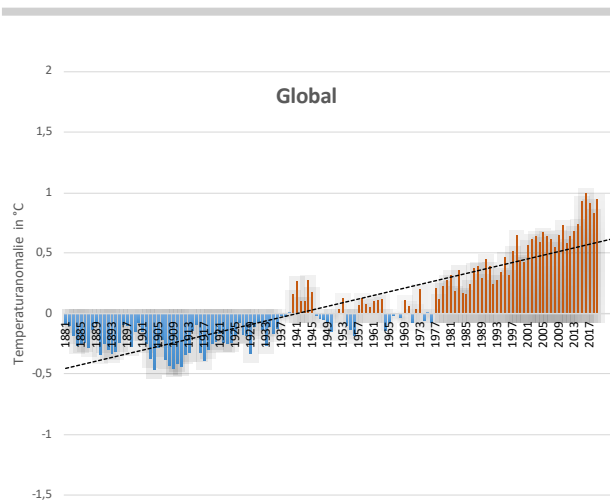
# 1

## Klimawandel und Waldökosysteme – eine Einführung

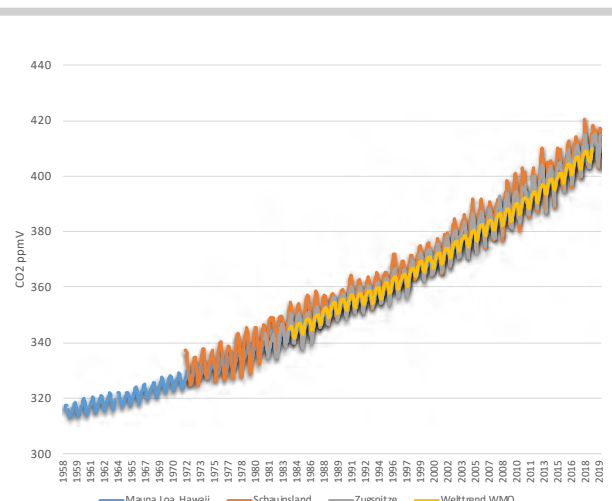
### 1.1 Entwicklungen und Projektionen der Klimaänderungen

Die Forstwirtschaft ist ähnlich wie die Landwirtschaft ausgesprochen stark von Klima, Witterung und Wetter abhängig. Klima ist die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort beschreibt. Um das Klima einer Region darzustellen, werden entsprechend den Vorgaben der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) Zeiträume von mindestens 30 Jahren analysiert (DWD 2020a, b). Nach Berichten des IPCC (2019) und einer Metaanalyse von Cook et al. (2013) bestehen kaum noch Zweifel, dass sich das Klima durch die Einflussnahme des Menschen ändert.

Der Klimawandel zeigt sich vor allem durch das steigende Mittel der globalen Lufttemperatur. Die Atmosphäre der Erde hat sich zwischen 1881 und 2019 um 0,74 °C erwärmt (linearer Trend; Abb. 3 links). Dabei ist in den letzten Jahren eine deutlich beschleunigte Entwicklung zu beobachten. Als Hauptursache der globalen Erwärmung gilt der Treibhauseffekt. Der größte Beitrag zum Treibhauseffekt entfällt auf Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) mit etwa 66%, gefolgt von Methan mit 16%, Lachgas mit 6%, und den halogenierten Treibhausgasen mit insgesamt 11% (Butler und Montzka 2020). In den letzten fünfzig Jahren stieg allein die CO<sub>2</sub>-Konzentration von 330 ppm auf über 410 ppm an (Abb. 4, rechts).



**Abb. 3:** Abweichung der mittleren jährlichen Lufttemperatur vom vieljährigen Mittel 1901 – 2000 global (Land und Ozeane; Daten [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov))



**Abb. 4:** Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre ([www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)): 1 ppmV = 10<sup>-6</sup> = 1 Teil pro Million = 0,0001%

Besonders markant ist die Häufung hoher Lufttemperaturwerte in den vergangenen Jahren. Insgesamt traten global gesehen 18 der 19 wärmsten Jahre überhaupt seit Beginn der Messaufzeichnungen im Jahr 1880 nach dem Jahr 2000 auf. In den Jahren 2014, 2015, 2016 gab es nacheinander neue Lufttemperaturrekorde. 2016 war das weltweit wärmste Jahr seit Beginn der Messungen, das zweitwärmste

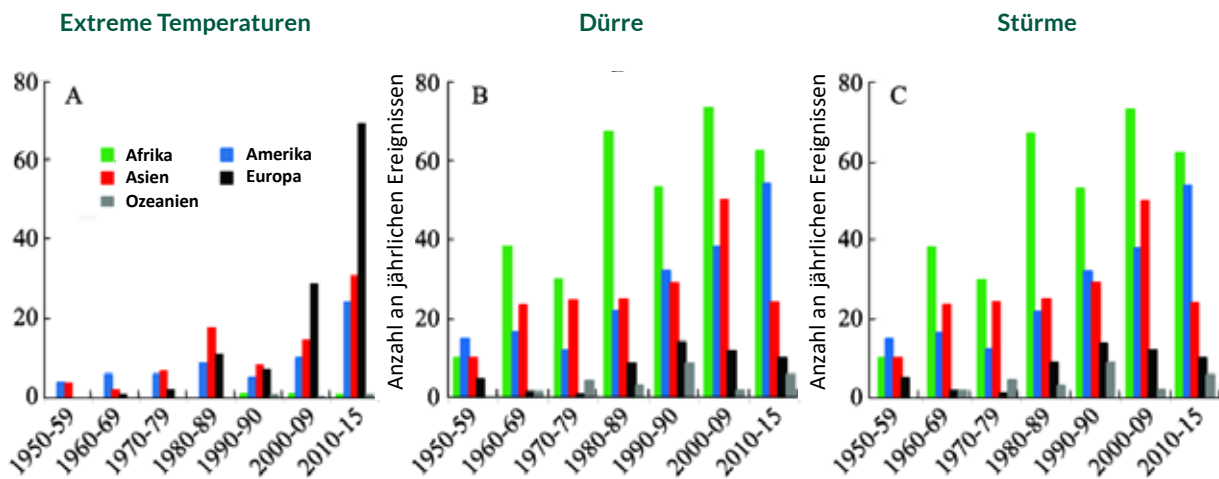
war 2019. Global wird die Erde seit 1880 im Durchschnitt in jeder Dekade um 0,07 °C wärmer, wobei regional beträchtliche Unterschiede bestehen können. Die Niederschläge über Europa haben im letzten Jahrhundert um bis zu 8 % zugenommen, wobei zwischen Nord- und Südeuropa getrennt werden muss. In Nordeuropa nahmen die Niederschläge um 10 – 40 % mit Schwerpunkt im Winterhalbjahr zu. In Südeuropa,

inklusive Mittelmeerraum, haben die Niederschläge dagegen um bis zu 20% abgenommen (DWD 2020b).

Veränderungen im zirkumpolaren Jet Stream verursachen immer häufiger stationäre Wetterlagen mit längeren Verweilzeiten von Tief- und Hochdruckgebieten, die dann für Dauerregen oder Dürre sorgen können (Mann et al. 2018). Als ein Grund der Stationarität werden die vergleichsweise schnellere Erwärmung der Arktis und die damit verbundene Reduzierung des Lufttemperaturunterschiedes zwischen den Tropen und der Arktis angeführt.

Besonders markant sind Extremwetterereignisse wie Trockenheit, Starkregen, Fröste und Stürme, die in der Forstwirtschaft große Schäden anrichten können.

Die Schadintensitäten können dabei kleinräumig stark variieren und sind oftmals nicht konkret vorhersehbar (Goemann 2015). Auf globaler Ebene wird mit hoher Sicherheit erwartet, dass die Häufigkeit und Intensität von Extremwetterlagen zunimmt (IPCC 2019). Für den Zeitraum von 1950 bis 2015 lassen Daten der Emergency Events Database EM-DAT einen solchen Anstieg von Extremwetterereignissen bereits vermuten (Abb. 5). Auch für Europa wird als sicher erachtet, dass das Ausmaß von Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, Starkregen und Dürren zunehmen wird (IPCC 2014, EEA 2017). Es wird dabei immer wieder betont, dass sowohl weltweit als auch europaweit deutlich regionale Unterschiede bestehen werden.



**Abb. 5:** Weltweite jährliche Häufigkeit extremer Temperaturen, Dürre und Stürme während der Jahrzehnte von 1950 bis 2015. Die Schätzungen basieren auf der Emergency Events Database EM-DAT. verändert aus: Sohoulade Djebou und Singh (2016)

### 1.1.1 Klimamodelle, Klimaszenarien, Klimaprojektion

Mit globalen Klimamodellen wird die zukünftige Entwicklung des Klimas auf Basis von Emissionsszenarien der Treibhausgase berechnet. Während bei den „Special Report Emissions Scenarios“ (SRES, IPCC 2000) noch der Schwerpunkt auf die Emissionen selber gelegt wurde, lag bei den „Representative Concentration Pathways“ (RCP)-Szenarien der Fokus auf den atmosphärischen Konzentrationen und dem damit verbundenen Strahlungsantrieb der emittierten Treibhausgase (IPCC 2014). Das Szenario RCP2.6 basiert dabei auf Annahmen, die der 2-Grad-Obergrenze des Pariser Klimaabkommens entsprechen. Das Szenario RCP8.5 ist das „Weiter-wie-bisher“-Szenario. Es würde bei einem weiterhin steigenden Verbrauch fossiler Energieträger eintreten.

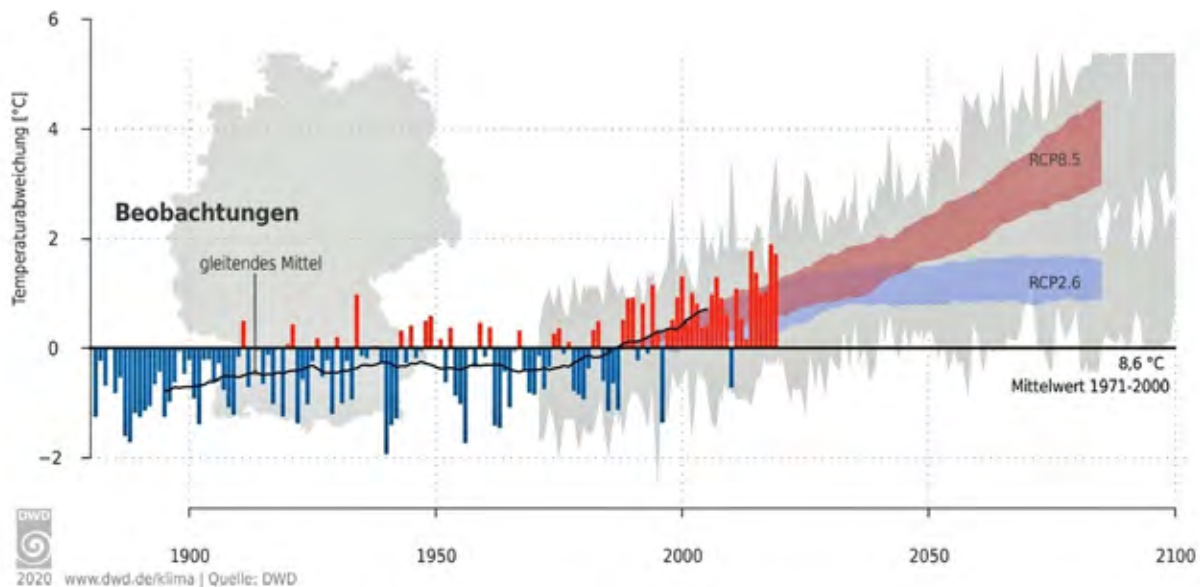
Für den 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates ist die Ergänzung von zwei weiteren Szenario-Typen

für das 21. Jahrhundert vorgesehen (DWD 2021). Zum einen sollen neue Versionen der RCPs verwendet werden, die auf mehrfach genutzten sozioökonomischen Pfaden und daraus abgeleiteten Modellsimulationen basieren und als SSP-Szenarien bezeichnet werden (Shared Socioeconomic Pathways). Weiterhin sollen „Lücken-Szenarien“ berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich um neue, bisher nicht von den RCPs abgedeckte Antriebspfade.

Mit Hilfe der Modelle und Szenarien werden die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf das Klima eingeschätzt. Das mit globalen Klimamodellen für eine künftige Zeitspanne berechnete Klima bezeichnet man auch als Klimaprojektion. Man spricht also nicht von Prognose oder Vorhersage, da das verwendete Emissionsszenario hypothetische Randbedingungen für die Projektion vorgibt und nicht vom gegenwärtigen Zustand des Klimasystems abhängt (Becker et al. 2008). Die daraus ermittelten regionalen Klimaparameter sind in vielen Sektoren, so auch

in der Waldwirtschaft, von besonderem Interesse. Die Auflösung der derzeit verwendeten globalen Klimamodelle liegt bei ca. 100 km x 100 km horizontalem Gitterabstand. Regionale Klimamodelle für Deutschland haben eine deutlich höhere räumliche Auflösung, die zwischen 20 km x 20 km bis 5 km x 5 km beträgt (Warscher et al. 2019). Sie können die Lufttemperaturentwicklung auch für kleine Landschaftsausschnitte ausreichend genau abbilden. Eine besondere

Herausforderung sind Projektionen der Niederschläge. Sie werden mit zunehmender räumlicher Auflösung immer schwieriger. Inzwischen lassen sich aber immerhin die Niederschlagssummen von Monaten mit einer ausreichenden Genauigkeit berechnen. In der nachfolgenden Abb. 5 ist die erwartete Zunahme der Lufttemperatur bis 2100 in den RCP-Szenarien 2.6 und 8.5. und die historische Entwicklung der Lufttemperatur für Deutschland dargestellt.



**Abb. 6:** Jährliche Abweichung der Lufttemperatur vom vieljährigen Mittelwert 1971 – 2000 in Deutschland sowie die zu erwartende Zunahme bis 2100 in den RCP-Szenarien 2.6 und 8.5. Abbildung abgeändert aus [www.dwd.de/klima](http://www.dwd.de/klima)

### 1.1.2 Durchschnittliche Lufttemperatur und Niederschlagsmengen

In Deutschland besteht seit dem Ende des 19. Jahrhunderts ein ungebrochener Erwärmungstrend. Der Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur beträgt seitdem 1,6 °C (DWD 2020b) und liegt mit 0,11 °C pro Dekade über dem weltweiten Durchschnitt von 0,08 °C pro Dekade. In den letzten 20 Jahren hat sich auch der Lufttemperaturanstieg deutlich beschleunigt. Entsprechend nehmen die vorwiegend temperaturgesteuerten Klimagrößen wie die Anzahl an heißen Tagen zu, bzw. die der Eistage ab. Neun der zehn wärmsten Jahre in Deutschland lagen innerhalb der letzten 20 Jahre. Die Temperaturanstiege der Luft zwischen den Jahreszeiten unterscheiden sich bislang nicht deutlich (Kaspar und Friedrich 2020).

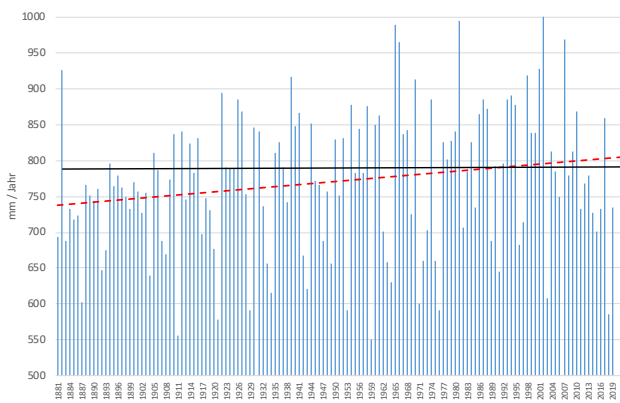
Räumlich befinden sich die stärksten Temperaturzunahmen in der Westdeutschen Bucht, dem Linksrheinischen Mittelgebirge und im Oberrheinischen Tiefland. Im Nordostdeutschen Tiefland ist der Anstieg mit 1,1 °C am geringsten (DWD 2020b). Bei den jährlichen

Niederschlagsmengen gibt es ebenfalls einen langfristigen, allerdings schwachen Trend (Abb. 6). Demnach nahm die Jahresniederschlagsmenge in Deutschland bisher gemäß Trend um 8% zu. Die Änderung der Niederschlagsmengen variieren nicht zur zeitlich stark, sondern auch räumlich zwischen den Bundesländern (Abb. 7).

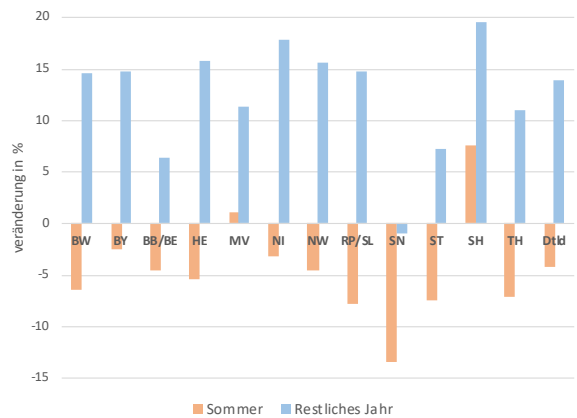
Die Niederschläge haben sich gemessen am langfristigen Trend in fast allen Bundesländern vom Sommer in die anderen Jahreszeiten verschoben. Nur in den küstennahen Ländern Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern nahm die Niederschlagsmenge auch im Sommer etwas zu.

Die Auswirkungen dieser klimatischen Veränderungen können anhand von Umweltindikatoren registriert werden. Ein temperaturabhängiger Indikator ist die Dauer der phänologischen Vegetationsperiode. Sie ist durch die Zeitspanne zwischen dem Blühbeginn des Apfelbaums und der Blattverfärbung der Stieleiche als phänologischer Zeiger für den Eintritt des Spätherbstes definiert (DWD 2007).

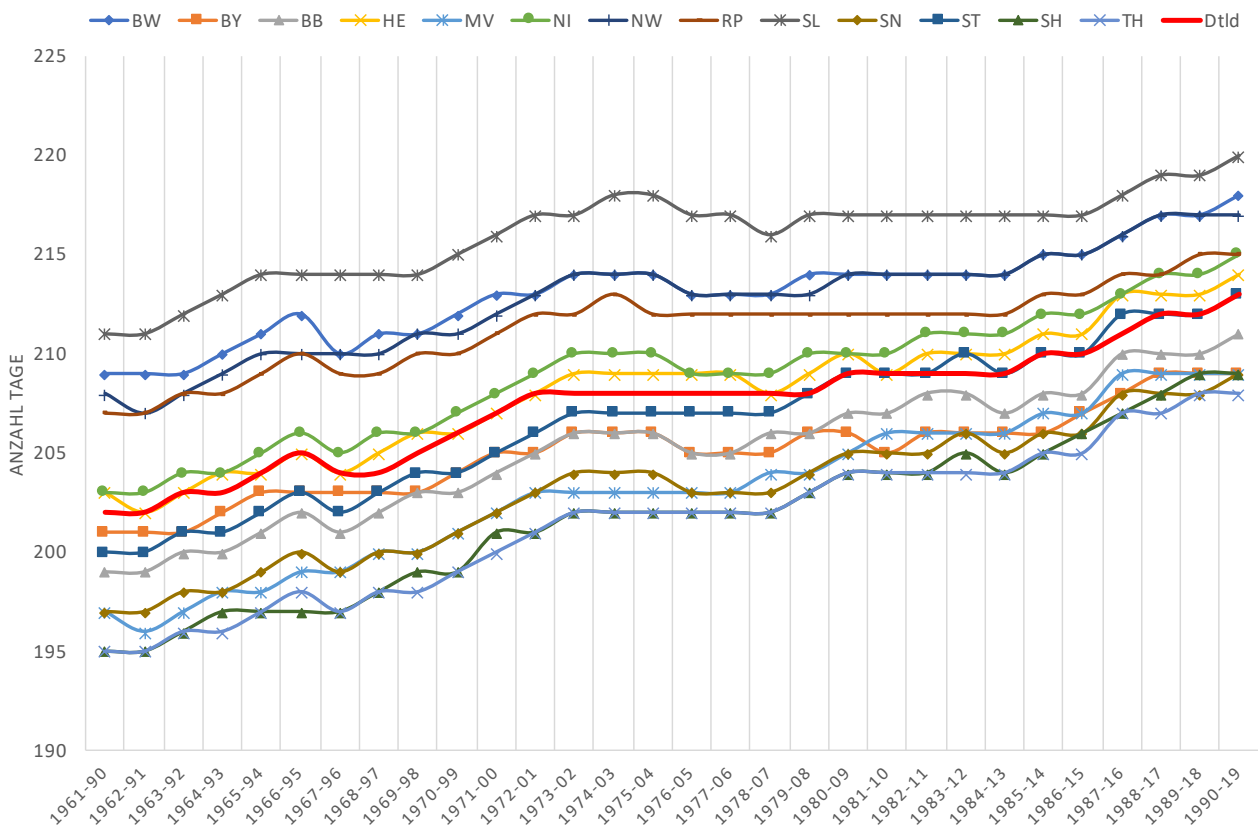
# 1 Klimawandel und Waldökosysteme – eine Einführung



**Abb. 7** Jährliche Niederschlagsmengen 1881 – 2019 in Deutschland, linearer Trend 1881 – 2019 (rote Linie) und vieljähriger Mittelwert (schwarze Linie 1960 – 1990; 789 mm). Daten: <https://www.dwd.de>



**Abb. 8** Veränderung der Niederschlagsmenge in den einzelnen Bundesländern gemäß ihres linearen Niederschlagstrends 1881 – 2019 im Sommer und im Rest des Jahres (Herbst, Winter, Frühling). Daten: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/deutschland/deutschland\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/deutschland/deutschland_node.html)



**Abb. 9:** Dauer der phänologischen Vegetationsperiode in Tagen zwischen 1961 - 2017. Angegeben sind die Mittelwerte für einen 30-Jahres-Zeitraum je Bundesland bzw. für Deutschland. Daten: LIKI Länderinitiative Kernindikatoren Stand 2020

Durch die geglätteten Mittelwerte zeigt sich in Abb. 9 für alle Bundesländer eine deutliche Verlängerung der Dauer der Vegetationsperiode über den Zeitraum von 1961 bis 2017 um 12 – 15 Tage. Sie beträgt statt anfangs 195 – 211 Tage in der Periode 1988 – 2017 nun 207 – 220 Tage. Dies wird als Folge eines verfrühten

Beginns des Frühlings im Zusammenspiel mit einem verspäteten Winterbeginn gewertet. Auf deutschlandweiten Dauerbeobachtungsflächen im Wald (Level-2) trieben die Buchen im Mittel seit 1998 und 2017 um ca. 14 Tage und die Fichten um 12 Tage früher aus (Krüger et al. 2020). Als einen positiven Effekt sehen Krüger

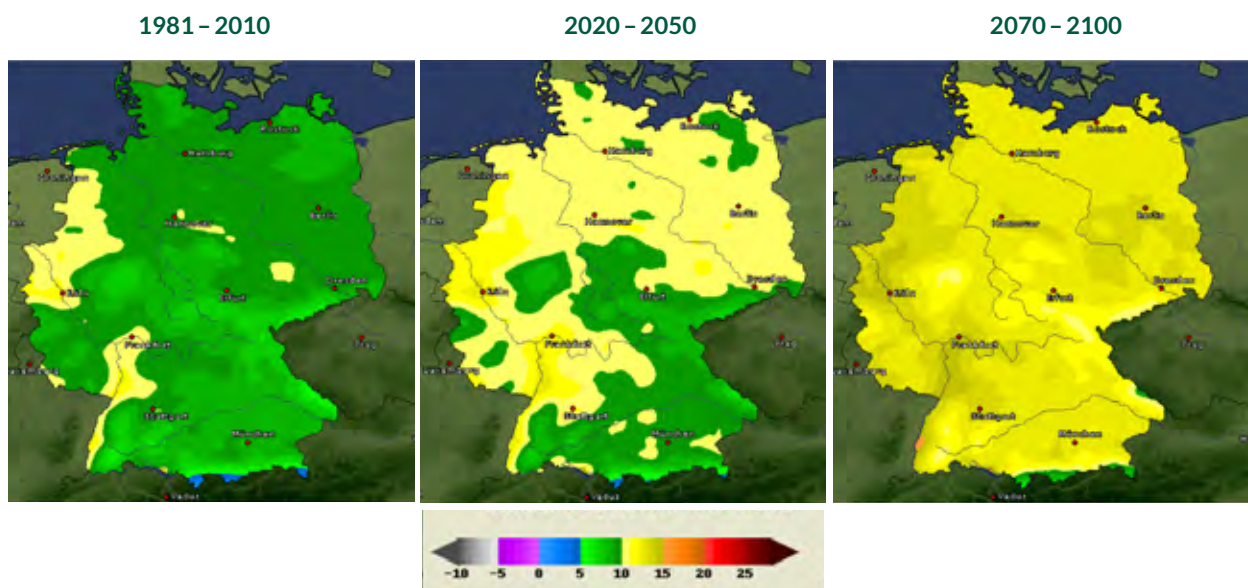


et al. (2020) ein besseres Holzwachstum, solange die Wasserversorgung gesichert ist.

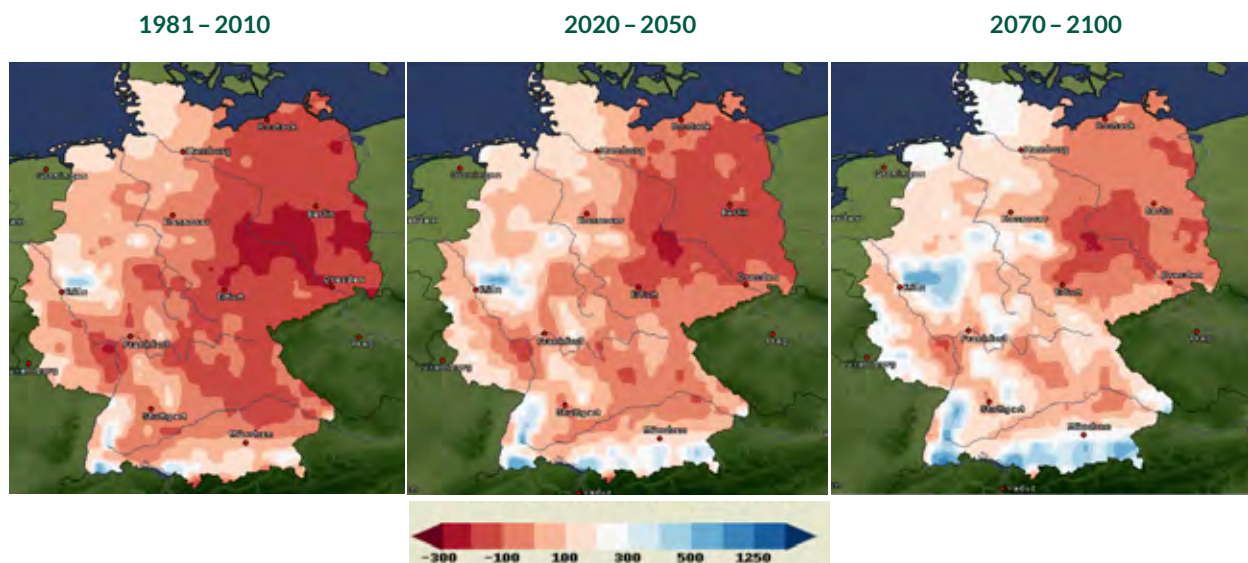
### Projektion in die Zukunft

Auch in Deutschland ist ein weiterer Anstieg der Lufttemperatur mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Mit der Temperaturzunahme der Luft geht eine Zunahme ihrer Temperaturextreme einher (DWD 2020b). Die Temperaturentwicklung für den langfristigen Planungshorizont wird aber stark vom

Emissionsszenario bestimmt. Unter den Bedingungen des „Weiter-wie-bisher“-Szenarios beträgt die Erwärmung in Deutschland durchschnittlich bis zum Jahr 2100 etwa +3,8 °C (DWD 2020b). In der Küstenregion des Nordwest- und Nordostdeutschen Tieflandes ist der Lufttemperaturanstieg am geringsten (+2,0 °C; Abb. 10). Durch die Erwärmung erfolgt der Vegetationsbeginn bis zum Jahr 2050 um 2 bis 4 Tage früher als heute, an den Küsten und im Alpenraum um 4 bis 6 Tage. Bis zum Jahr 2100 sind es überwiegend 10 bis 15 Tage früher.



**Abb. 10:** Entwicklung der Jahresmitteltemperatur der Luft im Vergleich zum Normalwert (Mittel 1981 - 2010) Emissionsszenario RCP8.5/GCM STARS aus <http://www.klimafolgenonline.com/>



**Abb. 11:** Klimatische Wasserbilanz nach Turc/Ivanov heute und zukünftig. Klimaprojektionen mit dem Emissionsszenario RCP8.5/GCM STARS aus <http://www.klimafolgenonline.com/>. Die klimatische Wasserbilanz ist die Differenz aus der Niederschlagssumme und der Summe der potenziellen Verdunstung.

Eine deutliche Änderung der mittleren Jahressumme des Niederschlags ist für Deutschland in naher Zukunft nicht zu erwarten (DWD 2020b). Langfristig wird mit einer moderaten Zunahme gerechnet, wobei es keine regionalen Schwerpunkte in Deutschland gibt. Der mittlere Niederschlag prägt in Deutschland die klimatische Wasserbilanz und damit auch die Dürregefahr (Abb. 11). Aufgrund der vorherrschenden Windrichtung sind die Lee-Gebiete nordöstlich der Mittelgebirge wie die Magdeburger Börde, Lausitz, aber auch die Pfalz bereits heute dürregefährdete Regionen und weisen bei Jahresniederschlägen unter 600 mm in den letzten drei Jahrzehnten im Mittel eine negative Klimatische Wasserbilanz auf.

Ohne Windänderungen verstärkt sich bei einer Lufttemperaturerhöhung die Situation insbesondere in den traditionellen Trockengebieten. Aber auch in anderen tiefer gelegenen Gebieten Deutschlands erhöht die zunehmende Lufttemperatur die Verdunstung, so dass bereits im Zeitraum bis 2050 deutlich mehr Gebiete mit negativen Wasserbilanzen entstehen werden. Bis 2100 wäre lediglich noch am Alpenrand und den Mittelgebirgen mit einer ausgeglichenen oder positiven Wasserbilanz zu rechnen.

### 1.1.3 Extremwetterereignisse

Die bedeutsamsten Extremwetterereignisse für den Wald sind Dürre, Hitze, Spätfrost, Starkregen und Sturm. Extremwetterereignisse treten per Definition sehr selten auf. Sie sind gekennzeichnet durch stark vom üblichen Zustand abweichende Verhältnisse (DWD 2020a), eine exakte Definition gibt es nicht. Gemäß des IPCC gilt ein Wetterereignis dann als „extrem“, wenn es sich nicht zwischen dem 10. und 90. Perzentil der beobachteten Wahrscheinlichkeitsverteilung befindet (IPCC 2007). Andere Definitionen verwenden zusätzlich die Wiederkehrzeit als Voraussetzung und etwas abweichende Perzentilwerte. Extremwetterereignisse sind Bestandteil der natürlichen Klimavariabilität. Allerdings hat der Klimawandel laut IPCC (2012) schon zu Veränderungen der Intensität, Länge, Häufigkeit oder räumlichen Ausdehnung einiger Extreme geführt.

Aufgrund ihrer Seltenheit liegen für Extremwetterereignisse aber nur relativ wenige Daten vor, deshalb sind Aussagen zu zeitlichen Veränderungen häufig mit Unsicherheiten verbunden (IPCC 2012). Insgesamt überlagert die „natürliche klimatische Variabilität“ stark den durch den Klimawandel verursachten Anteil, was eine eindeutige Zuordnung erschwert. Ein neuer Ansatz zur Untersuchung von Extremwetterereignissen sind daher Attributionsstudien mit der Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten (DWD 2019). Mit ihnen soll abgeschätzt werden, inwieweit der vom Menschen verursachte Klimawandel für das Auftreten

individueller Wetter- oder Klimaextreme verantwortlich ist (DWD 2020b).

#### 1.1.3.1 Dürre / Trockenheit

Unter Dürre bzw. Trockenheit versteht man einen Mangel an Wasser, der durch weniger Niederschlag und/oder eine höhere Verdunstung durch erhöhte Lufttemperatur (oder Wind) als üblich verursacht wird (DWD 2020b). Der Deutsche Wetterdienst unterscheidet je nach Dauer der Dürre und ihrer Auswirkungen zwischen meteorologischer Dürre (ein bis zwei Monate trockener als üblich), landwirtschaftlicher Dürre (zwei Monate und länger trocken, Ernteeinbußen), hydrologischer Dürre (ab vier Monate, Grundwasser und Pegel betroffen) und sozioökonomischer Dürre (ab einem Jahr, Wassermangel bremst produzierende Wirtschaft). Sinkt der Bodenwassergehalt von Waldstandorten bei Dürren unter einen kritischen Wert, so ist eine Wasser- und Nährstoffversorgung der Bäume nicht mehr ausreichend gewährleistet.

#### Beobachteter Trend und Projektion in die Zukunft

Bei Betrachtung der Bodenfeuchte zeigen die Zeitreihen der pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicherfüllung und der verschiedenen Trockenstressindizes, dass seit 1990 deutschlandweit die Intensität des Wassermangels zugenommen hat und Jahre mit ausreichender Bodenwasserverfügbarkeit nur noch sporadisch auftreten (Puhlmann et al. 2017). Mit retrospektiven Analysen über zwei Jahrhunderte ermittelten Erfurt et al. (2020) für Südwestdeutschland, dass die Jahre 2003, 2011, 2015 und 2018 zu den extremsten Dürreereignissen in den letzten hundert Jahren gehörten. Bei Betrachtung der letzten 218 Jahre zeigte sich allerdings, dass Dürreereignisse von ähnlicher Intensität auch bereits in früheren Jahren auftraten (z. B. 1842, 1865, 1870, 1893). Büntgen et al. (2021) wiederum schließen aus Isotopenanalysen von Eichenjahrringen, dass die Abfolge der letzten Sommerdürren in Zentraleuropa beispiellos in den letzten 2.110 Jahren gewesen war.

Für Mitteleuropa analysierten Ionita et al. (2021) hydrologische und meteorologische Langzeitbeobachtungen sowie Paläoklima-Rekonstruktionen über mehrere Jahrhunderte. Ihren Angaben nach liegen die jüngsten Dürreereignisse (z. B. 2003, 2015 und 2018) innerhalb des Bereichs der natürlichen Variabilität und sind im letzten Jahrtausend nicht beispiellos: „Obwohl die Treibhausgase und das damit verbundene globale Erwärmungssignal wesentlich zum zukünftigen Dürreerisiko beitragen werden, zeigt unsere Studie, dass zukünftige Dürrevariationen auch stark von natürlichen Schwankungen beeinflusst werden.“

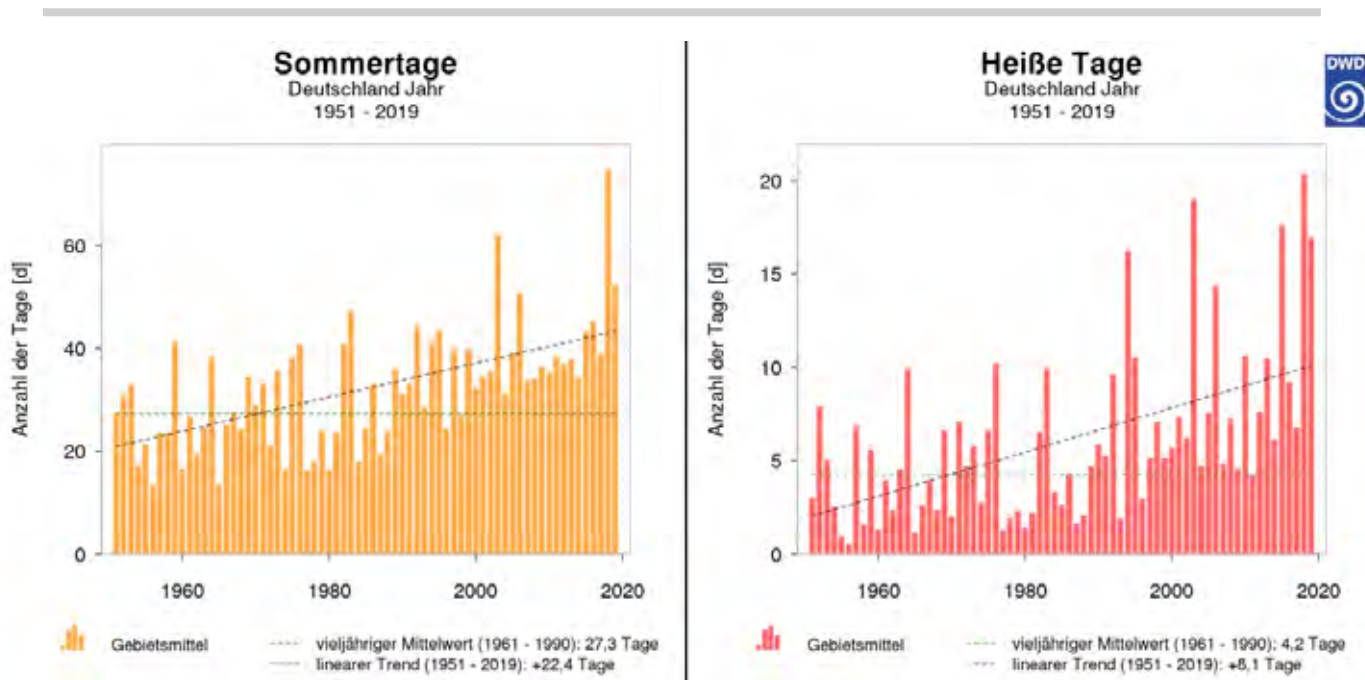
Mit Betrachtung der meteorologischen Daten seit 1881 für Gesamtdeutschland beschreibt der Deutsche Wetterdienst, dass ein Ereignis wie die Dürre 2018 innerhalb der beobachteten Periode noch nie vorgekommen ist (DWD 2020b). Mit einer dazu erstellten Attributionsstudie wurde berechnet, dass sich durch den Klimawandel die Wahrscheinlichkeit für eine neuerliche vergleichbare Dürre um den Faktor 3 erhöht hat. Ein Ereignis wie die Dürre 2018, das ohne Klimawandel höchstens alle 100 Jahre aufgetreten ist, könnte sich somit aktuell alle 30 Jahre wiederholen (Vautard et al. 2020). Hari et al. (2020) zeigten, dass das Auftreten der aufeinanderfolgenden Sommerdürren 2018–2019 in den letzten 250 Jahren als beispiellos angesehen werden muss. Mit Hilfe von Klimaprojektionsergebnissen berechneten sie für das RCP8.5-Szenario eine Versiebenfachung des Auftretens solcher aufeinanderfolgenden Dürren. Bei anderen Szenarien (RCP 2.6 und RCP 4.5) reduziert sich dieses Risiko deutlich.

### 1.1.3.2 Heiße Tage und Hitzewellen

Mit dem Klimawandel steigen nicht nur die Durchschnittstemperaturen der Luft, auch ihre Temperatur-extreme nehmen zu. Sie können zu direkten Schäden an den Bäumen und zu einem Rückgang der Photosynthese führen. Bei unzureichender Wasserversorgung entsteht zusätzlich Trockenstress. Außerdem begünstigt eine hohe Lufttemperatur zusammen mit intensiver Sonneneinstrahlung die Bildung von Ozon.

Nach Smidt et al. (2007) wirkt sich Ozon auch bei Bäumen zunächst auf Zellebene aus und die Bildung aggressiver Sauerstoffverbindungen in den Chloroplasten verursachen einen „oxidativen Burst“ mit entsprechenden Zellschädigungen und Blattverfärbungen (OSTLUFT 2013).

Nachfolgend sind in Abb. 12 die jährliche Anzahl und Dauer von Sommertagen und Heißen Tagen („Tropentage“) dargestellt. Mit einer Maximaltemperatur  $\geq 30^\circ\text{C}$  werden Heiße Tage als ein Gradmesser für Hitzebelastung verwendet (DKK 2020).



**Abb. 12:** Temperaturbezogene Kenntage 1951 - 2019: Sommertage (Maximum der Lufttemperatur  $\geq 25^\circ\text{C}$ ) links, Heiße Tage (Maximum der Lufttemperatur  $\geq 30^\circ\text{C}$ ) rechts. (Grafik: Kaspar und Friedrich 2020)

Trotz der Schwankungen zwischen den Jahren wird deutlich, dass die Intensität und Häufigkeit von Sommertagen und Heißen Tagen zunehmen und ein Trend sichtbar ist. Gemessen an der Trendlinie nahm von 1950 bis 2020 die Anzahl an Sommertagen von 20 auf mehr als 40 Tage pro Jahr zu. Die Anzahl Heiße Tage hat sich sogar verdreifacht. Betrachtet man nur die letzten beiden Jahre 2018 und 2019, wäre der Anstieg bundesweit von 3 auf 17 bzw. 20 Heiße Tage.

Wie die folgende Auflistung zeigt, unterscheidet sich die Häufigkeit von Heißen Tagen auch regional (hier Bundesländer).

**Tab. 1:** Anzahl Heißer Tage pro Jahr in den Bundesländern und Gesamtdeutschland im langfristigen Mittel 1961 - 90 und 1991 - 2020. Eigene Datenauswertung aus <https://opendata.dwd.de> (239 Klimastationen)

	BW	BY	BB	HE	MV	NI	NW	RP	SL	SA	SAA	SH	TH	D
1961 - 1990	5	4	6	4	3	3	4	5	4	5	6	2	3	4
1991 - 2020	10	9	12	9	6	7	8	10	10	10	11	4	8	9

In den küstennahen Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein sind Heiße Tage in den letzten 30 Jahren am seltensten. Eine überdurchschnittlich hohe Anzahl kann dagegen inzwischen in Baden-Württemberg, Brandenburg, Rheinland-Pfalz, dem Saarland, Sachsen und Sachsen-Anhalt vermerkt werden.

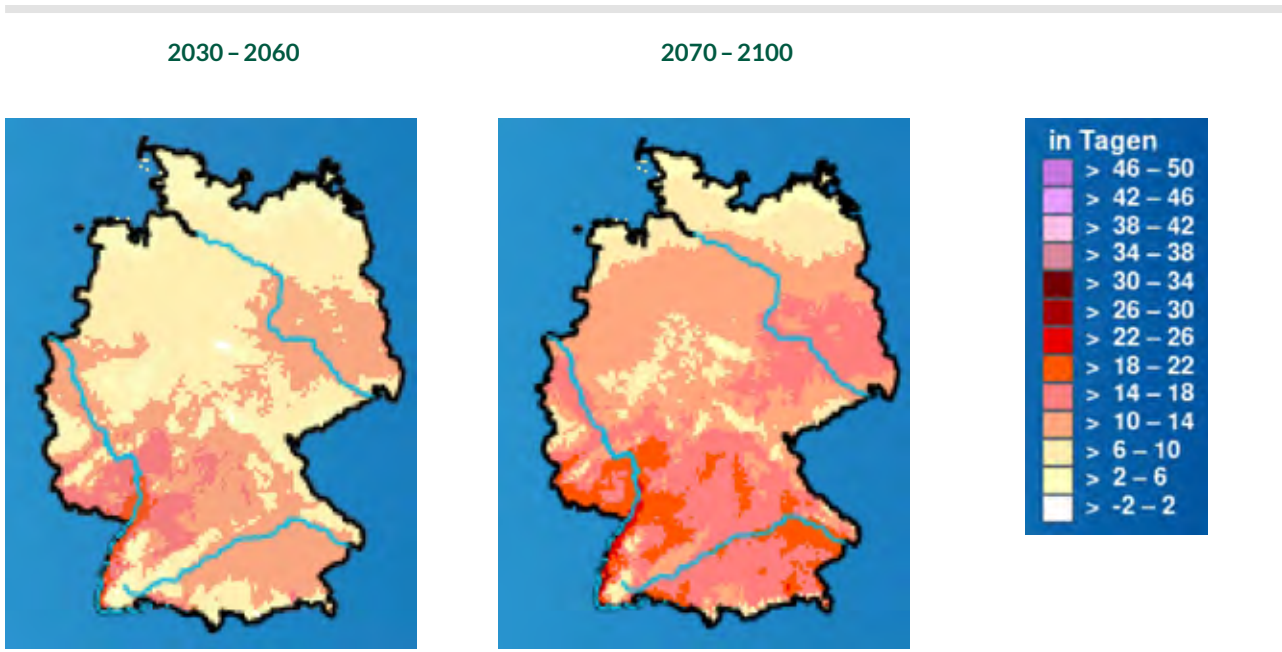
Mit der Zunahme Heißer Tage steigt die Gefahr von Hitzewellen. Eine Hitzewelle ist eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung, die in unseren Breiten oft im Zusammenhang mit andauernden sommerlichen Hochdrucklagen auftreten (DWD 2020a). Sie werden seit den 1990er-Jahren immer zahlreicher (DWD 2020b).

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Hitzewelle liegt für Deutschland derzeit zwischen 10–30 Jahren, ohne Klimawandel wäre dieser Zeitraum um ein Vielfaches länger (DWD 2020b). Selbst in den Küstenregionen hat sich die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen deutlich verändert. Vierzehntägige

Hitzeperioden mit einem mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C wurden in Hamburg vor 1994 nie verzeichnet. Seitdem gab es dort bereits fünf solcher Ereignisse (DKK 2020).

**Projektion in die Zukunft**

Aufgrund der vorhandenen und weiter fortschreitenden Erwärmung wird das Auftreten hoher Lufttemperaturen und neuer Temperaturrekorde als sehr wahrscheinlich eingeschätzt (DWD 2020b). Ebenfalls als wahrscheinlich gilt, dass das Auftreten Heißer Tage häufig auch mit längeren Hitzewellen verbunden sein wird. Gemäß DWD (2020b) zeigen die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen dafür klare Hinweise. Es wird erwartet, dass die Anzahl Heißer Tage besonders im süddeutschen Raum stark zunimmt. Je näher ein Gebiet an der Küste liegt, desto weniger Heiße Tage sind zu erwarten (Abb. 13).

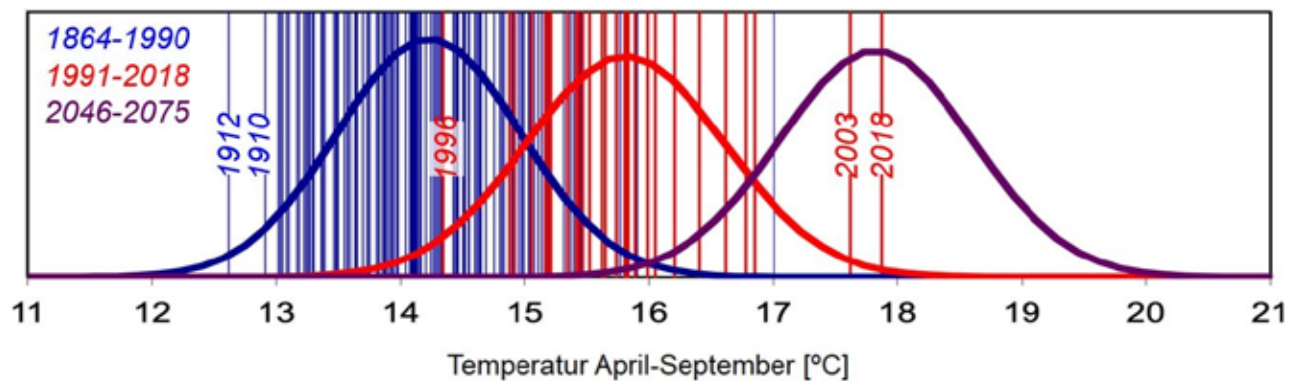


**Abb. 13:** Änderung der Anzahl Heißer Tage zum Normalwert (Durchschnitt 1971 - 2000) Emissionsszenario RCP4.5 Ensemble von bis zu 21 Klimamodellen.<sup>1</sup> (Grafik: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html))

<sup>1</sup> Die Ergebnisse aller Modelle werden der Größe nach geordnet. Bei den dargestellten Perzentilen werden somit 85 Prozent der Modellergebnisse abgedeckt, wohingegen mögliche Extremwerte nicht dargestellt werden.

In den Sommerhalbjahren 2003 und 2018 wurden in Mitteleuropa Temperaturrekordwerte erreicht. Wie diese Werte historisch und zukünftig eingeordnet

werden können, zeigen die Lufttemperaturdaten aus der Schweiz und modellhaften Annahmen einer zukünftigen Temperaturentwicklung (Abb. 14).



**Abb. 14:** Gemessene und modellierte Sommertemperaturen April-September in der Schweiz. Die gemessenen Werte basieren auf der durchschnittlichen Lufttemperatur an vier homogenisierten MeteoSchweiz-Stationen (Basel, Bern, Genf und Zürich). Die glockenförmigen Kurven sind Gauß'sche Anpassungen. Die Darstellung stellt eine Aktualisierung aus einer früheren Veröffentlichung dar (Schär et al. 2004 verändert von Rigling 2021).

Die beiden Extremsommer bilden den Modellannahmen nach zukünftig die durchschnittlichen Temperaturverhältnisse der Luft im Sommerhalbjahr ab und es wird angenommen, dass bisher nie erreichte Durchschnittstemperaturen von 19 bis 20 °C auftreten könnten.

### 1.1.3.3 Spätfrost

Spätfrost ist Frost, der nach Beginn der Vegetationsperiode auftritt. Spätfrostgefahr besteht in vielen Regionen Deutschlands bis zu den Eisheiligen, also Mitte Mai (DWD 2020a). Defekte entstehen durch unzureichende Frosthärtung mit nachfolgenden Frostschäden wie beispielsweise Erfrierungen an Knospen, Blüten, Blättern und Trieben, Aufplatzen der Rinde oder Holzrisen. Als besonders spätfrostgefährdet gelten unter den heimischen Baumarten Esche, Trauben-Eiche, Rotbuche und Weißtanne (Bartsch et al. 2020). Als Folge davon kann beispielsweise das mittlere Durchmesserwachstum von Buchenbeständen durch Spätfrost um mehr als 90% gegenüber dem durchschnittlichen Wachstum reduziert werden (Dittmar et al. 2006).

Scheifinger et al. (2003) sahen Anfang des Jahrhunderts noch ein abnehmendes Spätfrostisiko durch eine schnellere Verschiebung der Spätfrostereignisse im Vergleich zur Pflanzenphänologie. Dagegen berichten Liu et al. (2018), dass mittlerweile in Europa die Frosttage innerhalb der Vegetationsperiode bei gleichzeitig zunehmender Periodenlänge häufiger werden. Die Ergebnisse von Schulze et al. (2020) zu Frostschäden der Buche in montanen Lagen in Ostdeutschland bestätigen diese Resultate.

Das Austriebverhalten der frostgefährdeten Buche kann als ein Indiz zunehmender Spätfrostgefährdung einer typischen Hauptbaumart gesehen werden. Deutschlandweite Beobachtungen der Buchenphänologie (DWD 2020c) zeigen, dass der Austrieb, gemessen am linearen Trend, heute 10 Tage früher erfolgt als Anfang der neunziger Jahre (Abb. 15).

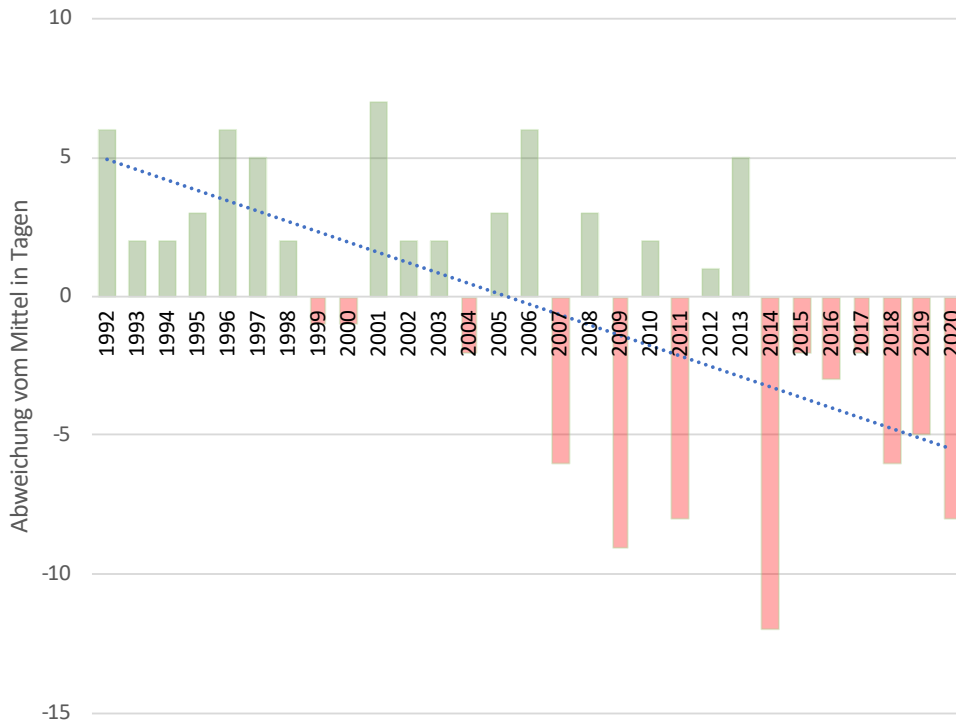
### Projektion in die Zukunft

Ob sich mit dem Klimawandel das Spätfrostisiko verändert, hängt davon ab, ob sich der Zeitpunkt des Vegetationsbeginns oder das Datum des letzten Spätfrosts zeitlich stärker in Richtung Jahresbeginn bewegen. Nach Angaben der Helmholtz-Gesellschaft im Regionalen Klimaatlas Deutschland ist die Änderung des letzten Frosttages im Frühjahr bis 2045 im Vergleich zu heute unklar und es bestehen große Spannbreiten zwischen den Klimamodellen. Als mögliche mittlere Änderung werden -9 Tage angegeben. Die Angaben zum Vegetationsbeginn werden ähnlich unsicher eingestuft, er läge im Mittel allerdings bei -15 Tagen (Helmholtz-Gesellschaft 2020). Für Apfelbäume konnten Pfeleiderer et al. (2019) zeigen, dass es zukünftig in einigen Regionen Deutschlands zu einer spürbaren Zunahme des Risikos von Frostschäden kommen wird. Als einen Schwerpunkt nennen sie Süddeutschland.

Zohner et al. (2020) schätzen, dass zukünftig, bezogen auf die Waldfläche der gemäßigten Zone, in Europa auf 35% und in Nordamerika auf 10% Spätfrostschäden häufiger auftreten. Sie begründen dies mit der schnellen Reaktion der europäischen Baumarten auf eine Erhöhung der Lufttemperatur. Baumarten

des östlichen Nordamerikas hätten dagegen eher einen späteren Blattaustrieb, der stärker durch die Tages-

länge als durch die Lufttemperatur kontrolliert wird.



**Abb. 15:** Blattentfaltung der Rotbuche 1992 - 2020 in Deutschland. Tägliche Abweichung vom mittleren Beobachtungstermin dem 23. April. Daten: Deutscher Wetterdienst

### 1.1.3.4 Starkregen

Von Starkregen spricht man bei großen Niederschlagsmengen je Zeiteinheit, die aus zumeist konvektiver Bewölkung fallen (DWD 2020a). Der Deutsche Wetterdienst warnt vor Unwettern mit Starkregen, wenn Niederschlagsmengen von mehr als 25 mm in 1 Stunde oder 35 mm in 6 Stunden zu erwarten sind (DWD 2018). Starkregen ist kaum vorhersagbar, kann überall auftreten und führt zu schnell ansteigenden Wasserständen bis hin zu Überschwemmungen (LAWA 2018). Im Wald ist bei einer zunehmenden Häufung von Starkregenereignissen mit einem vermehrten Oberflächenabfluss inklusive Bodenerosion (LAWA 2018), anaeroben Bedingungen bei Staunässe, aber auch nach Trockenheit mit einer geringeren Durchfeuchtung des Bodens, damit zu einer sinkenden Wasserverfügbarkeit für die Bäume und insgesamt mit einer Verschlechterung des Geländewasserhaushalts zu rechnen.

Besonders in Hoch- und Mittelgebirgslagen ist durch Starkregen vermehrt mit Hangrutschungen und Steinschlag zu rechnen, die wiederum forstliche Infrastruktur wie Forstwege oder Brücken beschädigen

können. Andererseits soll in tieferen Lagen das Rückhalte- und Versickerungspotenzial des Waldes zur Starkregenvorsorge für urbane Räume genutzt werden (Jensen 2020).

Für das europäische Festland weisen Fischer und Knutti (2016) nach, dass Starkniederschläge in ihrer Intensität und Häufigkeit zugenommen haben. Auch Auswertungen von Radardaten, die erst seit Anfang des Jahrhunderts zur Verfügung stehen, deuten darauf hin, dass Starkregenereignisse in Deutschland in den vergangenen Jahren zumindest regional vermehrt aufgetreten sind (LAWA 2018). Allerdings ist die Zeitreihe für belastbare Trendaussagen zu kurz. Gemäß DWD (2020b) gibt es Hinweise auf einen früheren Beginn und späteres Ende der Saison mit konvektiven Starkregenereignissen mit gleichzeitig stärkerer Ausprägung.

Eine Analyse der täglichen Niederschläge zeigt für den Zeitraum 1951–2006 eine Zunahme der Tage mit hohen Niederschlagsmengen um ca. 25% im Winter wobei große regionale Unterschiede zu beobachten sind (DWD 2020b). So gibt es in Nordostdeutschland und an den Küsten deutlich weniger Starkregenereignisse als in Süddeutschland. Die Jahreszeiten Frühjahr



Bodendurchfeuchtung gravierende Windwurfschäden im Wald entstehen (Gömann et al. 2015). Steigende Wintertemperaturen verlängern die Dauer nicht gefrorener Bodenverhältnisse und verringern somit die Wurzelverankerung von Bäumen in Regionen, in denen der Boden im Winter gewöhnlich gefroren ist (Lindner und Rummukainen 2013).

Nach Angaben von Albrecht et al. (2008) waren Stürme von 1950 bis 2000 für über 50% der durch abiotische Schadursachen angefallenen Schadholzmenge in Europa verantwortlich. Mit Blick auf die hohen Schadholzmengen in den letzten 20 Jahren wird häufig vermutet, dass der Klimawandel bereits zu einer möglichen Änderung der Sturmhäufigkeit und -intensität geführt hat. Markante Stürme sind allerdings seltene Ereignisse und somit nur mit langen Zeitreihen statistisch zu bewerten, die oftmals nicht in ausreichendem Maß vorliegen (DWD 2020b). Albrecht et al. (2008) kommen bei einer umfangreichen Literaturstudie zum Ergebnis, dass es zumindest bis 2008 keine klaren meteorologischen Hinweise auf eine deutliche Zunahme von Stürmen gäbe. Dahingegen zeichne sich trotz widersprüchlicher Forschungsergebnisse eine Tendenz hin zu selteneren mittleren, aber häufigeren heftigen Stürmen ab. Auch Lindner und Rummukainen (2013) merken an, dass die Sturmhäufigkeit im Gegensatz zu den Spitzengeschwindigkeiten der Stürme nicht zugenommen hat.

Regionale Auswertungen liegen für Level-II-Dauerbeobachtungsflächen in Brandenburg vor. Demnach ist dort seit 1968 eine fallende Tendenz der Sturmhäufigkeit zu verzeichnen und starke Sturmereignisse wurden immer seltener (Forst Brandenburg 2016). Eine weitere Möglichkeit um Aussagen über die langfristige Entwicklung der Windgeschwindigkeiten und des Auftretens von Stürmen der letzten hundert Jahre abzuleiten, ist die Betrachtung des geostrophischen Windes, der nicht auf gemessenen Windgeschwindigkeiten, sondern auf einer Auswertung von Luftdruckdifferenzen beruht (DWD 2020b). Gemäß Angaben des Deutschen Wetterdienstes ist mit dieser Methode mittels Wetterstationsdaten aus der Deutschen Bucht historisch kein statistisch signifikanter Trend bei den Windgeschwindigkeiten erkennbar. In topographisch bewegtem Gelände kann allerdings die Windgeschwindigkeit aus Luftdruckdaten nicht immer verlässlich abgeleitet werden (Albrecht et al. 2008).

Die Großwetterlagen in Europa werden von Tiefdruckgebieten über Nordeuropa („Islandtief“) und Hochdruckgebieten über Südeuropa („Azorenhoch“) geprägt. Dabei beschreibt die Nordatlantische Oszillation die Schwankung des Luftdruckunterschieds zwischen diesen beiden Gebieten. Die Oszillation ist das ganze Jahr präsent und übt den größten Einfluss auf die Zirkulationsmuster und damit die Zugbahn von

Stürmen über der nordatlantisch-europäischen Region aus (Albrecht et al. 2008). Besonders stark ist die Nordatlantische Oszillation in den Wintermonaten, in einem Zeitraum also, in dem die Druckunterschiede zwischen „Islandtief“ und „Azorenhoch“ besonders groß sein können. Durch die entstehenden Tiefdruckgebiete und außertropische Zyklonen in mittleren Breiten treten die stärksten Winde und Böen in Nord- und Mitteleuropa auf.

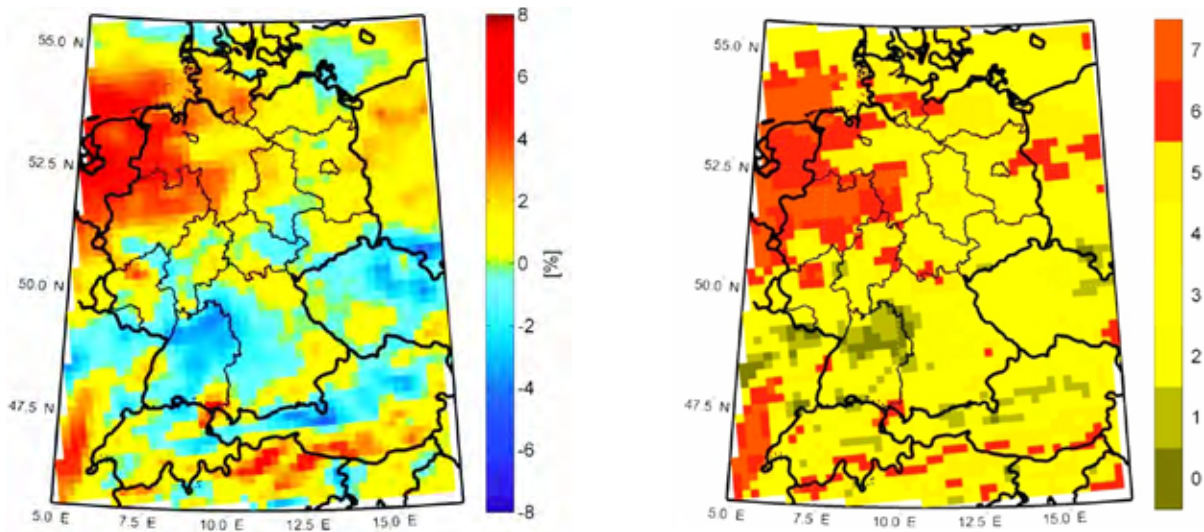
Außertropische Zyklonen verursachen dabei den Großteil von extremen Wetterereignissen wie Starkniederschläge, Sturmböen, Überflutungen oder Sturmfluten (Pinto und Reyers 2017). Das Gebiet im Nordatlantik, in dem außertropische Zyklonen in Richtung Europa ziehen, wird nordatlantischer „storm track“ genannt. Für Pinto und Reyers (2017) bildet daher eine Verlagerung dieses Gebietes in der Vergangenheit und in einem zukünftigen Klima eine Möglichkeit zur Bewertung der Auswirkung des Klimawandels auf die für Deutschland relevanten Zyklonen. Als Fazit für das gegenwärtige Klima ziehen Pinto und Reyers (2017), dass für Deutschland bisher kein klarer Trend hinsichtlich der Zyklonenaktivität gefunden werden konnte. Die zwischenjährlichen und dekadischen Schwankungen erwiesen sich als deutlich stärker als ein möglicher langzeitlicher Trend.

### Projektion in die Zukunft

Im Zuge des Klimawandels erwarten Pinto und Reyers (2017), dass sich die Sturmzugbahnen in Richtung Europa verschieben und dadurch häufiger starke Zyklonen auftreten werden. Sie vermuten, dass die Wiederkehrperiode starker Zyklonen über der Nordsee und Westeuropa sich verkürzen wird, allerdings bei einer gleichzeitigen Verringerung der Gesamtzahl an Zyklonen bis zum Ende des Jahrhunderts. Jahreszeitlich gesehen sollen die Zyklonen vor allem im Winter zunehmen, während es im Sommer eher zu einer Abnahme kommen könnte.

Räumlich gesehen wird als wahrscheinlich angesehen, dass bereits ab Mitte des 21. Jahrhunderts mehr Starkwindereignisse und starke Böen über der Nordsee und Nordwestdeutschland auftreten werden. Für andere Gebiete in Deutschland bestehen große Unsicherheiten, tendenziell werden aber nur geringe Änderungen im Vergleich zum gegenwärtigen Klima erwartet (Abb. 17).





**Abb. 17:** Ensemble-Ergebnisse aus sieben regionalen Klimamodellen (RCM)

Links: Relative Änderung der mittleren Bøe mit einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1971–2000  
Rechts: Anzahl der RCM-Simulationen mit einer positiven relativen Änderung der Bøengeschwindigkeit mit einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren  
(veränderte Grafik aus Rauthe et al. 2010)

Ob und wie sich eine geänderte nordatlantisch-europäische Sturmaktivität zukünftig auf das Ausmaß an Schäden in Wäldern auswirken könnte, ist gemäß Albrecht et al. (2008) aufgrund weiterer maßgeblicher Faktoren wie beispielsweise Änderungen des Bestandsalters oder der waldbaulichen Methoden schwer einschätzbar.

Größere Schäden im Wald entstanden in den letzten Jahren zudem durch Tornados. Dabei handelt es sich nach Definition des Deutschen Wetterdienstes um „kurzlebige und räumlich stark begrenzte, rotierende Luftmassen unter einer konvektiven Wolke, mit Bodenkontakt“. Eine Zunahme von Tornados in Deutschland ist allerdings aufgrund fehlender historischer Daten nicht nachweisbar. Auf Basis der vorliegenden regionalen Klimaprojektionen ist nicht abzuleiten, dass Tornados zukünftig häufiger in Deutschland auftreten werden (DWD 2020b).

## 1.2 Auswirkungen der Klimaänderungen auf Wälder und ihre Ökosystemleistungen

### 1.2.1. Struktur, Zusammensetzung, unterstützende Ökosystemleistungen und Biodiversität

Welche Leistungen Ökosysteme erbringen können, hängt unter den Vorzeichen des Klimawandels in besonderem Maße von ihrer Fähigkeit ab, sich an ändernde Umweltbedingungen anzupassen. Per

Definition sind Ökosysteme komplexe Wirkungsgefüge zwischen den Individuen vieler Arten, ihrem Lebensraum und ihren Umweltbedingungen. D. h. es handelt sich um offene Systeme, die diversen äußeren Einflüssen unterliegen und als dynamische Systeme über die Fähigkeit verfügen, auf diese Einflüsse zu reagieren. In welchem Maße Auswirkungen des Klimawandels auf die Funktionsfähigkeit der Waldökosysteme zu erwarten sind, wird in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

#### 1.2.1.1 Resistenz, Resilienz, und Anpassungsfähigkeit als Komponenten der Ökosystemstabilität

Die Fähigkeit von Ökosystemen, exogene Belastungen und Störungen zu tolerieren, wird als ökologische Stabilität verstanden (Kalbe 1997, Grimm und Wissel 1997). Ökologische Stabilität setzt sich aus fünf Eigenschaften zusammen (Van Meerbeek et al. 2021): (a) Resistenz - die Fähigkeit, einer Änderung nach einer Störung zu widerstehen, (b) Resilienz - die Geschwindigkeit, mit der ein System nach einer Veränderung in den Ausgangszustand zurückkehrt („technische Resilienz“, siehe Differenzierung unten), (c) Erholung - die Fähigkeit, vollständig zum Ausgangszustand zurückzukehren, (d) Spielraum - der maximale Betrag, um den eine Systemvariable verändert werden kann, und (e) Toleranz - die Fähigkeit eines Systems, Störungen zu tolerieren.

Zu einem zentralen Element des Stabilitätskonzeptes in der Ökosystemtheorie ist der Begriff der Resilienz geworden. Als Komponente der ökologischen

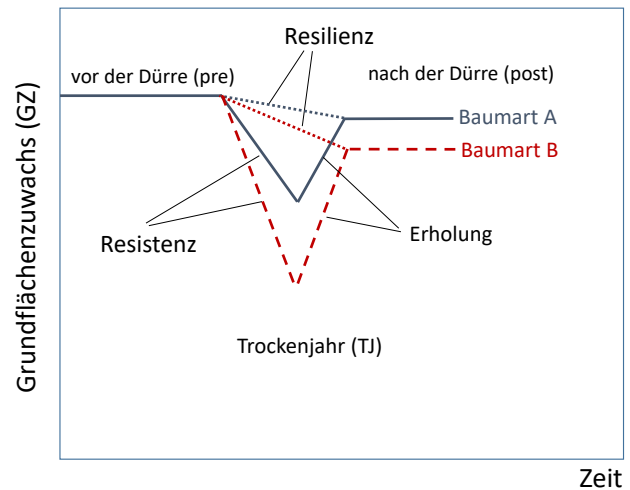
Gleichgewichts-Stabilität wird auch von technischer Resilienz gesprochen (Pimm 1984, Seidl et al. 2019). Holling (1973) grenzt den Resilienzbegriff vom Begriff der ökologischen Stabilität ab, da sich dynamische Systeme in unterschiedliche Richtung entwickeln können, und dennoch ihre Funktionsfähigkeit behalten. Basierend auf Holling (1973) und Walker et al. (2004) hat sich daher der Begriff der ökologischen Resilienz etabliert, der die Kapazität eines Systems beschreibt, Störungen zu absorbieren, ohne die systemimmanenten Funktionen, Strukturen und Prozesse zu verändern (Seidl et al. 2019).

Wird das Konzept der ökologischen Resilienz auf sozioökologische Systeme angewendet, wird von sozioökologischer Resilienz gesprochen, in der als zusätzliche Dimension die soziale Anpassungsfähigkeit hinzukommt, also die Fähigkeit, auf externe Stressoren und Störungen mit sozialem oder politischem Wandel in einer Weise zu reagieren, die die Funktionsfähigkeit erhält (Folke 2006, Seidl et al. 2019). Die drei genannten Resilienz-Konzepte beschreiben zunehmende Komplexität und stehen daher nicht unbedingt im Widerspruch zueinander, sondern können als komplementär angesehen werden (Nikinmaa et al. 2020). Da sich unsere Waldökosysteme unter dem Einfluss des Klimawandels dynamisch verändern und darauf durch Anpassungen in der Waldbewirtschaftung reagiert werden muss, ist die sozioökologische Resilienz für dieses Gutachten ein wichtiges Konzept.

Wie oben dargestellt sind Resistenz und Resilienz zwei Systemeigenschaften, die die ökologische Stabilität charakterisieren. Der Unterschied der Begriffe Resistenz und Resilienz kann unter anderem durch den Vergleich des Wachstums unterschiedlicher Baumarten vor und nach einem Trockenstressereignis veranschaulicht werden (Lloret et al. 2011; Abb. 18). Die Resistenz ist ein Maß für die Reduktion des Wachstums in einer Trockenphase gegenüber dem Wachstumsniveau in der Phase vor der Trockenheit. Je höher die Trockenstress-Resistenz einer Baumart ist, desto weniger verringert sich das Wachstum in der Trockenphase. In diesem Fall wäre Baumart A resistenter als Baumart B. Die Erholung beschreibt den Umfang, in dem sich das Wachstum gegenüber dem Niveau im Trockenjahr wieder erhöht. Hier wäre die Erholung in Baumart B höher als in Baumart A.

Die Resilienz der Baumart auf Trockenstress beschreibt in welchem Maße das Wachstum nach dem Stressereignis wieder das Niveau des Wachstums vor der Trockenheit erreicht. In diesem Fall wäre die Resilienz beider Baumarten  $< 1$ , da in beiden Fällen das Wachstum nach Trockenheit geringer ist als vorher, die Resilienz wäre aber höher in Baumart A als in Baumart B. Die Quantifizierung dieser Indizes hängt

in hohem Maße von der Länge und den Bedingungen der Referenzzeiträumen vor und nach einem Stressereignis ab (Schwarz et al. 2020).



**Abb. 18:** Resistenz, Erholung und Resilienz demonstriert am Beispiel der Wachstumsreaktion zweier unterschiedlicher Baumarten in Bezug auf ein Trockenstressereignis (modifiziert von Lloret et al. 2011). Resistenz =  $GZ_{TJ}/GZ_{pre}$ , Erholung =  $GZ_{post}/GZ_{TJ}$ , Resilienz =  $GZ_{post}/GZ_{pre}$ ; wobei GZ = Grundflächenzuwachs, pre = vor dem Trockenjahr, TJ im Trockenjahr, post = nach dem Trockenjahr

Die baumartenspezifische Ausprägung von Resistenz und Resilienz sind das Resultat unterschiedlicher ökophysiologischer Strategien infolge evolutiver Prozesse (Breda et al. 2006). Heimische Baumarten haben sich im Laufe der Evolution und nach der letzten Eiszeit in ihren jetzigen Verbreitungsgebieten an die sich latent ändernden Klimaverhältnisse angepasst und konnten so ein breites Spektrum von Witterungsextremen überleben – sonst wären sie heute nicht mehr an den Standorten vorhanden. Die aktuellen Klimaveränderungen erfolgen allerdings wesentlich schneller als in der Vergangenheit (Salinger 2005).

Gleichzeitig wird die natürliche Sukzession und Anpassung innerhalb der Verbreitungsgebiete durch die Fragmentierung der Landschaft begrenzt (Milad et al. 2011). Daher ist es wichtig, die unterschiedlichen Komponenten der Anpassungsfähigkeit zu verstehen. Neben der geographischen Verbreitung der Arten können sich mit dem Klimawandel auch die Konkurrenzverhältnisse zwischen den Baumarten, die unterschiedliche physiologische Amplituden aufweisen, verschieben (Arend et al. 2016; Liang et al. 2017)

Die ökologische Resilienz des Ökosystems wird stark von der Diversität auf unterschiedlichen Ebenen (Biozönose, Population, Individuum) beeinflusst (Thompson et al. 2009). Mischbestände aus Baumarten mit komplementären ökologischen Strategien erhöhen die Resilienz, weil die Arten auf Stress und die

künftig möglichen Klimabedingungen unterschiedlich reagieren (Bauhus et al. 2017a). Wenn einzelne Arten ausfallen, verbleiben besser angepasste Arten im System. Die ökologische Resilienz wird so durch die spezifische Anpassungsfähigkeit der Individuen, als die „reagierenden“ Elemente des Systems, der Populationen und der Artengemeinschaften in ihrer Wechselbeziehung getragen und begrenzt (Kätzel 2010).

Auf der Ebene der Individuen wird deren aktuelle Anpasstheit an die jeweiligen Umweltbedingungen u. a. durch ihre Vitalität, Wuchsleistung, Überlebensfähigkeit und Reproduktion sichtbar. Diese – auch im forstlichen Monitoring erfassten Indikatoren – sind wesentliche phänotypische Merkmale. Die phänotypischen Eigenschaften werden maßgeblich durch die sogenannte „genetische Reaktionsnorm“ bestimmt, die den anpassungsrelevanten Teil des Genotyps beschreibt. Damit Organismen (über)leben können, muss der durch die genetische Reaktionsnorm bestimmte Toleranzbereich innerhalb der Amplituden der Umweltfaktoren liegen (Stearns und Koella 1986). Bezogen auf Gehölze beschreibt die Amplitude der Anpassung den Toleranzbereich, der z. B. die Baumartenwahl unter den sich ändernden standörtlichen Bedingungen bestimmt (bzw. begrenzt) (Reed et al. 2010).

Neben der genetischen Determinante, die im Wesentlichen durch Mutationen variiert wird, gelangen zunehmend auch epigenetische Prozesse in den Fokus von Anpassung. Durch epigenetische Prozesse können Organismen wesentlich schneller auf Umweltbedingungen reagieren und auch an extreme Bedingungen konditioniert werden (Bräutigam et al. 2013). Ob die dabei neu entstehenden (Epi-)Geno-/Phänotypen einen größeren Toleranzbereich entwickeln, zeigt sich in der Auseinandersetzung mit den einwirkenden Selektionsfaktoren (Hitze, Trockenheit, Pathogene etc.).

Mit der Vielfalt unterschiedlicher individueller Reaktionsnormen innerhalb eines Ökosystems steigen die Möglichkeiten der Anpassung. Somit ist die Wahrscheinlichkeit (insbesondere extreme) vielfältige Umwelteinflüsse zu ertragen, umso höher, je vielfältiger das „Gegenangebot“ der Natur ist. Solange physiologische und genetische Prozesse eine Anpassung an Umweltbedingungen ermöglichen, ist das Risiko des „Nichtangepasstseins“ gering (Kätzel 2008; Reed et al. 2010).

Damit ist die Anpassungsfähigkeit auf der Ebene der Populationen von der Vielfalt an vorhandenen Genotypen einer Reproduktionseinheit (Population) abhängig. Um die Überlebensfähigkeit von Gehölzpopulationen zu erhöhen, muss den (extremen) Umweltfaktoren eine möglichst große Anzahl genetisch diverser Individuen gegenübergestellt werden („Der Evolution Futter bieten“). Eine wichtige Grundlage für die genetische Vielfalt auf der Ökosystemebene ist die

Populationsgröße. In der Praxis wird hierfür die genetische Vielfalt von Individuen und Populationen anhand von genetischen Markern und Indizes bewertet (genetische Diversität).

Während die genetische Vielfalt auf der Individualebene auf fortwährende Mutationen und sexuelle Rekombination zurückgeführt wird, beeinflussen auf der Populationsebene weitere Prozesse wie genetischer Drift, Selektion und natürliche Migration von Individuen aus anderen Populationen die genetische Diversität und damit die Anpassungsfähigkeit der Population. Unterschiedliche genetische Prädisposition beispielsweise auf Trockenstress wurde kürzlich beim Vergleich von geschädigten und gesunden Buchen nachgewiesen (Pfenninger et al. 2021). Solche genetischen Merkmale beeinflussen die Anpassungsfähigkeit der Baumarten. Mit Hilfe der identifizierten genetischen Marker könnten genetische Analysen in Zukunft helfen, trockenresistentere Samenbäume für die Pflanzenzucht auszuwählen. Mit der Mischung von Baumarten erhöht sich die Gesamtheit der genetischen Varianten im Ökosystem noch einmal erheblich. Hier setzen auch die Möglichkeiten aktiver Steuerungsmöglichkeiten durch die Waldbewirtschaftung ein (z. B. Assisted Migration, Mischungsregulationen), die in Kapitel 3.1.1 behandelt werden.

### **1.2.1.2 Standorteignung und Grenzen der Klimaanpassung einzelner Baumarten, Verschiebungen der Artenareale und Veränderungen der Baumartenzusammensetzungen**

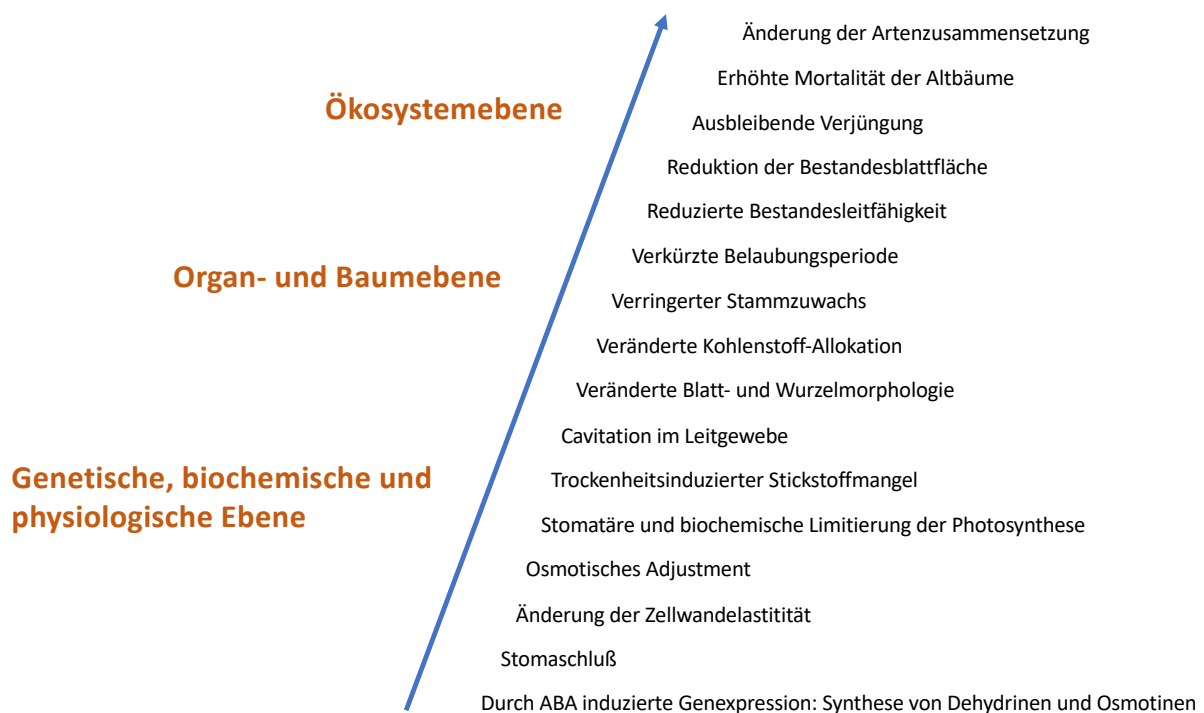
Die Baumarten Mitteleuropas haben unterschiedliche Klima- und Standortsansprüche (Thomas 2018) und weisen deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Trockenheitstoleranz auf (Zang et al. 2011, Klein 2015, Dyderski et al. 2018). Die natürliche Baumartenverbreitung resultiert aus den physiologischen Standortansprüchen der Arten, den Konkurrenzverhältnissen zu anderen Arten sowie dem Störungsregime und den Möglichkeiten der Arten, den Standort zu besiedeln (Huston und Smith 1987; Bartsch und Röhrig 2016). Auf Standorten mit mittlerer bis guter Wasser- und Nährstoffversorgung kann eine große Anzahl von Baumarten gedeihen, aber im Konkurrenzkampf setzen sich langfristig insbesondere wuchskräftige, schattentolerante und selber schattenbildende Arten durch. In Mitteleuropa ist auf solchen Standorten die Buche sehr konkurrenzstark.

Auf sehr nährstoffarmen oder auch sehr nährstoffreichen, kalten, trockenen oder deutlich staunassen Standorten fällt die Buche in ihrer Wachstumskraft zurück gegenüber anderen Arten, die an ihrer Stelle solche Standorte natürlich dominieren können

(Ellenberg und Leuschner 2010). Je nach Höhenstufe der Vegetation können weitere limitierende Faktoren hinzukommen (z. B. Schneelast, Spätfrost und verkürzte Vegetationszeit; Thomas 2018). Durch den Klimawandel verändern sich die Standortverhältnisse: Ansteigende Temperaturen und sich ändernde Niederschlagsmengen und -verteilung mit häufigeren, bzw. auch länger andauernden Trocken- und Hitzeperioden beeinflussen das Baumwachstum, das natürliche Störungsregime (z. B. durch Förderung von Schadinsekten, Pathogenen und Feuer) und das Konkurrenzverhältnis zwischen den Baumarten (Lindner

et al. 2014).

Trockenheits- und hitzeempfindliche Arten, die gleichzeitig kältetolerant sind, werden zunehmend nach Norden und in höhere Bergzonen zurückgedrängt und an ihren ursprünglichen Standorten durch andere Arten ersetzt. Entlang der warm-trockenen Verbreitungsgrenze kann durch erhöhten Trockenstress die Baum-Mortalität ansteigen bis zum flächendeckenden Absterben. Die Bäume reagieren auf Trockenstress in der Folge mit Anpassungen, die Leuschner (2008) als multiskaligen Prozess beschreibt (Abb. 19).



**Abb. 19:** Anpassung an Trockenheit als multiskaliger Prozess; aus Leuschner (2008).

Zum Vergleich der Trockenheitsresistenz werden neben der Mortalität Parameter wie Jahrringwachstum, Artverbreitungsgrenze oder das Blattwasserpotenzial herangezogen. Roloff und Grundmann (2009) bewerteten die Baumarten anhand einer umfangreichen Literaturstudie. Sie nennen als Trockenheitsabfolge die Kiefer als resistenteste Nadelbaumart, gefolgt von Lärche, Douglasie und Tanne. Für die wichtigsten Nadelbäume berechneten Thurm et al. (2020) die Trockenheitsresistenz mit Hilfe von Modellen zur Artverbreitung, Höhenwachstum, Überlebenswahrscheinlichkeit und Jahrringsensitivität. Ihren Ergebnissen nach wäre Douglasie in Deutschland die mit Abstand trockenresistenteste Nadelholzbaumart gefolgt von Waldkiefer, Europäischer Lärche und Weißtanne. Der Fichte wird in der Literatur einstimmig die geringste Trockenheitsresistenz zugeschrieben.

Bei den wichtigsten Laubbaumarten gelten die Eichen- und Ahornarten als am trockenheitsresistentesten (Roloff und Grundmann 2009). Als ein Indiz gilt unter anderem die schnellere Regeneration des Eichenwachstums im Vergleich zur Buche nach Dürreereignissen (Meinardus und Bräuning 2011). Über die Trockenheitsempfindlichkeit der Buche bestehen unterschiedliche Einschätzungen (Rennenberg et al. 2004, Ammer et al. 2005, Leuschner 2020), wobei offensichtlich deutliche Unterschiede zwischen den Buchenherkünften bestehen (Bolte 2016) und sogar innerhalb eines Bestandes auftreten können (Pfenninger et al. 2021). Die Überlagerung von Trockenheits- und Fruktifikationseffekten erschweren dabei die Interpretation des Durchmesserwachstums als Indikator (Krüger et al. 2020).

Auch den bisher seltenen Baumarten wie z. B. Speier-

ling, Elsbeere, Spitz- und Feldahorn, die von Natur aus eher an trocken-warmen Standorten zu finden sind, wird eine höhere Trockenheitstoleranz zugesprochen als der Rotbuche (Kunz et al. 2018). Auch den bisher seltenen Baumarten wie z. B. Speierling, Elsbeere, Spitz- und Feldahorn, die von Natur aus eher an trocken-warmen Standorten zu finden sind, wird eine höhere Trockenheitstoleranz zugesprochen als der Rotbuche (Kunz et al. 2018).

Unabhängig davon ist die Trockenheitstoleranz als alleiniges Kriterium nicht geeignet, um die Standortstauglichkeit und darüber hinaus die Eignung einer Baumart zur Erreichung der Bewirtschaftungsziele im Klimawandel zu bewerten. Dies geschieht am besten anhand multikriterieller Verfahren, wie sie z. B. von Albrecht und de Avila (2019) angewendet wurden. Berücksichtigt man z. B. auch die Toleranz gegenüber Hitzestress und die Resistenz gegenüber Schadorganismen und Krankheiten, gelangt man zwangsläufig zu differenzierteren Einschätzungen der Standortstauglichkeit der Baumarten (z. B. Bußkamp und Langer 2018, Rohde et al. 2019, Langer 2019).

Die Baumartenzusammensetzung hat sich im Zuge der nacheiszeitlichen Waldentwicklung dynamisch verändert und wurde in Mitteleuropa seit dem Mittelalter stark vom Menschen beeinflusst. Das Gebiet der heutigen Bundesrepublik Deutschland war zuvor im Westen überwiegend mit Buche und im Osten überwiegend mit Kiefer bestockt (Hasel 1985). Für die Spätphase des Mittelalters um 1300 herum wird das Verhältnis von Laubholz zu Nadelholz noch auf 75 % zu 25 % geschätzt (Mantel 1990, Hausrath 1936).

Der Rückgang des Brennholzbedarfs infolge der Verfügbarkeit von Kohle, der zunehmende Bedarf an Holz zur stofflichen Nutzung sowie die Freiflächenbedingungen vieler Aufforstungsflächen haben in der Phase der planmäßigen Wiederbewaldung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zum vermehrten Anbau von Nadelholz geführt. Entsprechend betrug das Verhältnis von Laubholz zu Nadelholz im Jahr 1913 im Deutschen Reich fast umgekehrt 30 % zu 70 % (Mantel 1990). Nach den Weltkriegen im 20. Jahrhundert wurden auf großen Flächen der Holzproduktion dienende Nadelholzbestände gepflanzt, vor allem aus Fichte und Kiefer. Häufig in Reinbeständen gepflanzt, erwiesen sich Fichtenbestände bereits ohne Klimaänderung als störungsanfälliger als Buchen- und Mischbestände (Schütz et al. 2006, Griess et al. 2012), insbesondere auf für die Baumart weniger geeigneten Standorten (z. B. vernässenden Standorten auf denen die Fichte nur oberflächlich wurzeln kann (Baumgarten et al. 2005).

Bedingt durch den Klimawandel verliert die Fichte in tieferen Lagen in Mitteleuropa zunehmend an Konkurrenzkraft (Bosela et al. 2021, Krejza et al. 2021)

und massive Borkenkäferkalamitäten bedrängen sie in weiten Teilen ihres vom Menschen künstlich ausgedehnten Verbreitungsgebiets (Hlasny et al. 2021). Rückzüge von Baumarten entlang der Trockengrenze von Arten wurden bereits seit einigen Jahren auf der Alpensüdseite im Wallis dokumentiert (Bigler et al. 2006, Rigling et al. 2013). Ähnliche Probleme treten inzwischen auch im Oberrheingraben und auf kontinentalen Standorten im Osten Deutschlands auf. Gegenläufig erfolgt mit der Klimaerwärmung die Ausbreitung von Laubhölzern in höhere Lagen und die Verschiebung der Baumgrenze (Cudlin et al. 2017). Die zu erwartende Verschiebung von Baumartenverbreitungen und Standortseignung der Baumarten werden seit langem mit Vegetationsmodellen simuliert (Austin und Smith 1989, Guisan und Zimmermann 2000). Dabei wird aus der beobachteten, aktuellen ökologischen Nische von Arten auf die zu erwartende künftige Verbreitung der Arten unter veränderten Klimabedingungen geschlossen (z. B. Kölling et al. 2016, Dyderski et al. 2018, Pecchi et al. 2019). Ein Problem stellt dabei die mangelnde Unterscheidung zwischen der konkurrenzbedingten „realisierten“ und der physiologischen Nische der Baumarten dar. Zudem fehlt häufig eine realistische Simulation der natürlichen Verbreitungsmechanismen, die in Europa durch fragmentierte Landnutzung und Infrastruktur stark behindert wird (Thuiller et al. 2005).

Da nicht jedes künftige Klima bereits Vorbilder hatte und sich Klimafaktoren lokal unterschiedlich ändern, wird es nicht nur eine „Verschiebung“ von Waldökosystemen, sondern auch neue Kombinationen von Vegetationsgemeinschaften geben. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass einige Baumarten bereits auf großen Flächen verloren gegangen sind (Ulmen, Eschen) (z. B. Enderle et al. 2017), während sich einzelne eingeführte Arten wie der Götterbaum, Eschenahorn oder die Spätblühende Traubenkirsche invasiv verbreiten können (Krumm und Viktova 2016).

In einer europaweiten Simulationsstudie fanden Hanewinkel et al. (2013), dass der Anteil von Eichen des gemäßigten und mediterranen Klimas in Europa bis 2100 von 20 % auf mindestens 50 % zunehmen und sich der Anteil von Fichten und Kiefern von derzeit über 50 % auf unter 25 % reduzieren könnte. Bender et al. (2019) fanden reduzierte Überlebenswahrscheinlichkeiten für alle Hauptbaumarten in Deutschland für 2050 und 2070 (verglichen mit dem Jahr 2000), wobei es deutliche regionale Unterschiede gab.

Bei der Interpretation solcher Projektionen sollte aber bedacht werden, dass sich die Artenzusammensetzung in Wirtschaftsbeständen durch entsprechende Förderung erwünschter Arten – innerhalb der physiologischen Möglichkeiten der Baumarten – recht deutlich vom simulierten Gleichgewichtszustand

unterscheiden kann. Simulierte Änderungen der Baumartenverbreitung sind somit noch mit deutlichen Unsicherheiten behaftet, bieten aber dennoch eine wichtige Orientierung für die Anpassung der Baumartenwahl im Klimawandel (Lindner et al. 2014). Unverzichtbar sind solche Simulationen beispielsweise für Empfehlungen zu Waldentwicklungstypen unter dem Klimawandel, die in einigen Bundesländern standortsabhängig vorgelegt wurden (z. B. das Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen, MULNV NRW 2019).

### 1.2.1.3 Veränderungen der Störungsregime und Naturgefahren

Ökologische Störungen sind natürliche Phänomene in Waldökosystemen. Während sich das Konzept von Stress<sup>2</sup> auf einzelne Organismen bezieht, beziehen sich Störungen auf Populationen, Gemeinschaften und Ökosysteme. Sowohl Stress als auch Störungen können zu einer Abweichung von den „normalen“ Lebensfunktionen (z. B. Wachstum, Verhalten, Bewegung oder Prozessraten) von Individuen und somit der Beiträge von Individuen, Populationen und Gemeinschaften zur Funktion und Leistung von Ökosystemen führen. Störungen können allgemein bezeichnet werden als „zeitlich und räumlich diskrete Ereignisse, die zur Reduktion bzw. dem Verlust von lebender Biomasse führen und die Verfügbarkeit von Ressourcen in Lebensgemeinschaften verändern“ (Jentsch et al. 2019).

Wenn Stressereignisse (wie z. B. Dürren) so stark sind, dass die Stressbewältigungsmechanismen von Pflanzen überlastet werden und es zur Mortalität von Organen oder ganzen Pflanzen kommt, werden diese zu Störungen. Die Eigenschaft oder der Prozess des Ökosystems, der durch die Störung gestört oder verändert wird, kann z. B. einfach die Biomasse sein, die teilweise oder vollständig abgetötet wird. Der Verlust pflanzlicher Biomasse bzw. ihre Überführung in Nekromasse ist eine Variable, die in den meisten terrestrischen Ökosystemen relativ gut erfasst werden kann. Das Ausmaß der Störung auf das Ökosystem könnte jedoch auch auf andere Weisen gemessen werden, z. B. der Verlust von Arten oder die Veränderungen von Nährstoffkreisläufen.

Ein „Störungsregime beschreibt die zeitliche und räumliche Dynamik aller in einer Landschaft wirkenden Störungen sowie ihrer Interaktionen über einen längeren Zeitraum hinweg“ (Jentsch et al. 2019). Ökologische Störungen können von kleinen, durch das

Absterben eines einzelnen Baumes verursachten Störungen bis hin zu großen, bestandeserneuernden und standortverändernden Ereignissen wie Stürmen, intensiven Bränden und Kalamitäten von herbivoren Insekten reichen. Störungsregime, denen bestimmte Waldökosysteme ausgesetzt sind, werden typischerweise durch die Art der Störung (z. B. Feuer, Windwurf, Überschwemmung, Insektenmassenvermehrungen usw.), ihre Intensität, die räumliche Ausdehnung sowie die Häufigkeit und Zufälligkeit ihres Wiederauftretens charakterisiert (Pickett und White 1985, Attiwill 1994).

Störungen sind allgegenwärtig, sie sind ein inhärenter und unvermeidbarer Bestandteil von Ökosystemen und ihrer Dynamik und wichtig für die Funktion und Integrität von Ökosystemen (Wohlgemuth et al. 2019). Einheimische Waldarten haben sich mit den vorherrschenden Störungsregimes entwickelt und Mechanismen entwickelt, um Störungen zu widerstehen, sich von Störungen zu erholen oder von ihnen zu profitieren (Attiwill 1994). Mit dem Klimawandel und anderen Auswirkungen des globalen Wandels wie der Verschleppung von Arten verändern sich auch die Störungsregime, denen die Wälder ausgesetzt sind. Daher besteht die Befürchtung, dass Waldökosysteme entweder neue Arten von Störungen oder intensivere oder häufigere Störungen erfahren könnten, als sie es in der Vergangenheit erlebt haben (Dale et al. 2001). Diese neuen Störungsregime könnten bisher nicht gekannte Folgen für das Funktionieren von Waldökosystemen und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen haben (Millar und Stephenson 2015, Trumbore et al. 2015).

Ökologische Störungen entstehen dann, wenn die Wirkung eines Störungsfaktors (z. B. Sturm, Feuer, Trockenheit) einen Schwellenwert der spezifischen Resistenz gegenüber dem jeweiligen Störungsfaktor überschreitet. Das Auftreten von Störungen hängt somit auch von dynamischen Ökosystemeigenschaften ab. So steigt zum Beispiel mit der Baumhöhe die Wahrscheinlichkeit, dass ein Sturm mit bestimmter Windstärke Bäume oder ganze Waldbestände an einem bestimmten Standort entwurzelt oder bricht (z. B. Albrecht et al. 2012).

Wie bereits in Kapitel 1.1 dargelegt, verändern sich die Häufigkeit und Intensität einiger abiotischer Störungsfaktoren wie Trockenheit und Hitze, während für mögliche Trends anderer klimatischer Störungsfaktoren wie Stürme oder Starkregen bisher keine

---

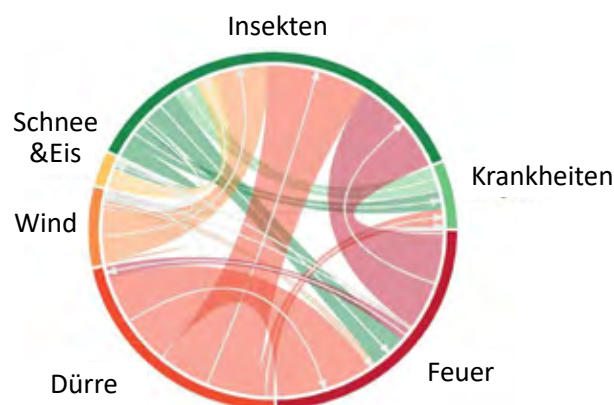
<sup>2</sup> Stress ist jeder ungünstige Zustand oder jede ungünstige Substanz, die den Stoffwechsel, das Wachstum oder die Entwicklung einer Pflanze beeinflusst oder blockiert (Lichtenthaler 1998). Bei Pflanzen kann Stress durch viele abiotische und biotische Faktoren verursacht werden, wie z. B. sehr niedrige oder sehr hohe Temperaturen und Wasserverfügbarkeit, Mineralstoffdefizite, Verbiss sowie Schadorganismen und Krankheitserreger.

verlässlichen Angaben gemacht werden können. Auf der Grundlage eines Ensembles von Klimawandel-Szenarien stellten (Seidl et al. 2014) fest, dass die Schäden durch Wind, Borkenkäfer und Waldbrände in Europa bis 2030 wahrscheinlich weiter zunehmen werden. Den größten Anteil daran haben Stürme. Diese zunehmenden Störungen haben einen großen Einfluss auf wichtige Ökosystemleistungen. So schätzen die Autoren die störungsbedingte Verringerung des Kohlenstoffspeicherpotenzials europäischer Wälder in den Jahren 2021 – 2030 auf 503,4 Mio t C.

### Interaktionen zwischen Störungsfaktoren

Um die Auswirkung der Änderungen des Auftretens der für Wald relevanten Störungen im Klimawandel einzuschätzen, ist ein Verständnis der indirekten Effekte und Interaktionen zwischen diesen Störungen wichtig. So schätzen Seidl et al. (2017) auf Grundlage

einer umfassenden Literaturstudie, dass über alle Störungsfaktoren hinweg, die direkten klimatischen Effekte 57% der Störungen verursachen, während jeweils 25 und 18% der Störungen auf indirekte Effekte und Interaktionen zwischen Störungen zurückzuführen sind. Indirekte Auswirkungen wurden in dieser Studie verstanden als Änderungen des Störungsregimes durch Klimaauswirkungen auf die Vegetation und andere Ökosystemprozesse, die nicht direkt mit den Störungen in Zusammenhang stehen. Dazu gehören klimabedingte Veränderungen des Baumbestands und der Artenzusammensetzung, die z. B. Änderungen der Störungsanfälligkeit durch eine Veränderung der Zusammensetzung, Höhe, und Dichte der Wälder bewirken. Interaktionseffekte wurden als miteinander verbundene oder sich gegenseitig verstärkende Beziehungen zwischen Störungsfaktoren definiert, z. B. ein erhöhtes Risiko von Borkenkäfermassenvermehrungen infolge von Sturmwürfen.



**Abb. 20:** Interaktionen zwischen Störungsfaktoren (Seidl et al. 2019b). Die Größe des Sektors im äußeren Kreis gibt die Verteilung der Interaktionen in der berücksichtigten Literatur wieder, während die Flüsse durch das Zentrum des Kreises die relative Bedeutung der Interaktionen zwischen den einzelnen Störungsfaktoren veranschaulichen. Die Pfeile zeigen die Richtung des Einflusses an.

Wärmere und trockenere Bedingungen begünstigen insbesondere Störungen durch Feuer, Dürre und Insekten, während wärmere und feuchtere Bedingungen Störungen durch Wind und Krankheitserreger verstärken. Die vielfachen Wechselwirkungen zwischen den Störungsfaktoren dürften die Störungen verstärken, während indirekte Klimaauswirkungen wie Veränderungen der Vegetation (andere Arten, andere Mischungsformen, geringere Wuchshöhen) langfristig die Empfindlichkeit gegenüber klimawandelbedingten Störungen reduzieren können (Seidl et al. 2017). Die Borkenkäfermassenvermehrungen der Trockenjahre 2018 und 2019 sind ein markantes Beispiel für diese Interaktionen. Trockenperioden, die zum Vertrocknen der Vegetation, insbesondere des Unterwuchses, führen, erhöhen die Menge leicht brennbaren Materials und somit das Waldbrandrisiko.

### Stürme

Selbst bei einer unveränderten Frequenz und Intensität von Winterstürmen, kann mit einem größeren Ausmaß von Störungen gerechnet werden, denn diese sind zu einem erheblichen Anteil auf die hohen und bisher noch weiter steigenden Holzvorräte, Durchschnittsalter und Bestandeshöhen in europäischen Wäldern zurückzuführen (z. B. Usbeck et al. 2010, Forzieri et al. 2021). Der beobachtete Anstieg der Windschäden in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts war in etwa zur Hälfte durch Veränderungen des Alters, Vorrats und der Baumartenzusammensetzung geschuldet (Seidl et al. 2011). Die größten Sturmschäden traten in den Nadelwäldern der Mittelgebirge auf.

Ob Störungen durch Stürme in Zukunft zunehmen,

hängt auch von der Entwicklung der Wälder selbst ab. Bei weiter steigenden Vorräten und Bestandesaltern der Wälder, ein Trend der seit Beginn der Bundeswaldinventuren zu verzeichnen war, steigt auch die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sturmschäden. Sollte es durch eine Änderung der Waldnutzungsintensität oder die Zunahme anderer Störungen, wie den gegenwärtig verbreiteten Borkenkäferkalamitäten in Fichtenbeständen, zur Abnahme der Vorräte, insbesondere bei windwurfgefährdeten Baumarten kommen, könnten die Schäden durch Sturmwürfe auch abnehmen.

Inbesondere bei Stürmen spielen indirekte Effekte und Interaktionen mit anderen Störungsfaktoren eine wichtige Rolle für das Auftreten von Störungen (Seidl et al. 2017). Daher bieten sich hier auch viele Bewirtschaftungsoptionen, um das Sturmschadensrisiko zu reduzieren (z. B. Albrecht et al. 2012, Mason und Valinger 2013) (siehe Kap. 3.1.3).

Große Sturmwürfe in Nadelwäldern führen durch die Bereitstellung einer großen Menge an Brutmaterial häufig zu einer Massenvermehrung von Borkenkäfern. Die großen Stürme Vivian/Wiebke und Lothar fanden zu Zeiten sehr niedriger Populationsdichten der Borkenkäfer statt und führten nachfolgend zu hohen Anstiegen der Borkenkäferpopulationen mit den entsprechend erhöhten Schadholzmengen in den 3–5 Jahren nach Sturm (z. B. Pertercord et al. 2008). Mit zunehmendem Trocken- und Hitzestress in Nadelwäldern steigt das Risiko, dass Sturmwürfe zu Zeiten von bereits sehr hohen Populationsdichten der Borkenkäfer auftreten (wie Sturm Sabine Anfang 2020) und somit die Massenvermehrungen und Borkenkäferschäden noch weiter verstärken.

### Dürre

Extremwetterlagen mit langanhaltender Trockenheit sind in den letzten Jahren in Mitteleuropa gehäuft aufgetreten (z. B. Mann et al. 2018). Trockenstress wirkt sich direkt auf das Baumwachstum aus, da Stomata länger geschlossen bleiben und die Bäume weniger Kohlenstoff assimilieren können. Als Folge von Wasserstress reagieren Bäume mit früher Blattverfärbung, vorzeitiger Blattseneszenz sowie mit Blattverlust im Folgesommer (Schuldt et al. 2020, Mette und Falk 2020). Auch die Jahrringbreite wird nachweislich negativ vom Wassermangel im Waldboden beeinflusst. Die Altlasten der Dürre von 2018, begleitet von anhaltend niedriger Bodenfeuchte und wiederum überdurchschnittlich hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen im Frühjahr/Sommer 2019, führten zu starken Wachstumseinbußen bei Buche, Eiche, Ahorn und Birke auf Versuchsflächen in Nord-Ostdeutschland in diesem Jahr (Scharnweber et al. 2020).

Mit steigendem Wasserdefizit im Boden erhöht sich das Risiko von Lufteinschlüssen im wasserleitenden Xylem, die den Transpirationsfluss im Baum unterbinden und letztlich zum Absterben führen können (Breda et al. 2006, Allen et al. 2010). Die jüngste Trockenperiode der Jahre 2018 und 2019 löste bereits eine beispiellose Mortalität bei vielen ökologisch und ökonomisch wichtigen Baumarten der gemäßigten europäischen Wälder aus (Schuldt et al. 2020). Eine deutlich erhöhte Mortalität trat nicht nur bei Arten wie der Fichte auf, wo dies aufgrund des verbreiteten Anbaus außerhalb ihres ursprünglichen Verbreitungsgebiets, eines flachen Wurzelsystems und einer hohen Anfälligkeit für sekundäre Schadinsekten wie Borkenkäfer eher zu erwarten ist (Christiansen und Bakke 1988, Grodzki et al. 2004, Schuldt et al. 2020). Die heimische Rotbuche ist bekanntermaßen empfindlich gegenüber Trockenheitseffekten (z. B. Gessler et al. 2007, Leuschner 2020), das Ausmaß des standortspezifischen massiven Kronensterbens und der anschließenden Mortalität der Rotbuche in verschiedenen Teilen Mitteleuropas war jedoch deutlich stärker ausgeprägt als in bisherigen Trockenjahren (z. B. Schuldt et al. 2020).

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, nimmt in Zukunft die Wahrscheinlichkeit für extreme Trockenphasen in Kombination mit Hitze zu. Ähnlich wie bei Stürmen ist auch bei extremer Trockenheit das Risiko von Störungen durch eine Reihe von indirekten Faktoren beeinflusst. Dazu gehören die Baumartenzusammensetzung sowie Bestandesdichte und -höhe (z. B. Cescatti und Piutti 1998, Guiggioloa et al. 2013, Grossiord 2020). Da größere Bäume einen höheren hydraulischen Widerstand überwinden müssen, um die Blätter mit Wasser zu versorgen, geraten sie früher und stärker unter Wasserstress als kleinere Bäume der gleichen Baumart am gleichen Standort (Ryan und Yoder 1997).

Hohe Bäume mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit und großer Blattfläche haben daher die höchste Wahrscheinlichkeit zukünftig an Trockenstress zu sterben (McDowell und Allen 2015). Das Höhenwachstum bzw. die erreichbare Endhöhe der Bäume spiegelt u. a. die Wasserversorgung der Standorte wider, d. h. das Höhenwachstum wird bis zu einer hydraulischen Grenze ausgereizt. Daher können auch alle Wälder, unabhängig von der absoluten Höhe der durchschnittlichen Wasserverfügbarkeit, potenziell von Trockenstress betroffen sein. Die globale Verbreitung trockenstressbedingter Mortalität über alle Biome hinweg macht dies deutlich (Allen et al. 2010). Daher sind Störungen durch Dürre dort zu erwarten, wo es die größten negativen Veränderungen der Wasserverfügbarkeit gibt und nicht unbedingt dort, wo es absolut am trockensten ist. Um Risikoregionen und -bestände zu identifizieren sind daher regional hoch aufgelöste



Modelle des Klimawandels erforderlich.

Trockenstress kann zudem die Wirkung anderer Störungsfaktoren verstärken (Abb. 20). Indirekte Auswirkungen von Wassermangel sind u. a. die verringerte Abwehrkraft gegenüber phytophagen Insekten und Pathogenen und erhöhte Waldbrandgefahr. Als wechselwarme Tiere profitieren Insekten sowohl von den höheren Temperaturen (die in trocken-heißen Phasen auftreten) als auch von den gestressten Pflanzen, deren Abwehrmechanismen gegenüber Schadinsekten geschwächt sind. So kann z. B. der extrem erhöhte Borkenkäferbefall von Fichten u. a. mit vermindertem Harzfluss der trockengestressten Fichten begründet werden (z. B. Netherer et al. 2015).

## Feuer

Waldbrände sind in den temperierten Wäldern Mitteleuropa von Natur aus selten und Entzündung durch Blitzschlag ist eher ungewöhnlich (Kraus et al. 2019); die weit überwiegende Anzahl von Vegetationsbränden sind von Menschen verursacht durch Fahrlässigkeit (z. B. durch Zigaretten oder Lagerfeuer), technische Quellen (z. B. Funkenflug an Bahnschienen), oder gezielte Brandstiftung. Neben einer Zündquelle sind brennbare Biomasse und der Feuerausbreitung förderliche Witterungsbedingungen wesentliche, das Waldbrandrisiko beeinflussende Faktoren. Vegetationsbrände können bei Temperaturen bis 40 °C und starken Winden schnell unkontrollierbar werden.

Besonders waldbrandgefährdet sind jüngere und lichte Nadelwälder, insbesondere Kiefernwälder auf Sandböden, mit dichter und üppiger Bodenvegetation, z. B. mit geschlossenen Grasdecken. Im langjährigen Durchschnitt sind Nadelholzbestände deutlich überproportional zu ihrem Anteil an der deutschen Waldfläche von Waldbränden betroffen (UBA 2020a). Potenziell riskant sind auch Borkenkäfer-Schadflächen mit großen Mengen abgestorbener leicht entzündlicher Biomasse (Mitze 2020). Im Bielowieza Waldschutzgebiet in Polen erhöhte sich in den ersten 1–4 Jahren nach großräumigen Borkenkäferschäden die Brandgefahr, insbesondere auf vergrasteten Flächen (Szczygieł et al. 2016).

Das Brandrisiko verändert sich sehr dynamisch mit der Beschaffenheit und Zersetzung der abgestorbenen Kronen und des Feinreisigs. Die Menge von stärkerem Totholz, insbesondere in fortgeschrittenen Zersetzungsstadien, trägt hingegen nicht oder nur unwesentlich zum Brandrisiko bei (Kraus et al. 2019, Hood 2020).

Aufgrund klimatischer und hydrologischer Gegebenheiten sowie der vorherrschenden Baumarten ist die Auftretenswahrscheinlichkeit regional sehr unterschiedlich. Am häufigsten sind die Kiefernregionen

Nordostdeutschlands, des östlichen Nordwestdeutschlands und des Oberrheinischen Tieflands betroffen. Durch Extremwetterlagen mit andauernder Trockenheit und Hitze hat es in den letzten Jahren vermehrt Perioden mit extrem hoher Waldbrandgefahr gegeben. In den Jahren 2018 und 2019 gab es deutschlandweit mit 2.349 ha und 2.711 ha eine deutlich größere Waldbrandfläche als im langjährigen Mittel von 812 ha für den Zeitraum 1991–2019. Allein 2019 führten die Waldbrände zu einem geschätzten Schaden von rund 2,22 Mio. Euro (BLE 2020).

Für die kommenden Jahrzehnte wird aufgrund steigender Temperaturen und zurückgehenden Niederschlägen in den Frühjahrs-, Sommer- und Herbstmonaten vielerorts ein steigendes Waldbrandrisiko auch für Deutschland vorausgesagt (UBA 2020a). Durch die Klimaänderung verlängert sich die Feuersaison mit besonderen Problemzeiten im Frühjahr vor dem Austrieb der Bodenvegetation und im Hochsommer. Während Projektionen des Waldbrandrisikos zwischen Klimamodellen deutlich variieren (Glade et al. 2017), lassen neue Erkenntnisse zur Zunahme von stationären Rossby-Wellen im globalen Wettersystem vermuten, dass sich Wetterextreme wie im Sommer 2018 häufen könnten (Kornhuber et al. 2019), so dass auch häufigere Phasen mit entsprechend erhöhtem Waldbrandrisiko auftreten. Schäden durch Waldbrände könnten daher in Zukunft in Deutschland und anderen Gebieten Mittel- und Nordeuropas ansteigen.

## Schadorganismen und Waldkrankheiten

Der Klimawandel hat direkte und indirekte Auswirkungen auf Insekten und Pathogene, die zu einer deutlichen Veränderung des biotischen Störungsregimes führen können. Indirekt werden veränderte Temperatur- und Niederschlagsregime die räumliche Verteilung von Wirtsbäumen und deren Eignung für herbivore Insekten und Pathogene beeinflussen, zum Beispiel weil die Abwehrkräfte der Wirtsbäume beeinträchtigt werden oder weil phänologische Anpassungen (z. B. zum Entfalten der Knospen) gestört werden (Baltensweiler 1993, Anderegg et al. 2015). Interaktionen von Pathogenen, Pilzen, natürlichen Feinden und Konkurrenten, die den Erfolg von Insektenpopulationen beeinflussen, werden ebenfalls durch klimatische Veränderungen beeinflusst und haben damit sowohl positive als auch negative indirekte Auswirkungen auf Ausbrüche von Waldinsekten und Pathogenen (Sturrock et al. 2011, Kalinkat et al. 2015, Kolb et al. 2016).

Die Temperatur hat einen direkten Einfluss auf viele Lebensfunktionen und Entwicklungsphasen von Insekten wie die Diapause, Entwicklung der Frosttoleranz und die gesamte Entwicklungszeit, die wiederum die Populationsentwicklung beeinflussen (z. B.

Bentz und Jönsson 2015). So kommt es in warmen Jahren bereits heute zu einem frühzeitigeren Auftreten, höheren Vermehrungsraten, verkürzten Entwicklungszeiten sowie der Ausbildung von zusätzlichen Generationen und Geschwisterbruten beim Buchdrucker-Borkenkäfer, *Ips typographus* (Krengel und Seidel 2016).

Generell können kürzere Generationszeiten von Waldinsektenarten zu einer erhöhten Baum mortalität führen (Ramsfield et al. 2016). Steigende Temperaturen können dazu beitragen, wenn die Diapause abgewendet wird, wie für mehrere Gilden eurasischer und nordamerikanischer Waldinsektenarten beschrieben wurde (z. B. Battisti et al. 2000, Lange et al. 2006, Faccoli 2009, Bentz und Jönsson 2015).

Auch wenn das Abwenden der Diapause für das Populationswachstum vieler Waldinsekten vorteilhaft ist, können wärmere Temperaturen auch zu einer Desynchronisierung des Lebenszyklus führen, was z. B. zu kalteunverträglichen Entwicklungsstadien im Winter und infolge zu einer höheren Insektensterblichkeit und reduziertem Populationswachstum führt (Faccoli 2002, Wermelinger et al. 2011). Neben Verkürzungen der Generationszeit können steigende Minimaltemperaturen Populationen von der Einschränkung durch periodische extreme Kälte befreien und zu einer Ausdehnung des Verbreitungsgebiets nach Norden und in höhere Lagen beitragen (Weed et al. 2013).

Neben dem Einfluss der Temperatur ist Trockenheit einer der wichtigsten klimatischen Faktoren, der die Anfälligkeit von Wirtsbäumen für herbivore Insekten beeinflusst, denn eine reduzierte Wasserverfügbarkeit beeinträchtigt vielfach die Abwehrkräfte und Vitalität der Bäume (Jactel et al. 2012, Netherer et al. 2015). Da die Umweltbedingungen eine kritische Steuergröße in Befalls- und Ausbreitungsprozessen von Waldkrankheiten sind, ist neben einer Zunahme des Trockenstresses für Wirtsbäume auch mit einer Zunahme von schädlichen Effekten durch Pathogene und deren Interaktionen mit Insekten wahrscheinlich (Sturrock et al. 2011, Kolb et al. 2016).

Zusätzlich zum Klimawandel birgt auch die Ausweitung des globalen Handels über die damit verbundene Einschleppung nicht-heimischer Arten ein zusätzliches Risiko für Wälder (z. B. Liebhold et al. 1995, Roques et al. 2009). Einige dieser Arten haben erhebliche schädliche ökologische und ökonomische Auswirkungen auf Bäume in natürlichen und bewirtschafteten Ökosystemen. Invasive Krankheitserreger wie jene, die die Ulmenkrankheit oder das Eschensterben verursachen, können Ausrottungskaskaden für alle anderen Arten auslösen, die von diesen Baumarten abhängen (z. B. Hultberg et al. 2020). Einschleppte Pilze wie *Phytophthora ramorum* verursachen das Absterben und die Mortalität einer breiten

Palette von Baumarten in Europa und Nordamerika (Grünwald et al. 2012).

Wechselwirkungen mit dem Klimawandel werden die Auswirkungen von eingeschleppten Schadorganismen und Krankheiten auf die europäischen Wälder wahrscheinlich noch verstärken (Seidl et al. 2018), denn der Klimawandel kann sowohl die Ausbreitung einheimischer als auch exotischer Schadorganismen und Krankheitserreger begünstigen und gleichzeitig die Resistenz der Bäume gegen Schadorganismen beeinträchtigen (Jactel et al. 2012, Anderegg et al. 2015). Daher können wir insgesamt von einer Zunahme der biotischen Störungen in europäischen Wäldern ausgehen.

### 1.2.1.4 Auswirkungen auf die Biodiversität und ihre Funktionen

Die Verbreitung und die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften sind in hohem Maße vom Klima geprägt. Daher können sich Klimaänderungen direkt auf die Biodiversität und ihre Funktionen auswirken. Zudem reagieren Arten nicht isoliert auf den Klimawandel, sondern interagieren mit anderen Arten. Entsprechend können sich Klimaänderungen auch auf indirektem Wege auswirken, etwa durch das Fehlen von Interaktionspartnern, die Konkurrenz mit invasiven Arten oder die Veränderung der Waldstrukturen.

### Erfassung von Klimaänderungen durch die Phänologie

Zur Erfassung des Einflusses von Klimaveränderungen auf die Biodiversität lässt sich die Phänologie von Arten heranziehen. Sie beschreibt, wie saisonale und interannuelle Schwankungen von Klima- und weiteren Lebensraumfaktoren periodische Ereignisse im Lebenszyklus von Pflanzen und Tieren antreiben und ist für den Erfolg von Arten in ihren Lebensräumen von entscheidender Bedeutung. Verschiebungen in der Phänologie von Arten haben offensichtliche Auswirkungen auf Prozesse innerhalb von Populationen, Arten, Interaktionen zwischen Arten, die Organisation von Gemeinschaften (Hutchinson 1961), auf die Biodiversität (Shimadzu et al. 2013) und die Ökosystemfunktionen (Cleland et al. 2007).

Der Klimawandel verändert nicht nur die Mittelwerte der klimatischen Variablen wie Temperatur und Niederschlag, sondern auch deren jahreszeitliche Variation und die Häufigkeit von Extremwetterereignissen (z. B. Spätfröste, Dürren). Obwohl Aufzeichnungen von phänologischen Ereignissen in Ostasien bis zu 5000 Jahre zurückreichen (Chen 2003), ist das Verständnis der ökologischen Auswirkungen von Veränderungen der Phänologie auf Populationen, Gemeinschaften

und deren Funktionen in Ökosystemen nach wie vor begrenzt (Thackeray et al. 2016, Visser 2016). Das Verständnis und die Vorhersage der Phänologie von Arten unter den Bedingungen des Klimawandels sind relevant, um die Erfassung der Dynamik von Gemeinschaften und ihrer Reaktionen auf den Klimawandel zu verbessern und damit die Genauigkeit von Vorhersagen etwa der Produktivität von Ökosystemen unter dem Klimawandel zu erhöhen und schlussendlich zu helfen, Bewirtschaftungsstrategien an den Klimawandel anzupassen (Cleland et al. 2007).

### **Direkte Auswirkungen von Klimaänderungen auf Biodiversität**

#### **Phänologie**

Jahrzehntelanges Biodiversitätsmonitoring (z. B. Peñuelas und Filella 2001, Thackeray et al. 2016) deutet darauf hin, dass der aktuelle Klimawandel bereits phänologische Muster beeinflusst, darunter auch Verschiebungen im zeitlichen Ablauf von Lebenszyklus-Ereignissen von Pflanzen und Tieren (für eine Meta-Analyse siehe Parmesan und Yohe 2003). Gerade langlebige Organismen wie Bäume nutzen in Wäldern der gemäßigten Klimazonen hauptsächlich Strahlungs- und Temperaturunterschiede und die Tageslänge als Umweltsignale für chronobiologische Reaktionen auf phänologische Veränderungen wie etwa der Blüte, der Fruchtbildung, des Knospenaufbruchs und der Blattseneszenz (Ding und Nilsson 2016, Simons et al. 2020). In Mitteleuropa wurde eine fortschreitende Phänologie der Pflanzenentwicklung festgestellt, z. B. eine verlängerte jährliche Wachstumsaison von Bäumen (Menzel und Fabian 1999) oder die frühere Blüte von Frühlingspflanzen (Sparks et al. 2009).

Auch die Lebenszyklus-Ereignisse von Tieren zeigen Veränderungen wie etwa eine frühere Rückkehr von Vogelarten aus den Überwinterungsgebieten als noch vor einigen Jahrzehnten (Mitrus et al. 2005) oder gar deren ganzjährigen Verbleib im Brutgebiet. Ähnliche jahreszeitliche Verschiebungen konnten auch im annualen Kreislauf der Amphibien gezeigt werden, etwa durch früheres Abwandern aus den Winterquartieren und früheres Abbläuen sowie der Einfluss des Klimawandels auf Fitness und Aufkommen der Amphibienlarven (z. B. Reading 2007, Rödder und Schulte 2010, Scott et al. 2008).

Diese exemplarischen Beispiele für eine Vielzahl an beobachteten Veränderungen machen deutlich, dass Arten direkt vom Klimawandel beeinflusst werden. Verschiebungen in der Phänologie werden daher stellvertretend als eine der offensichtlichsten Auswirkungen des Klimawandels auf die gesamte Biodiversität angesehen. Daher gehört die Phänologie zu den

wesentlichen Biodiversitätsvariablen (Essential Biodiversity Variables, EBV), die als Maß und für das Monitoring, die Berichterstattung und das Management von Biodiversitätsveränderungen erforderlich ist (Peireira et al. 2013).

### **Direkte Auswirkungen von Erwärmung auf die Verbreitung von Arten**

Langjährige Monitoringdaten zeigen bereits deutlich, dass es aufgrund der Klimaerwärmung zur Verschiebung von Verbreitungsgebieten kommt, wie etwa von Tagfaltern (Parmesan et al. 1999) oder auch der Stechpalme oder der Lorbeerkirsche (Walther et al. 2001). Gerade in Deutschland, in der temperaten Zone, führt ein Anstieg der Temperatur für viele Insektenarten zu besseren Lebensbedingungen. So haben verschiedene Tothholzkäferarten unter wärmeren Bedingungen geringere Ansprüche an ihre Ressource Holz (Müller et al. 2015). Eine Art wie der Eichenheldbock ist in Mitteleuropa noch an dicke Eichen gebunden, während die Art im mediterranen Raum unter warmen Bedingungen auch schwächere Eichen besiedelt (Buse et al. 2007).

Bei einer Reihe bedrohter Arten wird die aktuell beobachtete Ausbreitung daher auf die Erwärmung zurückgeführt (Buse et al. 2013, Köhler 2010). Folglich sind weitere Änderungen der Zusammensetzung von Artgemeinschaften, z. B. durch potenzielle Wanderung von derzeit gebietsfremden Arten in klimatisch passende Gebiete zu erwarten (Pompe et al. 2008). Die Prognose von zukünftigen Artgemeinschaften ist allerdings sehr komplex, da zukünftige Interaktionen schlecht vorhersagbar sind. Das liegt auch darin begründet, dass zahlreiche Arten aufgrund spezifischer Habitatansprüche nicht in der Lage sind, ihr Verbreitungsgebiet zu verschieben. Für Hummeln etwa wurden starke Rückgänge in der Verbreitung beobachtet (Kerr et al. 2015). Ein weiteres Beispiel sind Arten der subalpinen Zone, wie z. B. die Ringdrossel, deren europaweiter Bestandsrückgang auf die Erwärmung zurückgeführt wird (von dem Bussche et al. 2008).

### **Indirekte Auswirkungen von Klimaänderungen auf Biodiversität**

#### **Entkopplung von Interaktionen durch Klimawandel**

Richtung, Ausmaß und Zeitpunkt der Klimasensitivität variieren deutlich zwischen den Arten (Thackeray et al. 2016). Arten reagieren nicht einheitlich auf Veränderungen der Saisonalität, weil die Phänologie einer einzelnen Art von verschiedenen Merkmalen bestimmt wird und in unterschiedlichem Ausmaß mit nicht-klimatischen Umweltfaktoren wie der

Photoperiode interagiert (Edwards & Richardson 2004). Zudem reagieren Arten nicht isoliert auf den Klimawandel – sie interagieren mit anderen Arten auf denselben oder benachbarten trophischen Ebenen (Harrington et al. 1999), wodurch Veränderungen der phänologischen Synchronisation interagierender Arten entstehen können (Both et al. 2009, McMahon et al. 2011). So wurde etwa beim Trauerschnäpper beobachtet, dass die zur gewöhnlichen Zeit aus den Winterquartieren zurückkommenden Individuen auf bereits zu weit fortgeschrittene Raupenentwicklungen auf Grund hoher Temperaturen im Frühjahr treffen, was zu Nahrungsmangel bei der Jungenaufzucht und folglich zur Populationsabnahme von Trauerschnäppern geführt hat (Both et al. 2006). Eine solche Entkopplung zwischen interagierenden Arten kann auch räumlich auftreten, etwa wenn Verbreitungsgebiete von Schmetterlingen und ihren Wirtspflanzen aufgrund von klimatischen Veränderungen nicht mehr überlappen (Schweiger et al. 2008). Der Verlust von Pflanzenarten ist häufig der Auslöser für das Aussterben von Tieren (Schleuning et al. 2016).

### Konkurrenz mit invasiven gebietsfremden Arten

Der Klimawandel fördert die Ausbreitung nicht-einheimischer und auch invasiver Arten (Kleinbauer et al. 2010, Tobin et al. 2013). Mildere Wintertemperaturen fördern beispielsweise die Ausbreitung und Etablierung von Arten aus wärmeren Regionen (Walther et al. 2007, Tobin et al. 2013). Samen von immergrünen Zierbäumen/Laubbaumarten aus Gärten und Parkanlagen werden zunehmend in Wälder ausgebreitet, wo seit den 1970er Jahren Jungpflanzen in der Krautschicht nachgewiesen wurden (Walther et al. 2007). Neben der Ausbreitung von invasiven Arten begünstigt der Klimawandel auch die Einschleppung von Krankheiten, die durch diese Arten mitgebracht werden. So ist etwa die Asiatische Tigermücke Trägerin von Krankheiten wie des Dengue-, Chikungunya und des West-Nil-Fiebers (Pluskota et al. 2016). Zudem ermöglichen erhöhte Temperaturen das Bilden zusätzlicher Generationen bei vielen Insekten im Jahresverlauf (Tobin et al. 2013, Becker et al. 2017) wie etwa für den Buchsbaumzünsler in Mitteleuropa gezeigt wurde (Baur et al. 2019). Während dieser normalerweise zwei Generationen pro Jahr ausbildet, könnten in sehr warmen Sommern bereits drei Generationen beobachtet werden (Baur et al. 2019).

### Ressourcenveränderung durch erhöhte Störungsfrequenz

Der Lebenszyklus von Wäldern umfasst verschiedene Sukzessionsphasen, die durch unterschiedliche

Artengemeinschaften charakterisiert sind. Dabei zeigen sich vor allem frühe und sehr späte Phasen durch eine hohe Vielfalt der meisten Artengruppen aus. Daneben zeigen die verschiedenen Phasen jeweils eigene Lebensgemeinschaften. Viele Arten in Wäldern sind gerade auf frühe Sukzessionsphasen angewiesen (Hilmers et al. 2018), etwa wenn sie als Pionierarten offene Standorte benötigen. Stürme und starke Insektenvermehrungen schaffen zunehmend solche lichten Waldstrukturen, erhöhen das Totholzangebot und fördern somit die Pflanzenvielfalt in Wäldern. Zunehmende Störungsfrequenzen erhöhen entsprechende offene Strukturen, die in den letzten 200 Jahren für viele Waldarten limitiert waren. So war der über ein Jahrzehnt beobachtete Rückgang der Insekten in Wäldern mit Störungsflächen am geringsten (Seibold et al. 2019).

Für viele Arten ist neben der lokalen Komplexität der Waldstrukturen auch die Landschaftskomposition für ihr Vorkommen ausschlaggebend (Schall et al. 2017). Dies gilt insbesondere dann, wenn verschiedene Waldlebensräume in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus einer Art genutzt werden, z. B. Entwicklung in schattigem Totholz, Paarung hingegen auf besonnten Blüten.

Als Störungsereignisse gelten beispielsweise auch Spätfröste, die etwa die Blüte oder Fruchtbildung stören oder zerstören und somit auch zu wirtschaftlichen Verlusten führen (Gu et al. 2008, Kreyling et al. 2011). Neben den direkten Auswirkungen konnten auch indirekte, negative Auswirkungen des Frostes auf die Pflanzenreproduktion durch Veränderungen der Blütenmerkmale und des Bestäuberbesuchs gezeigt werden, was darauf hindeutet, dass Frost eine wichtige Rolle beim Einfluss des Klimawandels auf Pflanzengemeinschaften und ihre Interaktionen spielen könnte (Pardee et al. 2017).

Ein zweiter, indirekter Effekt des Klimawandels ist aber eine höhere Frequenz solcher Störungen (siehe Kap. 1.2.1.3). Sie führt zu mehr Lücken im Wald, toten Bäumen und Bäumen mit reduzierter Vitalität. Dies ist ein Zustand, der für die Vielfalt vieler Artengruppen zunächst förderlich ist (Albrecht et al. 2013, Heidrich et al. 2020, Hilmers et al. 2018), sofern Baumarten nicht völlig aus dem System verschwinden (z. B. Hultberg et al. 2020). Die vermehrte Verfügbarkeit von offenen Lebensräumen erhöht beispielsweise die Anzahl der Insektenpartner bei der Bestäubung (Albrecht et al. 2013). Die Partnerzahl bei der Samenausbreitung hingegen verzeichnete einen erheblichen Rückgang, welcher zumindest teilweise einem Verlust spezialisierter Arten zugeschrieben wird, die auf alte Waldbestände angewiesen sind (Albrecht et al. 2013, 2014).

## Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Funktionen der Wälder

Natürliche und bewirtschaftete Wälder bieten in ihren vielen verschiedenen Ausprägungen der Waldtypen, aber auch innerhalb der einzelnen Bestände zahlreiche Lebensräume für Tiere, Pilze und Pflanzen (Ratcliffe et al. 2017). Je artenreicher der Baumbestand und je vielfältiger das Spektrum an Strukturelementen, wie etwa alte und dicke Bäume, Totholz, das Angebot von Still- und Fließgewässern, die Variation zwischen Licht- und Schatten etc. ist, desto vielfältiger wird die Tier- und Pflanzenwelt sein (Ampoorter et al. 2020, Gamfeldt et al. 2013, Hilmers et al. 2018).

Ein Anstieg der Temperaturen fördert allgemein die Artenvielfalt, vor allem bei Insekten (Bässler et al. 2013). Artenvielfalt verbessert generell die Multifunktionalität ökologischer Prozesse (Hector und Bagchi 2007). Entsprechend sind die Interaktionen und ökologischen Funktionen von Wäldern eng mit deren Biodiversität verbunden (Albrecht et al. 2013, 2014) und der Verlust oder die Zunahme von Arten als Folge des Klimawandels ist eng assoziiert mit den Interaktionen wie etwa der Bestäubung, der Samenausbreitung oder der Herbivorie (Schleuning et al. 2016, Thom et al. 2017).

Die vermehrten Störungsereignisse im Zusammenspiel mit der zunehmenden Klimaerwärmung führen in vielen Fällen zu einer geringeren Resistenz von Bäumen gegenüber Insektenbefall und Waldkrankheiten führen (siehe Kap. 1.2.1.3.). Darüber hinaus sind insbesondere die Struktur und die Zusammensetzung des Nahrungsnetzes im Boden von zentraler Bedeutung für die Pflanzengesundheit (Duran et al. 2018) und die Zersetzung von Pflanzenmaterial und die Nährstoffrückführung ins Ökosystem (Heemsbergen et al. 2004). Steigende Temperaturen werden den Abbau beschleunigen (Gonzalez et al. 2008).

### 1.2.1.5 Veränderungen des Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalts

Der Nährstoffhaushalt von Waldökosystemen ist stark anthropogen beeinflusst. Klimawandel und extreme Witterungsereignisse wirken dabei in Kombination mit anhaltender atmosphärischer Deposition und Säureeinträgen. Spätestens seit der Diskussion um das Waldsterben wird der Nährstoffhaushalt von Waldökosystemen gut und kontinuierlich im Rahmen Europäischer (ICP Forests) und nationaler (Bodenzustandserhebung, BZE) Analysen und Monitoring-Programme untersucht. Säure-, Schwefel- und Stickstoffeinträge führen zur Auswaschung von Kationen wie Magnesium oder Kalium. Die Untersuchungen zeigen, dass dieses Problem mit dem in den letzten Dekaden

zu verzeichnenden Rückgang der Säureeinträge deutlich kleiner geworden ist (Riek et al. 2016, Prietzel et al. 2020). Stickstoffeinträge in Waldökosysteme sind jedoch immer noch sehr hoch (UBA 2015).

Eine europaweite Erhebung von 422 Waldbeständen liefert Hinweise dafür, dass Stickstoffeinträge auch den beobachteten Anstieg der Holzzuwächse mit erklären können (Etzold et al. 2020). Entsprechend dieser Untersuchung schlägt dieser Düngungseffekt über einem gewissen Schwellenwert des Stickstoffeintrags (zum Beispiel für Buche:  $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) allerdings in einen schädigenden Effekt um, der das Wachstum hemmt. Dies steht im Einklang mit der Beobachtung, dass sich in vielen Regionen die Verhältnisse von Stickstoff zu anderen Nährelementen in den Blättern und Nadeln der Bäume, die als Maß für N-induzierte Nährstoff-Ungleichgewichte gelten, vergrößert bzw. verschlechtert haben. Dies betrifft vor allem das Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor (Jonard et al. 2014, Talkner et al. 2015). Diese Einträge sind auch im Zusammenhang mit dem Klimawandel sowohl aus pflanzenphysiologischer Sicht als auch im Hinblick auf die N-Dynamik im Boden relevant.

Die Folgen von N-Einträgen auf die Widerstandsfähigkeit von Wäldern gegenüber Trockenheit sind Gegenstand aktueller Forschung (Millar und Stephenson 2015), die jedoch auch viele noch offene Fragen aufwirft. Eine Überversorgung der Pflanzen mit Stickstoff kann die Gefahr für hydraulischen Stress im pflanzlichen Gewebe erhöhen. Dieses Problem wird durch verringertes Wurzelwachstum bei hoher N-Verfügbarkeit noch weiter verstärkt werden. Andererseits verringert schlechte Nährstoffversorgung jedoch auch die Wassernutzungseffizienz der Pflanzen bei Trockenheit (Gessler et al. 2017).

Trockenheit verändert auch die Dynamik und reduziert Speicherkapazität von Stickstoff im Boden. Nach wiedereinsetzendem Niederschlag nach trocken-warmen Phasen kann es zu Mineralisierungsschüben und zur Auswaschung schnell freigesetzter Nährstoffe kommen (Brödlin et al. 2019). Bisher gibt es aber keine Hinweise auf einen deutschlandweiten, klimabedingten Trend bei der Nährstoffverfügbarkeit oder der Nährstoffauswaschung. Dies liegt neben dem komplexen Zusammenspiel vieler gegenläufiger Prozesse auch daran, dass parallel zur Veränderung des Klimas auch eine Veränderung der Art und Intensität der atmosphärischen Deposition stattfindet.

Im Falle gesteigerter Nachfrage nach Bioenergie kann die Entfernung von Kronenholz für die energetische Verwendung für Forstbetriebe attraktiver werden. Mit der Entfernung dieser Baumkompartimente ist ein nennenswerter Nährstoffentzug verbunden, da die Nährelementanteile in diesen Kompartimenten höher sind als im Industrie- und Stammholz (Block

et al. 2016, BFFF 2018). Dies gilt besonders für die Nährelemente Kalium und Phosphor, deren Gehalte in Ästen und in der Rinde weitaus höher sind als in den anderen Kompartimenten der Biomasse (Yanai et al. 1998, Ettl und Göttlein 2007, Meiwes 2013). Zusätzlich zur reinen Mengenbilanz von Kohlenstoff und der Nährelemente sind in diesem Zusammenhang auch komplexe ökologische Konsequenzen des Biomasseentzuges zu berücksichtigen, von deren Bedeutung bereits Ebermayer als einer der Urväter der Waldernährung überzeugt war (Ebermayer 1882, zitiert nach Kölling und Borchert 2013) und die von aktuellen Untersuchungen bestätigt wird (Lang et al. 2016).

In vielen europäischen Ländern wird eine verstärkte Vollbaumnutzung erwartet (Achat et al. 2015). In Deutschland hat man aber die Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung erkannt und sie in der forstlichen Praxis an eine Nachhaltigkeitssteuerung mittels Nährstoffbilanzierungen, Bodenvorratsbestimmungen und abgeleitete Indikatoren gekoppelt, so dass bei der forstlichen Planung die Nutzungintensitäten standortsabhängig und baumartenspezifisch angepasst und auch Vorsorge- und Kompensationsmaßnahmen differenziert durchgeführt werden können. Außerdem ist dabei zu beachten, dass der Entzug der gesamten Baumbiomasse bei der Ernte auch ökonomisch nicht nachhaltig ist, selbst wenn Äste und Zweige energetisch genutzt werden (Möhring und Rüping 2008). Gleichzeitig wird im Zuge des ökologischen Waldbaus in Deutschland der Erhalt von Totholz als wichtiger Lebensraum und Nährstofflieferant gefördert. Laut der dritten Bundeswaldinventur 2012 (BMEL 2018) gibt es im deutschen Wald durchschnittlich 20,6 m<sup>3</sup> Totholz pro Hektar, insgesamt 224 Mio. m<sup>3</sup>. Das sind aktuell 18% mehr totes Holz als vor 10 Jahren. Damit hat der Totholzvorrat 6% des lebenden Holzvorrates erreicht und beeinflusst den Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt positiv.

Die hier aufgeführten Veränderungen der Nährstoffdynamik in Wäldern stehen in engem Zusammenhang mit deren Produktion von Biomasse, die die maßgebliche Quelle des Kohlenstoffs im Boden darstellt. Vor diesem Hintergrund ist der auf Basis der Kohlenstoffinventur 2017 deutlich gewordene beschleunigte Holzzuwachs (Riedel et al. 2019, siehe dazu auch Kap. 1.2.1.7) von besonderer Bedeutung und könnte einer der Gründe für die Zunahme des Kohlenstoffvorrats in den Waldböden sein. Die Zunahme des Bodenkohlenstoffvorrates ist ein zentrales Ergebnis der BZE, die die Waldböden in Deutschland als bedeutende Kohlenstoffsенke identifiziert. Die BZE wurde 1990 und 2007 auf 1800 Waldstandorten durchgeführt. Die Analysen ergaben, dass in diesem Zeitraum der Kohlenstoffvorrat in den Waldböden in Deutschland um 63 Mio. t zugenommen hat, trotz gleichzeitigen Anstiegs

der mittleren Jahrestemperatur. Diese Zunahme entspricht 10% des Kohlenstoffgesamtbestandes (Grüneberg et al. 2016).

Die große Bedeutung der Waldböden für die Kohlenstoffspeicherung ist durch viele Studien belegt (DeVos et al. 2015). Sie weisen ebenso hohe oder sogar deutlich höhere Kohlenstoffvorräte auf als Böden unter Grünland (Poeplau et al. 2011). Dagegen sind Ackerböden durch deutlich niedrigere Kohlenstoffgehalte charakterisiert. Eindeutige Aussagen, wie sich der Klimawandel auf die Kohlenstoffspeicherung in Waldböden auswirkt, sind bisher jedoch nicht möglich. Dies wird unter anderem von Arbeiten bestätigt, die darauf hinweisen, dass Wechselwirkungen zwischen Ökosystemen und dem Klimawandel zu den größten Unsicherheiten für Klimavorhersagen zählen (Heimann und Reichstein, 2008). Grundsätzlich ist im gemäßigten Klima damit zu rechnen, dass Temperaturerhöhung den Abbau organischer Bodensubstanz verstärkt (Hagedorn et al. 2010). Ob aber dieser Effekt durch erhöhte Biomasseproduktion oder durch trockenheitsbedingte Hemmung des Kohlenstoffabbaus ausgeglichen wird, ist bislang nicht geklärt.

Zusätzlich werden verstärkt auftretende Störungen die Kohlenstoffdynamik der Waldböden in bislang ungewissem Ausmaß beeinflussen (Seidl et al. 2014). Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass die Art der Waldbewirtschaftung (Baumartenwahl, Umtriebszeit, Durchforstungsintensität) den Kohlenstoffvorrat im Boden beeinflussen kann (Mayer et al. 2020). Da bislang vorliegende Ergebnisse oft vom ökologischen Kontext abhängig sind und teilweise sogar in entgegengesetzte Richtung weisen, ist auch hier auf Basis der aktuellen Forschung noch keine generelle Aussage möglich.

### 1.2.1.6. Veränderungen im Wasserkreislauf

Die sowohl im Sommer als auch in den Wintermonaten kontinuierlich steigenden Temperaturen, die verlängerte Vegetationsperiode und die dadurch erhöhten Verdunstungsraten gehen insgesamt nur mit einer leichten durchschnittlichen Niederschlagsabnahme, dafür aber mit einer umso stärkeren Verschiebung der Niederschläge in die Wintermonate (+26% seit 1881) sowie einer Zunahme an Starkregenereignissen (+7% seit 1951) einher (UBA 2019).

Die klimatischen Änderungen führen für den Wasserkreislauf im Wald zu verschiedenen Konsequenzen. Steigende Temperaturen sowie die im mittleren Trend seit 1961 um zwei Wochen verlängerte Vegetationsperiode (www.dwd.de) sind Auslöser für eine insgesamt höhere potenzielle Verdunstung mit der Folge, dass weniger Wasser versickern und ins Grundwasser infiltrieren kann (Spekat et al. 2007). In den

Wintermonaten nehmen die Niederschlagsmengen zwar zu, sie treffen dann aber häufiger auf bereits wassergesättigte oder gefrorene Böden und können nicht versickern. Genauso führt der zunehmende Temperaturanstieg und die steigende Anzahl an heißen Tagen (+170% seit 1951, UBA 2019) in den Sommermonaten zur Austrocknung der Böden und damit zur Verringerung der Infiltrationsleistung und Erhöhung des Oberflächenabflusses. Niederschläge, die zunehmend als Starkniederschläge auftreten, können von den trockenen Böden im Sommer und den wassergesättigten Böden im Winter dann kaum aufgenommen werden, sondern fließen oberirdisch ab und erhöhen die Erosion.

Beobachtungen an dem Grundwassermessnetzwerk der Länder zeigen, dass, im Vergleich zum langjährigen Mittel, Monate mit unterdurchschnittlich niedrigen Grundwasserständen signifikant häufiger werden. Vor allem über mehrere Jahre hintereinander auftretende Niederschlagsdefizite führen zu sinkenden Grundwasserständen oder verringerten Quellschüttungen. In größeren Bereichen von Deutschland und speziell in den Niederungen wird mittel- bis langfristig mit dem Absinken des Grundwasserspiegels aufgrund einer geringeren Grundwasserneubildung zu rechnen sein, was weitreichende Konsequenzen für die angrenzenden grundwasserabhängigen Ökosysteme hat.

Zu den geringeren Niederschlägen im Sommer kommt hinzu, dass die Verdunstung durch die höheren Temperaturen und verlängerte Vegetationsperiode steigen wird (Hartmann 2011). Das hat ebenfalls eine Verschlechterung der Wasserbilanz zur Folge, was durch die Trockenschäden der letzten Jahre sehr deutlich dokumentiert wird. Pflanzenverfügbares Bodenwasser wird, wie der Dürremonitor des Helmholtzzentrums für Umweltforschung ([www.ufz.de/duerremonitor](http://www.ufz.de/duerremonitor)) anschaulich zeigt, in immer kürzeren zeitlichen Intervallen zur Mangelware. Erhobene Zeitreihen aus der Nationalen Waldbodeninventur zur Bodenwasserspeicherung und verschiedener Dürre-Stress-Indizes zeigen übereinstimmend, dass die Intensität des Wassermangels im Wald seit 1990 zugenommen hat (Puhlmann et al. 2019) (siehe auch Kap. 1.2.1.3). Die Daten belegen, dass für die Auswirkungen von Dürre auf das Baumwachstum nicht nur das Wasserdefizit an sich, sondern auch Zeitpunkt, Dauer und Intensität der Dürre entscheidend sind.

Oben skizzierte Ursachen für die Verschlechterung der Wasserversorgung und der Wasserqualität werden durch eine Art Selbstverstärkungseffekt des Klimawandels weiter intensiviert. Großflächige Windwurfereignisse oder durch die Trockenheit begünstigte Massenvermehrungen von Schadorganismen wie den Borkenkäfern verändern neben den

direkten Effekten des Klimawandels zusätzlich die hydrologischen Prozesse Verdunstung, Rückhalt und Abfluss im Wald. Simulationsstudien zur Abflusssituation nach Windwürfen (Bronstert et al. 2001) sowie empirische Studien zur Abflusssituation nach Kahlschlägen (Beschta et al. 2000) zeigen, dass der Hochwasserscheitel und das Hochwasservolumen aufgrund einer angenommenen geringeren Makroporosität und einer geringeren Interzeptionsspeicherung geringfügig in den ersten fünf Jahren im Einzugsgebiet beeinflusst wird.

Eine weitere, durch den Klimawandel häufiger erwartete Störung von Waldökosystemen, deren Böden und Hydrologie sind Waldbrände (siehe Kap. 1.2.1.3). Durch Brände wird der Wald direkt aber nachfolgend auch indirekt durch die Herabsetzung des Wasserspeichervermögens der Böden negativ beeinflusst (Larson-Nash et al. 2018, Cerdá und Robichaud 2009).

Auch die Baumartenzusammensetzung und Struktur von Wäldern beeinflussen deren Wasserhaushalt. In einer Freilandstudie des Thünen Instituts (Müller 2016) zu hydroökologischen Wirkungen des Waldumbaus wurde festgestellt, dass die Grundwasserneubildung durch das Alter und die Art der Bäume, die vertikale Strukturierung und Heterogenität der Wälder sowie die Art und Weise ihrer Bewirtschaftung beeinflusst wird. Laubwälder wiesen dabei grundsätzlich eine höhere Grundwasserneubildungsrate auf als Nadelwälder, obwohl Nadelbaumarten wie Kiefer oder Douglasie oft einen geringeren Wasserbedarf aufweisen als Laubbaumarten (Prietzl und Bachmann 2011). Die Ursache für die größere Grundwasserneubildungsrate von Laubwäldern als von Nadelwäldern ist die höhere Sickerwasserspense im Winter. In hydrologischen Simulationsrechnungen im Oker Einzugsgebiet im Harz (Sutmöller et al. 2010) sowie in anderen Einzugsgebieten (Bosch und Hewlett 1982, Gallart und Llorens 2003) konnte ebenfalls ein distinkter Einfluss der Bewirtschaftungsform auf die hydrologischen Prozesse im Wald nachgewiesen werden. Im Allgemeinen zeigen sich Bestände mit hoher Biomasse und mit großen Blattmengen als anspruchsvoller im Wasserbedarf. Durchforstung kann die Wasserverfügbarkeit im Bestand erhöhen (Sohn et al. 2012) gleiche Effekte sind für die Sickerwasserspense zu erwarten. Zusammenhänge zwischen der Bestandesstruktur und verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten sind komplex und oft schwierig vorherzusagen. Je nach klimatischer Situation kann Auflichtung von Wäldern durch turbulente Windströmungen auch die Verdunstung der Bäume erhöhen mit entsprechenden negativen Wirkungen für die Grundwasserneubildung (Ringgaard et al. 2012).

Die vorgestellten Ergebnisse liefern erste Hinweise, um die zukünftige Gefährdung der heutigen Wälder abzuschätzen und Strategien zur Anpassung

an die regionalspezifischen Auswirkungen des sich bereits vollziehenden Klimawandels zu entwickeln. Der Klimawandel erfordert insbesondere an trockenheitsempfindlichen Standorten eine Veränderung der Baumartenzusammensetzung. Wie sich diese auf die Wasserhaltekapazität der Waldböden oder den Wasserhaushalt der Wälder insgesamt auswirkt, gehört trotz vorhandener Untersuchungen noch zu den offenen Fragen der Vorhersage und Bewertung der zu erwartenden Veränderungen.

### 1.2.1.7 Veränderungen der Biomasseproduktivität von Wäldern

In der Ökologie bezieht sich der Begriff Produktivität auf die Rate der Erzeugung von Biomasse in einem Ökosystem, üblicherweise ausgedrückt in Masse pro Fläche pro Zeit. Die Masseneinheit kann sich auf die Trockensubstanz oder auf die Masse des erzeugten Kohlenstoffs beziehen. Die Primärproduktivität ist der Prozess, der aus der photosynthetischen Aktivität der Pflanzen resultiert und die Akkumulation von Biomasse, z. B. in Wäldern, bestimmt. Die Netto-Primärproduktivität (NPP) je Jahr und Hektar ist einer der wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung der Produktivität von Ökosystemen. Sie stellt die Differenz zwischen der Assimilation (oder Brutto-Primärproduktion, BPP) durch den Prozess der Photosynthese von Pflanzenblättern und den Energieverlusten aufgrund von Atmung und Mortalität der Pflanzengewebe dar. Das Verhältnis der NPP zur BPP beträgt etwas weniger als 50%; für eine Vielzahl unterschiedlicher Wälder wurde ein durchschnittlicher Wert dieses Verhältnisses von 0,47 bestimmt (Waring et al. 1998).

Die Biomasseproduktivität von Wäldern wird durch eine Vielzahl von abiotischen (Wasserverfügbarkeit, Temperatur, Licht, CO<sub>2</sub>-Konzentration der Umgebungsluft, Nährstoffverfügbarkeit, toxische Substanzen, Störungen wie z. B. Sturm oder Feuer) und biotischen Faktoren (Artenzusammensetzung, Effizienz der Pflanzen, Mikroorganismen, Herbivoren, Krankheiten) beeinflusst. Zudem haben waldbauliche Maßnahmen, mit denen sich einige der oben genannten Faktoren steuern lassen, einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität von Wäldern. Die Modellierungsergebnisse von Härkönen et al. (2019) deuten darauf hin, dass Änderungen in der Bewirtschaftung europäischer Wälder sogar größere Auswirkungen auf das Wachstum der Bestände und die Kohlenstoffbilanz haben als der prognostizierte Klimawandel.

Weltweit unterliegen die Waldökosysteme einer an Geschwindigkeit zunehmenden Veränderung. Dies ist sowohl auf anthropogen bedingte Standortveränderungen durch die Deposition von Luftschadstoffen,

als auch auf die Auswirkungen des sich regional bis global ändernden Klimas zurückzuführen. Informationen zu diesen Veränderungsprozessen können aus Großrauminventuren, Dauerbeobachtungsflächen, Experimenten und Modellen gewonnen werden. In Deutschland setzt sich das Nationale Waldmonitoringprogramm aus der großräumigen Bundeswaldinventur (BWI) und den räumlich höher auflösenden Wald- und Bodenzustandserhebungen zusammen (Wellbrock und Bolte 2020). Informationen zur Produktivität der Wälder werden hier aus der zeitlichen Veränderung von Vorräten sowie des Ausscheidens von Bäumen durch Ernte oder natürliches Absterben abgeleitet.

Rückblickend auf die letzten Jahrzehnte waren Wälder eine Kohlenstoffsенке mit einer kontinuierlichen Zunahme des Kohlenstoffs in der unter- und oberirdischen Biomasse (Riedel et al. 2019). Den Einfluss der gravierenden Schadereignisse der letzten Jahre (2018–2020) wird allerdings erst die Bundeswaldinventur 2022 aufzeigen können. Aus den letzten Ergebnissen der Kohlenstoffinventur 2017 ist eine hohe CO<sub>2</sub>-Bindungsrate in den jüngeren Altersklassen ersichtlich, die mit zunehmendem Bestandesalter stetig abnimmt (Riedel et al. 2019). Auffallend ist auch, dass in der gleichen Altersklasse die Buche je Flächeneinheit ähnlich viel CO<sub>2</sub> bindet wie die Fichte, und die Eiche mehr als die Kiefer. Die Kohlenstoffspeicherungsrate der Baumarten lag somit deutlich enger beieinander als der auf das Volumen bezogene Zuwachs (Hennig et al. 2019). Offenbar könnte aber für die zukünftige Biomasseproduktivität weniger die Baumart, sondern mehr ihre Altersverteilung und die zukünftige Entwicklung der Wuchsleistung von Bedeutung sein. Basierend auf Daten von langfristigen, ertragskundlichen Versuchsflächen, die seit 1870 kontinuierlich unter Beobachtung stehen, zeigten Pretzsch et al. (2014) für die Hauptbaumarten Fichte und Buche eine signifikante Beschleunigung der Bestandesproduktivität (+10 bis +30%) für den Zeitraum 1961–2010. Dabei folgen Bäume und Waldbestände nach wie vor ähnlichen allometrischen Regeln. So verändert sich zum Beispiel bei gegebener Bestandeshöhe das erreichte Volumen nicht, aber dieselben Baum- und Bestandesgrößen werden schlichtweg in früherem Alter erreicht als in der Vergangenheit. Das schnellere Volumenwachstum geht allerdings mit einer verringerten Holzdicke einher, wodurch die CO<sub>2</sub>-Bindung weniger gestiegen ist (Pretzsch et al. 2018).

Die Wachstumsbeschleunigung scheint in erster Linie auf Temperaturerhöhungen, Verlängerung der Vegetationszeit und deutlich gestiegene atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Stickstoffeinträge zurückzuführen zu sein (Pretzsch et al. 2018). Modellbasierte Wachstumssimulationen zeigten, dass die



klimatischen Veränderungen allein, ohne die erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Stickstoffeinträge, eine Reduktion des Wachstums im Zeitraum von 1981 bis 2010 bewirkt hätten. Die Beschleunigung des Wachstums fiel auf gut mit Nährstoffen versorgten Standorten höher aus als auf nährstoffarmen Standorten. Forstwirtschaftlich und produktionstechnisch werden diese Befunde als vorteilhaft interpretiert.

Eine Fortsetzung dieser positiven Wachstumstrends in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erscheint sehr unwahrscheinlich. Andere regionale, auf Inventuren basierende Analysen weisen bereits auf abnehmende Wachstumstrends hin. Bereits vor 15 Jahren wurde festgestellt, dass das Wachstum der Buche an ihrer südlichen Verbreitungsgrenze trotz der damals noch eher moderaten Temperaturzunahme schon deutlich nachließ (Jump et al. 2006).

Für die Hauptbaumarten Südwestdeutschlands wurden ab Mitte des 20. Jahrhunderts bis in die 1990er Jahre zwar steigende Zuwachstrends beobachtet, danach kehrte sich bei allen Baumarten dieser Trend allerdings um (Kohnle et al. 2014, Kohnle und Klädtke 2018). Nothdurft et al. (2012) rechnen in ihren Szenarien bis 2070 mit einem Rückgang der Wuchsleistung bei allen Hauptbaumarten in den tiefen Lagen Südwestdeutschlands. Ab der submontanen Zone nimmt die Wuchsleistung von Weißtanne und besonders der Eiche zu, für Buche und Fichte wird eine deutlich nachlassende Wuchsleistung in kollinen Lagen prognostiziert. Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Biomasseproduktivität von Wäldern sind allerdings außerordentlich kompliziert. So repräsentiert das heutige Wachstum eines Bestandes in tieferen Lagen nicht das zukünftige Wachstum in höheren Bereichen nach einer Temperaturzunahme (Kohnle und Klädtke 2018; Trotsiuk et al. 2020).

Die jüngsten Erfahrungen der Hitzesommer 2018 und 2019, die auch in vielen Teilen Deutschlands zu immensen Trockenheits- und Folgeschäden an ganzen Waldbeständen geführt haben, zeigen an, dass viele verbreitete europäische Baumarten der gemäßigten Zonen für extreme sommerliche Trockenheit und Hitzewellen anfälliger sind als bisher angenommen (Schuldt et al. 2020). Da sich extreme Dürre- und Hitzeereignisse mit dem fortschreitenden Klimawandel wahrscheinlich häufen werden, könnte den mitteleuropäischen Wäldern eine substanzielle ökologische und ökonomische Transformation bevorstehen (Schuldt et al. 2020, Hanewinkel et al. 2013). McDowell et al. (2020) untersuchten in einer Metastudie die weltweiten Auswirkungen der Änderungen vorwiegend abiotischer Faktoren auf die globale Entwicklung von Wäldern. Sie interpretieren, dass gegenwärtig ein Wechsel von überwiegend positiven Effekten des globalen Klimawandels hin zu einer Periode der

wachsenden Limitierungen für Bäume stattfindet. Während positive Effekte auf das Wachsen von Bäumen in Zukunft stark variabel und lokal unterschiedlich ausfallen werden, zeigt sich in Hinblick auf die Mortalität ein einheitlich negatives Bild.

Seidl et al. (2017) untersuchen die Folgen der durch den Klimawandel induzierten, extremer auftretenden abiotischen und biotischen Einflüsse auf Wälder. Wärmere und trockenere Bedingungen fördern insbesondere Störungen durch Feuer, Dürre und Insekten, während wärmere und feuchtere Bedingungen die Störungen durch Wind und Krankheitserreger verstärken. Großflächige Wechselwirkungen zwischen den Störungsfaktoren wirken dabei verstärkend, während indirekte Folgen von Störungen z. B. die Veränderungen der Vegetation (Ersatz von Nadel- durch Laubwälder), die langfristige Störungsempfindlichkeit gegenüber dem Klima wieder herabsetzen können.

Von klimatischen Extremen und einer Zunahme von abiotischen und biotischen Störungen sind insbesondere große und alte Bäume betroffen (Lindenmayer et al. 2012, Grote et al. 2016). Diese sind aufgrund ihrer Höhe stärker von Windwurf gefährdet, geraten wegen der langen Wassertransportwege schneller unter Trockenstress und sind somit auch stärker herbivoren Insekten wie zum Beispiel Borkenkäfern ausgesetzt (Forzieri et al. 2021). Mit zunehmendem Alter sammeln sich auf Bäumen auch pathogene Parasiten an wie z. B. der Hemiparasit Mistel, die ihre Widerstandskraft schwächen. Ein Ergebnis der Veränderung der Störungsregime wird sehr wahrscheinlich die Entstehung von Wäldern mit kleineren Bäumen, offener Bestände und niedrigere Biomasse sein (McDowell et al. 2020). Das könnte direkte Auswirkungen auf die Klimaschutzwirkung von Wäldern haben, indem die Kohlenstoff-Speichermenge der oberirdischen Biomasse abnimmt. Zudem steht weniger Holz mit gegebenenfalls anderen Eigenschaften zur Verfügung für die Holzproduktespeicher und die stoffliche und energetische Substitution.

Zudem sind Auswirkungen auf die Funktionen der Waldböden und die Biodiversität mit der Veränderung der Baumarten-Zusammensetzung und der zunehmende Verlust von alten Wäldern und großen Bäumen zu erwarten (z. B. Augustynczyk et al. 2019, Hoffmann et al. 2019, Lindenmayer et al. 2012, siehe auch Kap. 1.2.1.3).

Insgesamt ist bei der Beurteilung der zukünftigen Biomasseproduktivität in den vorgelegten inventurbasierten und auch dendrochronologischen Analysen zu berücksichtigen, dass diese an den überlebenden Bäumen und Versuchsflächen durchgeführt worden sind. Die Einflüsse von Störungen werden daher systematisch eher unterschätzt. Die Veränderung der zukünftigen Produktivität, insbesondere, wenn sie durch

einen Wechsel der Baumartenzusammensetzung verursacht wird, kann dabei nur eingeschränkt betrachtet werden. Dafür bedarf es einer Kombination von Artverbreitungs- und physiologischen Wachstumsmodellen sowie Mortalitätsmodellen, um die Auswirkungen der Verschiebung der Baumartenzusammensetzung in Kombination mit dem Klimawandel und einem sich ändernden Störungsregime auf die Produktivität von Wäldern sicherer abschätzen zu können. Derzeit sind die Interaktionen von klimatischen Veränderungen und Veränderung des biotischen Störungsregimes nicht ausreichend gut voraussagbar und alle Projektionen der zukünftigen Produktivität der Wälder sind daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

### 1.2.2 Bereitstellung von Ökosystemleistungen

#### 1.2.2.1 Holz/Rohstoffe

Der Rohstoff Holz wird in Deutschland überwiegend in der Säge- und Holzindustrie, Holzwerkstoff- und Zellstoffindustrie sowie zur Energieerzeugung genutzt. Etwa zwei Drittel des im heimischen Wald eingeschlagenen Rohholzes (ca. 70 Mio m<sup>3</sup>) werden einer stofflichen Nutzung zugeführt, etwa ein Drittel direkt energetisch genutzt (Jochem et al. 2015). Das stofflich genutzte Rohholz wird zu mehr als 75% in Sägewerken eingeschnitten. Die Sägerestholzmengen werden mehrheitlich von der Holzwerkstoff- und Zell-/Holzstoffindustrie stofflich weiterverarbeitet oder energetisch genutzt. Werden diese für die Wärme- oder Stromproduktion verwendeten Reststoffe und Nebenprodukte berücksichtigt (ausgewiesen in den Statistiken zur Holzrohstoffnutzung), erhöht sich der Anteil des energetisch genutzten Holzes in Deutschland auf gut 50% (Bösch et al. 2015).

Die aktuellen Strukturen der Holzbe- und -verarbeitenden Unternehmen und ihre räumliche Verteilung wurden auf Grundlage von Umfrage- und Statistikauswertungen dokumentiert (Mantau et al 2018). Von den 2.070 Schnittholzproduzenten sind 70% auf Nadelholz und 10% auf Laubholz spezialisiert, 20% sind Mischbetriebe. Das hochgerechnete Einschnittvolumen 2015 betrug 36,0 Mio. m<sup>3</sup> Stammholz. Ca. 1.900 Sägewerke haben eine jährliche Einschnittkapazität unter 20.000 m<sup>3</sup> und gelten als Kleinbetriebe, sie sind regional recht homogen über das Bundesgebiet verteilt angesiedelt. Die industriellen Großbetriebe mit Einschnittkapazitäten > 0,2 Mio. m<sup>3</sup> sind zu 96% auf Nadelholz spezialisiert und liefern gut 2/3 des nationalen Einschnittvolumens, bei einem Anteil von nur 2,1 an der Betriebsanzahl der Sägewerke.

Die Holzwerkstoffindustrie ist mit 32 Betrieben

an 25 Standorten deutlich übersichtlicher und einheitlich großindustriell strukturiert. Die nationale Produktionskapazität im Jahr 2015 betrug 12,6 Mio. m<sup>3</sup> (Spanplatten 5,7; OSB 1,3; Faserplatten höherer Dichten 4,2 und geringerer Dichten 1,4; alle Angaben in Mio. m<sup>3</sup>). Der Rohstoffbedarf der Holzwerkstoffproduktion wird zu 40% durch Sägenebenprodukte (Hackschnitzel, Sägemehl) und zu knapp einem Drittel durch Nadelindustrieholz aus der Forstwirtschaft gedeckt. Laubindustrieholz wird zu 14% eingesetzt, in der Spanplattenfertigung werden zudem zunehmend Altholzsortimente verwendet, der Gesamteinsatz 2015 betrug 12%, bei steigender Tendenz. Die verbrauchten Holzrohstoffe werden zu 84,0% aus dem Inland im Umkreis von meist weniger als 150 km bezogen.

Die Holzschliff- und Zellstoffindustrie ist auf 16 Produktionsstandorte verteilt: Zehn Holzschliff bzw. Refiner-Holzstoffwerke haben eine Gesamtkapazität von 1,2 Mio. t Holzschliff, die vier Sulfitwerke produzieren jährlich 0,6 Mio t und die beiden Sulfatwerke 1.0 Mio t Zellstoff. Mit einem Verbrauchsvolumen von 5,3 Mio. m<sup>3</sup> bzw. einem Verbrauchsanteil von 53,4% war Nadelindustrieholz wichtigstes Holzrohstoffsoriment, 38,3% des Bedarfs wurde aus Sägenebenprodukten gedeckt, und Laubindustrieholz wurde zu 0,8 Mio. m<sup>3</sup> eingesetzt. Die Transportdistanzen liegen im Schnitt zwischen 100 und 200 km.

Während die Sägeindustrie annähernd flächendeckend über das Bundesgebiet verteilt ist (mit Ansiedlungen der großen Nadelholzproduzenten vor allem in Süd- und Westdeutschland), ist die Holzwerkstoffindustrie in räumlicher Nähe zu den großen Möbelindustrien in Nordrhein-Westfalen und in den neuen Bundesländern angesiedelt, dort in Nähe zu den beiden großen Sulfatzellstoffwerken. Die Sulfitzellstoffherstellung ist vorwiegend im Südwesten und die Holzschliffproduktion im Süden Deutschlands lokalisiert.

Die energetische Verwertung von Holz erfolgt einerseits in Privathaushalten zur Wärmegewinnung, und andererseits in Biomassefeuerungsanlagen zur Erzeugung von Strom und/oder Wärme mit einer Wärmeleistung unter sowie über 1 MW. Gut 30 Mio m<sup>3</sup> Waldrestholz, davon 63% Laubholz, werden vorwiegend als Scheitholz in Privathaushalten verfeuert, die Menge ist jedoch stark abhängig von den Witterungsbedingungen im Winterhalbjahr. Der Anteil von Pelletheizungen, deren Rohstoff aus Sägenebenprodukten (Säge- u. Hobelspäne) hergestellt wird, ist in der letzten Dekade stark gestiegen. Die unter anderem durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geförderte Energieerzeugung in gewerblichen Biomassefeuerungsanlagen >1MW fand im Jahr 2016 in 504 Anlagen statt, die 19,2 Mio. m<sup>3</sup> Holz verwerteten, vorwiegend aus Altholz und Landschaftspflegeholz. Die

Biomassefeuerungsanlagen > 1MW sind in allen Regierungsbezirken des Bundesgebietes errichtet worden, es gibt mit Oberbayern, Karlsruhe, Arnsberg, Brandenburg vier Zentren mit einem Jahresholzverbrauch von jeweils mehr als 750.000 t. In den gewerblichen Kleinf Feuerungsanlagen (unter 1 MW, Anzahl > 36.000) wurden 2016 8,2 Mio. m<sup>3</sup> Holz verfeuert, vorwiegend aus Waldrestholz (31,4%), Sägenebenprodukten 18,4%), Waldderbholz (13,7%), Landschaftspflegeholz (15,9%) und Pellets/Briketts (7,3%) sowie in kleineren Mengen aus Alt- bzw. Gebrauchtholz, Rinde (lose), Schnellwuchsplantagenholz und Hackschnitzeln unbestimmter Herkunft.

Die Verwertung von Holzsortimenten zur Produktion chemischer Grundstoffe ist momentan noch nicht großtechnisch etabliert, sondern befindet sich derzeit in der Pilotphase. Es besteht breites Einverständnis, dass Forst- und Holzwirtschaft zu den zentralen Stützen einer nationalen Bioökonomie zählen (Miletzky et al. 2020). Holz ist die mit Abstand größte biobasierte Rohstoffquelle zur stofflichen, chemischen und mechanischen Nutzung für eine weite Produktpalette außerhalb des Lebens- und Futtermittelbereiches.

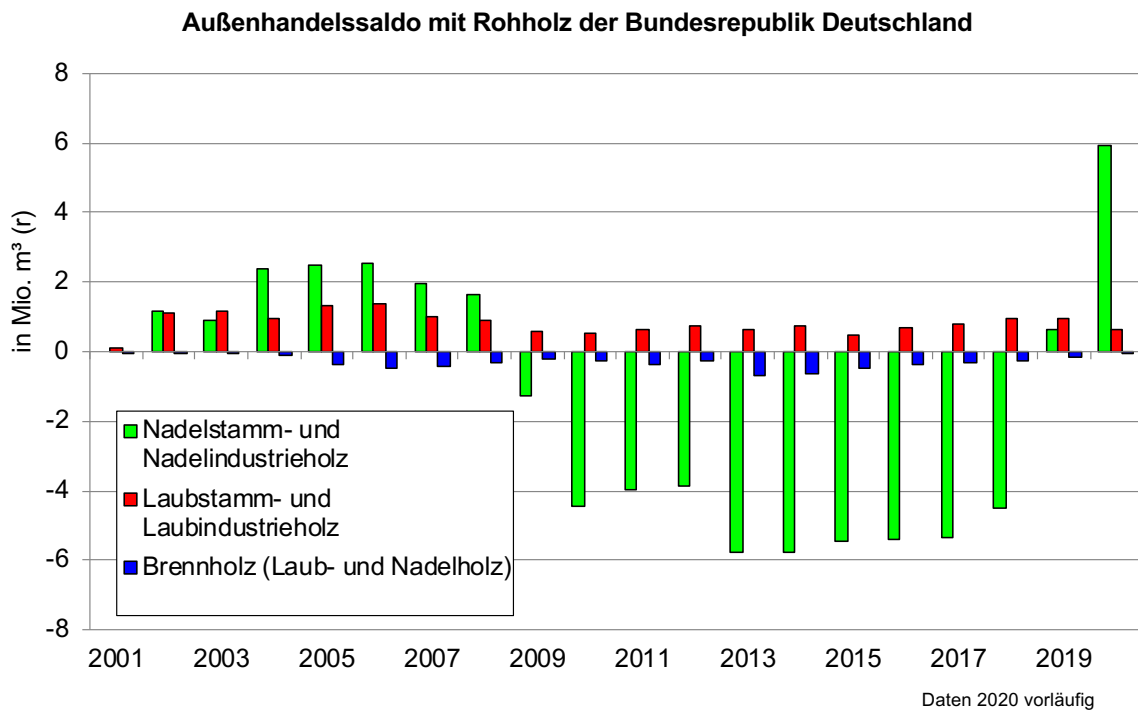
Die holzbasierte Bioökonomie muss den Rohstoff Holz (Stammholz, Kronenholz, Nebenprodukte aus der Verarbeitung, Altholz aus vorausgegangener Nutzung) mit hohen Effizienzgraden nutzen, um die steigenden Mengenbedürfnisse zu decken. Die stoffliche Nutzung hat dabei eine höhere Priorität gegenüber der energetischen. Wichtige Pfeiler der holzbasierten Bioökonomie sind die Kreislaufführung von Rohstoffen, und die Kaskadennutzung, bei der nutzbare Holzbestandteile von einem Produkt am Ende des Produktlebens in eine weitere Produktnutzung überführt werden. Erst wenn keine effiziente stoffliche Nutzung mehr möglich ist, erfolgt die Nutzung der Reststoffe als Energieträger.

Die holzbe- und holzverarbeitende Industrie in Deutschland hat sich auf die bisher langfristig sichere Verfügbarkeit von Nadelholz eingestellt. Etwa 85% des in Deutschland stofflich genutzten Holzes ist Nadelholz (Jochem et al. 2015, Thünen-Institut 2020a). Der weit überwiegende Anteil der Wertschöpfung im Cluster Forst und Holz in Höhe von 57 Mrd. Euro pro Jahr (Becher 2016, Thünen-Institut 2020b) ist somit abhängig von der regelmäßigen Verfügbarkeit von Nadelholz.

Diese starke Abhängigkeit zeigt sich insbesondere auch in der Entwicklung der Außenhandelsalden im Handel mit Rohholz (Abb. 21). Während die Vorzeichen der Handelsalden mit Laubholz und mit Brennholz über den betrachteten Zeitraum von 2001 bis 2019 gleichgeblieben sind und sich auch in der Höhe keine größeren Änderungen ergeben haben, haben sich beim Nadelholz erhebliche Veränderungen

ergeben. In einer Phase hoher Angebote der Forstbetriebe wurde Nadelholz netto exportiert. Mit der einsetzenden Verknappung von Nadelholz nach Kyrill hat sich die Handelsrichtung im Saldo umgekehrt und Deutschland wurde mit ca. 5,5 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr zum Nettoimporteuer. Die holzbearbeitende Industrie hat somit nicht die Rohstoffbasis von Nadel- auf Laubholz gewechselt, was in der Regel auch technisch (wegen fehlender Substituierbarkeit in der stofflichen Nutzung) nicht möglich ist, sondern den Bedarf an Nadelholz stärker aus dem Ausland gedeckt. Die großen Mengen an Nadelkalamitätsholz ab dem Jahr 2018 haben die Richtung des Handelsüberschusses im Jahr 2019 wieder umgekehrt; Deutschland ist wieder Nettoexporteur, wenn auch nur in geringem Umfang.

Beim Laubholz ist die Bundesrepublik Deutschland schon länger Netto-Exporteur, weil die verfügbaren Verarbeitungskapazitäten das inländische Holzaufkommen nicht vollständig aufnehmen können.



**Abb. 21:** Außenhandelssaldo Deutschlands mit Nadelholz, Laubholz und Brennholz im Zeitablauf; negatives Vorzeichen = Import, positives Vorzeichen = Export. Quelle: Basis Weimar 2018, Thünen-Institut auf Grundlage amtlicher Außenhandelsstatistik (StBA FS 7, R 2)

Auf die hohe Bedeutung von Nadelholz, insbesondere Fichte, für die Ertragslage der Forstbetriebe in Deutschland wird im Kapitel 3.1.1.2 (Wirtschaftsergebnisse) sowie im Kapitel 3.1.3.8 (Alternative Einkommensquellen für Forstbetriebe) eingegangen. Sowohl für die Forstbetriebe als auch für die holz- und holzverarbeitende Industrie stellt sich damit die Frage nach der kurz-, mittel- und langfristigen Entwicklung des Nadelholzaufkommens in Deutschland und möglicher Konsequenzen. Hierbei ist zu beachten, dass die Zeithorizonte bei Projektionen in der Waldwirtschaft (kurzfristig: 15 bis 20 Jahre, mittelfristig: ca. 40–50 Jahre, langfristig ca. 80–100 Jahre) sich von den Zeithorizonten der Holz- und Bauwirtschaft wesentlich unterscheiden.

Die letzten drei Jahre waren von besonderen Ereignissen für die Forstwirtschaft geprägt: Trockenheit und Folgeschäden durch Borkenkäfer und andere Schadorganismen haben einen hohen Anfall an Kalamitätsholz verursacht. Schätzungen der Bundesländer (Stand Juni 2020) belaufen sich auf einen Kalamitätsholzfall von 178 Millionen Kubikmeter und eine Fläche von 285.000 Hektar, die wiederbewaldet werden muss (BMEL 2020). Zum Teil steht das Kalamitätsholz noch im Wald; Schätzungen des Thünen-Institutes dazu (Stand August 2020) belaufen sich auf ca. 37 Mio. m<sup>3</sup>. Da Kalamitätsholz in verschiedenen Verwendungsbereichen nicht mehr oder nur begrenzt einsetzbar ist, oder auch trotz technischer Tauglichkeit,

zum Beispiel aufgrund von Farbveränderungen, weniger Akzeptanz bei den Abnehmern findet, ist auch weiterhin ein Frischholzeinschlag notwendig. Die Preise für Nadelholz sind im Durchschnitt über ganz Deutschland deutlich gesunken, in den Hauptschadensgebieten war es zum Teil unverkäuflich, wenn der Holzpreis die Aufarbeitungskosten nicht mehr deckte.

Kurzfristig kann das folgende Szenario als ein wahrscheinliches angesehen werden. Das Nadelholzaufkommen bleibt weiter hoch, allerdings zu einem nennenswerten Anteil aus Kalamitätsholznutzungen. Die Qualität dieser unplanmäßig genutzten Sortimente hängt wesentlich vom vorsorglichen Risikomanagement inkl. Maßnahmen des Werterhalts auf den Lagerplätzen ab. Frischholz wird weiter benötigt, wird dabei aber naturgemäß knapper, da Kalamitätsholz vormals auch Bestandteil des Frischholzangebotes war. Die Preise für Nadelholz, insbesondere für Kalamitätsholz, bleiben weiter niedrig.

Mittelfristig (bis 2050) wird das in den Jahren 2018–2021 vorzeitig und unplanmäßig angefallene Nadelholz dem Holzmarkt fehlen. Zudem werden zu einem wachsenden Anteil starke Stammdimensionen angeboten werden, für die es kaum eine Nachfrage gibt und für die ebenfalls die Logistikketten fehlen. Zwischen den beiden Bundeswaldinventuren 2002 und 2012 haben sich die Durchschnittsvorräte in den Durchmesserklassen ab 60 cm beim Nadelholz um ca.

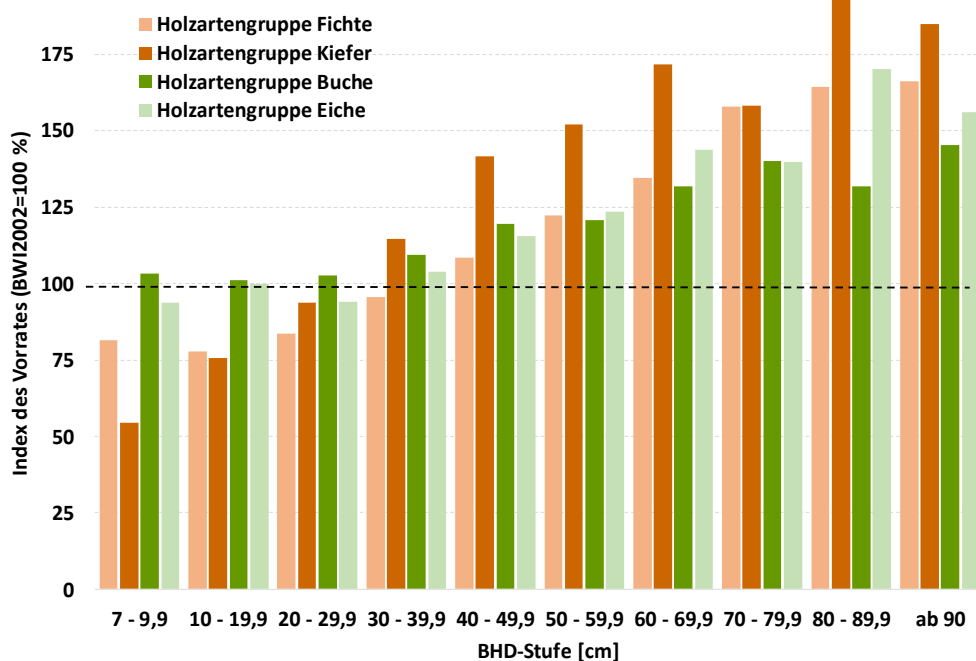
70% erhöht (Abb. 22). Nadelholz der nachgefragten mittleren Dimensionen wird daher mittelfristig knapp werden.

Langfristig wird Nadelholz in Deutschland sehr knapp werden. Begründet ist dies in der hohen Risikoanfälligkeit insbesondere der Baumart Fichte und in dem seit ca. 30 Jahren dauernden Waldumbau; Nadelholz dominierte Wälder werden vielfach in Laub- und Mischwälder umgebaut. In der Jungbestockung (Bäume zwischen 0,2 und vier Meter Höhe) weist die Bundeswaldinventur 2012 mittlerweile nur noch 25% Nadelholz aus. Unter den derzeitigen Strukturen der Verarbeitung und Verwendung von Holz in Deutschland würden damit weder Forst- noch Holzwirtschaft wettbewerbsfähig und damit rentabel sein.

Die Auswirkungen der dargelegten möglichen Zukünfte sind für die beiden Marktpartner Forst- und Holzwirtschaft besorgniserregend. Wenngleich die Holzwirtschaft kurzfristig noch Gewinn aus dem Überangebot an Holz schlagen kann, verliert sie mittel- und langfristig ihre wichtige Rohstoffgrundlage. Die Forstwirtschaft wird kurzfristig aufgrund niedriger Rohholzpreise und mittel- und langfristig aufgrund

geringer Mengen Erlöseinbußen hinnehmen müssen.

Lösungsansätze, die beiden Marktseiten nützen würden, wären ein verstärkter Anbau wuchskräftiger und stabiler Nadelbaumarten (wie beispielsweise Douglasie), die wertschöpfende Verwertung von Nadel-Starkholz in deutlich größeren Mengen, sowie die stoffliche Verwertung der verschiedenen, zunehmend auf den Markt kommenden Laubholzarten, erweitert um die Laubholznutzung für Biokomposite und die chemische Industrie (Bioraffinerie). Der Lösungsansatz „zunehmende Einfuhr von Nadel-Rohholz“ würde allein der Holzwirtschaft nutzen. Bei ihm stellt sich zudem die Frage nach der langfristigen Verfügbarkeit von Nadelholz in unseren Nachbarländern; Rohholz über weitere Strecken zu transportieren ist in der Regel unwirtschaftlich. Vom Lösungsansatz „Honorierung von Ökosystemleistungen“ würde, je nach Ausgestaltung, in erster Linie die Forstwirtschaft profitieren. Die Abwanderung von größeren Teilen der holzbearbeitenden Industrie als Alternative würde auf jeden Fall sowohl der Forstwirtschaft erheblich schaden als auch einen volkswirtschaftlichen Verlust bedeuten.



**Abb. 22:** Entwicklung des Holzvorrates zwischen 2002 und 2012 nach Durchmesserklassen. Quelle: Thünen-Institut, Auswertung der Bundeswaldinventuren 2002 und 2012

### 1.2.2.2 Tierische und pflanzliche Nichtholzwaldprodukte

Der Wald stellt neben der nachwachsenden Ressource Holz auch zahlreiche Nichtholzwaldprodukte (NHWP)

bereit (Sacande und Parfondry 2018). Diese NHWP beinhalten wilde und halbwilde Nichtholz-Waldarten und Produkte daraus sowie Produkte in frühen Stadien der Domestikation, beispielsweise die Früchte von Obstbäumen oder Sträuchern. Für tropische

Wälder ist seit langem dokumentiert, dass NHWP wirtschaftlich weit bedeutender sein können als der Rohstoff Holz (z. B. Plotkin und Famolare 1992, Niekisch 2005).

Es gibt zunehmend auch Belege dafür, dass NHWP ein wichtiges und gleichzeitig unterschätztes Segment der Waldgüter und -leistungen in temperaten Regionen darstellen, da sie im internationalen politischen Diskurs als ein wesentlicher Bestandteil der multifunktionalen Waldbewirtschaftung und der nachhaltigen Waldwirtschaft gesehen werden. Dies spiegelt sich in der Aufnahme von NHWP in mehreren internationalen Abkommen wider, wie etwa bei der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung im Jahr 1992, die Einbeziehung von NHWP in mehreren internationalen Abkommen und Prozessen in Bezug auf Biodiversität, Waldwirtschaft und Klimawandel (Wolfslehner et al. 2019). Auf den hohen Stellenwert der NHWP im Rahmen der Diskussion um die geistigen Eigentumsrechte soll hier nicht näher eingegangen werden.

Den Nichtholzwaldprodukten kommt eine soziale, kulturelle und regional – etwa in Süd- und Nordeuropa - auch eine ökonomische Bedeutung zu. Kalkulatorisch liegt der Wert von NHWP in Europa bei etwa 2/3 des auf gleicher Fläche geernteten Rundholzes (Lovric et al. 2020, 2021). Wegen des hohen Anteils des Eigenkonsums von etwa 90% wird die quantitative Bedeutung vieler Produkte regelmäßig unterschätzt. In Deutschland überwiegt für die Forstbetriebe finanziell aber meist weiterhin der Ertrag aus Holz. Dennoch sind tierische Produkte wie Wildbret, Tierfelle, Honig und pflanzliche Nichtholzwaldprodukte wie Schmuckgrün, Samen der Waldbäume, wildwachsende Früchte, Beeren und Kräuter sowie auch Pilze mit lokalen Unterschieden für verschiedene Personengruppen bedeutungsvoll (ca. 30% der Haushalte in Deutschland, Wolfslehner et al. 2019).

Während in Deutschland die Nutzung von Handsträußen, Pilzen und wildwachsenden Früchten und Kräutern kostenfrei für den Eigenbedarf möglich ist, beläuft sich der forstbetriebliche Ertrag aus den klassischen forstlichen Nebennutzungen (Schmuckgrün, Wildlinge, Saatgut etc.) auf ca. 7 €/ha (entspricht 1,5% des Umsatzes) und aus Jagd/Fischerei auf ca. 14 €/ha (entspricht ca. 3% des Umsatzes) (Zahlen aus dem Testbetriebsnetz Forst des BMEL 2018). In Europa belief sich der geschätzte Gesamtwert der NHWP 2016 auf 2,28 Mrd. €, wovon 73% auf pflanzliche Produkte entfielen (FOREST EUROPE 2015). Dabei wurden in einer repräsentativen Haushaltsumfrage in Europa die Ernte von Nüssen in 71% der Fälle, das Pflücken von frischen Beeren (70%), gefolgt von getrockneten oder weiterverarbeiteten Früchten (46%) und frischen (41%) und getrockneten Pilzen (40%) für den

Eigenbedarf als wichtige Aktivitäten angegeben (Lovric et al. 2021). Aktuell ist weltweit ein Anstieg der Nachfrage nach lokal und ökologisch produzierten Produkten zu beobachten, wozu auch viele NHWP zählen (Pettenella et al. 2014, Wong & Wiersum 2019).

Sowohl das Sammeln von NHWP wie auch die Jagd sind für verschiedene Bevölkerungsgruppen ein wichtiger Anlass, Wälder zu betreten, sich körperlich zu bewegen, zu erholen oder sich über den Verzehr von Pflanzen und Wildbret auch zunehmend gesundheitliche Wirkungen des Waldes zu erschließen (Hartig et al. 2014, Geng et al. 2015, Frumkin et al. 2017, Zelenski et al. 2015). So steigt die Zahl der Inhaber von Jagdscheinen in Deutschland seit Jahren an, auf aktuell über 397.000 (DJV 2021). Verschiedene Natursportarten bzw. Lifestylekonzepte wie Trekking, Survival, Bushcraft stellen regelmäßig auch auf die Nutzung bzw. den Verzehr von Wildkräutern ab (Fenton 2016, Wistoft 2013).

Im Zuge entsprechender Trends der Lebensmittelbranche erreichen NHWP aber auch jene Konsumenten, die dafür nicht selbst in den Wald gehen (neben Wildbret etwa Bärlauch, Beeren, Trüffel, Pilze, Birken-saft oder Honig). Nach vorliegenden Angaben essen 60% der Deutschen mindestens einmal jährlich Wildbret. In Summe entspricht dies einem Verzehr von fast 14.000 Tonnen Wildschwein, knapp 9.000 Tonnen Reh- und etwa 4.000 Tonnen Rot- und Damwild (LJV 2021). Von der mit dem Sammeln und Zubereiten von Wildkräutern verbundenen Erschließung traditionellen Wissens werden auch positive Beiträge in wald-, natur- oder wildnispädagogischen Konzepten erwartet (Fenton et al. 2020, Wistoft 2013). Es gibt plausible Abschätzungen, dass im Kontext einer Verbreitung entsprechender Lebensstile und Konsummuster die Nachfrage nach „natürlichen“ Produkten wie sie viele NHWP repräsentieren, weiter steigen wird (Vacik et al. 2020).

Wie sich die Verfügbarkeit der NHWP im Vergleich zur Nachfrage im Zuge des Klimawandels entwickeln wird, ist noch wenig untersucht. Es ist plausibel, dass eine Aufflichtung von Waldbeständen im Zuge von Störungen die Entwicklung mancher Arten begünstigt (Beeren, Wild), vorliegende Studien geben aber auch kritische Einschätzungen der zukünftigen Nutzungsmöglichkeiten ab (Calama et al. 2019, Herrero et al. 2019). Sowohl die entsprechenden wissenschaftlichen Modelle zur Abschätzung von deren Entwicklung, als auch die betrieblichen Konzepte für eine sinnvollen Koppelproduktion von Holz und NHWP unter klimatischen Veränderungen bedürfen insofern zunächst einer weiteren Entwicklung (Miina et al. 2020).

### 1.2.2.3 Klimaschutz

Wälder haben eine ausgleichende Funktion im Hinblick auf das standörtliche Kleinklima und auf den globalen Klimawandel. Beide Aspekte werden in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt.

#### Wirkung der Wälder auf das Kleinklima

Waldökosysteme haben ein ausgeprägtes Mikroklima unterhalb der Baumkronen, das durch verschiedene biophysikalische Prozesse reguliert wird und sich deutlich vom Klima der Umgebung unterscheidet. Für das Wachstum und Überleben von unterständiger Baum- und Strauchschicht und Sämlingen sowie anderen temperaturempfindlichen Arten ist dieses Innenklima von großer Bedeutung (von Arx et al. 2013, De Frenne et al. 2019), aber auch für die Erholungsfunktion der Wälder (siehe Kap. 1.2.2.6).

Der Wald wirkt sich ausgleichend auf das Kleinklima aus. Im Wald sind die Luft- und Bodentemperaturen in der Nacht höher und am Tag niedriger als im Offenland (von Arx et al. 2012), wegen des stärkeren Wärmeaustausches mit dem Offenland sind diese Unterschiede bei der Lufttemperatur geringer ausgeprägt als bei der Bodentemperatur (Mitscherlich 1981). Wälder fungieren also als s.g. Wäremeisolatoren. Der Temperaturunterschied zwischen dem Unterholz im Wald und offenem Gelände steigt bei zunehmenden Temperaturextremen (De Frenne et al. 2019). Der Einfluss des Waldes auf das Kleinklima hängt stark vom Großklima, der Wetterlage, der Bestandesstruktur oder auch der Baumartenzusammensetzung ab (Kovács et al. 2017). Auch die Waldfragmetrierung in der Landschaft, welche zu mehr Waldaußenrändern führt, erhöht die Temperaturamplitude und reduziert damit die Pufferwirkung des Waldes (Latimer und Zuckerberg 2017).

Eine Langzeitstudie zum Waldinnenklima in europäischen Wäldern zeigt bereits, dass das Mikroklima der Schlüssel zum Verständnis ist, wie Organismen und Ökosysteme auf makroklimatische Veränderungen reagieren. Veränderungen im Kronendach der Wälder sind dabei von grundlegender Bedeutung, wobei geschlossene Kronendächer die Auswirkungen des makroklimatischen Wandels durch ihre kühlende Wirkung abpuffern während ein lichtetes Kronendach durch lokale Erwärmungseffekte die Veränderungen in der Artenzusammensetzung hin zu wärmeliebenden Arten beschleunigen (Zellweger et al. 2020).

Weil bei der Verdunstung von Wasser Wärme verbraucht wird und weil die Erwärmung von Wasser langsamer ist als die von Luft, hängt das Mikroklima einer Fläche aus sehr stark von der Bodenfeuchte ab (Mitscherlich 1981). Das Mikroklima von

Waldökosystemen ist entscheidend für das Vorkommen vieler Pflanzen- und Tierarten und daher von großer Bedeutung für die Biodiversität (von Arx et al. 2013). Wegen der komplexen Interaktionen ist es derzeit noch nicht möglich, den Einfluss des Klimawandels auf die Temperatur in Wäldern mit großer Sicherheit vorherzusagen. Dies gilt besonders für die Waldbodentemperatur (von Arx et al. 2013) einschließlich der zu erwartenden Effekte auf Mineralisierungsprozesse.

Neben diesem Einfluss auf das Innenklima, haben Wälder aber auch einen großen Einfluss auf das Klima von Flächen in der Nachbarschaft. Dies macht man sich in Agroforstsystemen zu Nutze aber auch in der konventionellen Landwirtschaft (Zellweger et al. 2019). Bäume und Wälder spielen auch eine große Rolle für die Verbesserung des Klimas in Städten. Diese Leistung der Wälder versucht man in der Stadtplanung zu realisieren und passt das Management von urbanen Wäldern aber auch die innerstädtischen Strukturen entsprechend an (Petri et al. 2019). Letzteres ist wichtig, weil für den Kühlungseffekt von urbanen Bäumen oder Wäldern auch die Struktur der Stadt eine wichtige Rolle spielt (Meier und Scherer 2012). Da warme Wetterphasen in der Stadt oft viel extremer ausfallen als in ländlichen Gegenden und im Zuge des Klimawandels gehäuft auftreten, wird aber die Nutzung von städtischem Grün zur Klimaverbesserung eine immer größere Herausforderung.

#### Wirkung der Wälder auf den Klimawandel

Waldökosysteme haben in zweierlei Hinsicht Auswirkungen auf den Klimawandel. Zum einen beeinflussen sie die Treibhausgasbilanz zum anderen wirken sie auf die Strahlungsbilanz ein.

Die europäischen Wälder der gemäßigten Zonen liefern einen wichtigen Beitrag zur terrestrischen Kohlenstoffsенke und des Kohlenstoffspeichers (Luyssaert et al. 2010). Dies gilt auf Grund des vergleichsweise hohen Flächenanteils und der hohen Produktivität besonders für die Wälder in Deutschland (Weingarten et al. 2016). Wälder gehören aufgrund ihrer großflächigen Ausdehnung und ihrer hohen Kohlenstoffspeicherung zu den wirksamsten terrestrischen Kohlenstoffsенken. In der ober- und unterirdischen Biomasse, im Totholz und der organischen Bodensubstanz sind bedeutende Mengen an Kohlenstoff festgelegt. In Deutschland waren im Jahr 2012 insgesamt ca. 1.169 Mio. t Kohlenstoff in lebenden Bäumen und im Totholz gebunden. Zusätzlich waren in der Humusaufgabe und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe weitere ca. 850 Mio. t Kohlenstoff gespeichert (Wellbrock et al. 2014). Das entspricht einer Menge von durchschnittlich ca. 660 t CO<sub>2</sub>-Äq je ha Wald.

Die rezente Steigerung der Zuwachsrate der Holz-

biomasse in der Bundesrepublik (Riedel et al. 2019), des Totholzanteils (BMEL 2018), sowie die zunehmenden Kohlenstoffgehalte im Boden (Grüneberg et al. 2016) bestätigen die große Bedeutung der Wälder für den Klimaschutz in Deutschland. Die jährliche Senkenleistung der bundesdeutschen Wälder wird gegenwärtig mit ca. 58 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq kalkuliert (UBA 2020b). Gleichzeitig zeigen die vorliegenden Daten aber auch die Notwendigkeit, den Umgang mit den Wäldern nachhaltig im Hinblick auf die Bereitstellung dieser Ökosystemleistung zu gestalten, denn gerade wegen der hohen Kohlenstoffgehalte können Waldböden bei ungünstiger Veränderung des Kohlenstoffregimes von einer Kohlenstoffs Senke zu einer Kohlenstoffquelle werden (Nabuurs et al. 2013)

Anhaltende Stickstoffeinträge, intensivere Nutzung nährstoffreicher Biomassekompartimente und unsachgemäße Holzernteverfahren können die Bodenfruchtbarkeit und damit die Produktion von Biomasse, als dem primären Faktor der Klimaschutzfunktion der Wälder vermindern. Ebenso ist eine Anpassung der Baumartenzusammensetzung an Trockenheit und erhöhte Temperaturen notwendig, um die Produktionsleistung der Wälder aufrecht zu erhalten (siehe Kap. 1.2.1.2 und 1.2.1.7). Störungen der Waldökosysteme durch Windwurf, Schadorganismen, Trockenheit und Waldbrände können zu Mineralisierungsschüben und damit verbundenen Verlusten der organischen Bodensubstanz führen (Seidl et al. 2014, Buras et al. 2020). Auch die Auswirkungen dieser Prozesse auf die Klimaschutzleistung der Wälder ist bisher nicht quantifizierbar. Offen ist außerdem, ob und wann die Kapazität der Böden, Kohlenstoff in Form von organischer Bodensubstanz zu speichern, erschöpft ist. Auch könnte durch steigende Temperaturen der Abbau der organischen Bodensubstanz und damit die C-Speicherung der Böden herabgesetzt werden (de Vos et al. 2015). Oben erwähnte Wissenslücken hinsichtlich des Kleinklimas im Wald bergen weitere Unsicherheiten für diesbezügliche Abschätzungen.

Auch Waldmoore sind von großer Bedeutung für die Treibhausgasbilanz, weil im Moorkörper sehr viel Kohlenstoff gespeichert ist, der bei Entwässerung mineralisiert und in die Atmosphäre freigesetzt wird (Weingarten et al. 2016). Intakte Moore konservieren organische Substanz auf Grund der anaeroben Bedingungen über tausende von Jahren und haben eine bis zu 10-fach höhere Kohlenstoffkonzentration als mineralische Waldböden (SRU 2012). In intakten Mooren mit wachsendem Torfkörper ist der C-Speicherung – anders als in Mineralböden – im Prinzip kein Limit gesetzt. Allerdings ist diese Speicherung stark von hydrologischen und klimatischen Bedingungen abhängig. Steigende Temperaturen und sinkende Grundwasserspiegel führen zu einer Einschränkung dieser

Ökosystemleistung. Waldmoore sind Torfkörper, die im Waldverband liegen, teils jedoch auch offene Moorflächen bilden. Intakte Moore verhindern wegen der zumindest zeitweise anoxischen Bedingungen die Entwicklung geschlossener Waldbestände.

Nach Drainage wachsen Bäume sehr gut auf dem entwässerten Moorkörper. Die Wuchsleistung wird dort zusätzlich durch die Freisetzung von Nährstoffen begünstigt. Daher wurden in der Vergangenheit an vielen Standorten Moore entwässert (Goldbecker 2013). In Deutschland nehmen Moore nur 5% der Landoberfläche ein, dort werden jedoch 40% der Klimagase in der Kategorie Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) freigesetzt (Bechtold et al. 2014). Diese Aussage bezieht sich jedoch im Wesentlichen auf die kultivierten und heute landwirtschaftlich genutzten Moorflächen. Nach Angaben des BMU (2020) werden derzeit in Deutschland ca. 300.000 ha an Moorböden forstwirtschaftlich genutzt oder sind mit Gehölzen bewachsen. Im Staatswald gibt es vielerorts Bemühungen, renaturierbare Moorböden wieder zu vernässen. Hier ist die Frage, wie schnell diese Maßnahme zu einer Erhöhung der Nettospeicherung von Treibhausgasen führt, denn zunächst kann dadurch der aufstockende Wald absterben.

Die Klimaschutzleistung des nachgelagerten Sektors der Holzverwendung basiert auf dem Erhalt und dem Ausbau der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten sowie auf einer effizienten Verwendung von Holz in langlebigen Produkten, vor allem in Gebäuden (Hafner und Schäfer 2017). Für die Treibhausgasberichterstattung gemäß den Vorgaben der Klimarahmenkonvention ist allerdings die aktuelle Rate der Kohlenstofffestlegung wichtiger als die vorhandenen Speicher. Die Klimaschutzwirkungen des genutzten Holzes beruhen sowohl auf der Speicherung von biogenem Kohlenstoff in Holzprodukten als auch auf indirekten Effekten durch die Vermeidung energieintensiver hergestellter Alternativprodukte auf mehrheitlich konventioneller Rohstoffbasis (stoffliche Substitution), und dem Ersatz fossiler Energieträger durch Holz (energetische Substitution). So betrug die Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch die Erzeugung von Wärme und Strom aus fester Biomasse (die fast vollständig aus Holz besteht) im Jahre 2020 knapp 29 Mio t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (UBA 2021). Ersetzen die Holzprodukte in der Anwendung Produkte aus anderen Rohstoffen, deren Herstellung oder Nutzung meist mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden sind (z. B. Werner und Richter 2007, Würdehoff et al. 2011, 2017 Hafner et al. 2017), so werden stoffliche Substitutionspotenziale wirksam, die gemäß verschiedener Studien mittel- bis langfristig höher liegen als die Speicherwirkungen im Wald (z. B. Taverna et al. 2007).



Der Wald beeinflusst das Klima neben der Kohlenstoffspeicherung und -freisetzung aber auch durch seine regulierende Wirkung auf die Oberflächen und die Lufttemperatur. Dies wird durch die Evapotranspiration sowie die Albedo der Wälder determiniert. Untersuchungen in Europa haben gezeigt, dass Wald im Vergleich zum Offenland generell eine kühlende Wirkung auf die Oberflächen sowie Lufttemperatur hat (Tang et al. 2018, Naudts et al. 2016). Besonders ausgeprägt ist der Effekt tagsüber in den Sommermonaten. Laubwald weist eine höhere Albedo als Nadelwald auf. Das kommt dadurch zustande, da Laubblätter heller sind als Nadeln und da Laubbäume im Winter ihre Blätter abwerfen. Von den helleren Laubblättern im Sommer sowie der Bodenstreu und dem schneebedeckten Waldboden im Winter wird mehr Strahlung reflektiert und weniger absorbiert und in thermische Energie umgewandelt. Laubwälder haben daher eine stärkere kühlende Wirkung als Nadelwälder. Die Förderung resilienter Wälder mit hohem Anteil an Laubbäumen ist damit sowohl mit seiner Wirkung auf das Kleinklima als auch mit seiner Wirkung auf die Energiebilanz für den Klimaschutz von großer Bedeutung.

#### 1.2.2.4 Bodenschutz

Die Bodenbilanz ist weltweit negativ (Montgomery 2007), weil die Geschwindigkeit des Bodenverlusts um ein Vielfaches höher ist als die Neubildungsraten der Böden. Netto-Bodenneubildung findet in Deutschland vor allem unter Wald statt, denn Wald bietet eine ganzjährig geschlossene Vegetationsdecke und wirkt damit der Erosion von mineralischem Bodenmaterial entgegen. Geringerer externer Energie-Input, andere Quantität und Qualität in Böden eingetragener Biomasse, und anderes Mikroklima führen dazu, dass unter Wald andere Bodenbildungsprozesse stattfinden als auf Freiflächen oder in Grünlandstandorten oder Ackerböden. Zu diesen Wald-typischen Eigenschaften und Prozessen gehören hohe Gehalte an organischer Bodensubstanz mit einem hohen Anteil von Ligninbürtigen, relativ stabilen Kohlenstoff-Komponenten (Stutz et al. 2019), ausgeglichene Bodenfeuchte und Temperatur (von Arx et al. 2013, siehe Kap. 1.2.1.6), ungestörte Bodenstrukturbildung und geringe Trockenraumdichte bzw. hohes Porenvolumen (Leitgeb et al. 2013), eine hohe räumliche Heterogenität dieser Eigenschaften (van Miegroet 2019), hohe Diversität mikrobieller Gemeinschaften, sowie geringe Nährstoffverluste mit dem Sickerwasser (Lang et al. 2016, siehe Kap. 1.2.1.5).

Gerade diese für die Mitigation des Klimawandels so wertvollen Charakteristika werden durch den Klimawandel stark beeinträchtigt. Große Risiken

ergeben sich für Waldböden aus den geänderten klimatischen Bedingungen in Kombination mit zunehmenden Störungen, Kalamitätsnutzungen und der damit verbundenen Reduzierung der Überschildung des Bodens (siehe Kap. 1.2.2.3). Dadurch entstehen im Bergland Angriffsflächen für Wassererosion besonders bei Starkregen, sowie im Tiefland für Winderosion, besonders bei Trockenheit (WBW 2020). Erosion führt zum Verlust von Feinboden und Humus sowie den darin enthaltenen Nährstoffen, vermindert den Wurzelraum und kann im Extremfall an Hängen zu Rutschungen führen. Die Folgen sind erschwerte Wiederbewaldung und dauerhafte Standortverschlechterung, Zerstörung von Waldwegen, Beeinträchtigung der Wasserqualität in Einzugsgebieten von Talsperren bis hin zu Risiken für Siedlungen.

Die Baumartenzusammensetzung nimmt großen Einfluss auf Bodeneigenschaften (Dawud et al. 2016) und die Bodenentwicklung (McCarthy 2001, Phillips und Marion 2004). Über die Einflussnahme auf die Baumartenzusammensetzung trägt der Mensch daher auch zur Veränderung der Waldböden bei. Dazu gibt es aus der Vergangenheit negative und positive Beispiele. Die Übernutzung der Wälder über lange Zeiträume zusammen mit dem hohen Bedarf an Holz führte im 19. Jahrhundert in vielen Gegenden zum Anbau von im Hinblick auf den Nährstoffbedarf anspruchslosen Fichten- oder Kiefern Reinbeständen. Dies beschleunigte an vielen Standorten die Versauerung der Böden (Rehfuess 1990). Wohingegen der seit den 1990er Jahren verstärkte durchgeführte Umbau dieser Bestände in Mischwälder zur Verbesserung der Bodeneigenschaften führte. Eine Veränderung der Baumartenzusammensetzung zur Anpassung an veränderte Klimabedingungen kann ebenso zu langfristigen und nur schwer umkehrbaren Veränderungen der Bodeneigenschaften führen, je nach Baumart und Standort zu einer Verbesserung (Erhöhung des pH-Wertes, der Boden-Biodiversität und des Humusgehaltes) oder auch zur Verschlechterung.

Die Risiken im Zusammenhang mit einer möglichen Intensivierung des Biomasseentzuges aus Wäldern für den Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt der Böden wurde bereits in Kapitel 1.2.1.5 ausführlich beschrieben. Diese Intensivierung kann ebenso die Bodenschutzleistung der Wälder herabsetzen. Durch Holzernte können verstärkt Schäden an Böden verursacht werden. Dazu gehören beispielsweise Bodenverdichtung, Oberflächenabtrag durch Erosion und in hängigen Lagen verstärkte Bildung von Oberflächenabfluss (Haas et al. 2020). Im letzten Jahrzehnt gelang der Transfer zahlreicher technischer Weiterentwicklungen in die Praxis sowie die Erarbeitung von Empfehlungen für eine verbesserte Organisation der Holzernteinsätze, die derartige Schäden verringern kann

(Forbrig et al. 2008). Wobei die Einhaltung existierender Regelungen im Störfall eine besondere Herausforderung darstellt. Die Realisierung dieses Potenzials ist von großer Bedeutung für die Erhaltung der Bodenschutzfunktion der Wälder.

### 1.2.2.5 Trinkwasser, Gewässer- und Hochwasserschutz

Wie in Kapitel 1.2.1.6 ausgeführt, sind Wälder ein bedeutender Faktor im gesamten Wasserkreislauf. Sie bremsen bodennahe Luftströmungen und fördern die Aufnahme- und die Speicherfähigkeit der Vegetationsdecke für Wasser und dessen Verdunstung. Dies ist die Basis für die Ökosystemleistung, die Wälder im Hinblick auf die Bereitstellung von Trinkwasser sowie den Gewässer- und Hochwasserschutz erfüllen, wengleich wegen hoher Transpirationsleistung und Interzeption die Grundwasserspende unter Wald geringer ist als unter Ackerflächen (Ahrends et al. 2018). Wälder sind entscheidend zur Dämpfung und Verzögerung von Hochwasserspitzen. Aber auch für die Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Trinkwasser sind sie von zentraler Bedeutung. Ebenso wie der waldinterne Wasserkreislauf an sich, werden auch diese damit verknüpften Ökosystemleistungen negativ vom Klimawandel beeinflusst. Auch im Hinblick auf Biodiversität und Biotopschutz spielen Wälder für Gewässer eine wichtige Rolle, mit vielen essentiellen Kleinststandorten. Ein gutes Beispiel sind hier ephemere Kleinstgewässer mit unschätzbarem Wert als Laichplätze hochgefährdeter Amphibienarten (Feldmann 1974, Geise et al. 2020).

Das häufigere Auftreten von Starkregenereignissen (UBA 2019), erhöht den Oberflächenabfluss, da oft vorgeschaltete Trockenheit die Retentionskapazität der Böden für Wasser verringert und bei Auftreten von Trockenschäden und den damit verbundenen Verlusten an Blattfläche die Interzeption der Bestände reduziert wird. Der Oberflächenabfluss wird daher auf gestörten Flächen zum Beispiel nach Windwurf oder bei flächigem Absterben der Bäume verstärkt (Bronstert et al. 2001). Dies erhöht die Hochwassergefahr und vermindert die dämpfende Funktion der Wälder auf den Abfluss bewaldeter Einzugsgebiete. Auch eine Verschlechterung der Wasserqualität der Oberflächengewässer sowie des Grundwassers steht zu befürchten, z. B. durch die Umgehung des Bodenfilters, Stoffeintrag über bevorzugte Fließwege, Erhöhung der Salzkonzentration und geringere Verdünnung von Schadstoffen (Mosbrugger et al. 2014). In dieser Situation wird die Resilienz von Wäldern, im Sinne einer raschen Wiederbewaldung, für den Wasserrückhalt und die Dämpfung von Abflussspitzen in Einzugsgebieten von zunehmender Bedeutung sein (EEA 2015).

Besonders Waldbrände, deren Häufung im Zuge des Klimawandels ebenfalls zu erwarten ist, bedrohen die Ökosystemleistung des Waldes, qualitativ hochwertiges Wasser an das Grundwasser und die Oberflächengewässer zu spenden und Hochwasserspitzen zu vermeiden. Feuer verändert sowohl den Boden als auch die Vegetations- und Streudecke auf dem Boden, wodurch sich der Infiltrationsprozess für einige Jahre auf verbrannten Flächen verändert. Oberflächenabfluss und Erosionsraten steigen in den ersten Jahren nach dem Brand (Larson-Nash et al. 2018). Unmittelbar nach einem Brand absorbiert die Asche den Niederschlag und die Infiltration in den Mineralboden wird kurzzeitig verstärkt. Wird die Asche später durch Oberflächenabfluss den Hang hinuntergespült, kann sie dort die Bodenporen verstopfen, was zu einer Oberflächenversiegelung und sehr geringer Infiltration führt (Cerdá und Robichaud 2009).

Die Förderung resilienter Wälder mit hohem Anteil an Laubbäumen, die besonders in den Wintermonaten die Sickerwasserspende erhöhen (Reise et al. 2020), ist damit auch im Hinblick auf den Gewässer- und Grundwasserschutz im Klimawandel von großer Bedeutung.

### 1.2.2.6 Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus

Wälder haben Bedeutung als Ökosystem und als Produktionsraum für materielle Güter. Als „soziale Orte“ sind sie aber auch wichtige Grundlage vielfältiger kultureller Ökosystemleistungen (MEA 2005). Wälder bieten eine attraktive „Kulisse“ für naturgebundene Freizeitgestaltung, Bewegung, ästhetische Erlebnisse, Ruhe, aber auch sozialen Austausch, so wie sie Sportlerinnen, Jäger und andere Freizeitaktive nachfragen (Elsasser et al. 2009, Schraml 2009, Getzner und Meyerhoff 2020). Viele dieser Aktivitäten sind auch Gegenstand touristischer Angebote und haben insofern auch regionalwirtschaftlich eine nennenswerte Bedeutung (Zandersen und Tol 2009, Bertram und Larondelle 2017, Tyrväinen und Väänänen 1998).

Auch in der Wahrnehmung der Bevölkerung selbst haben die sozialen Formen der Waldnutzung in den letzten Jahrzehnten an Relevanz gewonnen, wengleich sie je nach Milieu oder Ethnie durchaus unterschiedlich genutzt werden. Gerade den stadtnahen Wäldern kommt im Rahmen des Konzepts einer „Urbanen Waldwirtschaft“ diesbezüglich eine herausragende Rolle zu (Schmithüsen et al. 1997, Lupp et al. 2016, Plieninger et al. 2015, Baumeister et al. 2020, Gerstenberg et al. 2020). Letzteres hängt unter anderem mit den Besonderheiten von Waldinnenklima und Waldluft zusammen, deren gesundheitsfördernde Wirkung derzeit vielfach beschrieben wird (Bauer et

al. 2016, Dadvand et al. 2016, Cervinka et al. 2013, Cho et al. 2017, Karjalainen et al. 2010, Rathmann et al. 2020). Der in vielen Regionen Deutschlands traditionelle Gesundheitstourismus macht sich diese Effekte zunehmend mit eigenen Angeboten wie Kur- und Heilwäldern sowie Waldbaden zu Nutze (Guan et al. 2017, Volz et al. 2018, Schuh und Immich 2013).

Für die Attraktivität guter Erholungswälder wird vor allem deren Lage zu den Wohnorten bzw. touristischen Zentren genannt, es liegen aber auch viele Studien über Präferenzen der Waldbesuchenden vor (Arnberger et al. 2018a, 2018b, Arnberger et al. 2017, Sheppard und Picard 2006, Cervinka et al. 2020, Gundersen und Frivold 2008, Edwards et al. 2012). Demnach besteht zwischen der visuellen Qualität der Wälder, der Zufriedenheit der Gäste, wie auch deren Interesse am Besuch und dem berichteten Erholungserlebnis ein Zusammenhang. Vitale, ältere Wälder mit kleinen Freiflächen und dem Zugang zu Wasser werden jenen vorgezogen, die viel Totholz oder „Gestrüpp“ aufweisen, große Freiflächen werden ebenso schlechter beurteilt als eng stehende Jungbestände.

Zugleich dienen Wälder als symbolischer und spiritueller Bezugs- und Lernraum, der sowohl Bildung für nachhaltige Entwicklung, als auch darüber hinausgehende Persönlichkeitsentfaltung ermöglicht. Wälder und ihre Böden beherbergen zudem Kulturdenkmale, die Relikte früheren menschlichen Lebens und Arbeitens darstellen. Als kostenfreier Begegnungs- und Erholungsraum stehen Wälder Angehörigen verschiedener Kulturen und Altersgruppen sowie Menschen mit und ohne Handicaps offen und sind so auch ein Ort sozialer Integration (Jay und Schraml 2009). Als Dachbegriff für diese vielfältigen kulturellen Ökosystemleistungen des Waldes wird im Folgenden der Begriff der Freizeit- und Erholungsnutzung verwandt (Bernasconi und Schroff 2008).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Attraktivität von Wäldern für die Freizeit- und Erholungsnutzung im Zuge der erwarteten klimatischen Veränderungen weiter zunimmt (Hahne et al. 2012). Die zu erwartenden Veränderungen im Ökosystem Wald und dessen Management können sich jedoch – von wenigen, die Aufenthaltsqualität fördernden Aspekten abgesehen – auch limitierend auf die Freizeit- und Erholungsnutzung sowie deren touristische Vermarktung auswirken. Gerade für den Wintertourismus werden viele Veränderungen erwartet (Endler und Matzarakis 2011).

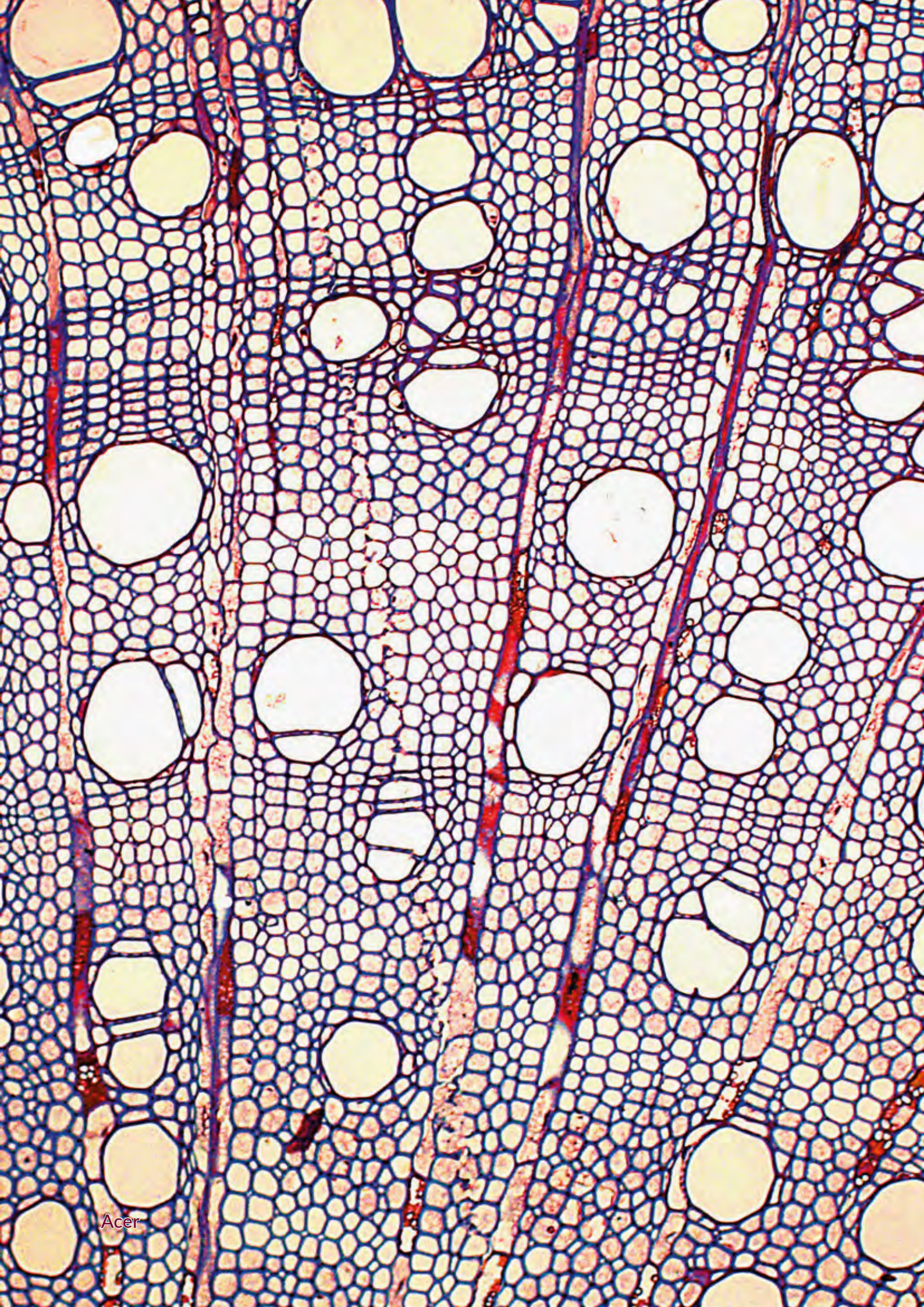
Die folgenden Veränderungen sind dabei besonders hervorzuheben (ausführliche Erläuterungen siehe Kap. 3.4):

- Veränderungen des Waldinnenklimas durch Störungen: Während das kleinräumige Wechselspiel von Licht und Schatten von den meisten Waldbesuchenden als angenehm erlebt wird, verändern große Unterbrechungen im Kronendach das Innenklima nachteilig, z. B. durch höhere Temperaturen, Änderung der Strahlungsverhältnisse, Verlust an Luftfeuchtigkeit und den Verlust an Immissionsschutz. Absterbende Baumbestände können nur noch sehr wenig zu einem ausgleichenden Waldinnenklima beitragen – bei gleichzeitig steigendem Bedarf an Kühlung und Regeneration durch Waldbesuche (Rupp und Knoefel 2015).
- Erhöhte Konfliktpotentiale mit Forstbetrieben nach Störungen: Das intensive Management, das vielen Störungen in Waldbeständen folgt, geht mit Einschränkungen für Waldbesuchende einher: Sperren, Begegnungsverkehr, Lärm, visuelles Erleben von Maschinen und deren Spuren, schlechte Wegequalität. Es ist mit einer Häufung von Faktoren zu rechnen, die von Erholungssuchenden meist negativ bewertet werden (Eriksson et al. 2012, Edwards et al. 2012).
- Verlust an visueller Qualität durch hohe Anteile von Totholz: Obwohl es viele Bemühungen gibt, z. B. in Schutzgebieten die Bedeutung von Totholz zu erklären, reagieren die meisten Menschen auf sterbende Bäume mit negativen Gefühlen. Insbesondere auf der Landschaftsebene ist bei großen Mengen von stehendem Totholz von einer erheblichen Reduktion der wahrgenommenen visuellen Qualität auszugehen (Ehrhart und Schraml 2014, Arnberger et al. 2018a, 2018b).
- Verlängerung von Vegetationsperiode und Erholungssaison: Moderat wärmere Temperaturen, eine zu erwartende längere Vegetationsperiode und eine längere Sonnenscheindauer können dagegen zu einer als positiv empfundenen Verlängerung der Saison für Radfahren und Wandern sowie weitere Sportarten beitragen (Pompe et al. 2011, Hahne et al. 2012). Längere Zeitfenster für Freizeitaktivitäten im Tages- und Jahresverlauf können jedoch auch zu konfliktträchtigen Überlappungen mit Zeitfenstern für Waldarbeiten führen.
- Zunahme von Gesundheitsgefährdungen durch Allergene und Infektionen: Eine längere Wärmeperiode und die damit einhergehende längere

Vegetationsperiode führt zu einer Verlängerung der Pollenflugzeit (Behrendt 2008). Sie begünstigt zudem die Aktivität von Überträgern waldbasierter Infektionen (z. B. Zecken) und Verbreitung von allergenen Reaktionen durch bereits bekannte Schadorganismen wie den Eichenprozessionsspinner (Eis et al. 2010). Die Ahorn-Rußrindenkrankheit ist nicht nur für Bäume bedrohlich, sondern kann infolge der Sporen des durch die Erwärmung begünstigten Pilzes beim Einatmen schwere Entzündungen der Lungenbläschen beim Menschen hervorrufen (Lehmann 2010).

neben Neophyten auch die angestrebten höheren Laubbaumanteile. Insbesondere Birke, Hasel und Erle stellen als typische Baumarten auf Störungsflächen gegebenenfalls auch ein gesundheitliches Risiko dar (Steinparzer 2020).

- Zunahme von Extremwetterereignissen: Extremwetterereignisse wie Starkregen wirken sich beeinträchtigend auf Wege als zentrale Erholungsinfrastruktur aus. Das Fehlen von längeren Frostperioden steigert die Gefahr von Bodenschäden durch Holzerntemaschinen bzw. verringert die Begehrbarkeit von Wegen. Zugleich können im Boden befindliche Kulturdenkmale bei verstärkt erforderlichen forstlichen Räumungsarbeiten stärker als bisher in Mitleidenschaft gezogen werden.
- Risiken für Waldbesuchende durch Störungen: Durch Sturm- oder Dürreeinwirkung beeinträchtigte Bäume erhöhen das Unfallrisiko und den Aufwand von Waldbesitzenden für die Gewährleistung der Verkehrssicherungspflicht. Es ist davon auszugehen, dass die Verkehrssicherung von Waldwegen nicht flächendeckend im gewohnten Umfang aufrechterhalten werden kann. Durch das entstehende Unfallrisiko würde die für die Erholung weitgehend sicher nutzbare Waldfläche zurückgehen. Infolge zunehmender Temperaturen steigt zudem das Waldbrandrisiko (Badeck et al. 2004).
- Ästhetische und gesundheitliche Folgen einer veränderten Artenzusammensetzung: Mit veränderter Baumartenzusammensetzung verändert sich auch das Erscheinungsbild von Wäldern. Prägende alte Baumbestände gehen zurück, das Bild des (immer)grünen Waldes muss langfristig revidiert werden, der gewohnte Anblick des Waldes wandelt sich. Die Einführung oder Einwanderung neuer Arten, sogenannter Neozoen, wird in Teilen der Bevölkerung als irritierend erlebt, bietet aber auch die Chance auf das Erleben neuer attraktiver Tier- und Pflanzenarten (Pearce 2016). In der Medizin intensiv diskutiert und Gegenstand aktueller Forschung sind die Folgen eines neuen Artenrepertoires für Allergiker. Studien gehen von einer stark steigenden Betroffenheit in der Bevölkerung aus (Smith et al. 2014, Storkey et al. 2014, Lake et al. 2017). In der Diskussion stehen dabei



Acer

# 2

## Relevante Grundlagen und Politiken für die Anpassung von Wäldern und Forstbetrieben

### 2.1 Grundlagen der nachhaltigen Waldbewirtschaftung

Die Informationen zu Eigentums- und Betriebsstrukturen von Forstbetrieben und deren durchschnittlichen Wirtschaftsergebnissen zeigen auf, wie aktuell ein nachhaltiges Wirtschaften in den Betrieben ermöglicht wird und welche gravierenden Auswirkungen Schadereignisse wie beispielsweise die Dürren von 2018 und 2019 auf Betriebe und die ganze Forstbranche auslösen können.

#### 2.1.1 Eigentums- und Betriebsstruktur, Forstorganisation

In Deutschland befindet sich 48% der Waldfläche in Privatbesitz, 29% gehört den Bundesländern, 19% den Körperschaften und 4% dem Bund (BMEL 2021). Die Waldbewirtschaftung und die Erfüllung der sonstigen mit dem Waldbesitz verbundenen Aufgaben erfolgt in der Regel durch Forstbetriebe. Diese in Deutschland extrem vielfältig gestaltet. Sie unterscheiden sich neben der Eigentumsart und Betriebsgröße durch die jeweils vorhandenen Baumarten, standörtliche Situation, regionale Lage, Vorratsausstattungen, Bewirtschaftungssysteme und das betriebliche Leistungsspektrum, wobei sehr unterschiedliche Ziele verfolgt werden können. So kann beispielsweise ein Kommunalwaldbetrieb in einem Verdichtungsraum das prioritäre Ziel auf die Gestaltung von Erholungswald legen, eine große öffentliche Forstverwaltung eines Flächenlandes kann auf Multifunktionalität und damit die gleichrangige Bereitstellung der verschiedenen Ökosystemleistungen des Waldes abzielen und ein kleinerer Privatwald kann vorrangig der Eigenversorgung mit Brennholz, dem Erhalt des Besitzes oder der Erzielung von Arbeitseinkommen dienen.

Dabei sichert die große Vielfalt der Eigentümer und der betrieblichen Rahmenbedingungen insgesamt auch eine große Vielfalt im deutschen Wald. Gleichzeitig zeichnet sich die Struktur der Forstbetriebe in Deutschland durch eine bemerkenswerte

Beständigkeit aus. Die jährlichen Waldverkäufe bewegen sich nur im Bereich von gut 1 Promille des vorhandenen Bestandes (Löffler 2005).

Nach allgemeiner Definition sind Forstbetriebe, wie andere Betriebe auch, planvoll organisierte Wirtschaftseinheiten, in denen Sachgüter und Dienstleistungen produziert und auf Märkten abgesetzt werden. Für Forstbetriebe ist typisch, dass sie über Waldflächen als „Produktionsstätten“ verfügen und dass ihre Produkte (wie beispielsweise das Rohholz) unter Ausnutzung von sehr langfristigen, zum Teil ein Jahrhundert umspannenden, natürlichen Prozessen erzeugt werden. Dies ist mit nicht unerheblichen Risiken (Sturm, Feuer, Insekten, Pilzen etc.) behaftet und mit nur sehr geringen Interventionen (kaum Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz etc.) verbunden.

Ebenfalls ist es ein Spezifikum der Forstwirtschaft, dass bei der Rohholz-Produktion auch eine Vielzahl von „positiven externen Effekten“ (beispielsweise für Wasserschutz, Naturschutz, Erholung, Klimaschutz etc.) entstehen. Sie werden heute meist als „Ökosystemleistungen“ bezeichnet. Die Bedeutung dieser gesellschaftlichen Leistungen übertrifft in der öffentlichen Wahrnehmung vielfach die Bedeutung der marktfähigen Leistungen (Lorenz und Elsasser 2018, Hampicke und Schaefer 2021), wobei diese Beobachtung stärker auf die Stadt- als auf die Landbevölkerung zutrifft. Die Bereitstellung von regulierenden und kulturellen Ökosystemleistungen führen jedoch regelmäßig nur zu vernachlässigbar geringen Einnahmen bei den Forstbetrieben (Ermisch et al 2015). Forstbetriebe sind komplexe Systeme und auf vielfältige Weise mit ihrer ökonomischen Umwelt verknüpft:

- Zu Beginn des Betriebsprozesses steht die Beschaffung von Personal, Investitionsgütern (Waldflächen, Maschinen etc.) und Verbrauchsgütern (Treibstoffe, Pflanzenmaterial etc.). Dann folgt ein komplexer, meist über mehrere Jahrzehnte andauernder biologisch-technischer Kombinationsprozess, an dessen Ende die erstellten Leistungen (insbesondere in Form von verkaufsfähig

aufgearbeitetem Rohholz) stehen. Die betrieblichen Leistungen werden anschließend an andere Betriebe bzw. Haushalte vermarktet.

- Dieser güterwirtschaftliche Ablauf gelingt nur, wenn er im Gegenstrom auch finanziert werden kann, denn Personal, Investitions- und Verbrauchsgüter müssen bezahlt werden, der Staat erhebt Abgaben und Steuern und die Kapitalgeber und Eigentümer erwarten Entlohnung für das eingesetzte Kapital oder die eingesetzte Arbeit und auch eine Tilgung von Verbindlichkeiten.
- Die dafür notwendigen finanziellen Mittel stammen ganz überwiegend aus den Erlösen des Holzverkaufs. Das Testbetriebsnetz Forst weist im Privatwald beispielsweise im Jahr 2017 (BMEL 2019a) Umsatzerlöse für Holz in Höhe von rund 370 €/ha aus, das sind rund 86% des betrieblichen Ertrages.
- Es ist eine Stärke nachhaltiger Forstbetriebe, dass sie in der Regel kontinuierlich Einnahmen erzielen, mit denen sie die laufenden Betriebsprozesse (wie Waldverjüngung, -pflege und -schutz, Verwaltung etc.) aufrechterhalten können. Forstbetriebe aller Eigentumsarten versuchen meist, Einlagen (Zuschüsse der Eigentümer) oder auch Kreditaufnahmen auf dem Kapitalmarkt zu vermeiden. So wurden in der jüngeren Vergangenheit vielfach auch öffentliche Forstbetriebe in Form von Eigenbetrieben oder Anstalten des öffentlichen Rechts aus den Landeshaushalten ausgegliedert, mit der Maßgabe, in der Rohholzproduktion nachhaltig erfolgreich zu wirtschaften.
- Hinzuweisen ist hier auch darauf, dass die (private) Forstwirtschaft von der öffentlichen Hand nur eine vergleichsweise geringe Förderung erfährt. Das schon erwähnte Testbetriebsnetz Forst weist für 2017 Fördermittel (BMEL 2019a) im Privatwald > 200 ha von rund 9 €/ha aus; dies ist vollkommen anders als in der Landwirtschaft, dort belaufen sich die Direktzahlungen und Zuschüsse in landwirtschaftlichen Betrieben auf rund 410 €/ha (BMEL 2019b), sie sind je Hektar also fast 50mal so hoch. Den Großteil an dieser Summe machen zudem die Direktzahlungen der EU aus. Sie fließen den landwirtschaftlichen Betrieben ohne weitere

Leistungen zu. Die Förderung in der Forstwirtschaft ist in der Regel hingegen an die Durchführung von spezifischen Maßnahmen gebunden, für die den Forstbetrieben auch Kosten entstehen.

In der Vergangenheit haben vielfach die Forstverwaltungen bzw. -betriebe der Bundesländer die Betreuung des kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswaldes übernommen. Diese staatliche Dienstleistung wurde meist zu vergünstigten Tarifen angeboten und das geerntete Holz gemeinsam mit demjenigen aus dem Staatswald vermarktet. Diese Form der „indirekten Förderung“ ist seit mehr als einem Jahrzehnt Gegenstand kartellrechtlicher und auch beihilferechtlicher Auseinandersetzungen und Grund für die in den meisten Bundesländern laufenden oder bereits vollzogenen Umstellungen im Bereich der Beratung, Betreuung und Bewirtschaftung des Nichtstaatswaldes.

Nach Hochrechnungen des WBW (2018) auf Basis des Testbetriebsnetzes Forstwirtschaft des BMEL beliefen sich die bundesweit für die indirekte forstliche Betreuung eingesetzten Haushaltsmittel auf rund 250 Mio. Euro pro Jahr. Dieser Betrag liegt weit über der bisher üblichen Höhe der gesamten Förderung forstlicher Maßnahmen im Rahmen der GAK (Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz) für Waldumbau, Waldwegebau etc., die sich zusammen mit den entsprechenden, durch die EU über ELER (Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raumes) geförderten Anteilen auf rund 60 Mio. Euro pro Jahr beliefen<sup>1</sup> (vgl. auch Kap. 2.4)

Die „direkte forstliche Förderung“ des Privat- und Körperschaftswaldes wird in Deutschland bisher ganz überwiegend im Rahmen der GAK umgesetzt, welche eine Beteiligung der Länder an der Finanzierung und Umsetzung der Maßnahmen voraussetzt. Vor dem Hintergrund verschiedener Ziele, Konzepte und Finanzierungsmöglichkeiten bestehen in den Ländern sehr vielfältige Regelungen der forstlichen Förderung. Die Förderangebote sind sehr unübersichtlich (insbesondere bei waldbaulichen Regelungen beispielsweise zu Baumarten, Stammzahlen etc.), mit nicht unerheblichen Rückforderungsrisiken behaftet (beispielsweise bei Nichterreichung der Verjüngungsziele und als Folge von „Cross Compliance“) und entsprechen häufig nicht den Bedürfnissen der Forstbetriebe. Auch ändern sie sich regelmäßig und sind meist finanziell nur schwach ausgestattet – so dass sich die ausgereichten

1 Zur Bewältigung der aktuellen Schäden im Wald wurden die GAK-Bundesmittel deutlich auf insges. 478 Millionen Euro aufgestockt, so dass mit dem Anteil der Länder Hilfen für den Wald im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK) aktuell rund 800 Millionen Euro zur Verfügung stehen; parallel wurden im Jahr 2020 vom Bund im Rahmen des Corona-Konjunkturpaktes für Wald & Holz insgesamt 700 Millionen Euro bereitgestellt (500 Mio. EUR für die Nachhaltigkeitsprämie Wald, die restlichen 200 Millionen Euro für Investitionen in die moderne Forst- und Holzwirtschaft und das Bauen mit Holz).

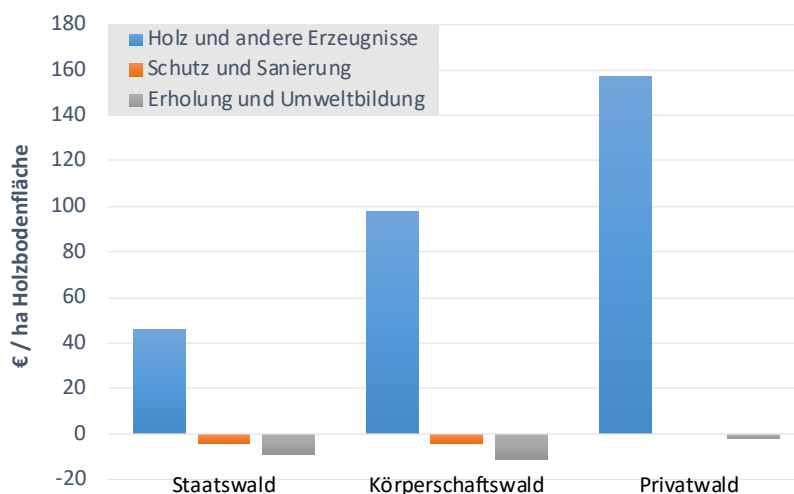
Förderbeträge häufig in einem ungünstigen Verhältnis zu der Regelungsdichte befinden.

### 2.1.2 Wirtschaftsergebnisse

Die wirtschaftliche Situation von Forstbetrieben soll hier anhand von Ergebnissen des sogenannten Testbetriebsnetzes Forst des BMEL noch etwas differenzierter dargestellt werden. Alljährlich werden die Wirtschaftsergebnisse von repräsentativ ausgewählten Forstbetrieben aller Eigentumsarten erfasst und zentral ausgewertet und dokumentiert, wobei in die Erhebung nur Forstbetriebe mit einer Mindestgröße von 200 ha<sup>2</sup> einbezogen werden.

Zur Gewährleistung eines Mindestmaßes an Vergleichbarkeit der Betriebsergebnisse in der Forstwirtschaft hat der Deutsche Forstwirtschaftsrat (DFWR) den sogenannten „Produktplan Forst“ entwickelt. Dadurch soll berücksichtigt werden, dass Forstbetriebe in der Regel ein breites Spektrum an verschiedenen Tätigkeiten versehen. So werden beispielsweise alle Aktivitäten im Bereich der Rohholzproduktion gemeinsam mit anderen marktfähigen Produkten im

Produktbereich „Produktion von Holz und anderen Erzeugnissen“ zusammengefasst. Der Produktbereich 2 „Schutz und Sanierung“ fasst die Maßnahmen insbesondere in den Bereichen Natur- und Artenschutz und Schutzwaldsanierung zusammen. Der Produktbereich 3 „Erholung und Umweltbildung“ umfasst die für öffentliche Forstbetriebe zunehmend wichtigen Aktivitäten zur Sicherung der Erholungsfunktion und Waldpädagogik. Der Produktbereich 4 „Leistungen für Dritte“ enthält insbesondere forstliche Beratungs- als Betreuungsdienstleistungen, die sowohl von öffentlichen als auch (größerer) privaten Forstbetrieben erbracht werden können. Der Produktbereich 5 „Hoheits- und sonstige behördliche Aufgaben“ adressiert die forstbehördlichen Tätigkeiten (wie Forstaufsicht, Fachplanungen, Vergabe Fördermittel und Versuchswesen), die im Rahmen von Einheitsforstverwaltungen zum Teil auch von öffentlichen Forstbetrieben wahrgenommen werden. Die Abbildung zeigt die vom BMEL veröffentlichten Ergebnisse in den Produktbereichen 1–3 für das Jahr 2017<sup>3</sup> der Eigentumsarten Staatswald, Körperschaftswald und Privatwald (verkürzt aus BMEL 2019a).



**Abb. 23:** Wirtschaftsergebnisse des Testbetriebsnetzes Forst des BMEL des Jahres 2017 in den Produktbereichen 1 „Holz und andere Erzeugnisse“, 2 „Schutz und Sanierung“ sowie 3 „Erholung und Umweltbildung“ für Forstbetriebe der Eigentumsarten Staatswald, Körperschaftswald und Privatwald > 200 ha (gekürzt, siehe BMEL 2019a). Staatswald: Vorläufige Daten; Flächenstaaten ohne Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Saarland.

2 Diese Mindestgröße erklärt sich daraus, dass für die Datenerhebung eine organisatorische und technische Mindest-Infrastruktur bestehen muss und dass es sinnvoll ist, die Erhebungen in jährlich nachhaltig wirtschaftenden, und nicht in „aussetzenden“ Betrieben, die nur gelegentlich forstlich tätig sind, durchzuführen. Man muss sich aber im Klaren darüber sein, dass das Gros der Forstbetriebe des Kleinprivatwaldes in Deutschland nicht von dieser Erhebung erfasst wird.

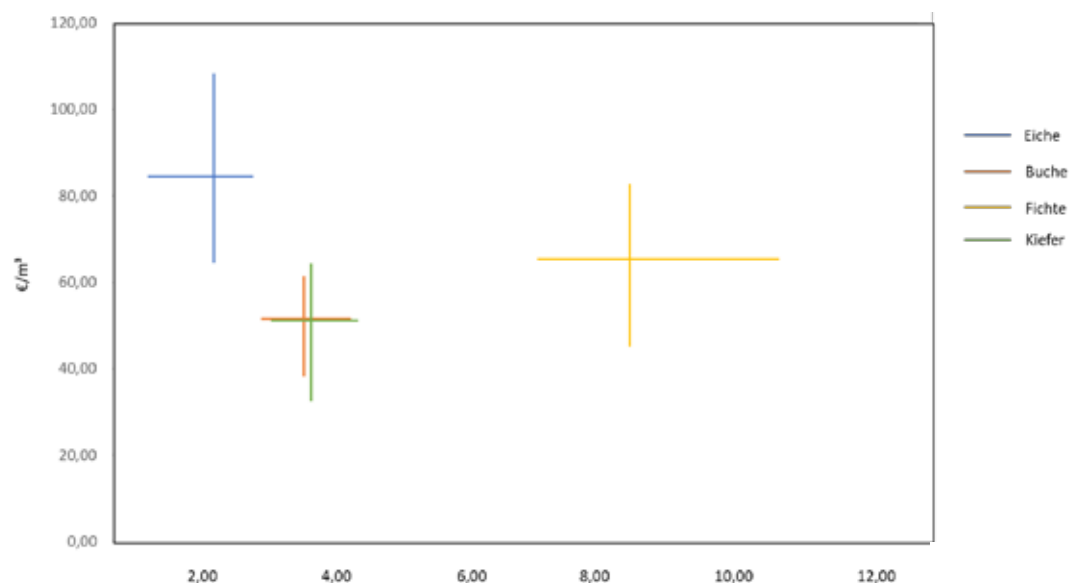
3 Hier wurden bewusst die Ergebnisse des Jahres 2017 zur Darstellung ausgewählt, weil das Jahr als vergleichsweise „normales“ Jahr bezeichnet werden kann und die Zahlen noch nicht durch die aktuellen Schadereignisse der Jahre 2018 – 2020 überprägt sind.



Es wird erkennbar, dass der Produktbereich 1 „Produktion von Holz und anderen Erzeugnissen“ im Jahr 2017, also vor den Schäden der Jahre 2018 – 2020, in allen Eigentumsarten im Mittel mit einem positiven Betriebsergebnis (Staatswald 46 €/ha, Körperschaftswald 98 €/ha, Privatwald 157 €/ha) abgeschlossen hat. Bezieht man das vergleichsweise günstige Betriebsergebnis des Jahres 2017 des Privatwaldes von rund 150 EUR/ha auf einen Verkehrswert von Waldflächen von beispielsweise ca. 15.000 EUR/ha<sup>4</sup>, so ergibt sich die für Forstwirtschaft typische vergleichsweise geringe Kapitalrentabilität von ca. 1%. Die Produktbereiche

2 und 3, „Schutz und Sanierung“ und „Erholung und Umweltbildung“ führen hingegen in allen Eigentumsarten zu negativen Ergebnissen und müssen mithin aus dem Produktbereich 1, also der Rohholzproduktion „quer-subsidiert“ werden.

Auf zwei forstökonomisch wichtige, in der Diskussion des Themas „Klimaanpassung“ bisher wenig beachtete Zusammenhänge soll hier noch hingewiesen werden. Sie werfen jeweils ein Schlaglicht auf die Ertrags- als auch Aufwandssituation von den Forstbetrieben.



**Abb. 24:** Durchschnittliche Erlöse und jährlicher Einschlag pro Hektar der Hauptbaumartengruppen nach Testbetriebsnetz Forstwirtschaft des BMEL, aktualisierte Auswertung auf Grundlage von Ermisch et al. 2013, Zeitraum 2003 - 2018.

Der erste Aspekt betrifft die „ökonomische Leistungsfähigkeit“ der verschiedenen Baumarten. Die Abbildung 24 zeigt anschaulich die über 16 Jahre hinweg stabilen deutlichen Unterschiede zwischen den Hauptbaumartengruppen Eiche, Buche, Kiefer und Fichte hinsichtlich ihrer Durchschnittserlöse und ihrer Flächenproduktivität. Da der Holzertrag das Produkt aus Erntevolumen und Holzerlös ist, wird aus der Abbildung deutlich erkennbar, dass die Baumart Fichte bisher aufgrund ihrer hohen Flächenproduktivität und ihrer guten Durchschnittserlöse den mit Abstand höchsten Beitrag zum Ertrag der Forstbetriebe in Deutschland geleistet hat. Der Ausfall dieser Baumart als Folge der Sturm- und Borkenkäferschäden und

des Klimawandels ist wirtschaftlich also für die Forstbetriebe extrem schmerzhaft und erfordert neben der Förderung von klimaresilienten Ersatzbaumarten die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle.

Bezüglich der Aufwands-Ertragsverhältnisse hat die Kennzahl des Verhältnisses zwischen dem durchschnittlichen Erlös eines Festmeters Rohholz und der Anzahl der daraus bezahlbaren produktiven Arbeitsstunden eine hohe Aussagekraft. Hier muss man feststellen, dass aktuell (2018) nur noch rund zwei Arbeitsstunden aus dem mittleren Erlös eines Festmeters Rohholz bezahlt werden können, Anfang der 1970er Jahre konnten noch rund acht Arbeitsstunden (also ein ganzer Waldarbeiter-Arbeitstag) daraus bezahlt

<sup>4</sup> Für das Bundesgebiet gibt es keine einheitliche Statistik über Kaufpreise (Verkehrswerte) von Waldflächen; die oberen Gutachterausschüsse der Bundesländer veröffentlichen aber gegebenenfalls entsprechende Zahlen im Internet, beispielsweise Grundstücksmarktbericht 2020 Nordrhein-Westfalen ([https://www.boris.nrw.de/borischachdaten/gmb/2020/GMB\\_000\\_2020\\_pflichtig.pdf](https://www.boris.nrw.de/borischachdaten/gmb/2020/GMB_000_2020_pflichtig.pdf)): durchschnittl. Kaufpreisniveau für forstwirtschaftlich genutzte Grundstücke (incl. Bestand) 1,57 €/m<sup>2</sup>.

werden (Möhring und Dög 2019). Diese Entwicklung der ökonomischen Input-Output-Relationen verdeutlicht mithin, unter welchem Rationalisierungsdruck die forstliche Betriebswirtschaft schon in den letzten Jahrzehnten gestanden hat und sie erklärt, warum in großem Stil Personal abgebaut und die Mechanisierung im Wald vorangetrieben wurde.

### 2.1.3 Eingetretene Schäden der Jahre 2018/19/20 und ihre wirtschaftlichen Folgen

Umfang und Bedeutung der durch Stürme, Trockenheit, Käfer und Pilze ausgelösten Waldschäden der Jahre 2018–2020 wurden bisher ganz überwiegend mittels natürlicher Kennziffern kommuniziert. So meldeten BMEL (2020b) und EUWID (2020) ein Schadholzaufkommen von ca. 176,8 Mio. Erntefestmeter (Efm) und eine wieder zu bewaldende Schadfläche von ca. 284.500 ha. Über die dadurch entstandenen wirtschaftlichen Verluste haben Experten aus Praxis, Wissenschaft und Verwaltung erstmalig im Jahr 2021 eine ökonomische Zwischenbilanz für die Waldschäden 2018–2020 vorgelegt (Möhring et al. 2021). Dazu wurde auf die oben genannten Daten zum Schadensausmaß, etablierte Bewertungsmodelle und betriebswirtschaftliche Datenquellen und, wo diese fehlen, auf Expertenschätzungen zurückgegriffen. Insgesamt wurde der zu ermittelnde Gesamtschaden in verschiedene Schadenskomponenten zerlegt, für die jeweils getrennte Abschätzungen erfolgen.

- Mehrkosten und Mindererlöse beim aufgearbeiteten Schadholz: Sie entstehen durch erschwerte Aufarbeitungsbedingungen, Maßnahmen der Holzkonservierung aber auch als Folge knapper Aufarbeitungskapazitäten, durch Ernteverluste (als Folge von Bruch, Gesundschneiden etc.), Sortenverschiebungen sowie Holzentwertungen (Abwertung des Stammholzes D etc.) und insbesondere auch durch kalamitätsbedingte Marktstörungen.
- Abschreibung des nicht aufgearbeiteten Schadholzes: Zusätzlich zu dem verwerteten Schadholz ist noch der Anteil der nicht aufgearbeiteten Schadholzmenge zu bewerten. Dabei wurde vereinfachend unterstellt, dass dieses Schadholz ohne zusätzliche Kosten im Wald verbleibt und wirtschaftlich abzuschreiben ist.
- Hiebsunreife: Durch Kalamitäten fallen nicht hiebsreife Waldbestände aus, deren Ertragspotenzial verloren geht. Diese Verluste werden in der Waldbewertung als „Hiebsunreife“ bezeichnet und sind den Mehrkosten/Mindererlösen beim

Kalamitätsholzeinschlag hinzu zu rechnen; siehe Möhring et al. (2021) zur Herleitung.

- Mehrkosten der Wiederbewaldung: Die Wiederaufforstung von Kalamitätsflächen verursacht in der Regel unmittelbar Mehrausgaben, beispielsweise für die Flächenräumung, erschwerte Arbeitsbedingungen und erhöhte Pflanzenzahlen wegen der Freiflächenbedingungen und des Fehlens von Naturverjüngung, wobei sich die Mehrkosten auch in der Bestandespflege fortsetzen. Da bei der Wiederbewaldung der Kalamitätsflächen wertmäßig ein neues Wirtschaftsgut entsteht, ist der Ausbuchung der abgestorbenen Bestände eine rechnerische Zuschreibung für die neu erstellten Kulturen entgegenzustellen, wobei dafür als Referenz die „Normalkosten“ der Bestandesbegründung gewählt wurden. Mithin gingen nur die Mehrkosten der Bestandesbegründung in die Schadensberechnung ein.
- Sonstige betriebliche Mehrkosten: In von Kalamitäten betroffenen Forstbetrieben entstehen betriebliche Mehrkosten durch zusätzliche Belastungen des Verwaltungspersonals, erhöhte Aufwendungen für Verkehrssicherung, starke Inanspruchnahme beispielsweise der Wegeinfrastruktur usw.; diese betrieblich zum Teil sehr bedeutenden Mehrkosten ließen sich nur pauschal einschätzen.
- Zuwachsverluste: Anders als bei den bisher betrachteten Schadenskomponenten, die sich auf zerstörte/ausgefallene Waldbestände beziehen, wirken sich Extremtemperaturen/Wassermangel durch Zuwachsverluste auch auf überlebende Waldbestände aus, wobei Zuwachsschäden in der Regel eine längere Periode als die eigentliche warm/trockene Phase betreffen. Da für die durch die Trockenheit 2018–2020 in Deutschland entstandenen Zuwachsverluste derzeit noch keine empirischen Erhebungen/Auswertungen vorliegen, wurden die Zuwachsverluste stark vereinfachend für den 3-jährigen Zeitraum 2018–2020 eher vorsichtig auf den 1,5-fachen Betrag des Zuwachsschadens geschätzt, den Beck (2010) für Deutschland nach dem Hitze- und Trockenjahr 2003 auf der Grundlage von Jahrringanalysen auf den Level-II Plots ermittelt hat.

Für die zuvor beschriebenen Schadenskomponenten ermittelte die erwähnte Studie bei einer „vorsichtigen“ Bewertung einen Schadenbetrag in Höhe von insgesamt rund 12,75 Mrd. € (siehe Tab.2), wobei der überwiegende Teil dieses Betrages Schäden in den Waldbeständen betrifft, die im forstlichen Rechnungswesen

nicht unmittelbar erkennbar werden, sondern einer kalkulatorischen Bestandesrechnung bedürfen.

**Tab. 2:** Synopse der hier bewerteten forstbetrieblichen Schadenskomponenten für die Schadensjahre 2018 – 2020 (aus Möhring et al. 2021)

	Betrag (Mio. €)	Anteil (%)
Mindererlöse und Mehrkosten Kalamitätseinschlag	3.891	31
Schadensbetrag nicht absetzbares Schadholz	1.154	9
Hiebsunreife-Verlust für Kalamitätsflächen	2.275	18
Mehrkosten Wiederbewaldung der Kalamitätsflächen	1.364	11
Mehrkosten Verwaltung	587	5
Wertzuwachs-Verlust	3.481	27
Summe	12.753	100

Der Gesamtschaden beläuft sich auf fast das 10-fache des jährlichen Nettounternehmensgewinns des Wirtschaftsbereiches Forstwirtschaft<sup>5</sup>. Zu betonen ist, dass hiermit „lediglich“ die bereits feststellbaren Schäden für die Ökosystemleistung Rohholzproduktion der multifunktionalen Forstwirtschaft in Deutschland, nicht jedoch zu erwartende Folgeschäden und Schäden für die weiteren Ökosystemleistungen, wie zum Beispiel Biodiversität, Klimaschutz oder Erholungswert, bewertet wurden.

Auch wenn die hier vorgestellten Zahlen geeignet erscheinen, summarisch die aktuelle wirtschaftliche Betroffenheit der Forstwirtschaft in Deutschland aufzuzeigen, so sind sie doch nur eine Momentaufnahme in einem sehr dynamischen Geschehen. Entsprechende Erhebungen und Auswertungen sollten deshalb jährlich fortgeführt werden, wobei im Sinne eines effizienten ökonomischen Waldschadensmonitorings sowohl die Datenerfassung als auch die Bewertungsmethoden laufend zu verbessern sind. Idealerweise finden dann auch betrieblich differenzierte Erhebungen statt, welche die große Spannweite zwischen den einzelbetrieblichen Betroffenheiten erkennen lassen. Viele Forstbetriebe stehen durch die Bestandesverluste buchstäblich vor dem „Nichts“, andere waren nur durch die mangelnde Absatzbarkeit des Holzes sowie den bundesweiten drastischen Holzpreisverfall betroffen und haben nur geringe Vorrats-/Zuwachsverluste erlitten.

## 2.2 Übergeordnete Strategien und Politiken

Es gibt eine Vielzahl von politischen Regelungen, die einerseits Auswirkungen auf die Anpassung der Wälder an den Klimawandel haben und andererseits im Zusammenhang mit der Entwicklung von neuen Vorschlägen zu Klimaanpassung zu berücksichtigen sind, soll Kohärenz in der Klimaanpassungspolitik erreicht werden. In diesem Kontext wichtige politische Regelungen sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

### 2.2.1 Strategien und Politiken der EU

Auf Ebene der EU wirken insbesondere zwei aktuelle und übergeordnete Strategien auf die Anpassung und zukünftige Nutzung unserer Wälder: der sogenannte Green Deal und die EU-Biodiversitätsstrategie für 2030.

#### EU-Green Deal und damit verbundene Strategien

Im Green Deal wird zunächst anerkannt, dass die Waldökosysteme infolge des Klimawandels zunehmend unter Druck stehen. Die Waldgebiete in der EU sollen daher sowohl qualitäts- als auch flächenmäßig verbessert werden, um die EU-Ziele für eine Klimaneutralität und eine Verbesserung der Umwelt zu erreichen. Durch Aufforstungen sowie die Wiederherstellung geschädigter Wälder kann die Absorption von CO<sub>2</sub> erhöht und gleichzeitig die Widerstandsfähigkeit der Wälder verbessert und die kreislauforientierte Bioökonomie befördert werden. Teil des Green Deals ist auch die „Renovierungswelle“ und die Initiative „Neues Europäisches Bauhaus“, in denen die Potenziale biogener Materialien insbesondere von Holz in Bezug auf C-Speicherung und Substitution von Materialien mit nachteiliger Ökobilanz betont werden.

#### EU-Waldstrategie

Die EU-Waldstrategie (European Commission 2021) unterstreicht die multifunktionale Nutzung der Wälder und spannt einen weiten Bogen um die Bewirtschaftung des Waldes mit Zielen in den folgenden Handlungsfeldern: (i) Unterstützung der sozioökono-

<sup>5</sup> Der jährliche Nettounternehmensgewinn des Wirtschaftsbereiches Forstwirtschaft (inklusive der Forstlichen Dienstleister) beläuft sich nach Forstwirtschaftlicher Gesamtrechnung (Mehrjahresmittel 2012 – 2017) auf rund 1,32 Mrd. € pro Jahr (Rosenkranz 2019).

mischen Funktionen der Wälder zur Förderung ländlicher Gebiete und der forstbasierten Bioökonomie innerhalb der Grenzen der Nachhaltigkeit, (ii) Schutz, Wiederherstellung (Restauration) und Erweiterung der Wälder in der EU, um den Klimawandel zu bekämpfen, den Verlust der biologischen Vielfalt umzukehren und resiliente multifunktionale Waldökosysteme zu erhalten, (iii) Strategisches Waldmonitoring, Berichterstattung und Datenerhebung, (iv) eine starke Forschungs- und Innovationsagenda, um das Wissen über Wälder zu verbessern, (v) ein integrativer und kohärenter EU-Rahmen für die Waldpolitik, und (vi) die Intensivierung der Umsetzung und Durchsetzung bestehender EU-Rechtsvorschriften mit Relevanz für Wälder und Waldbewirtschaftung.

Die Anpassung der Wälder an den Klimawandel wird durch mehrere Ziele und Maßnahmen adressiert: Die Wiederherstellung der Wälder nach Klimaschäden wird bessere Informationen über Baumarteneignung für künftige Klimabedingungen erfordern und große Mengen an geeignetem forstlichem Reproduktionsmaterial verlangen. Rechtsvorschriften über forstliches Vermehrungsmaterial sollen durch Maßnahmen zur Förderung der Erzeugung von forstlichem Vermehrungsgut, das für künftige Klimabedingungen geeignet ist, ergänzt werden.

Ein freiwilliges Zertifizierungssystem für naturnahe Waldbewirtschaftung soll entwickelt werden, um biodiversitätsfreundliche Managementpraktiken zu fördern. Im Rahmen der Umsetzung der EU-Biodiversitätsstrategie wird die Kommission ein rechtsverbindliches Instrument für die Wiederherstellung von Ökosystemen vorschlagen, insbesondere für Ökosysteme mit großem Potenzial zur Bindung und Speicherung von Kohlenstoff und zur Prävention beziehungsweise Minderung der Auswirkungen von Naturkatastrophen, mit besonderer Bedeutung für ausgewiesene FFH-Gebiete. Finanzielle Anreize für Waldbesitzer und -bewirtschaftler zur Verbesserung der Quantität und Qualität der Wälder in der EU sollen entwickelt werden um Wälder zu schützen und deren Ökosystemleistungen auszubauen.

Neben der zukunftsorientierten anpassungsfähigen Restauration und ökosystembasierten Bewirtschaftung von Wäldern erfordert die Klimaanpassung auch Investitionen in die Störungsprävention, -vorbereitung, -bewältigung und die Wiederherstellung der Wälder nach Störungen. Dabei sollte die Verhinderung klimabedingter Schäden und die Erhöhung der Resilienz der Wälder Vorrang haben vor Investitionen in Ausrüstungen und technische Maßnahmen der Störungsbewältigung.

Zudem wird die Kommission in Zusammenarbeit mit den Mitgliedstaaten die Situation der Waldgesundheit in der EU überwachen, einschließlich der Auswir-

kungen von invasiven gebietsfremden Arten, Krankheiten und Schadorganismen wie Borkenkäfer, und die notwendigen Präventivmaßnahmen zur Früherkennung und Bekämpfung fördern.

Mit der EU-Waldstrategie schlägt die Kommission zudem einen Fahrplan für die Anpflanzung von mindestens 3 Mrd. neuen Bäumen in der EU bis 2030 vor. Dies soll durch biodiversitätsfreundliche Aufforstung und ökologische Restauration erfolgen (nach dem Prinzip: der richtige Baum am richtigen Standort zum richtigen Zweck). Die Förderung erfolgt über GAP-Strategiepläne und die Kohäsionsfonds. Für das Monitoring soll das Waldinformationssystem für Europa weiterentwickelt werden.

### **EU-Biodiversitätsstrategie**

Die EU-Kommission erarbeitete 2020 die „EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 - Mehr Raum für die Natur in unserem Leben“ als Teil des European Green Deals (Europäische Kommission 2020). Auch die EU-Biodiversitätsstrategie hat zum Ziel, die Quantität, Qualität und Widerstandsfähigkeit der Wälder in der EU zu verbessern, insbesondere im Hinblick auf Brände, Dürren, Schadorganismen, Krankheiten und andere Bedrohungen, die durch den Klimawandel voraussichtlich zunehmen werden.

Mit der Strategie soll daher nicht nur der Artenschutz maßgeblich gestärkt, sondern auch den durch Klimawandel verursachten Nachteilen für die Biodiversität entgegengewirkt werden. Damit die Wälder ihre Funktionen in Bezug auf die Biodiversität und das Klima erfüllen können, sollen alle Wälder in einem guten Zustand erhalten werden. Resiliente Wälder spielen eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von Rohstoffen, Produkten und Dienstleistungen, die für die kreislauforientierte Bioökonomie von zentraler Bedeutung sind; sie sollen eine resilientere Wirtschaft unterstützen.

Konkret sollen diese Ziele durch folgende drei Maßnahmen erreicht werden: (1) gesetzlich geschützte Gebiete sollen jeweils mindestens 30% der EU-Land- und Seefläche umfassen und durch integrierende ökologische Korridore als Teil eines trans-europäischen Netzes von Schutzgebieten miteinander verbunden werden, (2) mindestens ein Drittel der Schutzgebiete – also 10% der EU-Landflächen, einschließlich aller verbleibender Primär- und Urwälder der EU sollten streng geschützt werden und (3) wirksame Umsetzung bestehender EU-Rechtsvorschriften in der Bewirtschaftung aller geschützten Gebiete anhand klar definierter Schutzziele und -maßnahmen einschließlich Monitoring.

Die EU-Biodiversitätsstrategie gibt somit ambitionierte Schutzziele vor, deren Umsetzung allerdings

mit offenen Fragen verbunden ist. Zum Beispiel gibt es keine Vorgabe, wie das Ziel der 10% streng geschützten Landfläche in der EU auf unterschiedliche Landnutzungstypen verteilt werden soll und ob alle Mitgliedsstaaten in gleichem Umfang Flächen unter Schutz stellen müssen (O'Brien et al. 2021). Gerade das Einfordern größerer Flächen mit strengem Schutz sowie die Vorfestlegung von konkreten Schutzziele könnten einer notwendigen aktiven und flexiblen Klimaanpassung der betroffenen Wälder erheblich im Wege stehen.

## 2.2.2 Strategien und Politiken des Bundes

### Deutsche Anpassungsstrategie Klimawandel (DAS)

Um den Herausforderungen des Klimawandels auf nationaler Ebene zu begegnen, beschloss die Bundesregierung 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). 2015 und 2020 wurde die Anpassungsstrategie fortgeschrieben und die Maßnahmen der Aktionspläne der Anpassungsstrategie sollen alle 4 Jahre evaluiert und aktualisiert werden (Die Bundesregierung 2020). Die Deutsche Anpassungsstrategie folgt einem sektorübergreifenden Ansatz, d. h. die Koordinierung aller Fachministerien ist bereits erfolgt und die reklamierten Maßnahmen sind mit der Bekanntgabe bereits konsentiert.

Die Aktivitäten des Aktionsplans im Bereich Wald sind dem Cluster „Land“ zugeordnet, einem von insgesamt sechs Clustern. Vorgesehen ist dabei die Entwicklung von stabilen, strukturreichen und standortgerechten Mischwäldern zur Schaffung klimarobuster Wälder, die sich am aktuellen Stand der Forschung ausrichten soll. Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel und zur Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen, die von besonderem Bundesinteresse sind, sollen mit dem Förderinstrument Waldklimafonds (WKF) umgesetzt werden. Die positiven Effekte von Wald und Holz für die Erschließung des CO<sub>2</sub>-Minderungs- und Energiepotenzials sollen intensiviert werden. Darüber hinaus soll die Anpassung der Wälder an den Klimawandel im Rahmen der weiterzuentwickelnden Gemeinschaftsaufgabe für die Agrarstruktur und den Küstenschutz (GAK) gefördert werden.

Ein besonders hohes Handlungserfordernis wird im Aktionsplan (Anhang Anpassung III) in Bezug auf Schäden durch Schadorganismen identifiziert. In naher Zukunft wird auch von einem starken Wandel der Nutzfunktionen des Waldes ausgegangen. Hier wird, ebenso wie für die Bereiche Baumartenzusammensetzung, Schutzfunktionen, Hitze- und Trockenstress, Waldbrandrisiko und Schäden durch Windwurf von einem mittleren Handlungserfordernis ausgegangen, d. h. auch diese Bereiche sind prioritär zu behandeln.

**Tab. 3:** Bewertung von Klimawirkung, Anpassungsdauer und Handlungserfordernis im Bereich Wald (Quelle: Die Bundesregierung 2020, leicht veränderter Auszug aus dem Aktionsplan, Anhang Anpassung III, A1-6/7)

Klimawirkung	Bewertung der Klimawirkung			Anpassungs- dauer	Handlungs- erfordernis
	Gegenwart	Nahe Zukunft			
		Schwacher Wandel	Starker Wandel		
Baumartenzusammensetzung	niedrig	niedrig	mittel	lang	mittel
Nutzfunktionen	niedrig	mittel	hoch	lang	mittel
Schutzfunktionen	niedrig	niedrig	mittel	lang	mittel
Schäden durch Schadorganismen	mittel	mittel	hoch	lang	hoch
Hitze- und Trockenstress	niedrig	niedrig	mittel	lang	mittel
Waldbrandrisiko	niedrig	niedrig	mittel	lang	mittel
Schäden durch Windwurf	mittel	mittel	mittel	lang	mittel

Die Deutsche Anpassungsstrategie enthält zudem zahlreiche Maßnahmen zur Intensivierung von Forschung und Monitoring. So sollen Waldflächen mit natürlicher Waldentwicklung gefördert werden, um ein System von Referenzflächen für ein systematisches Monitoring zu schaffen. Die Forschung zu den Wechselwirkungen von Klimawandel, Schaderregern sowie abiotischer und biotischer Schadfaktoren und den Auswirkungen für die Wälder wird intensiviert, um daraus Empfehlungen zur Schaffung und Sicherung anpassungsfähiger Wälder ableiten zu können. Weitere Schwerpunkte für Forschung und Netzwerkaktivitäten liegen im Bereich der Forstpflanzenzüchtung und Herkunftsforschung zur Erfassung der genetischen Eignung verschiedener Vorkommen heimischer Baumarten inklusive solcher Vorkommen, die im Ausland liegen (Die Bundesregierung 2020).

### Klimaschutzplan 2050

Im Klimaschutzplan der Bundesregierung (BMU 2016) steht im Handlungsfeld Landnutzung und Forstwirtschaft der Erhalt und die Verbesserung der Treibhausgas-Senkenleistung des Waldes im Vordergrund. Gleichzeitig soll in Anhalt an die Waldstrategie 2020 die Klimaschutzleistung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung und der damit verbundenen Holzverwendung gefördert werden. Das Leitbild des Klimaschutzplans orientiert sich damit an den Feststellungen des Weltklimarates, wonach der Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder ein geeignetes und kostengünstiges Mittel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen ist. Der Klimaschutzplan übernimmt hierbei auch die Perspektive der Waldstrategie 2020 (siehe unten) bezüglich der Rolle von Holz als erneuerbarem Rohstoff, der über die Speicherung von Kohlenstoff in langlebigen Produkten und die Substitution von Materialien mit vergleichsweise nachteiliger Treibhausgas- und Ökobilanz sowie fossiler Energieträger einen wesentlichen Klimaschutzbeitrag leisten kann. Der Klimaschutzplan betont, dass die Anpassung der Wälder an den Klimawandel besonders wichtig ist für die Sicherung und den Ausbau des Klimaschutzbeitrages der Forstwirtschaft. Analog zur Waldstrategie 2020 soll daher „der Waldumbau zu klimaangepassten Mischwäldern mit standortgerechten Baumarten vorangetrieben werden“. Die Optimierung des Klimaschutzes durch Wälder, nachhaltige Waldwirtschaft und Holzverwendung soll durch eine enge Verzahnung mit den Erfordernissen der Ressourcen- und Materialeffizienz erreicht werden. Zur Erreichung dieser Ziele im Inland dienen:

- die Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK), die mit Bundesmitteln den Waldumbau und andere Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel fördert;
- der Waldklimafonds, mit dem Forschung sowie Maßnahmen zum Erhalt und Ausbau des CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzials von Wald und Holz sowie zur Anpassung der deutschen Wälder an den Klimawandel gefördert wird;
- die Charta für Holz 2.0 (siehe unten)

Zur Umsetzung der Ziele des Klimaschutzplans 2050 hat die Bundesregierung das Klimaschutzprogramm 2030 verabschiedet (BMU 2019). Im Klimaschutzprogramm wird noch stärker als im Klimaschutzplan die Anpassung der Wälder an den Klimawandel zur Sicherung der Kohlenstoffsенке im Wald sowie die dafür

notwendige Forschung und das erforderliche Monitoring betont. Zusätzlich wird auf Maßnahmen zur Bewältigung der aktuellen Waldschäden verwiesen.

### Waldstrategien 2020 und 2050

In der Waldstrategie 2020 der Bundesregierung (BMEL 2009) ist eine der entscheidenden Feststellungen, den Wald als CO<sub>2</sub>-Senke zu erhalten und dauerhaft zu sichern. Während die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt sich allein auf die natürlichen CO<sub>2</sub>-Speichermöglichkeiten konzentriert, bezieht die Waldstrategie 2020 auch die CO<sub>2</sub>-Speicherung in Holzprodukten sowie das Substitutionspotenzial von Holzprodukten in die Lösungsansätze mit ein, ohne jedoch hierfür konkrete Ziele vorzugeben (BMELV 2011).

Damit geht die Waldstrategie über die sektorale Betrachtung von Klimaschutzwirkungen der Wälder hinaus und berücksichtigt die gesamtwirtschaftliche Dimension von Klimaschutzmaßnahmen, die mit Wäldern und Holzprodukten erzielt werden kann. Es wird ausgeführt, dass einerseits die Potenziale der heimischen Wälder zur Verbesserung des Klimaschutzes über die Nutzung von Holz aktuell noch nicht überall ausgeschöpft werden, und dass andererseits die Wälder besonders betroffen sind durch die klimatischen Veränderungen. Um den Klimaschutzbeitrag der Wälder zu sichern, werden sowohl geeignete Anpassungsmaßnahmen empfohlen, als auch die Verwendung von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft zur Substitution energieintensiver Materialien.

Im Jahr 2019 hat das BMEL den Prozess zur Entwicklung einer Waldstrategie 2050 initiiert und im weiteren Verlauf koordiniert. Bis zum Sommer 2021 wurde der vom BMEL vorgelegte Entwurf, in dem 10 Handlungsfelder für die Waldpolitik des Bundes aufgeführt sind, in einem breiten Konsultationsprozess mit Verbänden und Stakeholdern erörtert und von diesen kommentiert, so auch vom WBW. Da ein rechtzeitiger Abschluss der Waldstrategie 2050 als Strategie der Bundesregierung vor der Bundestagswahl 2021 unrealistisch wurde, beschloss das BMEL, die Waldstrategie als sektorale Strategie des BMEL zu veröffentlichen.

In der Waldstrategie 2050 wird nach wie vor der enge Zusammenhang zwischen Wald- und Klimapolitik betont. So steht die Rolle der Wälder für den Klimaschutz und die Klimaanpassung der Wälder als erstes Handlungsfeld gleich zu Beginn. Der Wissenschaftliche Beirat hat in seiner Stellungnahme darauf hingewiesen, dass beim Thema Klimaschutz die bestehenden Ziele der Waldstrategie 2020 weiterverfolgt werden sollten, und dass in Anbetracht der aktuellen Entwicklungen die Forderung nach Anpassung der Wälder nochmals an Dringlichkeit gewonnen hat

(WBW 2020).

Der WBW hat erneut betont, dass die Klimaschutzwirkung der Wälder nicht nur darin besteht, dass CO<sub>2</sub> in Waldökosystemen und Produkten gespeichert wird, sondern auch darin, dass eine Substitution von energieintensiven Materialien und Energieträgern durch Holz erfolgt.

### Charta für Holz 2.0

Als wichtiges Instrument der Ressourcenpolitik für Holz und Meilenstein im Klimaschutzplan 2050 hat das BMEL im Jahr 2017 die „Charta für Holz 2.0“ veröffentlicht. Die Charta für Holz verfolgt in einem ganzheitlichen Ansatz und einem breit angelegten Dialogprozess unter Einbindung von Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Zivilgesellschaft das Ziel, den Beitrag der Holzverwendung aus nachhaltiger Forstwirtschaft zum Schutz des Klimas, der Schonung endlicher Ressourcen und der Wertschöpfung zu stärken. Die vom BMEL initiierte Charta für Holz 2.0 wird in folgenden Handlungsfeldern umgesetzt:

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

Zu den jeweiligen Handlungsfeldern bringen Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung in sechs Arbeitsgruppen ihre Expertise zur Identifizierung von Handlungserfordernissen ein, entwickeln Ideen und Maßnahmenvorschläge. Eine Steuerungsgruppe mit Vertreterinnen und Vertretern von Bund, Ländern, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Wissenschaft begleitet die Umsetzung der Charta für Holz 2.0 (BMEL 2017).

### Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt (NBS)

Die 2007 verabschiedete Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt (NBS) (BMUB 2007) zielt ab auf die Umsetzung des internationalen Übereinkommens über die biologische Vielfalt (Convention on biological diversity, CBD). Das auf der Konferenz für Umwelt und

Entwicklung in Rio de Janeiro beschlossene Übereinkommen vertritt den „Ökosystemansatz“, der die ökologische Tragfähigkeit zum Kriterium für ökonomische und soziale Entscheidungen macht. Um Wälder an den Klimawandel anzupassen, plädiert die NBS für den Anbau vielfältiger Mischwälder und verfolgt das Ziel, die Reaktionsfähigkeit empfindlicher Arten und Lebensgemeinschaften auf klimabedingte Veränderungen zu erhöhen (BMUB 2007).

Hinsichtlich des Artenschutzes im Klimawandel plädiert die NBS insbesondere dafür, die genetische Vielfalt von wildlebenden und domestizierten Arten zu erhalten. Das beinhaltet auch die Sicherstellung des natürlichen genetischen Austauschs wildlebender Arten, unter anderem durch die Erhaltung der Rastplätze und Zugwege wandernder Tierarten, die Etablierung von Biotopverbundsystemen für die Ausbreitung und Wanderung der vom Klimawandel betroffenen Arten sowie die Entwicklung von Konzepten für den Schutz von Arten, die durch das Biotopverbundsystem keine ausreichenden Adaptationsmöglichkeiten erhalten (hier insbesondere endemische Arten).

In der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt werden im Kapitel zum Klimawandel für den Wald zwar Ziele gesetzt (Erhöhung der natürlichen Speicherkapazität durch die Zunahme naturnaher Wälder, Neubegründung von Waldflächen sowie natürliche Entwicklung von Moorwäldern), die Herausforderung der Anpassung der Wälder an den Klimawandel wird aber nur in geringem Umfang thematisiert. Kann dies noch auf die im Jahr 2007 weniger dramatische Situation des Waldzustandes in Deutschland und anderen mitteleuropäischen Ländern zurückgeführt werden, erscheint die nur untergeordnete Bedeutung dieses Themas auch im aktuellen Vorschlag der Europäischen Kommission zur EU-Biodiversitätsstrategie 2030 (Europäische Kommission 2020) nur wenig zeitgemäß. Einerseits wird die nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern als entscheidend für die Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel angesehen. Andererseits geht es aber unverändert um den Schutz des Bestehenden („... Gebiete mit hohem Biodiversitätswert ... sind am anfälligsten für den Klimawandel und sollten ... strengen Schutz(es) erhalten“) und nicht um die dynamische Entwicklung zur Anpassung an den Klimawandel.

Im Bereich Forschung und Monitoring sollten lauten NBS regionale Klimaprojektionen unter den Aspekten Biodiversität und Klimasensitivität der Modelle aufbereitet und interpretiert, sowie Langzeitprognosen der Biodiversitätsentwicklung in Ökosystemen mittels dynamischer Modelle erstellt werden. Monitoringprogramme sollen eingerichtet beziehungsweise modifiziert werden, um das naturschutzfachliche

Management von Arten- und Gebietsschutzprogrammen unter Berücksichtigung der Erfordernisse des Klimawandels weiterzuentwickeln.

### Moorschutzstrategie

Das Bundesumweltministerium (BMU) hat mit Unterstützung des Bundesamts für Naturschutz (BfN) eine Moorschutzstrategie als Diskussionspapier erarbeitet (Nitsch und Schramek 2020, BMU 2020). Mit ihr sollen die Weichen zur Erhaltung der Moore als Biodiversitätshotspots und Langzeitspeicher für Kohlenstoff gestellt werden. Nach Angaben des BMU (2020) werden derzeit in Deutschland ca. 300.000 ha an Moorböden forstwirtschaftlich genutzt oder sind mit Gehölzen bewachsen. Bedeutsam in Zusammenhang mit der Waldwirtschaft sind genutzte Wälder auf entwässerten Moorböden. Unter dem Blickwinkel der Klimaanpassung misst das BMU (2020) der Erhaltung und Verbesserung der Wasserrückhaltung des Waldes eine entscheidende Bedeutung insbesondere hinsichtlich Dürreereignissen zu.

Ein wichtiges Ziel ist daher in der Moorstrategie die Erhöhung der Resilienz von Waldmoorböden gegenüber den Folgen des Klimawandels. Erreicht werden soll dies zum einen über eine verstärkte Zusammenarbeit des Bundes mit den Ländern inklusive Zielvereinbarungen zum Moorschutz und Förderprogrammen für Wiedervernässungsmaßnahmen. Wichtige Anpassungsmaßnahmen werden im Verzicht auf einen Vorflutausbau und weitere Vorflutabsenkungen unter Berücksichtigung der Eigentümerinteressen gesehen. Weiterhin sind die Entwicklung bodenschonender Holzernte auf Moorstandorten mit hohen Wasserständen und ein Verzicht auf finanzielle Förderung von Wiederaufforstung auf Moorstandorten durch den Bund und entsprechende Empfehlungen auch an die Länder vorgesehen. Über Pilotprojekte sollen neuartige Bewirtschaftungsformen, bei denen die Wasserstände durch Wiedervernässung vollständig angehoben werden können, auch im Wald erprobt werden. Hier können spezielle Bewirtschaftungsformen auf nassen oder wiedervernässten Moorböden - sogenannte Paludikulturen - zum Einsatz kommen (z. B. der Anbau von Röhricht oder die Kultivierung von Torfmoosen).

### Nationale Bioökonomiestrategie

Als eine der jüngsten Politikstrategien mit unmittelbarer Relevanz für den Klimaschutz hat die Bundes-

regierung im Juli 2013 die erste Bioökonomiestrategie beschlossen, der eine überarbeitete Fassung im Frühjahr 2020 folgte (BMBF und BMEL 2020). Sie benennt Ziele, strategische Ansätze und Maßnahmen für eine Entwicklung hin zu einer biobasierten Wirtschaft. Diese soll mit möglichst wenig fossilen Rohstoffen auskommen, nachhaltig erzeugte Produkte und Dienstleistungen bereitstellen und damit ökonomisches Wachstum und ökologische Verträglichkeit vereinen. Der Wandel zu einer auf erneuerbaren Ressourcen beruhenden rohstoffeffizienten Wirtschaft soll vorangebracht und der Verbrauch von fossilen Energien maßgeblich gesenkt werden.

Die Forstwirtschaft wird in der Strategie zusammen mit der Landwirtschaft als zentraler Pfeiler einer biobasierten Wirtschaft bezeichnet. Handlungsfelder, welche auch die Forstwirtschaft betreffen und zugleich Veränderungen durch den Klimawandel berücksichtigen sollten, sind die Minderung des Flächendrucks durch nachhaltige Steigerung der Produktivität von land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen und die nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung biogener Rohstoffe. Während die Produktivitätssteigerung in der Landwirtschaft über klimaangepasste Züchtungen erfolgen soll, wird dieser Aspekt bei der Forstwirtschaft nicht weiter präzisiert, außer dass die Produktivitätssteigerung mit der Wahrung von Biodiversität und Landschaftsbildern einhergehen müssen. Zur zukünftigen Verfügbarkeit biogener Rohstoffe wird betont, dass diese maßgeblich von der Anpassungsfähigkeit der Forstwirtschaft abhängen wird. Für weitere Ausführungen wird dabei auf den Aktionsplan zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel verwiesen (siehe oben).

## 2.3 Rechtliche Instrumente

### 2.3.1 Waldgesetzliche Regelungen

Waldpolitik fällt in Deutschland primär in die Kompetenz der Länder. Das Bundeswaldgesetz<sup>6</sup> formuliert in § 11, Abs. 1: „(1) Der Wald soll im Rahmen seiner Zweckbestimmung ordnungsgemäß und nachhaltig bewirtschaftet werden“. Die Landeswaldgesetze konkretisieren in der Regel diese waldgesetzlichen Pflichten im Rahmen der Definition der sogenannten „Ordnungsgemäßen Forstwirtschaft“. So führt beispielsweise das Niedersächsische Gesetz über den Wald und die Landschaftsordnung (NWaldLG) unter § 11 „Ordnungsgemäße Forstwirtschaft, eigendynami-

<sup>6</sup> Das „Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz)“ vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037), das zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Januar 2017 (BGBl. I S. 75)



sche Waldentwicklung“ aus: „(1) Die waldbesitzende Person hat ihren Wald ordnungsgemäß, insbesondere nachhaltig zu bewirtschaften und dabei zugleich der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes Rechnung zu tragen (ordnungsgemäße Forstwirtschaft). Ordnungsgemäß ist die Forstwirtschaft, die nach den gesicherten Erkenntnissen der Wissenschaft und den bewährten Regeln der Praxis den Wald nutzt, verjüngt, pflegt und schützt“; hierzu zählen beispielsweise:

- die Sicherung nachhaltiger Holzproduktion und Erhaltung der Waldökosysteme als Lebensraum einer artenreichen Pflanzen- und Tierwelt
- das Hinwirken auf gesunde, stabile und vielfältige Wälder,
- ein ausreichender Umfang von Alt- und Totholzanteilen zur Sicherung der Lebensräume wildlebender Tiere, Pflanzen und sonstiger Organismen,
- bei Aufforstungen Wahl standortgerechter Baumarten unter Verwendung geeigneten Saat- und Pflanzengutes bei Erhaltung der genetischen Vielfalt,
- möglichst weitgehender Verzicht auf Pflanzenschutzmittel, Einsatz des integrierten Pflanzenschutzes,
- Hinwirken auf Wilddichten, die den Waldbeständen und ihrer Verjüngung angepasst sind,
- sowie Maßnahmen zur Waldschadensverhütung.

Hiernach ist sowohl die Walderhaltung, als auch die Waldpflege und die Verhütung von Waldschäden zuvorderst gesetzliche Pflicht der Waldbesitzenden. Diese die Verfügungsrechte der Waldbesitzenden einschränkende Pflichten sind nach herrschender Meinung Teil der Inhalts- und Schrankenbestimmung des Eigentums und als solche sind sie Ausfluss der Sozialgebundenheit des Eigentums und grundsätzlich entschädigungslos hinzunehmen (Härtel 2010). Deshalb können – je nach landesrechtlicher Regelung - die dafür notwendigen Maßnahmen auch im Rahmen des Verwaltungszwanges (durch Ordnungsgelder, Ersatzvornahmen etc.) durchgesetzt werden.

Von dieser grundsätzlich bestehenden Möglichkeit der ordnungsrechtlichen Durchsetzung von Walderhaltungs- und Waldschutzmaßnahmen (beispielsweise zur Bekämpfung von Borkenkäfer-Nestern im Privatwald) wird derzeit jedoch nur selten Gebrauch gemacht. Denn Einschränkungen des Eigentums dürfen, gemessen am sozialen Bezug und an der sozialen

Bedeutung des Eigentumsobjekts sowie im Blick auf den Regelungszweck nicht zu einer übermäßigen Belastung führen und den Eigentümer unzumutbar treffen (Härtel 2010). In Anbetracht der aktuellen, zum Teil großflächigen Schäden erweisen sich diese waldgesetzlichen Pflichten also nicht als wirksam, um Schäden zu vermindern oder gar zu verhindern.

Statt des Ordnungsrechts spielt im Zusammenhang mit der Schadensbeseitigung und Klimaanpassung der Wälder derzeit das Instrument der Förderung die zentrale forstpolitische Rolle. Hier geht es vorrangig um die Aufarbeitung und Lagerung von Kalamitätsholz und auch die Wiederbewaldung von Kalamitätsflächen. Die Rahmenbedingungen der Förderung regelt § 41 des Bundeswaldgesetzes. Hiernach soll die Forstwirtschaft wegen der Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen des Waldes öffentlich gefördert werden, wobei die Förderung insbesondere auf die Sicherung der allgemeinen Bedingungen für die Wirtschaftlichkeit von Investitionen zur Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung des Waldes gerichtet sein soll. Zu diesem Zweck ist die Forstwirtschaft unter Berücksichtigung ihrer naturbedingten und wirtschaftlichen Besonderheiten vor allem mit den Mitteln der Wirtschafts-, Verkehrs-, Agrar-, Sozial- und Steuerpolitik in den Stand zu setzen, den Wald unter wirtschaftlich angemessenen Bedingungen zu nutzen und zu erhalten.

Der Bund beteiligt sich an der finanziellen Förderung der Forstwirtschaft nach dem Gesetz über die Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK). Staatliche Zuwendungen können erhalten: 1.) forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse und andere Formen gemeinschaftlicher Waldbewirtschaftung und 2.) Inhaber land- oder forstwirtschaftlicher Betriebe oder Grundbesitzer, soweit ihre forstlichen Vorhaben nicht über forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse gefördert werden.

Das Instrument der GAK-Förderung wird aktuell vielfach kritisiert, da es der Kofinanzierung durch die Länder bedarf und vielfach landesspezifische Politiken die Umsetzung dominieren. Auch wird die GAK-Förderung dafür verantwortlich gemacht, dass die erforderlichen Regelungen oft erst mit großem zeitlichem Verzögerung von den Ländern auf den Weg gebracht werden und dass das bereitgestellte Geld nicht oder nur sehr langsam abfließt, wo eigentlich schnelle Hilfe erforderlich wäre.

Zu den waldgesetzlichen Regelungen, die bei der Anpassung der Wälder an den Klimawandel berücksichtigt werden müssen, gehört auch das Forstvermehrungsgutgesetz (FoVG), das in Deutschland seit dem 01.01.2003, zusammen mit der Forstvermehrungsgut-Durchführungsverordnung (FoVDV) gilt. Der Zweck des Gesetzes ist, den Wald mit seinen vielfältigen positiven Wirkungen durch die Bereitstellung von

hochwertigem und identitätsgesichertem forstlichen Vermehrungsgut in seiner genetischen Vielfalt zu erhalten und zu verbessern sowie die Forstwirtschaft und ihre Leistungsfähigkeit zu fördern (§ 1 (1) FoVG). Verbindliche Grundlage für die nationalen deutschen Bestimmungen des FoVG ist die Richtlinie 1999/105/EG der Europäischen Gemeinschaft (EG) über den Verkehr mit forstlichem Vermehrungsgut. Derzeit läuft die Überprüfung der Saatgutdirektiven der Mitgliedsstaaten auf EU-Ebene durch die EU-Kommission mit dem Ziel einer stärkeren Harmonisierung.

Dem FoVG unterliegen die 47 in der EU-Richtlinie aufgelisteten Baumarten (einschl. der Hybridlärche und der Gattung *Populus*). Für 26 in Deutschland relevante Baumarten sowie die Hybridlärche und die Gattung Pappel sind Herkunftsgebiete ausgewiesen und es ist Ausgangsmaterial zugelassen. Die Zulassung erfolgt in Kategorien. Bei Baumarten, die dem FoVG unterliegen, wird zwischen forstlichem Vermehrungsgut der Kategorien „Ausgewählt“, „Qualifiziert“ und „Geprüft“ unterschieden (§2 (8) FoVG). Vermehrungsgut der Kategorie „Ausgewählt“ stammt aus Erntebeständen, Vermehrungsgut der Kategorie „Qualifiziert“ aus Samenplantagen und Vermehrungsgut der Kategorie „Geprüft“ aus Samenplantagen oder Erntebeständen, von Familieneltern, einem Klon oder Klonmischungen. Das FoVG regelt Erzeugung, Inverkehrbringen, Ein- und Ausfuhr von forstlichem Vermehrungsgut der genannten Baumarten bzw. Hybriden. Die Verwendung von forstlichem Vermehrungsgut ist nicht Gegenstand des Gesetzes und fällt in den Bereich der ordnungsgemäßen Forstwirtschaft. Die Förderrichtlinien von Bund und Ländern binden jedoch in der Regel staatliche Fördermittel, z. B. für Erst- und Wiederaufforstungen, an die Verwendung herkunftsgesicherten und angepassten Vermehrungsgutes.

Welche Anforderungen die Erntebestände erfüllen müssen, ist in der Forstvermehrungsgut-Zulassungsverordnung (FoVZV) geregelt. Neben ertragsorientierten Anforderungen wie Volumenzuwachs und Holzqualität spielen auch Angepasstheit, Gesundheit und Widerstandsfähigkeit eine Rolle. Um die Unterschiede in den natürlichen Wachstumsbedingungen zu berücksichtigen, werden die Erntebestände nach Herkunftsgebieten ausgewählt und zugelassen. Mit der Veränderung des Baumartenspektrums, z. B. in einem proaktiven Waldumbau müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen angepasst werden.

Die Verwendung von forstlichem Vermehrungsgut ist nicht Gegenstand des Forstvermehrungsgutgesetzes und fällt in den Bereich der ordnungsgemäßen Forstwirtschaft. Die Förderrichtlinien von Bund und Ländern binden jedoch in der Regel staatliche Fördermittel, z. B. für Erst- und Wiederaufforstungen, an die Verwendung herkunftsgesicherten und

angepassten Vermehrungsgutes. Die Verwendung von Vermehrungsgut aus dem eigenen Herkunftsgebiet ist jedoch nicht gesetzlich vorgeschrieben. Im Hinblick auf die Anpassung der Wälder an den Klimawandel ist dies sachgemäß, denn diese Regelung erlaubt, auch Vermehrungsgut aus anderen Herkunftsgebieten zu verwenden, wenn deren gegenwärtige Wachstumsbedingungen für den eigenen Standort zukünftig erwartet werden.

### 2.3.2 Naturschutzrecht, Pflanzenschutzrecht, Bodenschutz, Wasserrecht

Auch die Naturschutzgesetze von Bund und Ländern enthalten Regelungen, die den Wald und die Forstwirtschaft direkt und indirekt betreffen. Für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel sind besonders die Regelungen hinsichtlich der Baumartenwahl von Bedeutung. So enthält § 5 (3) BNatSchG folgende politische Zielbestimmung: „Bei der forstlichen Nutzung des Waldes ist das Ziel zu verfolgen, naturnahe Wälder aufzubauen und diese ohne Kahlschläge nachhaltig zu bewirtschaften. Ein hinreichender Anteil standortheimischer Forstpflanzen ist einzuhalten“. Auf die große Herausforderung, die Wälder in Deutschland auf den Klimawandel hin anzupassen wird in diesem Paragraphen nicht eingegangen, vielmehr werden die bisher standortheimischen Baumarten implizit weiterhin als geeignet angesehen.

Auch in anderen Abschnitten des Naturschutzrechtes werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die im Naturschutzrecht geregelten Schutzgüter nicht adressiert. Gemäß § 33 (1) BNatSchG sind „Alle Veränderungen und Störungen, die zu einer erheblichen Beeinträchtigung eines Natura 2000-Gebiets in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen führen können, [...] unzulässig“. Entsprechendes Fehlverhalten der Waldbesitzer ist gemäß § 69 (3) 6. BNatSchG als Ordnungswidrigkeit mit Bußgeld bewehrt. Die Veränderung von Natura 2000-Gebieten durch den Klimawandel lässt sich dadurch allerdings nicht aufhalten. Im Sinne einer möglichst naturschutzorientierten Anpassung der Schutzgebiete sowie im Sinne einer möglichst hohen Rechtssicherheit für die Waldbesitzer wären Regelungen zu Anpassungsmöglichkeiten der Schutzgebiete im Wald an den Klimawandel im Naturschutzrecht erforderlich.

Ein weiteres Teilgebiet im Rechtsbereich des Naturschutzes ist die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Diese wird wegen ihrer schädigenden Wirkung auch auf nicht bekämpfte Tier- und Pflanzenarten kritisch gesehen und weitgehend eingeschränkt. Gleichzeitig ist der gezielte Einsatz von biologischen oder

chemischen Pflanzenschutzmitteln als „ultima ratio“ unverzichtbar (vergleiche auch BÖR 2016 und WBW 2019).

Hinsichtlich der Waldböden gilt es, das nationale Bodenschutzrecht zu beachten. Nationale Vorschriften zum Bodenschutz ergeben sich aus zahlreichen Gesetzen und Verordnungen. Von besonderer Bedeutung sind das Bundes-Bodenschutzgesetz und die Bundes-Bodenschutzverordnung sowie weitere gesetzliche Regelungen auf Ebene der Bundesländer. Zweck des Bundes-Bodenschutzgesetzes ist es, „nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte so weit wie möglich vermieden werden.“ (§1 BBodSchG).

Durch den Einsatz von Forstmaschinen für die Holzernte und Holzrückung sowie weitere forstliche Maßnahmen wie z. B. bei der Beseitigung von Schlagabraum oder der Bodenvorbereitung für die Verjüngung besteht die Gefahr von Bodenveränderungen und -schäden. Die Bundesbodenschutzverordnung wird im Hinblick auf vorsorgenden Bodenschutz bislang wenig konkret. Dennoch gibt es strikte Regeln und Selbstverpflichtungen (in den Waldzertifizierungssystemen) für den Einsatz von Maschinen im Wald. Beim Einsatz von Forstmaschinen im Zuge der Holzernte ist ein flächiges Befahren von Waldböden untersagt (s. Landeswaldgesetze und PEFC / FSC-Kriterien). Es ist ein Netz von sogenannten Rückegassen bzw. Maschinenwegen auszuweisen, das auf Dauer Bestand hat, und auf das die Fahrbewegungen der Maschinen zu konzentrieren sind. Diese Befahrungslinien sind per definitionem keine Holzbodenfläche mehr, und aufgrund von Bodenverdichtungen haben sie auch wichtige Bodenfunktionen eingebüßt. Um sichtbare Schäden wie zum Beispiel tiefe Gleise und Fahrspuren zu vermeiden, die nicht nur die Erholungsfunktion der Wälder beeinträchtigen, sondern auch die technische Befahrbarkeit der Rückegassen in Frage stellen, ist die Waldarbeit entsprechend zu organisieren (z. B. Vermeidung von Forstmaschineneinsätzen bei hohem Wassersättigungsgehalt der Böden).

Am 22.12.2000 trat die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) in Kraft (Richtlinie 2000/60/EG). Mit ihr sollen die Gewässer in der Europäischen Union in einen qualitativ guten Zustand überführt werden. Die WRRL wurde durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG), die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) und die Grundwasserverordnung (GrwV)

in deutsches Recht umgesetzt. Die Anforderungen an Gewässerrandstreifen und Regelungen zur Wasserentnahme sind sowohl forstwirtschaftlich als auch hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels bedeutsam. Sie müssen bei Polterspritzungen und einer Nasskonservierung von Rundholz berücksichtigt werden (Odenthal-Kahabka 2005). Daneben sind Maßnahmen an Fließgewässern im Wald zu nennen, welche die Durchwanderbarkeit zur Sicherung der Lebensgrundlagen der Gewässerfauna und -flora sicherstellen, da unter den Auswirkungen des Klimawandels zeitweise trockenfallende Gewässerstrecken nur so wiederbesiedelt und dadurch in einem guten Zustand erhalten werden können (Schaber-Schoor 2007).

### 2.3.3 Wirtschafts- und Kartellrecht

Statt einer direkten Förderung erfuhr insbesondere der kleinstrukturierte Körperschafts- und Privatwald in Deutschland jahrzehntelang eine indirekte Förderung durch die staatlichen Forstverwaltungen, insbesondere durch nicht kostendeckende Betreuungsangebote und durch die gemeinsame Vermarktung des Holzes aus dem Staats-, Kommunal- und Privatwald (siehe Kapitel 2.1.1).

Beide Bereiche waren seit über 15 Jahren Gegenstand kartellrechtlicher Auseinandersetzungen. Während sich die wettbewerbsrechtlichen Prüfungen zunächst auf den besitzartenübergreifenden Holzverkauf fokussierten, wurden nachfolgend auch die sogenannten „vorgelagerten Dienstleistungen“, zu denen insbesondere die Planung von Hiebsmaßnahmen und das Auszeichnen von Beständen zählen, in die rechtliche Überprüfung einbezogen. Im Zuge von Prüfungen der EU wurde festgestellt, dass die weit unterhalb von Marktpreisen angesiedelten Entgelte für staatliche Betreuungsleistungen auch beihilferechtlich als problematisch anzusehen sind (WBW 2018).

Vor diesem Hintergrund wurden in einer Vielzahl von Bundesländern verschiedene Aktivitäten unternommen, um die forstliche Betreuung den kartell- und beihilferechtlichen Erfordernissen anzupassen. In der Konsequenz führen diese Entwicklungen zu einer erheblichen Einschränkung der bisher üblichen indirekten Förderung der nichtstaatlichen Forstwirtschaft und – soweit noch zulässig – zu einer deutlichen Verteuerung des staatlichen Betreuungsangebotes für den Privat- und Körperschaftswald.

Diese Entwicklung läuft den Herausforderungen des Klimawandels diametral entgegen, da zu erwarten ist, dass Maßnahmen zum Waldumbau, zum Waldschutz und zur Waldpflege vor allem für Eigentümer kleiner Waldflächen organisatorisch zunehmend kompliziert und wirtschaftlich zunehmend uninteressant werden und deshalb häufig unterlassen werden.

### 2.3.4 Brennstoffemissionshandelsgesetz

Um die Klimaschutzziele zu erreichen, wurde am 19. Dezember 2019 als Teil des Klimapaketes das Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG) verkündet. Dadurch werden ab dem Jahr 2021 auch die Sektoren Wärme und Verkehr in den Emissionshandel einbezogen und die Verbrennung von Kohle, Diesel, Benzin etc. finanziell belastet. Feste biogene Brennstoffe wie Holz, Pellets etc. sind hiervon ausgenommen. Im Nachgang hat man sich politisch auf die Erhöhung der Zertifikatspreise geeinigt; im Jahr 2021 beträgt der Einführungspreis je Tonne CO<sub>2</sub> nun 25 Euro und steigt dann bis zum Jahr 2025 auf 55 Euro (BEHG §10 (2)).

Hierdurch wird sich die wettbewerbliche Position des Rohstoffes Holz gegenüber den Ersatzprodukten (wie Kohle, Erdöl etc.) verbessern. Leider liegen noch keine Abschätzungen vor, welche Wirkung auf die Holzmärkte in Deutschland von dieser Regelung ausgehen werden. Aus Schweden ist bekannt, dass die dortige Forstwirtschaft von der dort bereits 1991 eingeführten Kohlenstoffsteuer, die mittlerweile auf rund 120 EUR/Tonne CO<sub>2</sub> angestiegen ist, sehr profitiert hat (IRENA 2019).

### 2.3.5 Forstschäden-Ausgleichsgesetz

Vor dem Hintergrund der Sturmflutkatastrophe von 1962 und Orkane im Frühjahr 1967 sah die damalige Regierung im Frühjahr 1969 für die Forstwirtschaft die Notwendigkeit einer gesetzlichen Regelung. Sie ergebe sich daraus (Pfullmann 2016), „dass a) sich Naturkatastrophen im Wald in unregelmäßigen Zeitabständen wiederholen, b) die schlechte Ertragslage der Forstwirtschaft den Waldbesitzern aller Größenordnungen keinen Spielraum mehr lässt, derartige Schäden, insbesondere den dadurch verursachten Preisverfall aufzufangen“.

Die Ziele des „Gesetz zum Ausgleich von Auswirkungen besonderer Schadensereignisse in der Forstwirtschaft“ (Forstschäden-Ausgleichsgesetz) in der Ausfertigung vom 29.08.1969 waren:

- ein nichtkonjunkturbedingtes Absinken der Rohholzpreise bei Schadensfällen zu verhindern, ohne die Versorgung der Holzwirtschaft zu gefährden (durch Beschränkung des ordentlichen Holzeinschlags und der Holzeinfuhr, Transportbeihilfen – sie wurden später gestrichen - und durch steuerliche Begünstigung von Übervorräten in der Holzwirtschaft)

- die wirtschaftlichen Folgen für die Forstbetriebe „tragbarer“ zu machen (durch Bildung einer steuerfreien Rücklage/eines betrieblichen Ausgleichsfonds, die Erhöhung des Pauschsatzes für Betriebsausgaben, den Verzicht auf Aktivierung von Kalamitätsholz und die pauschale Absenkung des Einkommensteuer-Satzes für Kalamitätsholz).

Die erste Bewährung erfuhr diese gesetzliche Regelung bei der Beschränkung ordentlicher Holzeinschläge nach dem Orkantief Quimburga vom 13. November 1972; bereits am 14.12.1972 trat die VO zur Beschränkung des ordentlichen Holzeinschlags in Kraft. Am 26.08.1985 erfolgte eine Novelle des Forstschäden-Ausgleichsgesetz (Aufnahme von Immissionsschäden, Änderung der Mindest-Mengen). Nach den Sturmschäden im Frühjahr 1990 (Wiebke und Vivian mit deutschlandweit 73 Mio. Fm Schadholtzanfall) trat am 11. April 1990 die VO zur Beschränkung des ordentlichen Holzeinschlags in Kraft. Letztendlich wurde nach den Sturmschäden im Dez. 1999 (Lothar mit europaweit 200 Mio. Fm Kalamitätsanfall) eine VO zur Einschränkung des ordentlichen Holzeinschlags erlassen (v. 8. Februar 2000). Nach dem Sturmtief Kyrill (Januar 2007) und Sturm Friederike (Januar 2018) erfolgte keine „Aktivierung“ des Forstschäden-Ausgleichsgesetz; anlässlich der starken Borkenkäferschäden (2018/19/20ff) wurden in 2018 steuerliche Erleichterungen gewährt. Im Herbst 2020 konnten sich die Bundesländer auf eine Aktivierung des Forstschäden-Ausgleichsgesetz einigen, die für das Forstwirtschaftsjahr 2021 gilt.

Erst Ende März 2021 hat der Bundesrat einer Verordnung über die Beschränkung des ordentlichen Holzeinschlags im Forstwirtschaftsjahr 2021 (HolzeinschlBeschrV2021) zugestimmt, welche vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft am 14. April 2021 erlassen wurde. Die Verordnung sieht vor, für die Holzart Fichte den ordentlichen Holzeinschlag auf 85% des durchschnittlichen Einschlags der Jahre 2013 bis 2017 zu beschränken. Neben der erwarteten positiven Wirkung auf die Holzpreise können gegebenenfalls auch die steuerlichen Erleichterungen (insbesondere ¼-Steuersatzes auf sämtliche Kalamitätseinkünfte im Zeitraum der Einschlagsbeschränkung) dazu beitragen, die wirtschaftlichen Folgen für die Forstbetriebe etwas abzumildern. Die Einschlagsbeschränkung ist nach § 1 Abs. 1 der Verordnung nur für das Forstwirtschaftsjahr 2021 gültig, d. h. für den Zeitraum 01.10.2020 bis zum 30.09.2021.

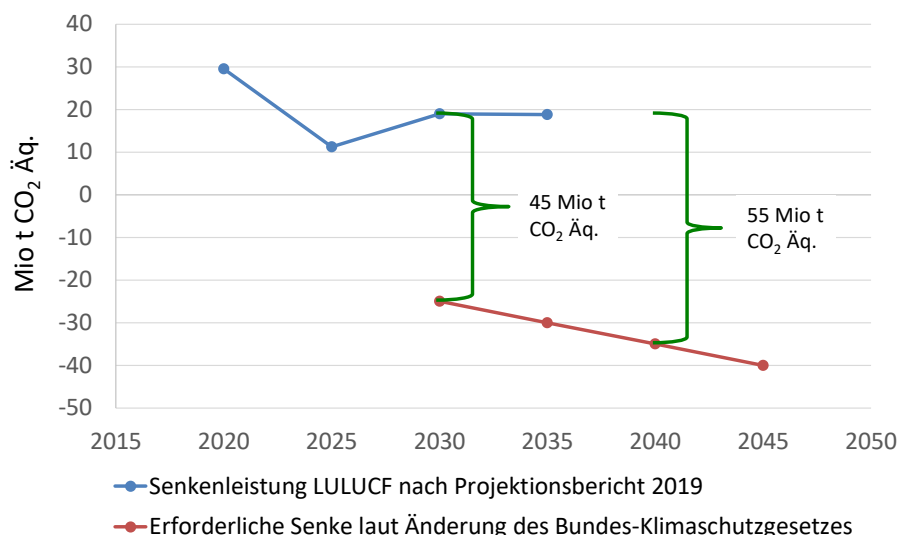
Insgesamt bleibt festzustellen, dass sich die Regelungen des Forstschäden-Ausgleichsgesetzes zur Lösung vergleichbarer Schadenslagen als nicht mehr

zeitgemäß erweisen. Die Beschränkung des planmäßigen Holzeinschlages erfolgte (auch aufgrund europarechtlicher Bedenken) erst drei Jahre nach Beginn der Kalamitätsserie im Januar 2018, zudem liefen die steuerlichen Erleichterungen zum Teil ins Leere, weil kaum mehr positive Einkünfte aus dem Kalamitäts-Holzverkauf erzielt wurden (siehe auch Kap. 2.4.2). Vor diesem Hintergrund hat sich der DFWR in einem Positionspapier für eine Novelle des Forstschäden-Ausgleichsgesetzes ausgesprochen und empfohlen, es zu einer gesetzlichen Grundlage für eine systematische Risikovorsorge und ein schnelles Handeln im Kalamitätsfall weiter zu entwickeln (DFWR 2020). Eine entsprechende Arbeitsgruppe hat das BMEL zur Beratung der Handlungserfordernisse für eine Novelle bereits eingerichtet.

### 2.3.6 Bundes-Klimaschutzgesetz

Das novellierte Klimaschutzgesetz wurde am 24.06.2021 vom Bundestag verabschiedet und anschließend vom Bundesrat gebilligt. Das Gesetz sieht vor, dass Deutschland bis zum Jahr 2030 mindestens 65 Prozent weniger Treibhausgase ausstößt als im Jahr 1990. Bisher waren nur 55 Prozent vorgegeben. Bis 2040 sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 88 Prozent fallen. Im Jahr 2045 und damit fünf Jahre früher als im bisherigen Klimaschutzgesetz soll Deutschland klimaneutral sein. Für diese Zeitperioden wurde auch

festgelegt, welche Beiträge im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF land use, land use change and forestry) erreicht werden sollen. Die sektorübergreifenden jährlichen Minderungsziele bilden den Rahmen für die nachfolgende Festlegung der sektorspezifischen Jahresemissionsmengen durch Rechtsverordnung im Jahr 2024 für die Jahresemissionsmengen von 2031 bis 2040 und im Jahr 2034 für die Jahresemissionsmengen von 2041 bis 2045. Der Mittelwert der jährlichen Emissionsbilanzen des jeweiligen Zieljahres und der drei vorhergehenden Kalenderjahre des Sektors LULUCF soll von minus 25 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bis zum Jahr 2030, auf mindestens minus 40 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bis zum Jahr 2045 sinken. Bisher wurde auf der Grundlage von Modellierungen angenommen, dass sich der LULUCF-Sektor für den Zeitraum bis 2035 zu einer Quelle von Treibhausgasen (THG) entwickelt (UBA 2019). Daher ergibt sich eine deutliche Differenz zwischen der rechtlich vorgegebenen THG-Senkenleistung und den bisher projizierten Emissionen des LULUCF-Sektors (Abb. 25). Allerdings sind die Vorhersagen der Senkenleistung des LULUCF-Sektors mit großen Unsicherheiten behaftet, vor allem vor dem Hintergrund der enormen Waldschäden der Jahre 2018–2020. Diese Unsicherheiten werden sich voraussichtlich erst mit Vorlage der nächsten Bundeswaldinventurergebnisse im Jahr 2023/2024 reduzieren lassen.



**Abb. 25:** Differenzen zwischen der für den Projektionsbericht modellierten THG-Emissionsbilanz des LULUCF-Sektors (UBA 2019) und der laut Änderung des Klimaschutzgesetzes eingeforderten Treibhausgassenke dieses Sektors. Differenzbeträge dargestellt als grüne Klammern (WBW 2021).

Innerhalb des Sektors LULUCF wird die Klimaschutzleistung der Waldökosysteme mit denen anderer Landnutzungskategorien wie Ackerland,

Grünland, Feuchtgebieten, oder Siedlungen verrechnet. Die Speicherleistung der Wälder betrug allein im Zeitraum 2012–2017 im jährlichen Durchschnitt

64 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Bolte et al. 2021). Von den anderen Landnutzungskategorien muss dagegen angenommen werden, dass hier nur ein begrenztes Potenzial besteht, diese kurzfristig (bis 2030) zu erheblichen Senken für Treibhausgase zu entwickeln (WBW 2021). Als eine Verbesserung der Emissionsbilanz des Sektors LULUCF ist im Klimaschutzgesetz die Erhöhung der Kohlenstoffvorräte in Wäldern vorgesehen. Als Kosten zur Erreichung der THG Minderungsziele werden für den LULUCF-Bereich bis 2030 etwa 3,5 Milliarden Euro angesetzt. In den kommenden Jahren soll der Fokus der Verwendung finanzieller Mittel im Bereich Wälder auf dem notwendigen Waldumbau hin zu angepassten Mischwäldern mit überwiegend heimischen Baumarten liegen. Hierfür sollen kostenneutrale Anreizprogramme entwickelt werden.

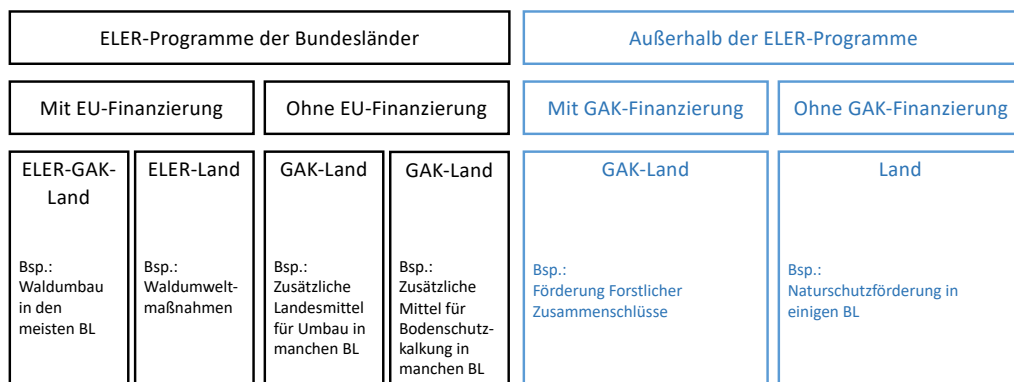
Es wird angenommen, dass zur Erreichung der THG Senkenleistung dieses Sektors durch Nutzungseinschränkungen erhebliche Biomassevorräte in den Wäldern aufgebaut werden müssten. Gleichzeitig wird angezweifelt, ob ein solcher Vorratsaufbau vor dem Hintergrund der weiten Verbreitung wenig klimaangepasster Wälder überhaupt möglich ist, beziehungsweise ob dies mit dem Ziel der Anpassung der Wälder an den Klimawandel kompatibel ist (WBW 2021). Weiterhin weist der WBW (2021) darauf hin, dass auch die Bewirtschaftung der Wälder und die Verwendung des Holzes einen nachhaltigen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten können und weiter optimiert werden sollten. Daher schlägt er eine umfassende Folgenabschätzung des Gesetzes vor, um eine mögliche Beeinträchtigung des potenziellen Beitrags von Wald, Waldbewirtschaftung und Holzverwendung durch die nun für den LULUCF-Sektor vorgegebenen Ziele zu vermeiden. Diese sollte auch untersuchen, welche klimarelevanten Auswirkungen sich für andere Sektoren (Energie, Gebäude, Industrie) ergeben.

## 2.4 Finanzielle Instrumente

Der Staat verfügt über verschiedene Möglichkeiten, bestimmtes Verhalten von Bürgerinnen und Bürgern zu erreichen. Das Spektrum reicht dabei von relativ schwachen, unverbindlichen Instrumenten wie der reinen Informationsbereitstellung bis hin zu Gesetzen und Verordnungen, mit denen den Bürgern ein bestimmtes Verhalten vorgeschrieben wird. Anders als bei diesem ordnungsrechtlichen Ansatz, bei dem der Staat das Recht auf eine bestimmte Handlung oder Unterlassung beansprucht, belässt der Staat das Verfügungsrecht bei Entscheidung für ein finanzielles Instrument bei den Bürgerinnen und Bürgern. Diese sind frei, über ihr Verhalten zu entscheiden und beziehen die finanziellen Kompensationsmöglichkeiten für staatlich gewünschtes Verhalten in ihre Entscheidungen ein. Nach dem vorhergehenden Kapitel über rechtliche Instrumente folgt nun eine kurze Darstellung der bestehenden finanziellen Instrumente.

### 2.4.1 Finanzielle Förderung der Waldbewirtschaftung

Für die Waldwirtschaft sind laut Grundgesetz primär die Länder zuständig. Für die Beteiligung des Bundes an der Förderung bedarf es einer gesetzlichen Grundlage. Diese ist heute allein durch die Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) gegeben. Über sie werden auch Finanzierungsbeiträge der EU im Rahmen des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) integriert (siehe Abbildung 26).



**Abb. 26:** Kombinationsmöglichkeiten der Finanzierung der forstlichen Förderung über den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER), die Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) und Land, BL = Bundesland (Quelle: Ermisch et al. 2016)

Die GAK ist damit das zentrale Finanzierungsinstrument, mit dem der Bund Wälder und Waldwirtschaft fördern kann. Das Ziel der GAK-Finanzierung ist gesetzlich festgelegt: Sie soll Leistungsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Land- und Forstwirtschaft ermöglichen und die nachhaltige Leistungsfähigkeit ländlicher Gebiete gewährleisten (GAKG, §§ 1, 2). Die Förderung ist in der Regel auf Privat- und Kommunalwälder begrenzt. Sie erfolgt derzeit generell durch Anteilsfinanzierung der jeweiligen Kosten; es werden also nicht Gewinnanreize gesetzt, sondern lediglich (Teile der) Kosten erstattet. In Bezug auf die Lenkungswirkung finanzieller Anreize ist zu beachten, dass es den Waldbesitzern freisteht, die entsprechenden Angebote wahrzunehmen oder nicht (Elsasser et al. 2020).

Die Förderung der Waldwirtschaft ist ein zentrales Ziel der deutschen Waldpolitik (§ 1 (2) BWaldG). Wie die Ergebnisse des Testbetriebsnetzes Forst des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft zeigen, haben Fördermittel für den Gesamtertrag der mittleren und großen Forstbetriebe insgesamt jedoch eine nachgeordnete Bedeutung. Im Durchschnitt der Jahre 2003 bis 2014 wurden in Deutschland jährlich 60 Mio. € Fördermittel im Rahmen der GAK ausgezahlt. Im Mittel der Jahre seit 2010 beträgt die Gesamtförderung 9,2 €/ha im Privatwald und 12,4 €/ha im Körperschaftswald. Im Staatswald spielt Förderung eine untergeordnete Rolle (Ermisch et al. 2016).

Die Förderung nach GAK umfasst aktuell folgende Maßnahmengruppen, von denen insbesondere die Gruppen A, D und F für Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel einschlägig sein dürften:

- A.) Naturnahe Waldbewirtschaftung
- B.) Forstwirtschaftliche Infrastruktur
- C.) Forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse
- D.) Erstaufforstung
- E.) Vertragsnaturschutz im Wald
- F.) Förderung von Maßnahmen zur Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald

Die finanzielle Förderung der Waldwirtschaft befindet sich derzeit im Umbruch. Die aktuelle ELER-Periode neigt sich dem Ende zu, die neue ist aber noch nicht abschließend geplant. Die wichtigen forstlichen Standardmaßnahmen wie Waldumbau,

Bodenschutzkalkung und Wegebau, die auch Bestandteil der GAK sind, werden jedoch weiter als förderfähig unter ELER erwartet (Fährmann et al. 2018). Die GAK wird aktuell ebenfalls angepasst, vor allem durch eine stärkere Ausrichtung auf Klimaschutz und Klimaanpassung. Von den Prozessbegleiterinnen wird jedoch davon ausgegangen, dass das Grundangebot der Maßnahmen sowie das Zusammenspiel der Maßnahmen unter GAK und ELER sich nicht wesentlich ändern werden. Es wird erwartet, dass Waldumbau die zentrale Maßnahme zur Klimaanpassung bleiben wird und die Maßnahme auch nach wie vor in allen Bundesländern angeboten werden wird, sowohl mit als auch ohne EU-Beteiligung. In den Änderungsentwürfen der GAK bleibt der Schwerpunkt auch weiterhin auf standortgerechten Baumarten mit einem hinreichenden Anteil standortheimischer Baumarten. Reine Nadelbaumkulturen oder Mischungen mit weniger als 30% Laubholz sind in der Regel nicht förderbar. Das schließt die Förderung „neuer“ Baumarten zumindest in gewissen Anteilen nicht aus. Konkrete förderfähige Baumarten werden dann aber erst durch die Länder festgelegt.

## 2.4.2 Steuerliche Regelungen

Neben der Einschlagsbeschränkung schafft das Forstschäden-Ausgleichsgesetz in buchführungspflichtigen Betrieben auch die Möglichkeit der Risikovor-sorge durch die Bildung einer steuerfreien Rücklage. Die auf einem besonderen Konto bei einem Kreditinstitut einzuzahlenden finanziellen Mittel dienen der „Eigenversicherung“ im Kalamitätsfall und können für Forstschäden reduzierende Maßnahmen wie beispielsweise zur Ergänzung der durch eine Einschlagsbeschränkung geminderten Erlöse, für vorbeugende oder akute Waldschutzmaßnahmen, für Maßnahmen zur Konservierung oder Lagerung von Holz, zur Wiederaufforstung oder Nachbesserung von Schadensflächen etc. in Anspruch genommen werden, was für den Waldbesitzer mit dem positiven Effekt der Steuerstundung und Einkommensglättung verbunden ist. Hier gilt es aber zu beachten, dass Zinserträge aus der steuerfreien Rücklage (die zum Betriebsvermögen zählt) der normalen Einkommensbesteuerung unterliegen, wohingegen auf Kapitalerträge aus Privatvermögen nur eine pauschale Abgeltungssteuer in Höhe von 25% erhoben wird, was die steuerfreie Rücklage, neben der eingeschränkten Möglichkeiten der Inanspruchnahme, ökonomisch wenig attraktiv macht (Moser 2011). In einer im Winter 2019/20 durchgeführten Umfrage (v. Arnim 2020) verfügten nur 14% der befragten Privatforstbetriebe über eine steuerfreie Rücklage, deren durchschnittliche Höhe ca. 80 €/ha betrug. Mithin kann von dieser Rücklage

keine nennenswerte risikomindernde Wirkung erwartet werden. Weitere steuerliche Erleichterungen des Forstschäden-Ausgleichsgesetzes betreffen den Pauschsatz für Betriebsausgaben, die Bewertung von Holzvorräten aus Kalamitätsnutzungen und den ermäßigten Steuersatz nach § 34b Abs. 3 Nr. 1 EStG (Viertel-Steuersatz) für Kalamitätsnutzungen im Wirtschaftsjahr einer Einschlagsbeschränkung.

Eine steuerliche Schlüsselvorschrift für Kalamitätsnutzungen im Privatwald stellt der § 34b des Einkommensteuergesetzes (EStG) dar. Da im Falle von Kalamitäten unter wirtschaftlichen Verlusten Produktionsmittel liquidiert werden, häufig auch unter dem Einfluss von Marktstörungen und mit erhöhten Folgekosten, erscheint eine steuerliche Begünstigung der Einkünfte aus Kalamitätsnutzungen, insbesondere auch zum Ausgleich von Progressionsnachteilen bei zusammengeballten Einkünften, geboten. Damit Kalamitätsanfälle nicht ungerechtfertigt die Steuerprogression im Betrieb verschärfen, gibt es schon seit 1920 steuerliche Vergünstigungen für solche außerordentlichen Holznutzungen (Moser 2011). Der aktuelle § 34b EStG wurde nach mehrfachen Änderungen 2011 vollständig neu gefasst. Hiernach werden Einkünfte aus Kalamitätsnutzungen (und Nutzungen, die aus volks- oder staatswirtschaftlichen Gründen erfolgen wie beispielsweise Zwangsnutzungen im Rahmen vom Straßenausbau etc.) mit dem halben Steuersatz besteuert. Sofern die außerordentlichen Nutzungen den nachhaltigen Hiebssatz übersteigen, gilt für diese Einkünfte der  $\frac{1}{4}$ -Steuersatz. Gemeint ist jeweils der Steuersatz, der sich ergäbe, wenn der Einkommensteuertarif auf das gesamte zu versteuernde Einkommen anzuwenden wäre.

Zusätzlich wurde die Bundesregierung im Rahmen der Novelle ermächtigt, durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates die Steuersätze abweichend für ein Wirtschaftsjahr aus sachlichen Billigkeitsgründen zu regeln, wenn besondere Schadensereignisse vorliegen und eine Einschlagsbeschränkung gem. § 1 des Forstschäden-Ausgleichsgesetzes nicht angeordnet wird. Für die Waldschäden des Jahres 2018 wurden entsprechende steuerliche Billigkeitsmaßnahmen getroffen (s. Kap. 2.3.5), für die Folgejahre nicht.

Grundsätzlich ist hier darauf hinzuweisen, dass entsprechende steuerliche Entlastungen nur dann eine Wirkung entfalten, wenn nennenswerte forstliche Einkünfte aus Kalamitätsnutzungen erzielt werden. Das setzt voraus, dass die Holzerlöse deutlich oberhalb der Kosten der Holzernte und -lagerung liegen. Unter den Rahmenbedingungen der Jahre 2019/2020 war dies verbreitet nicht mehr der Fall, so dass die entsprechenden steuerlichen Entlastungsregelungen vielfach „ins Leere liefen“.

### 2.4.3 Honorierung von Ökosystemleistungen von Wäldern

Neben der finanziellen Förderung und steuerlichen Erleichterungen verfügt der Staat auch über das Instrument des Kaufs bestimmter Leistungen. Es ist fester Bestandteil des öffentlichen Beschaffungswesens. Ebenso wie beispielsweise Beraterleistungen als Vorleistungen für Regierungsarbeit eingekauft werden, können auch Ökosystemleistungen durch den Staat erworben werden. Ökosystemleistungen können dabei ebenso Vorleistungen sein, wie beispielsweise die Reinigung des Wassers unter Wald für die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser, wie auch Güter für die Endverwendung, wie die Bereitstellung von Erholungsraum. Im Gegensatz zur herkömmlichen öffentlichen Beschaffung hat sich dieses Instrument der Bezahlung von Leistungen für die Allgemeinheit im Bereich der Ökosystemleistungen aber nicht durchgesetzt. Zahlungen für Waldumwelt- und Waldklimaleistungen sind nach EU-Rahmenregelung (EU-COM 2014) Beihilfen, die unter bestimmten Bedingungen zulässig sind, aber einer Notifizierung durch die EU bedürfen. Diese EU-rechtlichen Vorgaben sind bei der Entwicklung von Honorierungsinstrumenten für Wälder zu berücksichtigen.

In der Vergangenheit haben sich trotz regelmäßig wiederkehrender politischer Forderungen keine Instrumente zur Bezahlung bzw. Honorierung von Ökosystemleistungen gebildet. Dies ist auch nicht einem Mangel an einschlägigen Vorschlägen zuzuschreiben (z. B. Franz 2017, Franz et al. 2017, Franz et al. 2018, Müller et al. 2020). Die derzeitige Bundesregierung hat die Einführung von Instrumenten zur Honorierung von Ökosystemleistungen des Waldes jedoch zu einem zentralen walddpolitischen Ziel gemacht (Deutscher Bundestag 2021).

Aus Bundessicht stehen insbesondere zwei Ökosystemleistungen im Fokus von Honorierungsbemühungen: Die Honorierung der Klimaschutzleistung sowie die Honorierung von Naturschutzleistungen. Beide Leistungen kommen der gesamten Gesellschaft zugute (sind also nicht lediglich in einzelnen Bundesländern oder Regionen relevant) und Deutschland ist in internationalen Vereinbarungen auch Verpflichtungen zum Schutz des Klimas und der Biodiversität eingegangen (Elsasser et al. 2020). Im Übereinkommen von Paris hat sich Deutschland verpflichtet, die Erderwärmung auf unter 2 Grad Celsius zu beschränken. Die bei der nachhaltigen Waldbewirtschaftung und Holzverwendung entstehenden positiven Wirkungen für den Klimaschutz werden in der internationalen Berichterstattung erfasst und gehen in die Klima-Bilanzierung ein. Davon gehen bisher jedoch keine Anreize zur Anpassung der Wälder und einer



klimafreundlichen Bewirtschaftung im Forst- und Holzbereich aus.

Mit dem Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“, der aus den Einnahmen aus dem EU-Emissionshandel gespeist wird, sowie den Einnahmen nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) stehen dem Bund grundsätzlich zwei Finanzierungsmöglichkeiten zur Wahl, aus denen sachlich begründet die Klimaschutzleistung der Waldwirtschaft honoriert werden könnte. Für die Honorierung der Biodiversitätsschutzleistung gibt es bisher noch kein vergleichbares Finanzierungsinstrument. Mit dem Klimaschutz-Sofortprogramm 2022 will die Bundesregierung die Ökosystemleistungen des Waldes im Jahr 2022 mit 200 Mio. Euro honorieren. Mit dem Geld sollen Waldbesitzende einen Anreiz für den Erhalt und die Vergrößerung der Senke in Wäldern und in langlebigen Holzprodukten erhalten, der bisher nicht über die GAK gesetzt wird.

Parallel dazu besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit von freiwilligen Vereinbarungen zwischen Wirtschaftsunternehmen und Waldbesitzerinnen zur Erhöhung der Klimaschutzleistung deren Wälder. Aufgrund des langsamen Wachstums der Wälder sind die Möglichkeiten des Ausbaus der Klimaschutzleistung aber begrenzt und entsprechend sind es auch die zu erzielenden Gewinne aus solchen Transaktionen auf den freiwilligen Kohlenstoffmärkten. Zudem ist hierbei zu berücksichtigen, dass dieselbe Klimaschutzleistung nur einmal verbucht werden darf und nicht auf verschiedenen Ebenen – staatlich, sektoral, unternehmerisch -doppelt oder dreifach.

## 2.5 Kommunikation, Beratung, Ausbildung und Forschung

### Kommunikation

Insbesondere die Forstverwaltungen bzw. -betriebe der Länder nehmen flächendeckend einen gesetzlich verankerten Informations- und Bildungsauftrag wahr. Dieser wird von vielen privaten Trägern ergänzt. Dabei steht traditionell die Vermittlung der Prinzipien nachhaltiger Waldwirtschaft sowie die Zielgruppe Jugend im Vordergrund. Die besonderen kommunikativen Herausforderungen, die sich aus den im Klimawandel sehr schnell verändernden Waldbildern ergeben, werden im Sektor bzw. den Forstwissenschaften erst allmählich erkannt. Zwischenzeitlich gewinnen die von einigen Akteuren vorgelegten Deutungen von Schadensursachen und Handlungsbedarfen große mediale Aufmerksamkeit. Waldinteressierte Bürgerinnen und Bürger finden ein breites Angebot an Pflanzaktionen, um sich aktiv in der Wiederbewaldung zu

engagieren. Privatpersonen und Unternehmen leisten in großer Zahl einen finanziellen oder tätigen Beitrag zur Wiederwaldung, der von den Engagierten gleichzeitig als sinnstiftend erlebt wird. Die Möglichkeiten der Zivilgesellschaft sich gleichfalls mit Anregungen, Forderungen oder Kritik in die forstliche Planung einzubringen, sind in Deutschland wenig entwickelt und auf einzelne Betriebe bzw. Modellprojekte beschränkt. Kritik an Forstbetrieben sucht sich wohl auch deshalb zunehmend Wege in den sozialen Medien sowie der Organisation in forstverwaltungskritischen Bürgerinitiativen.

### Beratung

Bei etwa der Hälfte der Privatwaldfläche in Deutschland handelt es sich um Eigentumsgrößen von unter 20 ha. Den Waldbesitzenden von Kleinwaldflächen wurden in der Vergangenheit von staatlichen Forstdienststellen der Bundesländer Beratungs- und Betreuungsleistungen angeboten. Da die Forstlichen Dienstleistungen zu vergünstigten Tarifen angeboten wurden, handelte es sich um eine indirekte Förderung, die bereits vor mehr als 10 Jahren im Rahmen des sogenannten Dumping-Verfahrens unter kartellrechtlichen Gesichtspunkten in die Kritik geraten war. Zur Situation der Beratung und Betreuung im kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald hat der WBW im Jahr 2018 eine Kurzstellungnahme veröffentlicht. Darin konstatiert der WBW (S. 4): „Im Gegensatz zur Betreuung bleibt die Beratung privater und körperschaftlicher Waldbesitzer weiterhin eine wichtige Aufgabe des Staates. Im Hinblick auf die besondere Vertrauensstellung staatlicher Förster bei privaten Waldbesitzern sollten die Beratungskapazitäten bei den staatlichen Forstverwaltungen mindestens erhalten und wenn möglich gestärkt werden: Der Klimawandel, die organisatorischen Veränderungen im Bereich der Betreuung, aber auch der demografische und soziale Wandel im Bereich der Waldbesitzenden bedingen einen erhöhten Beratungsbedarf.“

Bei den kostenlosen Angeboten für Waldbesitzende handelt es sich um forstfachliche Beratungsleistungen. Auch wenn dies im Konkreten von den Bundesländern etwas unterschiedlich ausgestaltet wird, handelt sich immer um Informationen zum Wald und zu dessen Bewirtschaftung, zu den Fördermöglichkeiten sowie zur fachlichen Aus- und Fortbildung oder auch zur Anleitung bei der Bildung forstlicher Zusammenschlüsse. Diese Beratungsleistungen werden den Waldbesitzenden kostenfrei zur Verfügung gestellt mit der Begründung, dass die Leistungen des Privat- und Körperschaftswalds letztlich auch dem Allgemeinwohl zugutekommen.

### Ausbildung

Forstliche Studiengänge werden in Deutschland an fünf Hochschulen und vier Universitäten angeboten. Diese akkreditierten Studiengänge bieten forstwirtschaftliche beziehungsweise forstwissenschaftliche Ausbildungen in ihrer vollen Breite mit allen erforderlichen Kompetenzen an. Die klassischen forstlichen ökologischen, ökonomischen, holzwissenschaftlichen, technischen und sozialwissenschaftlichen Disziplinen wurden in der jüngeren Vergangenheit um viele neue Inhalte wie z. B. in den Bereichen der Biodiversität und des Naturschutzes, der Wald- und Umweltpolitik, der naturnahen Waldbewirtschaftung, Walddynamik und -ökologie, Bodenökologie, Wildtierökologie, der Ökosystemleistungen und des Ökosystemmanagements, der Anpassung an den Klimawandel, der Digitalisierung und Fernerkundung sowie der Kommunikation erweitert. Insbesondere an den Universitäten bieten sich für diese Studiengänge zudem viele Anknüpfungspunkte zur Biologie, sowie zu den Agrar-, Umwelt- und Geowissenschaften. Die Studiengänge sind in der Regel breit angelegt und darauf ausgerichtet, den Absolventinnen und Absolventen auf der Grundlage gesicherten Fachwissens möglichst umfangreiche und vielfältige Kompetenzen zur Umsetzung von Waldbewirtschaftungszielen und Lösung spezifischer Probleme zu vermitteln.

Die Halbwertszeit des Hochschulwissens ist mit ca. 10 Jahren bereits jetzt kurz (Braun 1996) und nimmt angesichts der Beschleunigung des Klimawandels sowie des technologischen Fortschritts weiter ab, während die Komplexität der damit verbundenen Probleme eher zunimmt (Incropera 2016). Daher gewinnt die Vermittlung von Kompetenzen, sich neues Wissen und neue Fähigkeiten rasch anzueignen und Probleme interdisziplinär zu lösen, deutlich an Bedeutung. Auch der Umgang mit Risiken, Unsicherheiten und Nichtwissen sollte mehr Gewicht in den Curricula erhalten. Gleichzeitig ist es notwendig, diese Inhalte und Kompetenzen auch konsequent im Bereich der beruflichen Weiterbildung zu verankern, damit sich auch die forstlichen Berater und Beraterinnen und die waldbewirtschaftenden Betriebe entsprechend anpassen können.

Neben den Ausbildungsgängen an Hochschulen und Universitäten gibt es für die Ausbildung von Forstpraktikern in allen Flächenländern Forstliche Bildungszentren, insgesamt sind es 18 in Deutschland. Forstwirt, früher auch Waldfacharbeiter, ist ein staatlich anerkannter Ausbildungsberuf, der in der Regel über drei Jahre erlernt wird. Darauf aufbauend kann im Zuge von Meisterkursen die Qualifikation zum Forstwirtschaftsmeister erworben werden. Die Forstlichen Bildungszentren sind die

zuständigen Stellen für die Abnahme der Prüfungen zum Forstwirtschaftsmeister.

Der praktische Teil der Lehrausbildung zum Forstwirt und zur Forstwirtin erfolgt in einem Forstbetrieb, zwei Drittel der Ausbildungsplätze werden in staatlichen Forstbetrieben angeboten, rund ein Drittel in privaten. Ein Forstwirt wird durch seine Lehre befähigt, alle in den Forstbetrieben anfallenden Tätigkeiten im Forstbetrieb (Waldarbeit) auszuführen. Im Zuge der Ausbildung werden Kenntnisse und Fähigkeiten im Umgang mit dem sensiblen Ökosystem Wald sowie über Technik, Ausrüstung und Verfahren für die verschiedenen Tätigkeiten vermittelt. An Bedeutung gewonnen hat die Vermittlung von kommunikativen Fähigkeiten, damit Forstwirte, die im Waldeinsatz anderen Waldnutzern begegnen, aufkommende Fragen beantworten können.

Während die motormanuelle Holzernte in der Forstwirtausbildung einen breiten Raum einnimmt, wird die hochmechanisierte Holzernte unter Einsatz von Harvestern und Forwardern meist nur gestreift. Einzelne Bundesländer und auch das Deutsche Netzwerk für Forstunternehmen und Forsttechnik e.V. (DFUV) hat in den letzten Jahren gefordert, dass die Fähigkeiten zum Führen von Forstmaschinen nicht nur im Zuge von Weiterbildungen oder Fachkursen vermittelt werden, sondern dass vielmehr ein eigener Lehrberuf „Forstmaschinenführer“ (alternativ Forstmaschinentechniker o.ä.) geschaffen wird. Dies wird damit begründet, dass gut qualifizierte Forstmaschinenführende in der Lage sind, Schäden am verbleibenden Bestand gering zu halten (von Teuffel et al. 2014), so dass die Bestände in ihrer Vitalität nicht geschwächt werden.

### Forschung

Die Kompetenzen, Kapazitäten, Ausrichtungen sowie Defizite und Schwächen der Wald- und Holzforschung wurden vor kurzem in dem Papier „Stärkung der Wald- und Holzforschung in Deutschland“ einer von den Bundesministerien für Ernährung und Landwirtschaft sowie für Bildung und Forschung eingesetzten Arbeitsgruppe einen detaillierten Bericht analysiert und bewertet (Isermeyer et al. 2021). Anlass für die Einsetzung dieser Arbeitsgruppe waren die großen Herausforderungen hinsichtlich des Schutzes und der Anpassung der Wälder einerseits und des potenziellen Beitrags von Wäldern und Holzverwendung zum Klimaschutz andererseits. Die Analysen dieser Arbeitsgruppe basierten dabei vorwiegend auf einer Befragung der Forschungseinrichtungen selbst sowie auf einer bibliometrischen Analyse. Die nachfolgenden Ausführungen greifen auf die Befunde und Empfehlungen dieses Papiers zurück.

Zum Thema Wald und Waldwirtschaft sowie Holzverwendung wird in Deutschland in vielen unterschiedlichen Einrichtungen geforscht. Die forstliche Forschung wird in Deutschland traditionell vor allem von den Fakultäten mit Forstwissenschaften der Universitäten Dresden, Freiburg, Göttingen und München sowie den Forstlichen Versuchsanstalten der Länder und der Ressortforschungseinrichtung des Bundes, dem Thünen-Institut, getragen.

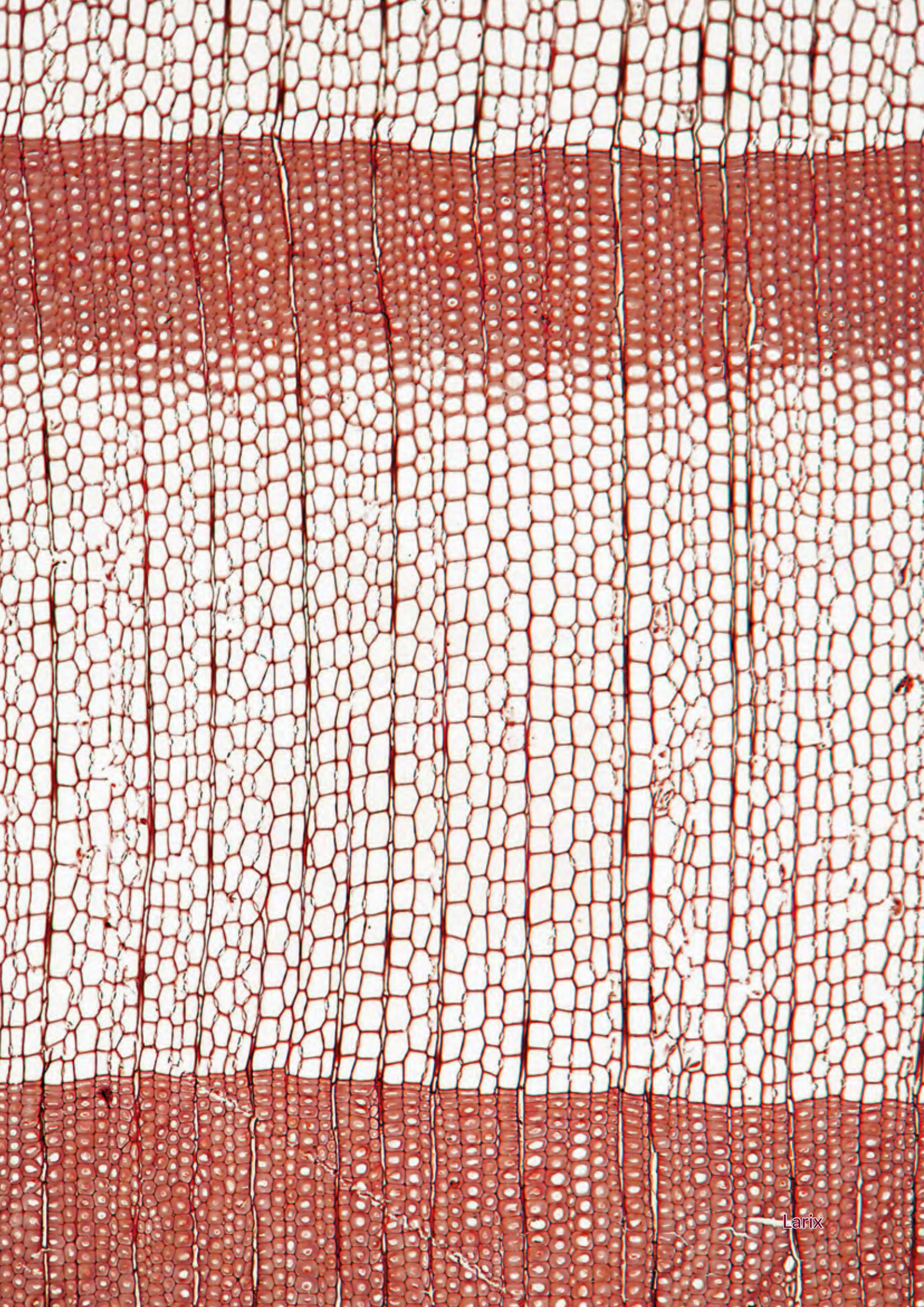
Neben den oben genannten Universitäten findet auch an biologischen, geografischen und umweltwissenschaftlichen Fakultäten walddrelevante Forschung, vor allem zu Fragen der Waldökologie statt. Während an den Universitäten neben der angewandten Forschung und der Lehre die Grundlagenforschung im Mittelpunkt steht, sind es an den Ressortforschungseinrichtungen das langfristige Monitoring, die angewandte Forschung und der Wissenstransfer. Dabei sind die Universitäten und das Thünen-Institut stärker national und international verortet, während die Forstlichen Versuchsanstalten der Länder traditionell einen starken regionalen Bezug haben. Darüber hinaus sind das Julius-Kühn-Institut (JKI, spezialisiert auf Waldschutzfragen), das Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF, spezialisiert auf die anwendungsbezogenen Fragestellungen der Forstlichen Verfahrenstechnik) sowie die Fachhochschulen wichtige Akteure auf nationaler Ebene.

Hinzu kommen die über Deutschland verteilten Einrichtungen der Holzforschung mit unterschiedlichen Arbeitsschwerpunkten. Die Forschungskapazitäten konzentrieren sich dabei, je nach Definition, in sechs bis acht regionalen Clustern, die fast 80% der Dauerstellen in der Waldforschung und ca. 70% in der Holzforschung umfassen. Die Forschungsförderung über Drittmittel betrug für die Periode 2015 bis 2020 ca. 150 Mio. € pro Jahr, wobei etwa 2/3 dieses Betrags auf die Waldforschung entfiel und 1/3 auf die Holzforschung (Isermeyer et al. 2021).

Auch wenn die Wald- und Holzforschung in Deutschland bisher insgesamt als leistungsfähig eingeschätzt wurde, identifizierte die Arbeitsgruppe in ihrem Bericht einige Forschungsthemen und strukturelle Defizite, die adressiert werden sollten, um tragfähige Lösungen für die zukünftigen Herausforderungen entwickeln und die existierenden Kapazitäten und Potenziale effektiver einsetzen zu können. Die in den Rückmeldungen der Umfrage genannten Themen, zu denen erheblicher Forschungsbedarf gesehen wird, spiegeln die Inhalte vieler gegenwärtig geförderten Forschungsprogramme wider. Gleichzeitig werden strukturelle Defizite genannt, die insbesondere eine effektive und rasche Unterstützung der Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft durch die Forschung abträglich sind.

Dazu gehören (Isermeyer et al. 2021):

- der Wissens- und Informationsaustausch zwischen Forschenden, politischen Entscheidungsträgern und der gesellschaftlichen Praxis. Dieser wird durch eine zunehmende sprachliche Divergenz zwischen den Akteuren, eine kleinteilige Forschungslandschaft, die unzureichende Zugänglichkeit von Forschungsdaten und das weitgehende Fehlen von Demonstrationsprojekten behindert;
- eine unzureichende Kooperation und Vernetzung zwischen Forschenden und Praxis (Transdisziplinarität) sowie mangelnder Datenaustausch zwischen den Forschungseinrichtungen;
- mangelnde Kontinuität der Forschungsförderung (und der damit verbundene hohe Turnover des Forschungspersonals: „brain drain“) und fehlende mittel- bis langfristig verfügbare Forschungsinfrastruktur;
- Mangel an wissenschaftlichem Nachwuchs in Disziplinen, die für die Bearbeitung wichtiger zukünftiger Forschungsfragen eine wichtige Rolle spielen, (z. B. Pathologie, Waldschutz oder Forstgenetik); und
- Mangel an Förderung von langfristigen Untersuchungen, sektorübergreifenden Studien und kombinierter Grundlagen- und Anwendungsforschung.



Larix

# 3

## Anpassung an den Klimawandel in unterschiedlichen Bereichen

In den folgenden Kapiteln wird beschrieben, wie sich unterschiedliche Bereiche der Waldbewirtschaftung an den Klimawandel anpassen können. Der Fokus liegt dabei auf den Forstbetrieben, der Holzverarbeitenden Industrie, dem Naturschutzmanagement und dem Bereich Gesundheitsvorsorge, Erholungsmanagement und Tourismus im Wald. In diesen vier Bereichen, die entscheidend sind für die Bereitstellung der Ökosystemleistungen des Waldes, werden zunächst die infolge des Klimawandels zu erwartenden Veränderungen sowie mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen geschildert. Darauf aufbauend stehen die Wechselwirkungen zwischen den Themenbereichen und die Anpassungshemmnisse im Fokus. Das überbetriebliche forstliche Monitoring als wichtige Grundlage für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung stellt eine Querschnittsaufgabe zu den ersten vier Bereichen dar und wird in einem fünften Unterkapitel separat behandelt.

### 3.1 Nachhaltige Waldwirtschaft und Forstbetriebe

In diesem Kapitel werden die Herausforderungen der Anpassung an den Klimawandel auf der Ebene der Forstbetriebe behandelt. Dies umfasst sowohl die Anpassung der Wälder als auch der betrieblichen Strukturen und Prozesse zur nachhaltigen Bereitstellung der gewünschten Ökosystemleistungen. Die Aspekte des Waldschutzes sowie des Schutzes von Böden und Gewässern werden hier mit behandelt, da diese hauptsächlich auf der Ebene der Forstbetriebe relevant sind.

Forstbetriebe erzielen nach wie vor einen Großteil ihrer Erlöse aus dem Holzverkauf (Ermisch et al. 2015, BMEL 2017). Sowohl im Privat- als auch im Körperschaftswald liegt der Anteil bei durchschnittlich knapp 85%, jeweils bezogen auf den Zeitraum 2003 bis 2018. Der wirtschaftliche Erfolg der Forstbetriebe hängt damit sehr stark von den Nutzungspotenzialen reife- und forstwirtschaftlich nutzbaren Holzes und der Entwicklung der Holzmärkte ab, die zum Beispiel im Zusammenhang mit großflächigen Ökosystemstörungen erhebliche

Verwerfungen erfahren können. In Phasen sinkender Holztrträge wird daher regelmäßig die Frage nach alternativen Einkommensquellen für Forstbetriebe gestellt (Brabänder 1995). Wahlweise wird von neuen Geschäftsmodellen oder Geschäftsfeldern, von Förderung oder von der Honorierung von Ökosystemleistungen gesprochen. Zwischen diesen Begriffen bestehen jedoch zum Teil erhebliche konzeptionelle Unterschiede.

Neue Geschäftsmodelle oder -felder im engeren Sinn umfassen Angebote, die Forstbetriebe aufgrund spezieller Nachfragen unterbreiten und über deren Annahme in Form individueller Verträge entschieden wird. Beispiele dafür sind der Verkauf von Schmuckreisig, Begräbnisstätten im Wald, spezielle Waldführungen oder Jagderlebnisse (siehe Tab. 1). In all diesen Fällen müssen die Forstbetriebe das Verfügungsrecht an den jeweiligen Gütern besitzen. Sie wenden Ressourcen auf, um die entsprechenden Produkte anzubieten. Um daraus auch Einnahmen erzielen zu können, müssen sie zahlungsunwillige Konsumenten von der Nutzung ausschließen können. Solche Verträge regeln den Austausch privater Güter über Märkte.

Häufig besitzen die Forstbetriebe das Verfügungsrecht an den jeweiligen Gütern des Waldes allerdings nicht. Sie können damit auch zahlungsunwillige Konsumenten nicht von der Nutzung dieser öffentlichen Güter ausschließen. So ist zum Beispiel das Betreten des Waldes zum Zwecke der Erholung nach §14 BWaldG (Bundeswaldgesetz) jeder Person gestattet. Auch das Sammeln von Pilzen oder das Pflücken von Blumen, Waldbeeren etc. für den Eigenbedarf ist gem. § 39 BNatSchG – soweit spezielle Betretungsverbote dem nicht entgegenstehen - für jedermann zulässig. Forstbetriebe dürfen daher die Gestattung eines Waldbesuches oder das Sammeln von den genannten Nichteinholzwaldprodukten nicht von der Zahlung eines Eintrittsgeldes abhängig machen. Auch im Bereich der Holzproduktion hat sich die Allgemeinheit in letzter Zeit Verfügungsrechte angeeignet bzw. die Verfügungsrechte der Waldeigentümer beschränkt. Beispiele sind konkrete Vorgaben für den Erhalt von Alt- und Biotopbäumen sowie für Totholz wie es sie beispielsweise in FFH-Gebieten gibt. Sofern solche

ordnungsrechtlichen Vorgaben für die Waldbesitzer existieren, können sie ihren Anteil an der bestehenden Nachfrage der Gesellschaft nicht abschöpfen.

Der Staat hat grundsätzlich auf diese Verschiebung der Nutzenverteilung reagiert und verschiedene Instrumente zur Beteiligung von Waldbesitzern am Nutzen der öffentlichen Güter der Wälder bzw. zur Abmilderung der negativen Folgen der Einschränkungen etabliert. Zu ihnen zählen vor allem die Maßnahmen, die von den Bundesländern im Rahmen der von der EU kofinanzierten ländlichen Entwicklungsprogramme angeboten werden. Das waren in der letzten Förderperiode des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raumes Zahlungen für Natura 2000 (ELER-Code 224), Waldumweltmaßnahmen (ELER-Code 225) sowie Naturschutz im Rahmen nichtproduktiver Investitionen (ELER-Code 227). Andere Beispiele sind das sogenannte Hessische Modell einer landeseigenen Stiftung zur Umsetzung von Natura 2000 im Privat- und Körperschaftswald oder das Bayerische Programm für Vertragsnaturschutz im Wald. Das Angebot derartiger Förderprogramme sowie deren finanzielle Ausstattung sind allerdings zwischen den Bundesländern deutlich verschieden. In den meisten Fällen zeigt sich, dass die zur Verfügung stehenden Fördermittel nur einen geringen Teil des Nutzens für die Gesellschaft darstellen, wenn man diesen Nutzen monetär bewertet (WBW und WBBGR 2020).

Neuere politische Bestrebungen, insbesondere auch im Zusammenhang mit den aktuellen Waldschäden und der problematischen Situation auf dem Rohholzmarkt, zielen auf die Honorierung von Ökosystemleistungen des Waldes ab. Welche Bedeutung die anderen Einkommensquellen - neben dem Holzverkauf - für die Forstbetriebe in Deutschland besitzen, lässt sich anhand der Daten des Testbetriebsnetzes (TBN) Forstwirtschaft des BMEL abschätzen. Das TBN fragt Erträge getrennt nach fünf Produktionsbereichen (siehe Tab. 1) in jährlichen Erhebungen bei knapp 350 Forstbetrieben aller drei Eigentumsarten im Rahmen des Testbetriebsnetz Forst des BMEL ab. Auch im Jahr 2018 machen die Erträge aus dem Holzverkauf den Großteil der Erträge der Forstbetriebe aus. Im Privatwald sind es 87% und im Körperschaftswald 83%.

Im Staatswald, der Eigentumsart, die im besonderen Maße auch andere Ziele als die Holzproduktion verfolgt und dafür in der Regel direkte staatliche Zuwendungen aus den Landeshaushalten als sogenannte Produktabgeltungen erhält, liegt der Anteil des Holzertrages bei „nur“ 61%. Aufgrund der besonderen Situation wird auf den Staatswald im Folgenden nicht näher eingegangen.

Die Höhe der Erträge in den anderen Produkt-

bereichen sind jeweils nur sehr gering. Auf Jagd und Fischerei entfallen in beiden Eigentumsarten, Privat- und Körperschaftswald, mit 4% bzw. 6% noch die höchsten Anteile am Gesamtertrag. Nennenswerte andere Geschäftsfelder lassen sich, zumindest im Durchschnitt der Eigentumsarten, nicht erkennen. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass einige Forstbetriebe besonders lukrative Geschäftsbereiche wie zum Beispiel den Betrieb von Windkraftanlagen, den gewerblichen Bodenabbau, Holzhandel oder gewerbliche Forst-Dienstleistungen in eigenständige Betriebe auslagern, um für den eigentlichen Forstbetrieb steuerrechtlich nicht die Eigenschaft eines Forstbetriebes zu verlieren. Die entsprechenden Erträge der eigenständigen gewerblichen Betriebe erscheinen dann nicht im TBN Forst.

Auch die Erträge in den Produktbereichen jenseits von Holzerntrag werden zum weit überwiegenden Teil über Märkte erwirtschaftet. Allein im Produktbereich Schutz und Sanierung entfallen im Privatwald 63% bzw. im Körperschaftswald 67% der Erträge auf die Förderung (Tab. 1). Die Förderung mit insgesamt 9,30 €/ha im Privatwald bzw. 10,30 €/ha im Körperschaftswald trägt im Vergleich zur Landwirtschaft nur sehr gering zum Ertrag in der Forstwirtschaft bei (siehe Kap. 3.1.1.1).

Die derzeit geringe Bedeutung alternativer Einkommensquellen für den Ertrag der Forstbetriebe in Deutschland deckt sich mit der Literatur zu diesem Thema. Auch in wissenschaftlichen und Anwender-orientierten Veröffentlichungen finden sich kaum Artikel über quantitativ relevante neue Geschäftsmodelle für Forstbetriebe. Ein letztes größeres, europäisches Forschungsprojekt zu diesem Thema liegt bereits ca. 20 Jahre zurück (Mantau et al. 1999, Mantau et al. 2001, a, b). Neuere einschlägige internationale Veröffentlichungen beschäftigen sich mehr mit der Frage der Organisation von Forstbetrieben (Kajanus et al. 2019) oder neuen Geschäftsmodellen entlang der gesamten holzbasierten Wertschöpfungskette in der Bioökonomie (Kutnar und Muthu 2016, D'Amato et al. 2020).

**Tab. 4:** Erträge nach Produktbereichen und Eigentumsarten 2018, Testbetriebsnetz Forstwirtschaft des BMEL. (Quelle: BMEL: Die wirtschaftliche Lage der forstwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse 2018. Berlin)

Produktbereich	Privatwald				Körperschaftswald				Staatswald			
	Ertrag		davon Förderung		Ertrag		davon Förderung		Ertrag		davon Förderung	
	€/ha	%	€/ha	%	€/ha	%	€/ha	%	€/ha	%	€/ha	%
1. Holz und andere Erzeugnisse <sup>1</sup>	506	97	5	1	397	93	4	1	456	73	1	0
davon: Holzertrag	450	87	5	1	352	83	3	1	384	61	0	0
2. Schutz und Sanierung <sup>2</sup>	6	1	4	63	10	2	6	67	32	5	2	6
3. Erholung und Umweltbildung <sup>3</sup>	0	0	0	0	1	0	0	17	21	3	0	1
4. Leistungen für Dritte <sup>4</sup>	5	1	0	0	16	4	0	2	70	11	0	0
5. Hoheitliche und sonstige behördliche Aufgaben <sup>5</sup>	2	0		0	3	1		0	47	7		0
Gesamt	520	100	9		426	100	10		626	100	3	

- <sup>1</sup> Einnahmen aus dem Verkauf von z. B. Schmuckreisig, Weihnachtsbäume, Pflanzen, Brennreisig, Schlagabraum, Mieten, Pachten, Gestattungen usw. aus zum Beispiel Windenergienutzung, Begräbnisstätten, Imkerei und Abbau von Kies und Sand, Verkauf von Wildbret, Verkauf von Abschüssen, andere Jagdnutzungseinnahmen, Einnahmen aus Fischerei, Einnahmen aus z. B. Zinserträgen, dem Verkauf gebrauchter nicht aktivierter Kleingeräte, Veräußerungsgewinne beim Verkauf oder Entnahme aktivierter Maschinen und Geräte
- <sup>2</sup> Einnahmen aus Schutz- und Sanierungsmaßnahmen (z. B. Vertragsnaturschutz, Ökokonto/Ökopunkte, Ausgleichs und Ersatzmaßnahmen, Klimaschutz und -anpassung)
- <sup>3</sup> Einnahmen zum Erhalt und Verbesserung der Erholungsfunktion und zur Umweltbildung (z. B. Schutzhütten, Erholungseinrichtungen, Vorträge, Führungen oder Ausstellung)
- <sup>4</sup> Einnahmen aus Arbeit für Dritte, Erlöse aus Gutachten und sonstige fachliche Leistungen für Dritte
- <sup>5</sup> Einnahmen aus Gebühren für Stellungnahme, Fachplanung, Inventur usw.

### 3.1.1 Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen

#### 3.1.1.1 Waldbauliches Risikomanagement

In diesem Kapitel werden zunächst Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit als die wesentlichen Komponenten waldbaulicher Anpassungsstrategien abgeleitet. Darauf aufbauend werden mögliche Veränderungen beziehungsweise Weiterentwicklungen waldbaulicher Systeme zur Reduktion der Vulnerabilität und der Auswirkungen klimawandelbedingter Störungen aufgezeigt. Nachfolgend zeigen wir welche Veränderungen in der Wahl von Baumarten, Provenienzen und in der Forstpflanzenzüchtung zu erwarten sind beziehungsweise verfolgt werden sollten, um die Anpassungsfähigkeit der Wälder zu fördern.

#### Komponenten waldbaulicher Anpassungsstrategien

Ein zentraler Aspekt, der bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen berücksichtigt werden muss, ist die Anfälligkeit der Waldökosysteme und wie diese von Praktikern wahrgenommen wird (Sousa-Silva et al.

2016). In den letzten zehn Jahren hat die Weiterentwicklung von Modellen in Verbindung mit einer verbesserten Datenverfügbarkeit zu bedeutenden Fortschritten bei der Quantifizierung der Anfälligkeit gegenüber den verschiedenen Stressoren des Globalen Wandels geführt (Lindner et al. 2010, Aubin et al. 2016). Obwohl die Einschätzung der Anfälligkeit in hohem Maße von der Art und Weise abhängt, wie sie konzeptionalisiert und berechnet wird (Belote et al. 2018, Kling et al. 2019), werden solche Einschätzungen routinemäßig zur Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels herangezogen, beispielsweise in Form von Risikokarten für die gegenwärtige Bestockung oder mögliche alternative Wirtschaftsbaumarten (Lindner et al. 2010, Brandt et al. 2017).

Ein typisches Ergebnis dieser Bewertungen ist, dass einige Wälder exponierter, vulnerabler oder anpassungsfähiger sein werden als andere, je nach ihrer geografischen Lage, Zusammensetzung und biotischen und abiotischen Umweltbedingungen (Charru et al. 2017, Aubin et al. 2018). In Waldlandschaften finden wir daher heterogene Mosaik von möglichen beziehungsweise modellierten Reaktionen der Wälder auf den Klimawandel (Seidl et al. 2018).

Vor dem Hintergrund zukünftiger Unsicherheiten und weil „keine einzige Lösung alle zu erwartenden

Herausforderungen adressieren kann“ (Millar et al. 2007), befürworten die meisten Ansätze zur Anpassung von Waldökosystemen an den Klimawandel die Entwicklung und Umsetzung eines Portfolios von Optionen (Millar et al. 2007, Aplet und McKinley 2017). Dabei orientieren sich die verschiedenen Anpassungsoptionen nicht nur an der Vulnerabilität der Ökosysteme, sondern auch an den übergeordneten Bewirtschaftungszielen, die unter anderem durch eine unterschiedliche Bewirtschaftungsintensität ausgedrückt werden können (siehe Abb. 2). Gleichzeitig stellt die Diversifizierung der Anpassungsoptionen auf Landschaftsebene eine Form der Risikostreuung dar, denn bei den meisten Optionen ist bisher ungewiss, bis zu welchem Grad der Umweltveränderungen sie effektiv wirken. Die eigentlichen Anpassungsstrategien für konkrete Situationen bestehen aus einer Kombination von Maßnahmen. Ein umfassendes Portfolio von Maßnahmen für die Ebene von Waldbeständen wurde von Millar et al. (2007) vorgeschlagen:

- 1.) Verstärkung der Resistenz der bestehenden Bestockung zur Verringerung der Vulnerabilität und somit der Eintrittswahrscheinlichkeit von Störungen.
- 2.) Förderung der Resilienz, also der Fähigkeit von Ökosystemen, sich von Störungen zu erholen.
- 3.) Erhöhung der Anpassungsfähigkeit der Wälder, um Anpassungsreaktionen zu erleichtern und zu beschleunigen.

#### **Weiterentwicklung waldbaulicher Systeme zur Förderung von Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit**

Waldbewirtschaftung findet auf verschiedenen räumlichen Skalen wie Einzelbaum, Bestand, Betrieb und Landschaft statt. Aus Gründen der Stringenz in der Darstellung wird hier zunächst auf die Bestandesebene fokussiert, da Waldökosysteme auf dieser Ebene am unmittelbarsten durch waldbauliche Aktivitäten beeinflusst werden. Bewirtschaftungseffekte auf größeren räumlichen Ebenen können oft als die Summe der Bewirtschaftungsaktivitäten auf der Bestandesebene betrachtet werden (Schall et al. 2018), obwohl es natürlich auch Wechselwirkungen und Rückkopplungen gibt, wie beispielsweise der Einfluss auf Störungsmuster (Franklin und Forman 1987). Waldbau ist die bewusste Gestaltung der Waldstruktur, -zusammensetzung und -dynamik, um die verschiedenen Ökosystemleistungen auf nachhaltiger Basis bereitzustellen (Bauhus und Pyttel 2015). Inwieweit und mit welcher Priorität die Nutzung der verschiedenen

Ökosystemleistungen verfolgt wird, hängt von den Bewirtschaftungszielen der Waldbesitzenden ab (Nyland, 2016).

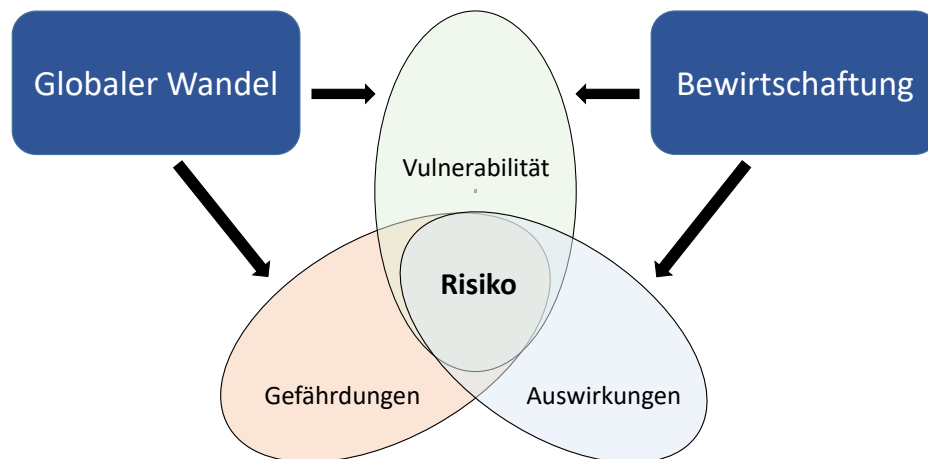
Als waldbauliches System bezeichnet man die Summe aller Aktivitäten, die auf der Bestandesebene von der Verjüngung bis zur Ernte der Bäume stattfinden. Traditionell werden waldbauliche Systeme nach der Verjüngungsmethode benannt, wie zum Beispiel Kahlschlag, Schirmschlag, Femelhieb, Samenbaumsystem und Plenterwald, weil die Art und Intensität der Ernte und die verbleibende Bestandstruktur wichtige Determinanten für alle folgenden Bewirtschaftungsaktivitäten sind, die ein waldbauliches System ausmachen.

Waldbauliche Systeme zielen darauf ab, die Struktur und Baumartenzusammensetzung der Waldbestände so zu steuern, dass die Bereitstellung der gewünschten Ökosystemleistungen optimiert wird. Um dies zu gewährleisten, müssen die gewünschten Baumarten in einer angestrebten Mischungsform erfolgreich verjüngt werden. In den sich daran anschließenden Phasen der Bestandespflege wird darauf hingearbeitet, diese Artenzusammensetzung und Struktur so zu erhalten oder zu verändern, dass die gewünschten Baumqualitäten und -dimensionen erzielt, Managementrisiken verringert, Habitats und Erholungswert erhalten und entwickelt sowie die Bodenfruchtbarkeit und Produktivität gefördert werden. Schließlich werden die Bäume entweder einzeln, in Gruppen, in Lücken, Streifen oder flächig geerntet, um dadurch Wuchsraum für die Etablierung einer neuen Baumgeneration zu schaffen.

Im Kontext dieses Gutachtens soll nachfolgend dargestellt werden, welche Weiterentwicklung und Modifizierung waldbaulicher Verfahren erforderlich sind bzw. Anwendung finden können, um die Wälder an den Klimawandel anzupassen, welche Erkenntnisse zur Effektivität der verwendeten Praktiken bestehen, und in welchen Bereichen bedeutsame Unsicherheiten herrschen.

Zunächst wird jedoch dargestellt, inwiefern die Auswirkungen des Klimawandels zu Veränderungen waldbaulicher Systeme führen. Diese Veränderungen zielen zu einem sehr großen Teil darauf ab, die Vulnerabilität, also die Anfälligkeit von Waldbeständen gegenüber Gefahren des Klimawandels zu reduzieren und dadurch auch eine Reduktion der Auswirkungen von Schäden zu bewirken (siehe Abb. 27).





**Abb. 27:** Risiko als Produkt von Gefährdungen, Vulnerabilität und Auswirkungen. Das Risiko hängt von der Kombination aus (1) der Wahrscheinlichkeit einer Gefährdung (z. B. Häufigkeit von Wind, Feuer, Krankheitserreger, Schadorganismen) als Ursache von Schäden, (2) der Anfälligkeit des Systems gegenüber der betreffenden Gefahr (Vulnerabilität), und (3) den sozioökonomischen Auswirkungen (Impact) des Schadens ab, der vom Wert des betroffenen Bestandes abhängt. Das Risiko wird sowohl vom Klimawandel und der Einschleppung neuer Arten als auch durch die Waldbewirtschaftung beeinflusst. Während der globale Klimawandel hauptsächlich zur Veränderung des Auftretens von Gefahren (z. B. höhere Häufigkeit und Intensität von Stürmen, Dürren, Feuern) und Veränderungen der Vulnerabilität führt (z. B. Wasserstress, der die Resistenz gegenüber sekundären Schadorganismen verringert), verändert die Waldbewirtschaftung hauptsächlich die Vulnerabilität der Wälder (z. B. Verbesserung der Vitalität von Bäumen durch Durchforstung und damit Resistenz gegenüber Schadorganismen) und die Auswirkungen des Schadens (z. B. Reduzierung des Bestandsvolumens). Abbildung adaptiert von Ramsfield et al. (2016).

### Trends in der Entwicklung waldbaulicher Systeme

Eine Übersicht über die Beziehungen zwischen den durch Klimawandel beeinflussten abiotischen Störungen und den Vulnerabilitätsfaktoren in den verschiedenen natürlichen Altersstufen der Wälder ist in Tabelle 5 dargestellt. Der Bezug zu den natürlichen Altersstufen wurde gewählt, da sich in der Regel auch waldbauliche Behandlungen auf diese Altersstufen beziehen und sich waldbauliche Systeme aus der Summe dieser Behandlung zusammensetzen. Hier wird nur auf die wesentlichen abiotischen Gefährdungen eingegangen, die in einer direkten Beziehung zu Veränderung des Klimas stehen. Die Interaktion zwischen diesen Faktoren wurden bereits oben angesprochen (Kap. 1.2.1.3).

Vulnerabilitätsfaktoren drücken den funktionellen Zusammenhang zwischen den einwirkenden Störungen bzw. Stress und den Auswirkungen auf Bäume und Waldbestände aus. Vulnerabilität beschreibt hier den potenziellen Schaden aufgrund eines möglichen Schadensereignisses. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Schadereignisse und die Vulnerabilität der Bestände gegenüber dem Schadereignis werden in dieser Übersicht nicht quantifiziert, da dies von den jeweiligen spezifischen Bedingungen vor Ort abhängig ist. Baumarten und deren Provenienzen sind bei allen Gefahren ein wichtiger Vulnerabilitätsfaktor und werden daher

nicht gesondert aufgeführt. Ebenso sind alle waldbaulichen Maßnahmen, die zur Förderung und zum Erhalt von Baumartenmischungen führen, eine geeignete waldbauliche Reaktionsmöglichkeit und werden daher auch nicht gesondert gelistet. Hier müssen auch die standörtlich geeigneten Baumartenkombinationen vielfach noch identifiziert werden (Baeten et al. 2019). Die biotischen Gefährdungen, insbesondere durch Schadinsekten und Pathogene werden aus mehreren Gründen nicht in dieser Tabelle behandelt. Zum einen werden Optionen eines zukünftigen Waldschutzes noch separat im Kapitel 3.1.1.2 behandelt. Zum anderen hängt die Vulnerabilität gegenüber spezifischen Schadinsekten und Pathogenen sehr stark von der jeweiligen Baumart und dem Grad der Mischung der Bestände ab (Jactel et al. 2017, Bauhus et al. 2017a). Diese Beziehungen sind weniger abhängig von den natürlichen Altersstufen der Bestände.

Da auch die Möglichkeiten zur Eindämmung bestimmter Schadinsekten wie den Borkenkäfern begrenzt und bei Pathogenen fast nicht gegeben sind, beschränken sich die waldbaulichen Möglichkeiten im Wesentlichen auf die Vermeidung bzw. Reduktion von anfälligen Baumarten wie Pflanzungsverzicht bei Esche, die Förderung genetischer Diversität innerhalb der Baumpopulationen, die Streuung von Risiken und Erhöhung der Resistenz und Resilienz durch Mischbestände funktional sehr unterschiedlicher Arten

(Castagneyrol et al. 2014, Bauhus et al. 2017a), und die Stärkung der Vitalität bzw. Reduktion der Vulnerabilität von Bäumen, zum Beispiel mittels Durchforstungen und Verkürzungen der Produktionszeit.

In Tabelle 5 sind einige generelle Trends bezüglich der Entwicklung waldbaulicher Systeme im Klimawandel zur Reduktion von Vulnerabilität und Auswirkung möglicher Schäden zu erkennen. Diese Entwicklungen in waldbaulichen Systemen haben nicht erst mit dem Klimawandel eingesetzt, denn ein wichtiges Ziel waldbaulichen Handelns war seit jeher die Erhöhung der Produktionssicherheit und Vermeidung von Risiken.

Sowohl die Zunahme der Baumartendiversität der Bestände als auch die Reduktion der Produktionszeiten erfordern in vielen Fällen aufwändigere Verjüngungsverfahren und häufige waldbauliche Eingriffe insbesondere in jungen Waldentwicklungsphasen (z. B. Bauhus et al. 2017c, Löff et al. 2018). Die zukünftig gewünschte Baumartenvielfalt und die spezifischen Baumartenkombinationen können in vielen Fällen nur durch Beteiligung künstlicher Verjüngung erzielt werden.

In der jüngeren Vergangenheit wurde in Deutschland der weit überwiegende Teil der Verjüngung mit ca. 85 % aus Naturverjüngung erzielt (BMEL 2018). Dieser hohe Prozentsatz wird aus einer Reihe von Gründen in Zukunft sicherlich rückläufig entwickeln. Zum einen besteht die Notwendigkeit auf vielen Standorten Baumarten/Provenienzen zu ersetzen, die für ein zukünftiges Klima und/oder damit verbundene Änderungen des Störungsregimes als nicht mehr geeignet angesehen werden. Dort wo jetzt schon Eschen aufgrund des Eschentriebsterbens ausfallen, flächig Fichtenbestände absterben oder Buchen eine hohe

Mortalität aufweisen, wäre es nicht sinnvoll, mit diesen Baumarten, auch wenn sie sich natürlich verjüngen, als führenden Wirtschaftsbaumarten weiter zu planen.

Dieser hohe Prozentsatz wird aus einer Reihe von Gründen in Zukunft sicherlich rückläufig entwickeln. Zum einen besteht die Notwendigkeit auf vielen Standorten Baumarten/Provenienzen zu ersetzen, die für ein zukünftiges Klima und/oder damit verbundene Änderungen des Störungsregimes als nicht mehr geeignet angesehen werden. Dort wo jetzt schon Eschen aufgrund des Eschentriebsterbens ausfallen, flächig Fichtenbestände absterben oder Buchen eine hohe Mortalität aufweisen, wäre es nicht sinnvoll, mit diesen Baumarten, auch wenn sie sich erfolgreich natürlich verjüngen, als führenden Wirtschaftsbaumarten weiter zu planen. Das muss nicht bedeuten, dass sie nicht in geringem Umfang in Mischung an zukünftigen Beständen beteiligt werden können. Auch wenn neue Baumarten nicht auf ganzer Fläche künstlich verjüngt werden müssen, sondern auch günstigere Verfahren wie die Kombination aus künstlicher und natürlicher Verjüngung gewählt werden können wie in Trupppflanzungen (Saha et al. 2012), werden insgesamt die betrieblichen Kosten für Verjüngung erheblich ansteigen. Zum anderen führen die großflächigen Schäden an bestehenden Beständen, wo bisher unter dem Schirm des Hauptbestandes noch keine Vorverjüngung etabliert wurde, vielfach zu der Notwendigkeit, diese Flächen wenigstens partiell künstlich zu verjüngen. Weiterhin ist damit zu rechnen, dass bei den extremen klimatischen Bedingungen, die Jungpflanzen auf Freiflächen ohne Schirm ausgesetzt sind, erhebliche Aufwendungen für Nachbesserungen anfallen werden.

**Tab. 5:** Zusammenhang zwischen den durch Klimawandel beeinflussten abiotischen Störungsfaktoren und den Faktoren der Vulnerabilität in verschiedenen Phasen der natürlichen Bestandesentwicklung (Altersstufen), sowie die daraus resultierenden waldbaulichen Reaktionsmöglichkeiten.

Störungsfaktoren im Klimawandel	Natürliche Altersstufen und dazugehörige Faktoren der Vulnerabilität in dieser oder einer späteren Altersstufe	Waldbauliche Reaktionsmöglichkeiten
Trockenheit und Hitze	<p>(1) Jungwuchs: Wurzelsystem noch nicht ausreichend entwickelt; Transpirationsstress auf Freiflächen; Wurzelkonkurrenz um Wasser mit Altbäumen und Bodenvegetation</p> <p>(2) Jungbestand: Hohe Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe</p>	<p>(1) Reduktion der Einstrahlung durch kleinflächige Kronendachöffnungen und Schirm (auch Vorwälder); Vermeidung der Wurzelkonkurrenz mit Altbäumen durch Loch-, Femel- u. Saumhiebe; Kontrolle der Konkurrenzvegetation; weitständige Pflanzungen; Verwendung diverser Baumarten mit unterschiedlichen Strategien zur Vermeidung von Trockenstress.</p> <p>(2) Intensive Jungbestandspflege u. gestaffelte Durchforstung zur Förderung der Entwicklung von Wurzelsystemen; Vitalisierung der Einzelbäume; Erhalt der Baumartenvielfalt; Verkürzung der Produktionszeit zum Erreichen des Zieldurchmessers bei geringeren Endhöhen</p>

	<p>(3) Stangenholz u. schwaches Baumholz: s. (2)</p> <p>(4) Mittleres u. starkes Baumholz: Zunehmende Schwierigkeit des Wassertransports in Bäumen, Anhäufung von Misteln bei einigen Baumarten</p> <p>(5) Alters- und Zerfallsphase: s. (4),</p>	<p>(3) Fortführung gestaffelter Durchforstungen zur Förderung der Entwicklung vitaler Zukunftsbäume</p> <p>(4) Vermeidung von starken, späten Durchforstungen und Vorratspflegeeingriffen zur Reduktion von Transpirationsstress an großen Bäumen; Etablierung von Vorverjüngung schattentoleranter Baumarten durch vorsichtiges Auflichten des Kronendachs</p> <p>(5) Auswahl von Habitatbäumen auf weniger Trockenstress gefährdeten Kleinstandorten (feuchte Senken, bachbegleitende Standorte, usw.)</p>
Sturm	<p>(1) Jungwuchs: eingeschränkte Wurzelentwicklung</p> <p>(2) Jungbestand: siehe (1)</p> <p>(3) Stangenholz u. schwaches Baumholz: mangelnde Einzelbaum- und Bestandesstabilität, zunehmende Baumhöhe, aufgeweichte Böden</p> <p>(4) Mittleres u. starkes Baumholz: siehe (3)</p> <p>(5) Alters- und Zerfallsphase: siehe (3), zunehmende Freistellung und Aufrauhung des Kronendachs</p>	<p>(1) weitständige Pflanzungen; Jungwuchspflege zur Reduktion der Bestandesdichte und Förderung der Baumartenvielfalt, Kontrolle der Konkurrenzvegetation, Verwendung tiefwurzelnder Baumarten</p> <p>(2) Intensive Jungbestandspflege u. gestaffelte Durchforstung zur Förderung der Entwicklung von Wurzelsystemen; Vitalisierung der Einzelbäume; Erhalt der Baumartenvielfalt; Verkürzung der Produktionszeit zum Erreichen des Zieldurchmessers bei geringeren Endhöhen</p> <p>(3) Fortführung gestaffelter Durchforstung</p> <p>(4) Vermeidung von starken, späten Durchforstungs- und Vorratspflegeeingriffen zur Vermeidung der Aufrauhung des Kronendachs; Etablierung von Vorverjüngung</p> <p>(5) Auswahl von Habitatbäumen auf weniger windwurfgefährdeten, geschützten Kleinstandorten</p>
Feuer	<p>(1) Jungwuchs: hohe Mengen leicht brennbarer Biomasse, z. B. trockene Gräser und Sträucher</p> <p>(2) Jungbestand: s. (1) und hohe Anteile von Baumarten mit leicht brennbaren Nadeln und Streu (z. B. Kiefern), horizontale Kontinuität brennbaren Kronenmaterials</p> <p>(3) Stangenholz u. schwaches Baumholz: s. (1 u. 2), und vertikale Kontinuität brennbaren Kronenmaterials (Feuerbrücken)</p> <p>(4) Mittleres u. starkes Baumholz: s. (1 – 3)</p> <p>(5) Alters- und Zerfallsphase: s. (1 – 3), zunehmende Mengen brennbarer Biomasse (Totholz) und leicht brennbare Bodenvegetation, z. B. trockene Gräser.</p>	<p>(1) Kontrolle leicht brennbarer Bodenvegetation; Begründung von Mischbeständen mit Baumarten mit schwer entflammbarer Krone und Streu; Anlage von Brandschutzstreifen und Waldbrandriegeln</p> <p>(2) s. (1) und Aufhebung horizontaler Kontinuität leicht brennbarer Kronen durch Brandschutzschneisen und Schutzstreifen mit brandhemmender Vegetation (Waldbrandriegel)</p> <p>(3) Beseitigung von Feuerbrücken (z. B. Astung) an ausgewählten Orten (entlang von Straßen u. Wegen) u. Unterbau mit waldbrandhemmenden, schattenspendenden Baumarten (Buche, Winterlinde, Hainbuche, Roteiche)</p> <p>(4) s. (2. u. 3) u. Unterbau mit waldbrandhemmenden, schattenspendenden Baumarten (Buche, Winterlinde, Hainbuche, Roteiche)</p> <p>(5) Reduktion von Brandlast an strategisch ausgewählten Forstwegen oder Rückegassen um diese im Brandfall als Kontrolllinien / Pufferzonen verwenden zu können.</p>

Natürliche Altersstufen: Jungwuchs: vom Beginn der Bestandesbegründung/Verjüngung bis Eintritt des Kronenschlusses; Jungbestand: vom Eintritt des Kronenschlusses bis zu einem mittleren BHD von 15 cm bei der Mehrzahl der herrschenden Bäume; Stangenholz: mittlerer BHD von 15 – 20 cm bei der Mehrzahl der herrschenden Bäume; schwaches Baumholz: mittlerer BHD von 20 – 35 cm bei der Mehrzahl der herrschenden Bäume; mittleres Baumholz: mittlerer BHD von 36 – 50 cm bei der Mehrzahl der herrschenden Bäume; starkes Baumholz: mittlerer BHD der Mehrzahl der herrschenden Bäume > 50 cm; Alters- und Zerfallsphase: zunehmende Auflösung der Kronen mit Absterben starker Äste und altersbedingter Baum mortalität

#### Reduktion der Vulnerabilität in verschiedenen Altersphasen

Insbesondere die Etablierungsphase, sei es durch natürliche oder künstliche Verjüngung, wird aufgrund von zunehmendem Trocken- und Hitzestress für Jungpflanzungen noch kritischer als sie das ohnehin bereits ist. Sämlinge haben in der Regel noch kein extensives Wurzelsystem um auch Bodenwasser in größeren Tiefen zu erreichen, sie besitzen kaum Speichergewebe und ihre empfindlichen Organe wie die Blätter sind nahe am Boden, wo sie den größten Temperaturextremen ausgesetzt sind.

Mangelnder Lichtgenuss kann ebenso wie sehr intensive Einstrahlung zu hoher Mortalität in der Verjüngung führen. In dieser Phase mit multiplen Stressfaktoren müssen Verjüngungsmethoden daher darauf ausgerichtet sein, den Stress für Sämlinge insgesamt und insbesondere den Einfluss des bedeutsamsten Stressfaktors zu reduzieren. Dies erfordert in vielen Situationen eine sehr ausgeklügelte Steuerung des Verjüngungsprozesses, da sich der Einfluss der Stressfaktoren mit der Entwicklung der Jungpflanzen rasch ändert.

In der sommerlichen Mittagshitze kann die Hitzestressgrenze der Photosynthese rasch überschritten werden und in Kombination mit erhöhtem Verdunstungsbedarf ernsthafte Auswirkungen auf das Überleben und Wachstum der Pflanzen haben (Valladares et al. 2008). In der Keimungs- und Etablierungsphase können durch eine Überschildung die Temperaturextreme und das Dampfdrucksättigungsdefizit abgepuffert werden (Geiger 1961, von Arx et al. 2013). Davon profitieren insbesondere frost- und hitzeempfindlichen Arten. Der moderierende Effekt des Kronendachs nimmt nicht nur mit der Belaubungsdichte, sondern auch mit der Bodenfeuchte ab, also dann, wenn die Bedingungen für das Wachstum der Sämlinge ohnehin kritisch sind (von Arx et al. 2013). Bei etablierten Sämlingen treten daher schon bald Licht und Wasserversorgung als limitierende Faktoren auf, zumal es für ein großes Kollektiv europäischer Baumarten keinen Zusammenhang zwischen Schatten- und Trockenstresstoleranz gibt (Coomes und Grubb 2000).

Die Begrenzung des Wachstums und Überlebens junger Bäume durch Konkurrenz um Bodenressourcen, also Wasser und Nährstoffe, wurde in den meisten Versuchen, in denen die Wurzelsysteme der Sämlinge durch Abgraben von der Wurzelkonkurrenz der Altbäume befreit wurden, bestätigt (Coomes und Grubb 2000). Daher sollten gerade auf trockeneren Standorten Verjüngungsverfahren gewählt werden, die geeignet sind, durch Reduktion der Wurzelkonkurrenz mit Altbäumen die Bodenfeuchtigkeit zu erhöhen, und

gleichzeitig den Strahlungsgenuss so steuern, dass Sämlinge ausreichend Licht erhalten ohne dabei einer zu hohen Hitzebelastung ausgesetzt zu sein. Dies ist beispielsweise durch Lochhiebe möglich. So konnte für Buchensämlinge am Rande der südwestlichen Verbreitungsgrenze der Art gezeigt werden, dass Sämlinge in Lücken während trockener Sommerphasen besser wuchsen und eine geringere Sterblichkeit aufwiesen also solche in der Unterschicht der Bestände (Robson et al. 2008).

In Situationen, in denen die waldbauliche Steuerung des Mikroklimas durch entsprechende Auflichtung der Bestände nicht möglich ist, beispielsweise nach Windwurf oder nach der Räumung abgestorbener Bestände, können Vorwälder oder strauchartige Vegetation eingesetzt werden, um Temperaturextreme und Austrocknung der Sämlinge zu reduzieren (Geiger 1961, Gómez-Aparicio et al. 2004). Durch die Steuerung des Mikroklimas sollte gleichzeitig die Konkurrenz der Bodenvegetation um Wasser, Nährstoffe und Licht kontrolliert werden.

In der Jungwuchs- und der folgenden Jungbestandsphase ist eine intensive waldbauliche Steuerung notwendig, um wuchsunterlegene Baumarten in Mischbeständen zu erhalten bzw. um stabile Mischungen zu schaffen (Bauhus et al. 2017c) und um einzelne Bäume so frühzeitig zu fördern, dass diese in einer Phase dynamischen Wachstums entsprechend darauf reagieren können. Diese Eingriffe sollten auch deswegen frühzeitig stattfinden, weil sie in späteren Stadien der Waldentwicklung aufgrund der größeren Bestandeshöhen und des langsameren Kronenschlusses nach Eingriff eine größere Anfälligkeit gegenüber Windwurf und Trockenstress hervorrufen (Albrecht et al. 2012, Bennett et al. 2015). Diese intensiven waldbaulichen Eingriffe sind in Jungbeständen und Stangenholzern häufig nicht kostendeckend durchführbar und stellen somit, wie auch die Verjüngung, eine notwendige Investition in die zukünftige ökologische Stabilität und Anpassung der Wälder dar.

Die geplanten und derzeit begründeten, deutlich stärker als bisher gemischten Bestände sind zudem sehr pflegeaufwändig und daher mit hohen Folgekosten verbunden (Puettmann et al. 2015, Bauhus et al. 2017c). In der Phase des Stangenholzes und schwachen Baumholzes sollten in der Regel intensive Durchforstungen fortgesetzt werden, um Mischungen zu erhalten, die Produktionszeiten bis zur Erreichung der Zieldurchmesser zu reduzieren und die destabilisierenden Eingriffe im Kronendach auf Bestandeshöhen zu beschränken, bei denen dies noch mit geringem Risiko, insbesondere in Hinblick auf Sturmwurf (Albrecht et al. 2012) durchführbar ist.

Die wichtigsten Vulnerabilitätsfaktoren in der Baumholz- und Altholzphase werden durch die Vitalität

der Einzelbäume nach entsprechender Förderung in den vorangegangenen Phasen, durch die Höhe der Bestände und die Beschaffenheit des Kronendachs bestimmt. Mit zunehmender Bestandeshöhe und Rauigkeit des Kronendachs nimmt einerseits die Windwurfgefahr zu (Albrecht et al. 2012) und andererseits die Dürreempfindlichkeit der großen Bäume. Letzteres könnte durch eine größere inhärente Anfälligkeit für hydraulischen Stress und den höheren Strahlungs- und Verdunstungsbedarf der exponierten Kronen bedingt sein (Bennett et al. 2015).

In Folge wurde beobachtet, dass in den vergangenen Jahrzehnten in Europa insbesondere die Mortalität großer Bäume und vorratsreicher, alter Wälder angestiegen ist (Forziero et al. 2021). Inwieweit diese klimawandel-bedingten Risiken für die herrschenden Bäume dadurch abgemildert werden können, dass in dieser Phase das Kronendach möglichst geschlossen bleibt, ist bisher noch nicht ausreichend untersucht. Dagegen spricht die zunehmende Konkurrenz um Wasser mit der Bestandesdichte (Sohn et al. 2016) und die Beeinträchtigung der Vorverjüngung. Während diese Risiken durch eine Verkürzung der Produktionszeiten für den zu erntenden Teil der Bestände reduziert werden können, stellt sich zunehmend die Frage, wie es gelingen kann, Habitatbäume im Klimawandel möglichst alt werden zu lassen (Gustafsson et al. 2020). Die Auswahl von Habitatbäumen in Form von Gruppen und auf besser wasserversorgten und windgeschützten Standorten könnte hier eine zielführende Maßnahme sein.

Die Vulnerabilität gegenüber Feuer wird zu einem erheblichen Teil durch die Baumartenzusammensetzung, die Entflammbarkeit und Menge der brennbaren Biomasse, und die Möglichkeit der Feuerausbreitung bestimmt. Waldbauliche Maßnahmen zielen daher darauf ab, Baumarten anzubauen, die feuerresistent sind, wenig leicht entflammbare Streu produzieren und/oder die Entwicklung einer leicht entflammbaren Unterschicht – beispielsweise durch Beschattung- reduzieren. Eine Reduktion der brennbaren Biomasse kann auch durch kontrolliertes Abbrennen erfolgen, das bisher in Deutschland so gut wie nicht praktiziert wird.

Eine weitere wichtige Maßnahme ist die Unterbrechung der räumlichen Kontinuität des brennbaren Materials. So kann die horizontale Ausbreitung von Feuern durch vegetationsfreie Brandschutzstreifen oder Laubholzgürtel unterbunden oder reduziert werden. Ebenso sollte die Steuerung der Bestandesstruktur einen vertikalen Aufstieg von Bodenfeuern in die Kronen von Bäumen verhindern. Dies kann zum Beispiel durch Waldweide, Ästung oder Entfernen der Strauchschicht erfolgen.

### Gemischte und strukturierte Bestände

Die Mischung von Baumarten ist ein zentrales Element der meisten alternativen waldbaulichen Ansätze und Strategien, um die Wälder besser auf die Unsicherheiten vorzubereiten, die sich aus den globalen Veränderungen ergeben (Puettmann et al. 2015; Bauhus et al. 2017b). Mischbestände sind geeignet, die Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit zu erhöhen (Bauhus et al. 2017). Baumartenmischungen können grundsätzlich in alle Formen der aktuellen Waldbewirtschaftung integriert werden, von naturnahen bis hin zu intensiv bewirtschafteten Wäldern (Abb. 2).

Es gibt inzwischen zahlreiche Belege dafür, dass Mischbestände im Durchschnitt produktiver sind als Reinbestände (Forrester und Bauhus 2016). Für viele andere Ökosystemleistungen gibt es zunehmende Evidenz, dass sie auch positiv mit dem Baumartenreichtum zusammenhängen, aber der Effekt ist variabler und weniger eindeutig (Gamfeldt et al. 2013). Während bestimmte Ökosystemleistungen in bestimmten Reinbeständen in höherem Maße erbracht werden können, sind Mischungen in der Regel besser geeignet, um mehrere Ökosystemdienstleistungen zu erbringen (van der Plas et al. 2016). Diese erhöhte Multifunktionalität erscheint besonders wichtig für Wäldern in öffentlichem Besitz und solchen mit langen Produktionszeiten, wo es höchst unvorhersehbar ist, welche Ökosystemleistungen künftige Generationen in welchem Umfang von den Wäldern beziehen wollen (Bauhus et al. 2017b).

Mischungen können daher die Waldbewirtschaftung nicht nur gegen Umweltveränderungen und Störungen, sondern auch gegen Veränderungen der gesellschaftlichen Ansprüche abfedern. Diese Wirkung von Mischungen auf Bestandes- oder Landschaftsebene beruht auf zwei Haupteffekten: a) der ökologischen Versicherung, da eine hohe Anzahl funktional unterschiedlicher Arten die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass einige dieser Arten eher mit Stress und Störungen zurechtkommen (Yachi und Loreau 1999), und (b) den Interaktionen zwischen den Arten, die die Art und Weise verändern, in der eine einzelne Art auf Stress und Störungen reagiert, so dass sie in Mischungen mehr oder weniger resistent sein kann als in Reinbeständen (Bauhus et al. 2017b).

Positive Beispiele für Mischungseffekte durch Interaktionen zwischen den Arten gibt es insbesondere bei spezialisierten Schadorganismen (Castagneyrol et al. 2014) aber auch bei Trockenstress (Grossiord 2020). Hier müssen auch vielfach noch die spezifischen Baumartenkombinationen identifiziert werden, die möglichst positive Effekte bieten (Baeten et al. 2019). Für positive Mischungseffekte aus Interaktionen der Baumarten bei abiotischen Störungen wie

Wind und Feuer gibt es bisher wenig Evidenz (Bauhus et al. 2017a). Sowohl die Versicherungseffekte wie auch die eigentlichen Mischungseffekte können durch die Kombination von funktional unterschiedlichen Baumarten verstärkt werden (Messier et al. 2019), zum Beispiel durch Kombination von Arten mit sehr unterschiedlichen Resistenzen gegenüber Störungsfaktoren.

Ähnliche Effekte wie durch Mischung von Arten, lassen sich durch Mischung von Bäumen unterschiedlicher Dimensionen in ungleichaltrigen, strukturierten Beständen erzielen (Dănescu et al. 2016, Pretzsch et al. 2018). Jedoch sind diese Effekte bisher deutlich weniger untersucht worden und es liegen auch widersprüchliche Ergebnisse vor. In jedem Fall erhöhen ungleichaltrige Bestände mit Vorverjüngung die Resilienz der Wälder, wenn, wie bei Sturm oder Trockenheit, die Vorverjüngung weniger stark von der Störung betroffen ist, und somit die nächste Bestandesgeneration nach Eintritt der Störung bilden kann.

Hier ist dann keine aufwändige Bestandesbegründung unter schwierigen Freiflächenbedingungen notwendig. Diese Form der Erhöhung der Resilienz ist in der Regel nur mit schattentoleranten Baumarten in der Vorverjüngung möglich. Um eine möglichst rasche Verjüngung mit schattenintoleranten Baumarten nach Störung zu ermöglichen, müssen Samenbäume dieser Arten in der Waldmatrix, beispielsweise entlang von Waldstraßen, erhalten bleiben. Wie bereits oben erwähnt erhöhen gemischte und strukturierte Bestände auch gleichzeitig die Komplexität und somit auch viele Kosten der Waldbewirtschaftung.

#### **Baumarten und Herkünfte**

Der Klimawandel wird sowohl die natürliche Verbreitung als auch die Anbaueignung der in Deutschland vorkommenden Baumarten beeinflussen (siehe Kap. 1.2.1.2). Im Rahmen der Risikovorsorge stellt daher die Suche nach besser klimaangepassten Baumarten bzw. Herkünfte eine wichtige und weitreichende Option dar, um die Resilienz von Wäldern zu erhöhen. Der Ursprung dieser Baumarten bzw. Herkünfte liegt vorzugweise in klimatisch trockenwarmen Regionen mit möglichst weiter Klimaamplitude insbesondere der (Spät-)Frosttoleranz. Grundlage für die Baumartenempfehlungen bieten Expertenwissen, Anbauversuche und Modellierungen.

In den letzten 10 Jahren sind hierzu mehrere umfassende Artenliste auf der Grundlage von Artensteckbriefen und Metaanalysen für sogenannte Alternativbaumarten, häufig mit regionalem Bezug in Deutschland vorgestellt worden (Vor et al. 2015, Klädtke 2016, De Avila und Albrecht 2017, Albrecht und De Avila, 2019, Janßen et al. 2019, Forster et al.

2019, Thurm et al. 2019). Neben ihrer ökologischen Amplitude und standörtlichen Eignung müssen darüber hinaus die wirtschaftliche Verwertung, Risikopotenziale wie Invasivität, Prädisposition gegenüber Krankheiten und Schadorganismen usw. und die reale Saatgutverfügbarkeit in den notwendigen Mengen aus potenziellen Exportländern berücksichtigt werden.

Für eine Reihe von in Deutschland heimischen Haupt- und Nebenbaumarten werden deutliche Veränderungen der aktuellen Verbreitung prognostiziert, sei es durch klimatisch bedingte Reduktion bzw. Verschiebung des Verbreitungsgebiets wie bei Rot-Buche, Gewöhnlicher Fichte, Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche (Hanewinkel et al. 2013, Thurm et al. 2018) oder durch biotische Schaderreger wie bei Berg-Ahorn, Gewöhnlicher Esche, Feld- und Berg-Ulme (Liesebach et al. 2021). Innerhalb des Spektrums der waldbaulichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel sind daher die Wiederbewaldung mit klimaangepasstem Vermehrungsgut auf Störungsflächen sowie ein mittelfristiger Baumartenwechsel wesentliche Handlungsoptionen beziehungsweise eine Handlungsnotwendigkeit im Fall akuter Waldschäden.

Die Möglichkeiten für das Ausgangsmaterial dieses Baumartenwechsels reichen von der Auswahl besser klimaangepasster Saatgutbestände innerhalb deutscher Herkunftsgebiete, der Verwendung von Herkünften aus anderen Klimaregionen auch in Deutschland vorkommender Hauptbaumarten wie für Buche und Eiche, der Förderung heimischer, seltener und Nebenbaumarten wie Hainbuche, Spitz-Ahorn, Elsbeere, der Verwendung ursprünglich fremdländischer Baumarten heimischer Standorte wie Douglasie, Rot-Eiche, Robinie, bis hin zur Einführung neuer Baumarten aus anderen Klimaregionen. Insgesamt bietet sich somit ein relativ vielfältiges Gehölzsortiment insbesondere für gepflanzte Verjüngungsflächen an.

Klimaangepasste Baumarten respektive Herkünfte sollten eine höhere Stresstoleranz gegenüber Trockenheit und Hitze, Spätfrösten und gegebenenfalls Sturm bei hinreichender Wuchsleistung und stofflicher Verwertungsperspektive besitzen (Bolte et al. 2009, Zang et al. 2014, Thurm et al. 2018). Damit ist die Anpassung an abiotische Stressfaktoren nur eine Facette des gewünschten Anpassungsprofils. Die Angepasstheit der Baumarten an wärmere und trockenere Standortbedingungen geht dabei häufig einher mit einer geringeren Wuchsleistung alternativer Baumarten (Thurm et al. 2018).

Alternative Baumarten sollten auch die heimische Biodiversität unterstützen. Am ehesten ist dies zu erreichen, wenn die alternativen Baumarten in einer engen verwandtschaftlichen, räumlichen und ökophysiologischen Beziehung zu einander stehen wie beispielsweise Rot-Buche / Orient-Buche, Trauben-Eiche /

Flaum-Eiche, Gemeine Kiefer / Schwarz-Kiefer. Einige potenzielle Ersatzbaumarten für einheimische Arten weisen dabei eine sehr hohe Tothholzkäfervielfalt bei der initialen Besiedlung von Ästen auf (Vogel et al. 2021).

Die dringlichste Verwendung für Alternativbaumarten besteht vor allem für Standorte und Risikogebiete, wo derzeit ein flächiger Ausfall der Hauptbaumart besteht bzw. zu erwarten ist und die Naturverjüngung nicht zu der gewünschten Baumartenvielfalt führt. Es ist daher zwischen Ersatz- und Ergänzungsbaumarten zu unterscheiden. Erstere zielen auf den Ersatz der bisherigen Baumart(en) ab, während letztere die Verjüngung der bisherigen Baumarten zum Beispiel in Form von Naturverjüngung ergänzen, um insgesamt besser angepasste und artenreichere Bestände zu entwickeln. Allerdings wird das Baumartenspektrum auf Standorten mit geringer Nährkraft, hoher Wasserdurchlässigkeit und unter Freiflächenbedingungen nach Borkenkäferkalamitäten, Brand oder Windwurf erheblich eingeschränkt.

Traditionell wurden Empfehlungen für alternative, eingeführte oder seltene Arten auf der Grundlage von großen Anbauversuchen ermittelt. Diese sind auch nach wie vor von großer Bedeutung und werden auch fortlaufend initiiert (Frei et al. 2018, Stiller und Olhoff 2021). Allerdings steht die lange Zeitspanne dieser Versuche und die Dauer bis zur Generierung belastbarer Ergebnisse im Gegensatz zur Schnelligkeit des Klimawandels und der Dringlichkeit des Informationsbedarfs. Daher werden zusätzliche Wege beschritten, um Information über die Baumarteneignung im Klimawandel zu generieren. Dazu gehören retrospektive Analysen des Wachstums von Bäumen entlang von Standort- bzw. Klimagradierten insbesondere unter der Berücksichtigung von klimatischen Extremereignissen (Vitali et al. 2017, Kunz et al. 2018).

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von Artenverteilungsmodellen (Thurm et al. 2018). Mit Hilfe von qualitativ hochwertige Datensätzen zum Vorkommen der Arten und entsprechenden Rechenkapazitäten ist es relativ einfach, solche Modelle für verschiedene Klimawandelszenarien zu entwickeln. Aufgrund der notwendigen Berücksichtigung vieler zusätzlicher Variablen zur Einschätzung der Eignung alternativer Baumarten, werden nach wie vor expertenbasierte Verfahren verwendet, in denen bisherige Anbauverfahren, retrospektive Analysen und Modellierungen berücksichtigt werden.

So wurden beispielsweise durch die Bund Länder AG Forstgenetik/Forstsaat unter Mitwirkung anderer forstlicher Fachdisziplinen 103 potenzielle Baumarten hinsichtlich ihrer Klimaanpassung an Hand von Expertenwissen, ca. 180 Veröffentlichungen, „grauer“ Literatur und Erfahrungswissen bewertet (Liesebach

et al. 2021). Dabei wurden die Kriterien ökophysiologische Amplitude, Wuchsleistung und Holzeigenschaften, biotische und abiotische Risiken und Invasivität sowie kurz- bis mittelfristige Versorgung mit forstlichem Vermehrungsgut berücksichtigt. Die bewerteten Baumarten wurden folgenden Gruppen zugeordnet:

- 1.) Eingeführte Baumarten, über die umfassende Kenntnisse über die genannten Kriterien bestehen und mit dem Potenzial andere Baumarten zumindest teilweise zu ersetzen.
- 2.) Baumarten, die vor allem für die Begründung von Vorwald in Frage kommen
- 3.) Baumarten, die durch unterschiedliche Ursachen gefährdet sind und vermutlich teilweise zu ersetzen sind.
- 4.) Baumarten, über die keine oder nur wenige Kenntnisse zu den genannten Kriterien vorliegen aber über das Potenzial verfügen, andere Baumarten zumindest teilweise zu ersetzen oder zu ergänzen.

Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass von den eingeführten außereuropäischen Baumarten fünf Arten bereits jetzt als potenzieller Ersatz für die heimischen Hauptbaumarten dienen können: Küstentanne, Douglasie, Rot-Eiche, Robinie und Japanische Lärche. Für diese Baumarten liegen hinreichende Kenntnisse zu den Kriterien der Baumartenwahl vor. Dies gilt ebenso für eine weitere Gruppe von Pionierbaumarten, die vor allem für die Begründung von Vorwald in Frage kommen wie Aspe, Pappel, Sand-Birke und Hybrid-Lärche. Für diese Baumarten kann auch der Saatgutbedarf weitgehend gedeckt werden.

Für die Baumarten Hainbuche, Winter-Linde, Spitz-Ahorn, Flaum-Eiche, Nordmann-Tanne, Orient-Buche, Atlas-Zeder sowie Elsbeere und Baum-Hasel wird ebenfalls eine potenziell hohe Klimaanpassung angenommen, die jedoch bundesweit durch kombinierte Anbau- und Herkunftsversuche auf einer breiten Standortpalette überprüft werden müssen. Für einige dieser Arten stehen derzeit noch nicht genügend Saatgutquellen zur Verfügung. Unabhängig davon sollten weitere europäische Arten aus den Gattungen der Tannen-, Kiefern- und Eichen hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit in Deutschland untersucht werden. Anbau- und Herkunftsversuche sind insbesondere für Baumarten notwendig, wo der Kenntnisstand zur Eignung und zu den Risiken unzureichend sind.

Im Ergebnis früherer Anbauversuche zeigt sich, dass die generalisierende Bewertung der Anbaueignung von Arten auf der Grundlage einer verwendeten

Provenienz zu Fehleinschätzungen führen kann. Dies gilt insbesondere für die Anpassung an meteorologische Einflussfaktoren. Herkunftsversuche, die ein breites Spektrum von Ökotypen innerhalb des Verbreitungsgebietes einer Art bzw. aus künftigen klimaanalogen Gebieten, zum Beispiel in Südosteuropa, berücksichtigen, sind daher weiterhin eine unerlässliche Bewährungsprobe für die angebauten Provenienzen. Um ein breites Standortspektrum für solche Prüfungen zu gewährleisten, sollten in bundesweite Versuchsanlagen neben den forstlichen Versuchsanstalten und anderen Forschungseinrichtungen auch andere Waldeigentümer nach dem citizen science-Ansatz einbezogen werden. Gleichzeitig ist vor „flächigen Selbstversuchen“ mit exotischen Baumarten von insbesondere privater Waldbesitzer ohne wissenschaftliche Begleitung zu warnen.

Um Wälder an den Klimawandel anzupassen, wird in der Waldwirtschaft neben bisher seltenen einheimischen auch auf eingeführte Baumarten zurückgegriffen (Vor et al. 2015, Thurm et al. 2018, Albrecht und de Avila 2018). Die Verwendung nicht heimischer Arten wird aus naturschutzfachlicher Sicht häufig kritisch gesehen, da diese Baumarten, bei einem geringen Grad der Verwandtschaft mit heimischen Baumarten (Gossner 2016), in der Regel weniger heimischen Arten Habitat bieten und einige von ihnen als invasiv oder potenziell invasiv angesehen werden (Felton et al. 2013, Dumas 2016). Für die bereits in der Vergangenheit eingeführten Baumarten liegen eine Reihe von Beurteilungen ihrer (potenziellen) Invasivität vor (Nehring et al. 2013, Vor et al. 2015).

Diese Beurteilungen divergieren teilweise erheblich, unter anderem weil unterschiedliche Kriterien verwendet und gleiche Kriterien unterschiedlich gewichtet werden, viele Bewertungen auf einer unzureichenden Datenbasis zur Quantifizierung von Invasionsrisiken vorgenommen werden und vielfach nicht zwischen Risiken, die von eingeführten Baumarten auf verschiedenen Standorten bzw. in unterschiedlichen Ökosystem ausgehen, differenziert wird (Bindewald et al. 2020). Grundsätzlich kann man aufgrund bisheriger Risikobewertungen zwischen solchen Baumarten unterscheiden, die a) als eindeutig invasiv eingestuft werden wie die spätblühende Traubenkirsche oder die Rot-Esche, b) als nicht invasiv eingestuft werden wie die Japanische Lärche, c) bei denen ein potenzielles Risiko als gering und durch die Waldbewirtschaftung kontrollierbar eingeschätzt wird wie bei der Douglasie und d) bei denen die Informationsgrundlage zu dürftig ist, um zu einer abschließenden Einschätzung zu gelangen wie beim Blauglockenbaum/Paulownie (Vor et al. 2015). In waldbaulichen Anpassungsstrategien sollte man sich daher auf Baumarten der Kategorien b) und c) fokussieren und gleichzeitig

die Informationsgrundlage für Risikobewertungen durch ein explizites Monitoring dieser Baumarten in verschiedenen Inventuren, zum Beispiel der Bundeswaldinventur, Betriebsinventuren oder Biotopkartierungen, laufend verbessern (Bindewald et al. 2021).

Letzteres erscheint vor allem in Hinblick auf die Unsicherheiten geboten, die mit der Populationsentwicklung eingeführter Arten unter zukünftig veränderten Störungsregimen einhergehen. Die wenigen bisherigen Untersuchungen in Mitteleuropa, können die Rolle von Störungen als Auslöser für biologische Invasionen durch eingeführte Baumarten nicht bestätigen (Dyderski et al. 2018). Eine Bewertung des Risikos einer potenziellen Invasivität oder anderer negativer ökologischer Auswirkungen sollte fester Bestandteil der Überprüfung der Anbauwürdigkeit von Baumarten sein, wie dies bereits in den meisten Fällen geschieht (Albrecht und de Avila 2018). Für bereits in der Vergangenheit eingeführte, als invasiv eingestufte Baumarten sind waldbauliche Systeme und Bewirtschaftungsplanungen auf Landschaftsebene zu entwickeln, die geeignet sind, diese Arten zurückzudrängen bzw. eine weitere Verbreitung und negative Auswirkungen auf die Ökosysteme zu kontrollieren und zu reduzieren (Petersen 2014, Quadt et al. 2016). Vielfach fehlt es hier noch an den erforderlichen Grundlagen (Felton et al. 2013).

Zu den wichtigen Handlungsoptionen gehört daher neben der grundsätzlichen Bereitstellung von forstlichem Vermehrungsgut die Gewährleistung der Herkunftssicherheit. Bei Baumarten, die gemäß Anlage zu §2 Forstvermehrungsgutgesetz FoVG der EU-Richtlinie unterliegen, muss innerhalb der EU die Herkunftssicherheit gewährleistet sein bzw. die Artenliste des deutschen FoVG mittelfristig angepasst werden.

#### **Auswahl von genetisch angepasstem Vermehrungsgut und Forstpflanzenzüchtung**

Die mit dem Klimawandel verbundenen veränderten Umweltbedingungen wirken sich nicht gleichförmig auf alle Individuen einer Population aus. Neben der im vorherigen Abschnitt besprochenen Auswahl geeigneter Baumarten bzw. Herkünfte gehen wir hier auf weitere Möglichkeiten ein, genetische Unterschiede innerhalb von Populationen und Herkünften zu identifizieren und für waldbauliche Anpassungsstrategien nutzbar zu machen. Die genetische Diversität und Anpassungsfähigkeit ist eine wichtige Komponente der natürlichen Auslese und die zugrundeliegenden genetischen Merkmale beeinflussen ökophysiologische Eigenschaften wie die Trockenstresstoleranz (Zang et al. 2014).

Fortschritte in der forstgenetischen Forschung erlauben es zunehmend genetische Muster zu analy-



sieren und genomische Unterschiede zwischen geschädigten und trockenstresstoleranten Individuen zu bestimmen, beispielsweise für Buche (Cuervo-Alarcon et al. 2021, Pfenninger et al. 2021) oder Fichte (Trujillo-Moya et al. 2018). Die Identifikation solcher Genorte ist ein wichtiger Schritt, um wünschenswerte genetische Merkmale im Vermehrungsgut zu selektieren.

Während in der Vergangenheit in naturnahen Laubmischwäldern überwiegend Naturverjüngung genutzt wurde, wird es in Zukunft im Zuge der Klimaanpassung einen wachsenden Bedarf an künstlicher Verjüngung geben, auch für Laubbaumarten. Es gibt ausreichend Saatgutbestände, aber diese gilt es hinsichtlich ihrer Klimaanpassung zu überprüfen, um Bestände mit geeigneten Merkmalen zu selektieren.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwieweit klimaanpassungsrelevante Merkmale gezielt durch Forstpflanzenzüchtung gefördert werden können. Die Forstpflanzenzüchtung verfolgt in der Regel das Ziel, wünschenswerte Merkmale von Bäumen wie die Wuchseistung, Wuchsformen, Resistenz gegenüber abiotischen Stressfaktoren oder Pathogenen, durch kontrollierte (gelenkte) Kreuzungen von zuvor ausgewählten Paarungspartnern und anschließender Selektion unter den hieraus hervorgegangenen Nachkommen zu verstärken. Der Erfolg und die Geschwindigkeit der Verbesserung dieser Zielmerkmale hängen von drei Faktoren ab (Erikson et al. 2001):

- 1.) Der genetischen Kontrolle des Zielmerkmals: Je stärker ein Merkmal genetisch kontrolliert wird und je weniger Gene für die Merkmalsausprägung verantwortlich sind, umso erfolgreicher und schneller ist ein Züchtungsprogramm.
- 2.) Der Kontrolle der Kreuzung zwischen ausgewählten Paarungspartnern: Während unter Versuchsbedingungen eine vollständige Kontrolle gegeben ist, können beispielsweise in Samenplantagen durch die räumliche Isolation von anderen Beständen der gleichen Art sowie durch die Anordnung der Paarungspartner innerhalb der Samenplantage die Pollenbeiträge zumindest teilweise kontrolliert werden. Bei der Produktion von Saatgut in zuvor ausgewählten Waldbeständen findet nur eine Kontrolle der mütterlichen Beiträge nicht aber der Pollenzusammensetzung statt. Je stärker die Kontrolle bei der Kreuzung, umso effektiver ist das Züchtungsprogramm.
- 3.) Die Stärke der Selektion der Individuen bezüglich der Ausprägung der Zielmerkmale: Je stärker die Selektion umso effektiver ist das Züchtungsprogramm.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind folgende Zielmerkmale relevant: (1) eine erhöhte Trockenstresstoleranz, (2) eine erhöhte Hitzestresstoleranz und eine (3) angepasste (Spät-) Frosttoleranz bei möglichst hinreichender Wuchseistung und ohne Einschränkungen im Abwehrvermögen gegenüber biotischen Schaderregern.

Fortschritte in der Genomanalyse zur Trockenstresstoleranz könnten in Zukunft genutzt werden um aus Herkünften und Populationen jene Plusbäume zu selektieren und in Vermehrungsprogramme zu überführen, die Extremwetterereignisse im Freiland und in Stressexperimenten besonders erfolgreich überstanden haben (Auslesezüchtung). Grundvoraussetzung hierfür ist eine populationsorientierte Datengrundlage, wie sie durch die Erhaltung forstlicher Genressourcen in Deutschland für eine Vielzahl von Baumarten bereitgestellt wird (Paul et al. 2000).

Im Gegensatz zu den traditionellen Züchtungszielen, beispielsweise der Erhöhung der Wuchseistung oder Resistenz gegenüber bestimmten Pathogenen, müssen bei den oben genannten anpassungsrelevanten Züchtungszielen folgende Besonderheiten berücksichtigt werden. Wie Transkriptionsanalysen zeigen, unterliegt die genetische Kontrolle der Zielmerkmale einer Vielzahl von Genen mit unterschiedlichen Funktionen in einem physiologisch/biochemisch hoch komplexen und fein abgestimmten Anpassungsprozess. Im Falle von Wassermangel werden dabei mehrere Hundert Gene, die verschiedene Stoffwechselbereiche betreffen, hoch- und runterreguliert (Joshi et al. 2016).

Allein das Zielmerkmal *Trockenstresstoleranz* wird durch eine Vielzahl von Anpassungsstrategien ermöglicht, die von strukturellen Merkmalen wie Wurzeloberfläche, Blattoberfläche, Behaarung, Stomatadichte und viele andere mehr, über regulative Fähigkeiten wie beispielsweise Stomataschluss- und Leitfähigkeit, Atmungsrate, Wasserpotenzialsteuerung, bis zu aktiven Stressreaktionen wie Prolinsynthese, Aktivierung von diversen Stressproteinen und Phytohormonen, reichen.

Welche Reaktionen in einem baumartenspezifischen Züchtungsprogramm sinnvollerweise gefördert werden sollen, ist weiterhin Gegenstand von Forschung. Einige mögliche Kandidaten werden diskutiert, beispielsweise auf zellulärer und Gewebeebene die osmotische Anpassung, der antioxidative Schutz und die erhöhte Wassernutzungseffizienz (Polle et al. 2019). Vor diesem Hintergrund sollten von der züchterischen Bearbeitung einiger weniger Gene keine schnellen Züchtungserfolge erwartet werden.

Allerdings verdeutlichen die erheblichen genetischen Unterschiede in der Reaktion auf Trockenheit selbst bei hochgradig trockenheitsempfindlichen

Arten wie Fichte und Europäische Lärche das mittelfristige Potential durch Züchtungsforschung, die lokale Anpassungen des genetischen Vermehrungsguts an künftige Bedingungen zu fördern (Schueler et al. 2021). Die Grundlagen für eine genom-basierte Züchtung von Dürreresistenz in Baumarten erfahren gerade eine rasche Entwicklung (Depardieu et al. 2021).

Die Intensität der bisherigen Züchtungsforschung fällt je nach Baumart unterschiedlich aus. Bisher wurde in Deutschland nur bei wenigen Baumarten eine intensive Züchtungsforschung betrieben zuzüglich Pappel und Lärche. Differenziert nach Ökosystemleistungen dominierte als Züchtungsziel die Erhöhung der qualitativen und quantitativen Wuchsleistung, einschließlich der C-Bindung. Diese „Domestikation“ von Bäumen war aber auf eine produktionsorientierte Bewirtschaftung und nicht auf die Klimaanpassung ausgerichtet (Fladung 2008).

Erst seit 2013 hat die Herkunftsforschung und Forstpflanzenzüchtung im Klimawandel an Beachtung gewonnen. Von den Versuchs- und Forschungsanstalten von Bund und Ländern wurden Strategien und Programme entwickelt (Liesebach et al. 2013, 2021), die seit 2014 umgesetzt werden. Am Anfang wurde der Schwerpunkt auf die häufiger vertretenen Baumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Douglasie, Lärche und Bergahorn gelegt (Liesebach et al. 2013). Zwischenzeitlich wurden die Arbeiten auch auf Neben- und seltenere Baumarten ausgeweitet. Regional laufen Versuche mit weiteren Baumarten. Erste Ergebnisse sind in Tagungsbänden und Einzelpublikationen veröffentlicht (Janßen et al. 2017, Meißner & Volmer 2017, Rieckmann et al. 2021). Aufgrund der Langfristigkeit von Züchtungsvorhaben mit Bäumen sind kurzfristige Durchbrüche allerdings nicht zu erwarten, zumal es für sehr viele heimische und nicht-heimische Alternativbaumarten bisher keine Herkunftsversuche in Deutschland gab.

Wichtiges Ziel der Forstpflanzenzüchtung unter Klimawandelbedingungen ist die Bereitstellung von Vermehrungsgut, das anpassungsfähig und leistungsstark genug ist, um den erwarteten Umweltänderungen bei der Erfüllung aller Waldfunktionen gerecht zu werden. Dies erfordert eine kontinuierliche Bearbeitung und, aufgrund der langen Generationszyklen der Waldbaumarten, langfristige Versuchsansätze. Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung besitzen hierzu einen bewährten Methodenkatalog, der durch die großen Fortschritte der Molekularbiologie weitere Optionen erwarten lässt.

#### 3.1.1.2 Waldschutz

Das Kapitel beschreibt zunächst die neuen Herausforderungen an den Waldschutz, die sich aus dem

Klimawandel und anderen Aspekten des Globalen Wandels ergeben. Daraus abgeleitet werden mögliche und notwendige Änderungen in den Bereichen des Waldschutzmonitorings und der Prognose sowie des Managements und der Planung und die gesteigerten Anforderungen an die Evidenz der Effektivität von Waldschutzmaßnahmen. Eine Diskussion der Möglichkeiten und Anforderungen an den Pflanzenschutz und sowie der Bedeutung des Managements von Wirbeltieren im Waldschutz vervollständigen das Kapitel.

#### Waldschutz im globalen Wandel

Der globale Wandel nimmt in vielfältiger Weise Einfluss auf die Waldschutzherausforderungen in Deutschland. Die globale Erwärmung führt bei einer Reihe von Schadorganismen zu verbesserten Reproduktionsbedingungen. Prominente Beispiele sind der Buchdrucker, der in warmen Sommern mit mehreren Generationen rasch seine Population aufbauen kann (Wermelinger 2004, Biedermann et al. 2019), oder Schwammspinner und Nonne (Vanhanen et al. 2007). In ihrem Review kommen Logan et al. (2003) zum Schluss, dass Klimaerwärmung viele Voraussetzungen von Insektenmassenvermehrungen begünstigen wird. Dies umfasst die Populationsdynamiken in aktuellen Verbreitungsgebieten, die Besiedlung neuer Gebiete, sowie die Kombination neuer Artengemeinschaften (Kap.1.2.1.3).

Eine weitere Erscheinung des Klimawandels ist die Zunahme von Witterungsextremen und Sturmereignissen auch in der temperaten Zone wie Deutschland (Seidl et al. 2011, Sommerfeld et al. 2018). Dies setzt Waldbäume unter physiologischen Stress und reduziert ihr Abwehrvermögen. Dabei lässt sich bei vielen Störungsereignissen eine großräumige zeitliche Synchronisierung beobachten (Senf und Seidl 2018). Das bedeutet, dass sich trotz hoher räumlicher Variabilität Massenvermehrungen von Insekten nahezu zeitgleich über große Räume ausbreiten mit weitreichenden Folgen für die Waldwirtschaft. Daher sind überregionale Strategien gefragt.

Neben den klimatischen Aspekten im globalen Wandel ist der stark gestiegene weltweite Handel eine weitere Ursache für die Ausbreitung von Schadorganismen. Dabei ist der Handel mit Pflanzen, pflanzlichen Produkten und Holz der Hauptvektor für die Verbreitung von Schadinsekten und Pathogenen (Liebhold et al. 2012). In Europa wurden seit 1980 in etwa 70% aller neuen Pathogene über die Einfuhr lebender Pflanzen eingeschleppt (Santini et al. 2013). Ein prominentes Beispiel ist hier das Eschentriebsterben. Hierbei handelt es sich um einen Blattpilz der in Asien die Blätter heimischer Eschenarten ohne Schaden besiedelt. Die Art wurde vermutlich mit importierten

Eschenpflanzen eingeschleppt und bringt die europäischen Populationen der Gemeinen Esche großflächig zum Absterben (Nielsen et al. 2017, McMullan et al. 2018).

Trotz der strengen Quarantänebestimmungen in Europa und anderen Regionen der Welt, kommt es immer wieder zur Einschleppung von Schadorganismen. Ein auffälliges Beispiel ist hier der Asiatische Laubholzbock der inzwischen in Europa und Nordamerika als etabliert gilt (Haack et al. 2010). Bei vielen unauffälligeren Arten wird dies häufig erst bemerkt, wenn sie im neuen Vorkommensgebiet in größerem Umfang Bäume zum Absterben bringen, wie beispielsweise der Asiatische Eschenprachtkäfer (Kovacs et al. 2010), der Schwammspinner in Nordamerika (Bogich et al. 2008), oder der Rote Riesenbastkäfer in China (Yang et al. 2014).

Immer wieder können sich aber auch Arten etablieren, die in ihrer Wirkung von Praktikern kaum von heimischen Arten zu unterscheiden sind. Jüngstes Beispiel ist der Nordische Borkenkäfer, dessen Einwanderung von Osten her befürchtet wurde und zur Prophylaxe Holzimportbeschränkungen diskutiert wurden. Tatsächlich scheint die Art aber schon weite Teile Deutschlands im Schatten des Buchdruckers besiedelt zu haben (Lemme et al. 2020).

Die Einschleppung von Organismen ist im Klimawandel auch von Relevanz, da das Bestreben besteht, immer mehr nichtheimische Arten in den Wäldern als Ersatz für eine Baumart wie die Fichte zu verwenden. Hierbei muss mit einer zusätzlichen Einschleppung von Pathogenen gerechnet werden (Liebhold et al. 2012). Dies gilt insbesondere auch für die Einfuhr von Saatgut (Francic et al. 2019).

Die Kombination aus Klimawandel und globalisiertem Handel wird von vielen Experten als besonders kritisch gesehen, da weder vorhersehbar ist, was verschleppt wird, noch wie sich Organismen in Neukombination mit anderen Arten und unter anderen Klimabedingungen verhalten (Anderson et al. 2004, Pautasso et al. 2010). Gerade die Entstehung neuer Artengemeinschaften, insbesondere die Interaktionen von Insekten und Pilzen, dürften häufig eine wichtige Rolle spielen, sind aber kaum bekannt und schwierig vorherzusagen (Hofstetter et al. 2007, Biedermann et al. 2019).

Ein zusätzlicher Aspekt ist auch, dass mit Zunahme der Anbaufläche von bisher nur in geringer Dichte vorkommenden Baumarten wie zum Beispiel der Douglasie sich auch die Zahl darauf auftretender Organismen erhöhen wird. So finden sich auf der Douglasie in Deutschland bereits jetzt die Zahl der Borkenkäferarten, die man entsprechend der Anbaufläche erwarten muss (Bussler et al. 2011). Generell gilt, dass mit einer Vergrößerung der Anbaufläche bei allen Baumarten

auch mehr besiedelnde Arten und damit Schadorganismen zu erwarten sind (Brändle und Brandl 2001).

### Monitoring und Prognose

Umso wichtiger ist ein gut koordiniertes Waldschutz-Monitoring über ganz Deutschland hinweg, bzw. noch besser auf europäischer Ebene. Dabei genügt es nicht, das Monitoring auf heimische Schadorganismen oder in ihren Heimatländern gefürchtete Schadorganismen zu beschränken. Für breitere Ansätze stehen inzwischen aber auch deutlich bessere Methoden, wie der Einsatz vielfältiger Pheromone oder die Identifizierung mit Hilfe von Sequenziermethoden bei Pilzen und Insekten zur Verfügung (Gitau et al. 2013, Grosdidier et al. 2018, Tedersoo et al. 2019, Hardulak et al. 2020, Milian-Garcia et al. 2021). Wichtig ist dabei ein länderübergreifendes und standardisiertes Vorgehen, das von der Freiland erfassung, über die Art diagnose, Kommunikation zwischen den Verantwortlichen bis hin zur Entwicklung von Gegenmaßnahmen reicht.

Auch die Prognosen sind auf Grundlage der Monitoringdaten zu verbessern. Aktuelle Prognoseverfahren weisen Unsicherheiten auf. Dies dürfte in erster Linie an der komplexen Dynamik potenzieller Schadorganismen liegen. Aktuell können wir trotz 200 Jahren Borkenkäferforschung bis heute beispielsweise nicht erklären, wann und warum Buchdruckerpopulationen zusammenbrechen (Biedermann et al. 2019). Beim Schwammspinner, als wichtigste Art in Eichenwäldern, sind Prognosen zum Fraß anhand der Eigelege bei hohen Dichten ebenfalls unsicher. Um hier zielgerichteter vorgehen zu können, muss das Prozessverständnis der wichtigsten Arten verbessert werden.

### Planung und Management

Ein vor kurzem veröffentlichter Bericht internationaler Experten geht der Frage nach, wie mit Borkenkäferdynamiken in Europa gerade im globalen Wandel umgegangen werden sollte (Hlásny et al. 2019). Die Voraussetzung für ein effizientes Management ist nach Hlásny et al. (2019), dass zunächst Schadorganismen wie Borkenkäfer als integraler Bestandteil von Waldökosystemen verstanden und akzeptiert werden.

Daneben hängt die Frage, ob ihr Wirken als Schaden oder als Nutzen betrachtet wird, stark von den lokalen Managementzielen ab. Erst die klare Definition von Zielen und deren Akzeptanz zwischen den unterschiedlichen Stakeholdern kann soziale Konflikte reduzieren und ermöglicht wirkungsvolles Management. Grundvoraussetzung ist eine entsprechende Ausbildung und eine verbesserte Kommunikation auf allen Verwaltungsebenen. Im Klimawandel ist es

notwendig, eine gute Balance zu finden zwischen Risikominimierung, dem bisherigen Schwerpunkt des Borkenkäfermanagements, und Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz von Wäldern (siehe Kap. 3.1.1.1).

Sektor-übergreifendes Krisenmanagement zum Beispiel von Forstwirtschaft, Naturschutz, Finanzen, Logistik und öffentlicher Sicherheit sind notwendig um negative Effekte für Waldbesitzer und Öffentlichkeit abzumildern. Dabei sind ad-hoc Lösungen meist nicht geeignet. Vielmehr gilt es lokale Zusammenschlüsse verschiedener Stakeholder zu schaffen und die ökologischen und sozialen Dimensionen von Massenvermehrungen besser zu verstehen. Gefragt ist ein holistisches, Landschafts- und Evidenz-basiertes Management, das Monitoring, Sanitärhiebs, Waldbau und Nichteingreifen gleichermaßen integriert. Dies ist von besonderer Bedeutung bei Arten die auf großer Landschaftsebene interagieren. So sind beispielsweise räumlich gut vernetzte Buchdruckerpopulationen besser in der Lage Bäume zu befallen als isolierte Vorkommen (Seidl et al. 2016). Dies bedarf in Landschaften mit vielfältigen Besitzstrukturen ein koordiniertes Vorgehen.

Für bekannte Schadorganismen mit wiederkehrenden Massenvermehrungen empfiehlt es sich Musterverfahren in Jahren der Latenz zu erstellen. In diesen Verfahren sollte klar geregelt werden auf welcher Basis, zum Beispiel unter Angaben von Schwellenwerten, Entscheidungen getroffen werden und wer die Genehmigungen ausstellt. Prioritäre Flächen für Maßnahmen gegen Schadorganismen wie beispielsweise Saatgutbestände oder Erholungswälder sowie Ausschlussflächen wie streng geschützte Wälder oder Wälder mit Vorkommen bedrohter Arten sind zu definieren. Auf dieser Grundlage in Kombination mit aktuellen Monitorings-Daten können dann kurzfristig Flächenkulissen für Maßnahmen erstellt werden.

#### **Evidenz der Maßnahmen und Strategien**

Da die Wirksamkeit, sowie die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen vieler Praxisstrategien bis heute unklar sind, sollten alle wesentlichen Waldschutzstrategien auf überregionaler Ebene von den zuständigen forstlichen Versuchsanstalten der Länder und des Bundes wissenschaftlich begleitet werden, um eine entsprechende, öffentlich zugängliche Evidenzbasis zu erstellen. Hier muss das Fehlen an wissenschaftlich belastbaren entsprechend replizierten Studien bemängelt werden (Hlásny et al. 2019, Leroy et al. 2021). Im „Katastrophenfall“ ist die Bereitschaft der Praxis auf Designanforderungen der Wissenschaft einzugehen in der Regel gering. Daher muss dies vorab geplant werden und insbesondere der staatliche Waldbesitz in die Pflicht genommen werden.

In diesem Zusammenhang ist die Neugründung eines Instituts für Waldschutz des Julius-Kühn-Instituts ab 2022 zu begrüßen (Hahn 2021). Mit der Ausrichtung auf Erarbeitung von Strategien und Konzepten für den Waldschutz unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels, die Forschung zu Biologie, Vermeidung und integrierter Bekämpfung von Schadorganismen und Krankheiten im Wald sowie die Stärkung der funktionalen Biodiversität und der natürlichen Regulations- und Abwehrmechanismen des Waldes gegen Krankheiten und Schadorganismen, könnte hier genau die Einrichtung entstehen, die aktuelle Lücken im Waldschutz in Deutschland schließen kann. Wichtig wäre dabei eine konsequente Umsetzung interdisziplinärer und überregionaler Forschungsgruppen, um verschiedenen Methoden und Skalenebenen erfolgreich in Zusammenarbeit mit den Forstlichen Versuchsanstalten zu vereinen.

#### **Möglichkeiten und Anforderungen an den Pflanzenschutz**

Jährlich werden in Wäldern nur auf 0,1% der Waldfläche Pflanzenschutzmittel eingesetzt. Dies zeigt die z. B. im Vergleich zur Landwirtschaft geringe Rolle von Pflanzenschutzmitteln im Wald. Zur Sicherung vielfältiger Ökosystemleistungen, insbesondere der Produktions- und Erholungsfunktion, erscheint bei einigen phytophagen Insektenarten der Einsatz biologischer oder chemischer Pflanzenschutzmittel als einzige akut wirksame Methode (BÖR 2016). Er konzentriert sich im Wesentlichen auf Eichen-, Kiefern- und Fichtenbestände. Die Zielorganismen die hier in erster Linie reduziert werden sollen, sind blattfressende Insektenraupen von Schmetterlingen und Blattwespen. Bei Borkenkäfer- oder anderen Käferarten haben sich Pflanzenschutzmittel in der Regel als nicht effektiv oder ökonomisch vertretbar erwiesen.

Seit Jahren verschärft sich zudem das Problem, dass den Forstbetrieben nur noch wenige wirksame, zugelassene Pflanzenschutzmittel zur Verfügung stehen, weil deren Entwicklung und Zulassung gestiegenen Anforderungen genügen muss, sehr kostenintensiv ist und die geringen Einsatzmengen für die Firmen oft nicht wirtschaftlich sind. Nach den Zielen des Nationalen Aktionsplans zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (NAP) sollten in 80% aller relevanten Anwendungsgebiete bis zum Jahr 2023 mindestens drei Wirkstoffgruppen zur Verfügung stehen (BMELV 2013). Im Forstbereich ist dies nur für 20% der relevanten Anwendungsgebiete der Fall (Wick et al. 2018), so dass ein integrierter Pflanzenschutz und ein notwendiges Resistenzmanagement kaum noch möglich sind. Gleichzeitig werden die Auflagen und Anwendungsbestimmungen für die wenigen im

Forstbereich verfügbaren Pflanzenschutzmittel von den Genehmigungsbehörden immer restriktiver, da die Auswirkungen auf geschützte Arten und Lebensräume häufig unklar sind. Ursache dafür ist das Fehlen wissenschaftlich belastbarer Untersuchungen mit ausreichend Replikaten und Kontrollflächen zu Wirksamkeit auf Ziel- und Nichtzielorganismen.

Vor diesem Hintergrund ist es unbedingt notwendig, dass die politischen Voraussetzungen für die Bereitstellung, Neu- bzw. Weiterentwicklung, Zulassung und den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln für die Anwendung im Wald geschaffen und durch die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten unterstützt werden und dass bei der Genehmigung ihrer Zulassung und ihres Einsatzes gleichermaßen Aspekte der Ökonomie, der Umweltverträglichkeit und der Walderhaltung angemessen berücksichtigt werden.

### Wirbeltiere im Waldschutz

Der Klimawandel wirkt sich auch auf die Populationen von Wirbeltieren aus. Insbesondere für Rehe und Wildschweine ist bekannt, dass europaweit die Populationsdichten mit steigenden Temperaturen und sinkender Schneehöhe weiter zunehmen (Melis et al. 2006, Melis et al. 2009, Hothorn et al. 2015). Damit wird selektiver Fraßdruck auf Jungpflanzen je nach Baumart weiter verstärkt (Gill und Morgan 2010). Hohe Wildschweindichten können sich negativ auf die Dichte der Naturverjüngung schwerfrüchtiger Baumarten wie Rotbuche oder Eichen auswirken (Boulanger et al. 2018). In diesem Kontext wird auch aktuell kontrovers diskutiert, inwieweit intensivere Bejagung und Änderungen im Jagdgesetz eine Verbesserung herbeiführen könnten. Dabei ist derzeit keine Einigung in Sicht.

Zwei Ansätze könnten aber bei der Umsetzung erfolgreich sein. Für Waldbesitzer, die einen Waldumbau im Klimawandel anstreben und das Jagdrecht selbst ausüben, sollten im Jagdgesetz alle technischen und zeitlichen Einschränkungen aufgehoben werden, die eine tierschutzgerechte und effektive Reduktion von Huftierpopulationen ermöglichen. Wie dies gehen könnte, wurde aktuell im Hinblick auf Wildschweine zur Eindämmung der Afrikanischen Schweinepest gezeigt. Im Gegenzug sollte aber auch akzeptiert werden, dass manche Waldbesitzer höhere Huftierbestände anstreben. Eine differenzierte Betrachtung könnte hier zu lokal deutlich besseren Ergebnissen führen als ergebnislose Diskussionen. Auch unter natürlichen Bedingungen können Huftierbestände räumlich deutlich variieren, beispielsweise auf Grund standörtlicher Variation oder unterschiedlicher Dichten der Prädatoren (Callan et al. 2013).

Schwieriger erscheint die Situation im kleinteiligen

Privatwald Deutschlands, wo das Jagdausübungsrecht nicht bei den einzelnen Waldbesitzern, sondern der Jagdgenossenschaft liegt, welche die Jagdausübung in der Regel durch Jagdpachtvertrag an private Jäger vergibt. Hier bestehen häufig erhebliche soziale und faktische Hindernisse, um die waldbaulichen Ziele der einzelnen Waldbesitzer zu realisieren. Zwar haftet die Jagdgenossenschaft grundsätzlich gegenüber den Mitgliedern der Jagdgenossenschaft für die Wildschäden nach § 29 BJagdG, wobei die Wildschadensersatzpflicht meist vertraglich auf den Jagdpächter übertragen wird. Im Wald betrifft dies insbesondere die durch Schalenwild verursachten Verbiss-, Fege- und Schälschäden, wobei nach §32 BJagdG Schäden an „Forstkulturen, die durch Einbringen anderer als der im Jagdbezirk vorkommenden Hauptholzarten einer erhöhten Gefährdung ausgesetzt sind“ von der Schadensersatzpflicht ausgenommen sind. Da die Erhebung der Wildschäden im Wald sehr aufwendig ist und der Wildschadensausgleich in der Landwirtschaft meist Vorrang hat, unterbleibt oft der Wildschadensersatz im Wald.

Insbesondere wenn im Rahmen des klimawandelbedingten Waldumbaus andere als die bisher vorhandenen Hauptbaumarten verjüngt werden sollen, erscheint lokal oft nur eine Lösung als einfach und schnell umsetzbar, der Schutz von Flächen durch Kulturzäune (Pellerin et al. 2010, Boulanger et al. 2018, Redick und Jacobs 2020). Im Gegensatz zu Einzelchutzmaßnahmen können dabei die vielfältigen Naturverjüngungspflanzen gemeinsam mit künstlich eingebrachten Pflanzen erfolgreich geschützt werden. Ein generelles Verbot von Wildschutzzäunen ist als Ziel zwar wünschenswert, erscheint aber angesichts des dringend notwendigen und prioritären Waldumbaus vielerorts wenig realistisch. Voraussetzung für lokale Einzelentscheidungen zum Verjüngungsschutz muss ein eigentumsübergreifendes, regelmäßiges und objektives Verjüngungsmonitoring sein.

#### 3.1.1.3 Betriebliches Risikomanagement

Jede Tätigkeit, die darauf abzielt, wirtschaftliche Chancen wahrzunehmen, muss gleichzeitig auch Unwägbarkeiten in Kauf nehmen. Unternehmerisches Handeln ohne Risiko gibt es nicht. Bezeichnenderweise bedeutet das lateinische Wort „risicare“ in Deutsch „wagen“. Risiken sind damit stete Begleiter jeder wirtschaftlichen Tätigkeit, auch der Forstwirtschaft. Roeder (1991) führt im forstlichen Kontext systematisch in das Risikomanagement ein. Das forstbetriebliche Risikomanagement zielt auf einen planvollen Umgang mit den unternehmerischen Risiken ab (Holthausen et al. 2004). Es soll vor Gefahren warnen und helfen, die richtigen Gegenmaßnahmen zu ergreifen (Möhring

2009). Dazu unterscheidet man üblicherweise folgende zwei Tätigkeitsfelder, Risikoanalyse und Risikohandhabung. Eine neue Dimension erhält das Risikomanagement durch die klimawandelbedingte Zunahme von Risiken im Wald.

#### Risikoidentifikation und Bewertung (Risikoanalyse)

In der Praxis hat es sich als sinnvoll erwiesen, bei der Risikoidentifikation und Bewertung analytisch vorzugehen, das heißt das unternehmerische Gesamtrisiko wird in die verschiedenen Risikofaktoren aufgeteilt und deren erwartete Schadenshöhen und

Eintrittswahrscheinlichkeiten werden abgeschätzt. Das erwartete Schadensausmaß, also die wirtschaftliche Betroffenheit bzw. der mögliche Vermögensverlust, und die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmen gemeinsam über die wirtschaftliche Bedeutung des Risikos. Das Produkt aus beiden Größen wird üblicherweise als Schadenserwartungswert oder als betriebswirtschaftliches Risiko bezeichnet. Es ist üblich, die Ergebnisse der Risikoanalyse in einer sogenannten „Risiko-Matrix“ darzustellen (Roeder 1991, Holthausen et al. 2004, Mußhoff und Hirschauer 2016), die erwartete Schadenshöhen den erwarteten Eintrittswahrscheinlichkeiten gegenüberstellt (siehe Abb.28).

Schadenshöhe	sehr hoch / katastrophal					
	hoch/kritisch	Risikoübertragung			Risikomeidung	
	mittel			Risikominderung		
	gering					
	sehr gering / unwesentlich	Risikoübernahme			Risikobegrenzung	
		unwahrscheinlich	fernliegend / selten	gelegentlich	wahrscheinlich	häufig
		Eintrittswahrscheinlichkeit/Schadenshäufigkeit				

**Abb. 28:** Ergebnisse von Risikoanalysen können in einer Risiko-Matrix dargestellt werden. Mit zunehmender Schadenshöhe und hoher Schadenshäufigkeit dominiert die Risikomeidung, wogegen geringe Schadenshöhen in Verbindung mit selten auftretenden Schäden regelmäßig akzeptiert werden. Bei selten auftretenden, aber kritischen Schadenshöhen ist die Risikoübertragung, z. B. auf Versicherungen, eine verbreitete Strategie, bei wahrscheinlichen/häufigen Schäden Risikominderung und Risikobegrenzung (Quelle: Möhring 2009).

#### Risikosteuerung oder -handhabung

Das betriebliche Risikomanagement zielt regelmäßig auf eine Minderung, nicht aber vollständige Beseitigung der unternehmerischen Gesamtrisiken ab und die verbleibenden Risiken sollen tolerierbar sein. Das kann vorrangig sowohl durch die Minderung der Eintrittswahrscheinlichkeiten, als auch die Minderung des Schadensausmaßes geschehen. In diesem Zusammenhang kann man verschiedene Grundsatz-Strategien der Risikosteuerung oder Risikohandhabung unterscheiden (Roeder 1991, Holthausen et al. 2004). Sie sind in Abbildung 28 bestimmten Risikokonstellationen zugeordnet. Sie seien hier anhand forstspezifischer Beispiele kurz erläutert:

- Risikoübernahme: Seltene Ereignisse mit geringer Schadenshöhe wie beispielsweise Hagelschlag in Laubholzkulturen sind regelmäßig durch den Forstbetrieb zu ertragen.
- Risikoübertragung: Gegen Ereignisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aber großer erwarteter Schadenshöhe sollte man sich gegebenenfalls versichern, beispielsweise durch Abschluss eine „Waldbrandversicherung“, da durch Waldbrand der Forstbetrieb existentiell gefährdet werden kann (Sauter et al. 2016).
- Risikomeidung: Ereignisse mit großer Schadenshöhe und hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten sollten systematisch gemieden werden.

Beispielsweise sollte man die Fichte nicht auf staunassen oder sommertrockenen Standorten anbauen. Hohe Schäden sind nach Baumgarten et al. (2005) dort unausweichlich, da die Bestände vorzeitig ausfallen.

- **Risikominderung / Risikobegrenzung:** Regelmäßig auftretende betrieblich relevante Risiken wie Schäden an verschiedenen Baumarten, Marktrisiken etc. lassen sich durch Diversifikation mindern, beispielsweise durch die Mischung von verschiedenen Baumarten (Paul et al. 2019) oder durch vorsorgende waldbauliche und Waldschutzmaßnahmen. So kann das altersabhängige Sturmwurfrisiko durch Durchforstungen oder eine Verkürzung der Produktionszeiten bis zum Erreichen der Zielstärke reduziert werden (Müller et al. 2019, Halbritter et al. 2020), oder die Befallsdichte und Parasitierung von bedeutsamen Schadorganismen an Kiefern durch Winterboden-suchen, der sogenannten „Puppensuche“, frühzeitig erkannt werden (Ziesche 2015).

Über allen Maßnahmen zur Risikosteuerung schwebt allerdings das Postulat ökonomischer Rationalität, das heißt die Wahl einer bestimmten Maßnahme wird einerseits von der Bedeutung des einzelnen Risikos für den Erfolg beziehungsweise die Existenz des Unternehmens abhängen und andererseits vom Kosten-Nutzen-Verhältnis der gewählten Maßnahme (Thommen und Achleitner 2009).

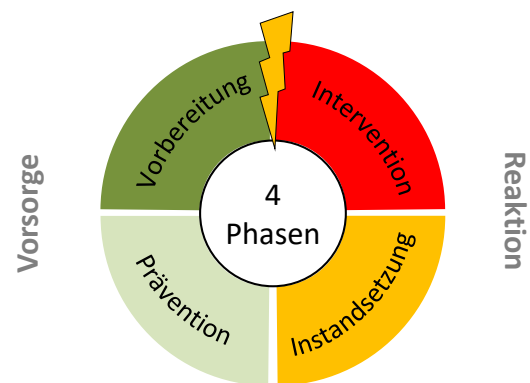
### Neuer Risikofaktor Klimawandel mit erhöhtem Störungsrisiko

Aufgrund der Unsicherheit von Klimaprojektionen und den damit verbundenen potenziellen Auswirkungen auf Wachstum, Produktivität und Stabilität unterschiedlicher Baumarten sind nach derzeitigem Wissensstand die Förderung von Baumartenmischungen und die Kombination unterschiedlicher Bestandestypen auf Forstbetriebsebene zentrale Komponenten betrieblichen Risikomanagements (Lindner et al. 2014, Paul et al. 2019, Knoke et al. 2020). Die aktuelle Borkenkäfer-Problematik mit großflächigen Schäden in Fichten-Reinbeständen unterstreicht die Vulnerabilität von einseitig ausgerichteten Forstbetrieben (Kölling et al. 2009). Strukturvielfalt im Betrieb erhöht generell die Resistenz und Resilienz gegenüber Störungen und vermag negative Auswirkungen der Klimaänderung abzuf puffern, solange diese baumartenspezifisch unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Die Kombination unterschiedlicher Baumarten in Mischung sowie von Baumartenmischungen auf Landschaftsebene im Betrieb fungiert somit als

Risikominderung oder -begrenzung (Dobor et al. 2020, Honkaniemi et al. 2020).

Die Herstellung und Erhaltung von Baumartenmischungen erfordert jedoch sowohl in der Phase der Bestandesbegründung, wenn nicht auf geeignete, vielfältig gemischte Naturverjüngung zurückgegriffen werden kann, als auch in der nachfolgenden Phase der Bestandespflege regelmäßig einen erhöhten Einsatz im waldbaulichen Management (siehe Kap. 3.1.1.1). Aber auch die technischen Verfahren der Pflege- und Holzerntemaßnahmen in Mischbeständen und die Vermarktung von Holzsortimenten aus Mischbeständen wie Sortimente verschiedener Baumarten, Qualitäten und Dimensionen, erfordern vermehrte Anstrengungen sowohl bei der Planung als auch im Betriebsvollzug (Puettmann et al. 2015).

Inspiziert durch das Sendai-Rahmenwerk der Vereinten Nationen für Katastrophenvorsorge (United Nations 2015) richtet sich im betrieblichen Risikomanagement der Fokus vermehrt auf die Prävention von Störungen bzw. Minderung von Störungseffekten, eine verbesserte Vorbereitung für die Bewältigung künftiger Störungen sowie die Orientierung auf verbesserte Resilienz der Wälder in der Störungs-Intervention und der Instandsetzungsphase nach Störungen (siehe Abb.29).



**Abb. 29:** Der 4-phasige Krisen-Management-Zyklus (Friederich und Westhauser 2019, modifiziert) kann auf das Störungsmanagement im Wald bezogen werden. In der Vergangenheit lag der Fokus überwiegend auf der Reaktion auf Störungen und weniger auf der Vorsorge. Die durch den Klimawandel bedingte Zunahme von Störungen erfordert vermehrte Anstrengungen in Prävention und Vorbereitung um für künftige Störungen besser gewappnet zu sein.

### Prävention

Zentrale Bedeutung zur Risikominderung kommt dem Bereich des Waldschutzes zu, da sich im Klimawandel sowohl die biotischen Risiken durch Insekten, Pilze

etc., als auch die abiotischen Risiken durch Sturm, Sommertrocknis etc., in einer sich verstärkenden Kombinationswirkung erhöhen werden (siehe Kap. 3.1.1.1 und 3.1.1.2). Präventionsmaßnahmen können beispielsweise darauf abzielen, Bestände durch geeignete waldbauliche Behandlung stabiler gegenüber Schneebruch und Sturmschäden zu machen. Die Wahl standortgerechter und für die zu erwartenden Klimaverhältnisse angepassten Baumarten und die Überführung von Reinbeständen in Mischbestände sind weitere Maßnahmen um das künftige Störungsrisiko zu begrenzen (siehe Kap. 3.1.1.1).

#### Vorbereitung

Um die Auswirkungen von Störungen zu begrenzen, kann vorausschauende Vorbereitung dazu beitragen, dass im Störfall besser mit diesen umgegangen werden kann. Beispielsweise ermöglicht eine automatisierte Waldbrandüberwachung eine schnelle Aktivierung und zielgenaue Leitung der Einsatzkräfte zur Brandbekämpfung (siehe Kap. 3.1.1.2). Die vorsorgliche Entwicklung und Umsetzung von – auch betriebsübergreifenden – Lagerungskonzepten für weiterhin zu erwartendes, unplanmäßig und in großen Mengen anfallendes Kalamitätsholz gewinnt an Bedeutung. So kann die Ausweisung und Vorbereitung von möglichen Nasslagerplätzen zur raschen Einlagerung und Beregnung von Kalamitätsholz beitragen und negative ökonomische Effekte von großflächigen Störungen abmildern.

#### Intervention und Instandsetzung mit Fokus auf Erhöhung der Resilienz

Frühe und effektive Intervention kann häufig Folgeschäden begrenzen, andererseits werden auch Weichen gestellt, wie resilient sich die Folgebestände entwickeln. Beispielsweise kann die Übernahme von Altholzresten und überlebenden Einzelbäumen für Strukturvielfalt sorgen und in der Landschaft verteilte Pioniergehölze können im Falle künftiger Störungen eine schnellere Wiederbewaldung ermöglichen (Hlasny et al. 2021).

Auch durch die räumliche Betriebsstruktur mit unterschiedlichen Bestandestypen und Altersklassen kann das Störungsrisiko, beispielsweise durch Sturmschäden, gemindert werden. Benachbarte Bestände sollten zur Minimierung von Windschäden entlang der Hauptwindrichtung von West/Südwest nach Ost/Nordost keine abrupten Höhenunterschiede aufweisen (Gardiner 2021). Die Schlagabfolge im Altersklassenwald ist traditionell deshalb von Ost nach West fortschreitend geplant worden. Durch die zunehmende Entwicklung von ungleichaltnen Bestandesstrukturen

mit Einzel- und Gruppenhieben auf großer Fläche verliert dieser Aspekt tendenziell an Bedeutung. Andererseits haben gehäuft auftretende Sturmschäden und die aktuellen Borkenkäferkalamitäten vielerorts Lücken in die Waldbestände gerissen, die kurz- und mittelfristig die Angriffsflächen für neue Sturmschäden drastisch erhöhen.

Aufgrund der großen Zahl von Akteuren die im Störfall in unterschiedlichen Aspekten des Risikomanagements involviert werden müssen, ist eine frühzeitige und umfassende Kommunikation von großer Bedeutung, auch mit der Öffentlichkeit, um Verständnis und Unterstützung für geplante Interventions- und Präventionsmaßnahmen zu bekommen. Ein Beispiel dafür ist, wenn der Zutritt zu Waldgebieten eingeschränkt werden muss aufgrund zu hoher Gefahr durch ungesicherte geschädigte Bäume entlang von Wegen.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass der neue Risikofaktor Klimawandel nicht zuletzt aufgrund unterschiedlicher Risikowahrnehmung und Einstellung gegenüber dem Risiko, also der individuellen Risikopräferenz (Dominguez und Shannon 2011, Eriksson et al. 2019) und individueller betrieblicher Ziele zu sehr unterschiedlichen Konzepten der alternativen Betriebsplanung mit unterschiedlichem Risikoverhalten führen werden (Kolström et al. 2011, Allgaier Leuch et al. 2017, Jandl et al. 2019):

- 1.) Risikominimierung durch Präferenz von Baumarten und Bestandestypen mit hoher Resilienz, bei verringerter Produktivität
- 2.) Wahl von produktiven Beständen mit Inkaufnahmen eines erhöhten Risikos inklusive Anbau von fremdländischen Baumarten
- 3.) Kombination von riskanten high return – high risk Strategien und resilienten low return – low risk Strategien.
- 4.) Rückzug aus dem operativen waldbaulichen Management.

Eine solche erwartete Vielfalt der forstbetrieblichen Konzepte im Umgang mit dem Klimawandel wird hier allerdings nicht kritisch gesehen, sondern vielmehr als Ausdruck eines dynamischen, räumlich und zeitlich differenzierten Adaptationsprozesses und Wettbewerbs um die besseren Konzepte interpretiert, mit positiver Wirkung durch Diversifikation. Das gilt aber nur dann, wenn die Erbringung der für die Gesellschaft wichtigen Ökosystemleistungen dadurch keinen Schaden nimmt.

Wichtig erscheint zudem, dass Erfahrungen aus der



Katastrophenbewältigung besser dokumentiert werden sollten. Bislang geht viel Erfahrungswissen nach jeder bewältigten Katastrophe verloren. Gute Vorsätze geraten schnell in Vergessenheit und münden nicht in konsequentes Handeln. Es sollte daher zum Standard werden, Erfolge und Defizite aus dem Risikomanagement in Handlungsleitfäden zu überführen um die künftige Störungsbewältigung effizienter zu machen.

### 3.1.1.4 Bodenschutz und Wasserhaushalt

Boden und Wasser gehören zu den grundlegenden Voraussetzungen für das Wachstum und den Bestand der Wälder. Gleichzeitig sind diese Kompartimente inhärenter Bestandteil von Waldökosystemen und werden von der Vegetation und spezielle von der Baumartenzusammensetzung und der Waldstruktur maßgeblich beeinflusst. Der Klimawandel wirkt sich direkt, aber auch indirekt auf die Eigenschaften und Entwicklung von Böden und Gewässern über die Einflussnahme auf die Vegetation aus.

Steigende Temperaturen und veränderte Niederschlagsmuster beeinflussen das Bodenleben negativ und beeinträchtigen die Ökosystemleistung, Boden- und Gewässerschutz sowie die regulierende Wirkung der Wälder auf den Gebietswasserhaushalt. Ebenso beeinflusst die Art der Bewirtschaftung die Waldböden sowie den Wasserhaushalt der Wälder. Aus Gründen des Boden- und Gewässerschutzes, aber auch um Waldökosysteme selbst nachhaltig zu schützen, ist daher bei der Anpassung von Wäldern und der Waldbewirtschaftung an den Klimawandel der Schutz von Boden und Wasser von entscheidender Bedeutung.

Die Vegetation des Waldes ist durch die Regulation des Waldinnenklimas in der Lage, negative Auswirkungen des Klimawandels auf essentielle Prozesse im Boden zu mildern. Entscheidend ist dabei, eine geschlossene Vegetationsdecke kontinuierlich aufrecht zu erhalten. Vor dem Hintergrund der starken Beeinflussung von Vegetation, Boden und standörtlichem Klima durch den Menschen betont der Arbeitskreis Standortkartierung (2016), dass angesichts von Klimawandel, Stoffeinträgen und Nutzungsintensivierung der Mensch als Standortfaktor für die forstliche Planung immer wichtiger wird, ebenso wie der immer notwendiger werdende Boden- und Gewässerschutz.

Ziel dieser Anpassung muss es sein, die hohe Kohlenstoffspeicherung der Waldböden zu erhalten oder sogar zu erhöhen bei gleichzeitigem Erhalt funktionierender Nährstoff- und Wasserkreisläufe, sowie dem Erhalt der Lebensraumfunktion der Waldböden für Pflanzen und Bodentiere. Ebenso sollte die Entstehung und Entwicklung von Böden nicht beeinträchtigt werden.

Es bieten sich für die Forstbetriebe viele Möglich-

keiten zum Schutz von Waldböden und Wasserhaushalt in Wäldern, die hier stichpunktartig zusammengeführt werden:

- Bei der Baumartenwahl muss der langfristige Einfluss auf die Böden hinsichtlich Nährstoffverfügbarkeit, Porenvolumen und Humusgehalt entsprechend berücksichtigt werden. Um das Risiko negativer Auswirkungen von Baumarten mit unbekanntem Einfluss auf Böden und Wasser zu minimieren, sollte deren Anteil am Bestand entsprechend gering bleiben.
- Der Einfluss spezieller Ökosystemkompartimente für die Kohlenstoffspeicherung, die Grundwasserneubildung oder den Wasserrückhalt im Bestand sollte standortsbezogen bewertet und diese Bewertung bei der forstlichen Planung berücksichtigt werden. Zu solchen Kompartimenten gehören neben dem aufstockenden Bestand die Krautschicht, die Humusaufgabe, liegendes Totholz sowie Bestandeslücken. Bei einer großen Bedeutung dieser Kompartimente für Kohlenstoff- und Wasserspeicherung sowie Grundwasserneubildung sollten diese besonders geschützt werden.
- Der Einfluss von Entwässerungsmaßnahmen auf den Wasserhaushalt von Standorten, auf Wassereinzugsgebiete und die Einspeisung in Vorflutssysteme sollte stärker berücksichtigt werden.
- Nach Störungen wie Windwurf, Trockenschäden, Massenvermehrungen von Schadinsekten oder Feuer sollte umgehend für die Wiederherstellung einer geschlossenen Vegetationsdecke gesorgt werden. Bereits bei der Waldbehandlung von Flächen ohne Störung, wie beispielsweise Durchforstungen, sollte darauf geachtet werden, dass das Risiko für Boden und Wasser im Störfall minimiert wird.
- Bei Flächenräumung nach Störungsereignissen ist Bodenschutz von besonders großer Bedeutung. Soweit möglich sollte die Befahrung des Bodens auch in diesem Fall auf dem ausgewiesenen Rückegassensystem erfolgen.
- Bodenrisiken wie eine negative Nährstoffbilanz, Bodenverdichtung, Erosion oder Humuszehrung und negative Einflüsse auf den Wasserhaushalt wie Benetzungshemmung der Waldböden bei Austrocknung, Erhöhung des Oberflächenabflusses, Verminderung der Infiltrationskapazität und der Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers, sollten

bei der forstlichen Planung permanent berücksichtigt werden.

- Regelmäßige Durchforstung sorgt für eine Reduktion des Wasserverbrauchs bei gleichzeitiger Vermeidung von zu starken Auflichtungen, um eine Erhöhung der Transpiration und Störung des Waldinnenklimas zu vermeiden. Verjüngung und Voranbauten unter Schirm tragen gleichzeitig zur Reduktion der Gefahr von Benetzungshemmung und Wasserverlusten sowie zum Erhalt des Bodenzustandes auch bei möglichen Störungen bei.

#### 3.1.1.5 Anpassung von Holzernte und Waldarbeit

Das Arbeiten im Wald gehört in Deutschland zu den gefährlichsten beruflichen Tätigkeiten. Charakteristisch für die Waldarbeit sind ungünstige Arbeitsbedingungen im Freien, eine hohe körperliche Belastung mit der Folge, dass der Anteil an Berufserkrankungen sehr hoch ist. Außerdem besteht für die im Wald arbeitenden Menschen ein besonders hohes Unfallrisiko, bedingt durch die so genannten walddtypischen Gefahren, durch die Witterung sowie die Geräte und Maschinen, die zum Einsatz kommen. Nur im Bauwesen verunfallen heute noch mehr Beschäftigte als in der Forstwirtschaft (SVLFG 2020).

Zwar ist es durch eine stärkere Technisierung mittels Einsatz von Forstmaschinen in der Holzernte, die sich im Wesentlichen in Folge von Sturmereignissen durchgesetzt hat, in den zurückliegenden Jahrzehnten gelungen, die Unfallzahlen deutlich zu senken, dennoch bleibt die Waldarbeit bis heute eine sehr gefahren- und unfallträchtige Tätigkeit. Wegen der ungünstigen Arbeitsbedingungen und der insgesamt recht geringen Wertschöpfung im Bereich der Rohholzproduktion erfolgt aktuell in Deutschland ein nennenswerter Anteil der Arbeitserledigung durch ausländische insbesondere osteuropäische Arbeitskräfte, die aus ihrem Heimatland Nachweise über ihre berufliche Qualifikation vorweisen - in der Regel handelte es sich dabei um das Europäische Motorsägenzertifikat EFESC, das bis 2021 bereits von mehr als 11400 Waldarbeitenden erworben wurde (EFESC 2021). Die meisten Arbeiten im Wald vor allem im Bereich der Holzernte werden heute durch Forstunternehmen durchgeführt, die Anzahl an im Waldarbeitenden, die bei den Forstbetrieben beschäftigt sind, ist seit Jahrzehnten rückläufig (BMEL 2021).

Für die Darstellung der vielfältigen Folgen klimatischer Änderungen für die im Wald arbeitenden Menschen ist es zweckmäßig, zwischen a) den unmittelbar infolge des Klimawandels geänderten

Arbeitsbedingungen und b) den geänderten ökosystemaren Bedingungen zu differenzieren, die dann mittelbar zu einer Veränderung der Arbeitsbedingungen bei der Waldarbeit führen.

#### Waldarbeit unter geänderten klimatischen Bedingungen

Die im Wald arbeitenden Menschen üben ihre Tätigkeit fast immer unter freiem Himmel aus. Das heißt, sie sind bei allen Tätigkeiten – Bestandesbegründung, Bestandespflege, Holzernte, Wegebau, Arbeiten für Naturschutz oder Erholungsleistungen des Waldes etc. – jeden Tag der Witterung weitgehend ungeschützt ausgesetzt. Deshalb bedeutet die Zunahme von Witterungsextremen eine äußerst relevante Veränderung der Arbeitsbedingungen in der Waldarbeit. Es sind im Wesentlichen extreme Hitzeperioden sowie Starkniederschläge und Stürme, die die Arbeitsbedingungen erschweren und eine hohe Flexibilität erfordern, um die Arbeitsabläufe fortlaufend organisatorisch anzupassen. Bei den sommerlichen Hitzeperioden mit Mittagstemperaturen von weit über 30 °C sind die Arbeitenden gezwungen, ihre Tätigkeiten am frühen Vormittag bzw. späten Nachmittag zu verrichten.

Die immer häufiger auftretenden Starkregenereignisse haben zur Folge, dass die Arbeiten unterbrochen und erst nach Wasserabfluss und Abtrocknen des Oberbodens wiederaufgenommen werden können. Ebenso bei Sturmereignissen, durch die außerdem die Kronen der Bäume derart geschädigt werden, dass bei der Holzernte vermehrt Äste herabfallen, die eine tödliche Gefahr für die im Wald Arbeitenden darstellen.

Eine weitere Ausprägung des Klimawandels ist die Häufung von Sturmereignissen in Orkanstärke, wie sie seit einigen Jahrzehnten zu beobachten ist. Orkane haben in den betroffenen Regionen immer wieder zu einem hohen Anfall an Schadholz geführt. Diese vom Sturm geschädigten, oftmals flächig zerstörten Wälder aufzuarbeiten, setzt qualifizierte Personen und geeignete Maschinen voraus, denn das Arbeiten auf diesen Flächen ist extrem gefährlich (Danguy et al. 2002). In der Vergangenheit passierten bei der Aufarbeitung von rund 1 Mio Fm Schadholz im Durchschnitt ein tödlicher Arbeitsunfall (Gabriel 2018).

Die einzige Möglichkeit, diese Unfallhäufigkeit zu senken, besteht in einer vollmechanisierten Aufarbeitung des Schadholzes. Dabei sind die Maschinenführenden vor die Herausforderung gestellt, dass auch in diesen Sondersituationen die dauerhaft angelegten Befahrungslinien nicht verlassen werden dürfen. Diese Linien sind nach Sturmereignissen im Gelände kaum mehr zu erkennen, und es bedarf einer

GPS-Unterstützung, um die Befahrungslinien aufzufinden und einzuhalten. Hierzu gibt es bereits erste Praxiserfahrungen.

Aufgrund der Sturmereignisse aus den letzten Jahrzehnten mit den Orkanen Vivian und Wiebke, Lothar, Kyrill etc. liegen in vielen Regionen in den Forstbetrieben Erfahrungen zur Aufarbeitung von Sturmholz vor, die für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz systematisch dokumentiert wurden (Odenthal-Kahabka 2008). Dennoch können sich Forstbetriebe auf diese Ausnahmesituationen, die in Folge von Katastrophenereignissen in der Waldarbeit entstehen, nicht kontinuierlich vorbereiten. Es sind bei hohen, konzentriert anfallenden Hiebsmengen Lagerkapazitäten und eine umfassende Planung und Koordination der gesamten Logistikkette erforderlich, die zahlreiche Dienstleistungsunternehmen und Transporteure einbezieht, damit die Holzabfuhr aus dem Wald möglichst zügig und reibungslos erfolgen kann. Für die im Wald oder am Waldrand verbleibenden Holzpolter kann entweder eine Beregnung, ein mechanischer Schutz wie eine Verpackung in Folie (Odenthal-Kahabka 2005) oder im Einzelfall auch ein chemischer Polterschutz mit Spritzung erforderlich sein.

Die insgesamt ansteigenden Temperaturen stellen die Forstbetriebe vor weitere organisatorische Herausforderungen im Hinblick auf die bisher saisonal ausgerichtete Waldarbeit. Denn lange winterliche Frostperioden werden seltener. Dies waren aber die bevorzugten Zeiten für die Holzernte, da gefrorene Böden weniger verdichtungsanfällig sind. Bei ausbleibenden Frostperioden birgt der Einsatz von Forstmaschinen ein hohes Risiko von bleibenden Bodenschäden, und die Einsätze müssen immer wieder unterbrochen werden.

Eine Möglichkeit, dieses Risiko zu begrenzen, ist der verstärkte Einsatz von bodenungebundenen Holzernteverfahren. So zeigen Untersuchungen von Schweier et al. (2020), dass Seilkran-Holzernteverfahren auch in der Ebene zur Anwendung kommen können, ohne dass die Kosten deutlich steigen – vorausgesetzt es erfolgt eine Vollkostenrechnung. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Risikos von Bodenschäden durch Befahrung kann eine Verlagerung der Holzernte, die auch heute noch in Deutschland vor allem bei der Laubbaumernte üblicherweise in den Wintermonaten konzentriert erfolgt, in die immer häufigeren Trockenperioden in der Vegetationszeit mit sich bringen. Die im Sommer stark ausgetrockneten Böden weisen eine hohe technische Befahrbarkeit auf. Doch würde die Ernte von Laubbäumen im Sommer in Deutschland einen Paradigmenwechsel in der Bewirtschaftung der Wälder bedeuten und eine vorherige Abwägung anderer Belange wie Naturschutz, Tourismus etc. zwingend erforderlich machen.

### **Waldarbeit in durch Klimawandel veränderten Wäldern und beeinträchtigten Infrastrukturen**

Der klimabedingt erforderliche Wechsel in der Baumartenzusammensetzung hin zu Mischbeständen mit hohem Laubholzanteil macht eine Anpassung der eingesetzten Technik sowie der Holzernteverfahren erforderlich. So führt eine geänderte Baumartenzusammensetzung zu einer stärkeren Diversifizierung des Hiebsanfalls, also einer höheren Vielfalt an Holzarten und Sortimenten, was zur Folge hat, dass die Effizienz bei der Bestandespflege und Holzernte durch eine abnehmende Leistung und zunehmenden Kosten sinkt.

Die Wälder, die aufgrund von klimatischen Extremen bzw. Insektenkalamitäten geschädigt sind, stellen zum Beispiel durch absterbende oder vom Sturm geschädigte Kronen oder durch geschädigte Wurzelsysteme für die im Wald arbeitenden Menschen eine besondere Gefährdung dar. So hat sich in Eschenbeständen, die vom so genannten Eschentriebsterben betroffen waren, gezeigt, dass die bisherige okulare Erfassung der Gefährdungen nicht mehr zu verlässlichen Ergebnissen führt (Landesforst Mecklenburg-Vorpommern 2014).

Neben der Holzernte ist es vor allem die Bestandesbegründung, die unter dem Einfluss des Klimawandels anzupassen ist. Zum einen sind die Flächen, die bepflanzt werden müssen, wesentlich grösser als in den letzten Jahrzehnten, so dass nicht nur die Beschaffung des Pflanzmaterials ein begrenzender Faktor sein kann, sondern es fehlt auch häufig an Personal und Technik. Bisher wurden die Pflanzungen vielfach im beginnenden Frühjahr durchgeführt, doch könnte auch hier ein Umdenken aufgrund der klimatischen Veränderungen erforderlich werden, denn die Kulturen sind durch die Frühjahrstrocknis stark gefährdet. Stattdessen könnten Pflanzungen im Herbst vorgenommen werden, so dass die Anwuchsprozente aufgrund der Niederschläge im Herbst und Winter höher liegen könnten.

Darüber hinaus ist die Infrastruktur in den Wäldern wie Wege, Lagerplätze, Rückegassen den geänderten klimatischen Verhältnissen, hier einer Zunahme von Starkregenereignissen, anzupassen, um die Wiederherstellungskosten zu begrenzen und eine möglichst ganzjährige Nutzung sicherzustellen.

#### **3.1.2 Wechselbeziehungen und Anpassungshemmnisse**

Forstwirtschaft wird durch eine extreme lange Produktionsdauer geprägt, die unter mitteleuropäischen Verhältnissen zwischen 60 und 200 Jahren schwankt (Speidel 1984). Aus dieser Langfristigkeit ergeben sich

bei der Planung, Führung und Kontrolle von Forstbetrieben Besonderheiten und Herausforderungen, wie sie in keinem anderen Wirtschaftszweig vorliegen. Die extreme Langfristigkeit führt auch zu einer Entkoppelung zwischen waldbaulichen Maßnahmen wie beispielsweise der Bestandesbegründung und den aktuellen Markterfordernissen wie zum Beispiel an die Holzsortimente. Eventuelle Umstellungen der Produktion, die in anderen Wirtschaftszweigen im Laufe eines Jahres oder weniger Jahre vollzogen werden können, dauern in Forstbetrieben zwangsläufig Jahrzehnte.

Für die forstliche Produktion ist es auch typisch, dass sie, anders als beispielsweise in der Landwirtschaft, keine explizite Produktreife aufweist (Kroth 1968). Vielmehr sind Art, Zeitpunkt und Intensität der forstlichen Eingriffe sehr variabel gestaltbar, wodurch gleichzeitig über eine Vielzahl betrieblich relevanter Parameter bestimmt wird, wie die Dimension und die Menge der Holzprodukte, die Höhe und Struktur des Holzvorrates, den Holzzuwachs, die Intensität der Bestandesbegründung und -pflege, die Art und Stärke des Risikos, Arbeitsintensität, Kapitalbindung etc.

Gleichzeitig wird dadurch über das Ausmaß und die Zusammensetzung weiterer gesellschaftlich relevanter Ökosystemleistungen der Wälder entschieden, beispielsweise über Biodiversität, CO<sub>2</sub>-Bindung in Waldbeständen / Holzprodukten / Substitution, Wasserspende, Erholungseignung, gesellschaftliche Wertschöpfung und Arbeitsplätze. So verwundert es nicht, dass über die Art und Intensität der forstlichen Nutzungen in Deutschland kein gesellschaftlicher Konsens besteht, sondern dass hier sehr unterschiedliche, zum Teil konträre Vorstellungen existieren.

Wichtig ist auch, dass die von der Forstwirtschaft in Mitteleuropa in den letzten 300 Jahren entwickelten Nachhaltigkeitskonzepte und Instrumente zur Messung und Steuerung der forstlichen Nachhaltigkeit (Speidel 1984), bei denen in der Regel verschieden alte Waldbestände als Repräsentanten der zeitlichen Entwicklung angesehen werden, von der Annahme der Stationarität der Umweltbedingungen geprägt sind.

#### **Konflikte und Anpassungshemmnisse**

Ein wichtiges Anpassungshemmnis ist fehlendes Erfahrungswissen. Traditionelle Konzepte zum Schutz und zur Bewirtschaftung der Wälder sind tief verankert. Die praktische Veranschaulichung anhand von Waldbildern funktioniert nur noch begrenzt bei sich schnell ändernden klimatischen und standörtlichen Rahmenbedingungen. Leitbilder wie „Deutschland als Buchenland“ können nicht schnell ersetzt werden und es stellt sich die Frage, was kommt danach? Ein empirisch basiertes Management, das auf traditionellen

„evidenzbasierten“ Ansätzen beruht, kann sich daher nicht schnell genug entwickeln, um effektive zukünftige Bewirtschaftungsoptionen zu bieten.

Der Klimawandel und die damit im Zusammenhang stehenden fundamentalen Veränderungen und Unsicherheiten für die Produktivität und Stabilität von Wäldern stellen die „bewährten“ Konzepte „nachhaltiger forstlicher Betriebsführung“ grundsätzlich in Frage. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Forstbetriebe in Deutschland bereits durch die Extremwetterereignisse der Jahre 2018–2020 zum Teil sehr hohe Substanzverluste insbesondere durch Windwurf und Borkenkäferbefall in Fichtenbeständen erfahren haben (Möhring et al. 2021), die ihre Liquidität für die nächsten Jahrzehnte und damit deren ökonomische Basis zur Anpassung an den Klimawandel extrem schwächen.

Darüber hinaus sind die zur Erhöhung der Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit im Klimawandel empfohlenen waldbaulichen Konzepte in der Regel mit einer erhöhten waldbaulichen und betrieblichen Intensität verbunden beispielsweise durch Pflanzungen von örtlich bisher nicht vorkommenden Provenienzen/Baumarten/Mischungen, durch komplexe Pflegekonzepte, durch vermehrten Waldschutz etc. Vielfach fehlen für die favorisierten Baumarten noch Perspektiven für eine hochwertige stoffliche Holzverwendung. Insofern erfordern die empfohlenen Anpassungsmaßnahmen meist einen höheren Einsatz finanzieller Mittel, denen in Zukunft – im Vergleich zum Status Quo – insbesondere aufgrund weniger produktiver Waldbestockungen und erhöhter Risikokosten Mindererträge.

Nachhaltige Waldbewirtschaftung als Generationenvertrag ist nicht mehr selbstverständlich, wenn die ökonomische Basis der Forstbetriebe wegbricht. Die forstökonomischen Zwänge des Klimawandels werden die im kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald ohnehin schon bestehenden betrieblichen/organisatorischen Probleme noch verschärfen und damit in diesem Bereich die gesellschaftlich erwünschte Anpassung der Wälder an den Klimawandel erschweren.

Auch wenn nachhaltige Waldwirtschaft als die naturnächste Form der Landnutzung gilt und naturnahe Waldbewirtschaftungskonzepte in Deutschland sehr verbreitet sind, so besteht zwischen einer auf marktwirtschaftlichen Prinzipien aufbauenden, auch moderne Technik einsetzenden Waldbewirtschaftung und dem Naturschutz ein systemimmanentes Spannungsverhältnis, denn Schutz und Nutzung natürlicher Ressourcen konkurrieren miteinander.

## Synergien

Es gibt aber auch grundsätzliche Synergien in diesem Bereich. So dient beispielsweise die Förderung der Stabilität und Anpassbarkeit der Wälder an den Klimawandel nicht nur den Forstbetrieben, sondern insbesondere auch der Allgemeinheit, indem sie den Erhalt der Waldökosysteme sichert und auch die Bereitstellung gesellschaftlich wichtiger Ökosystemleistungen.

Mit Blick die Synergien im Klimawandel kommt dem Aspekt „climate mitigation“ besonders große Bedeutung zu, denn von wüchsigen, vitalen und nachhaltig genutzten Wäldern mit hohem CO<sub>2</sub>-Bindungspotential profitiert die Senkenleistung der Wälder, die Speicherleistung der Holzprodukte und die stoffliche und energetische Substitution. Insbesondere langlebige Holzprodukte in mehrstufigen Nutzungskaskaden (an deren Ende erst die energetische Holznutzung steht) sind hier besonders wirksam (siehe dazu detaillierte Ausführungen in Kap. 3.2). Mehrstufige Nutzungskaskaden sind darüber hinaus förderlich beispielsweise für die regionale Wertschöpfung, für Arbeitsplätze und die Umsetzung der gesellschaftlich erwünschten Kreislaufwirtschaft.

Auch im Bereich moderner forstlicher Technologien (wie beispielsweise hochmechanisierter Holzernstverfahren) können sich Synergien ergeben, z. B. indem sie die forstbetrieblichen Kosten senken, die Wirksamkeit der forstlichen Maßnahmen auf der Fläche erhöhen, die Arbeitssicherheit verbessern und dem verbreiteten Mangel an Arbeitskräften entgegenwirken; bei geeigneten Technologien – wie beispielsweise Reifendruckregelanlagen – können Technologien auch helfen, Ziele des Natur- und Bodenschutzes umzusetzen.

Gerade bei einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung, die die langfristigen Stoffkreisläufe in den Ökosystemen und den gesellschaftlichen Systemen in den Blick nimmt, und die auch mögliche globale Verlagerungseffekte (Dieter et al. 2020) mit in die Betrachtung einbezieht, werden die Synergien einer auf Klimaanpassung ausgerichteten nachhaltigen Waldbewirtschaftung und Holznutzung offenbar.

## 3.2 Holzverarbeitende Industrie und Bioökonomie

### 3.2.1 Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen

Der Rohstoff Holz wird in Deutschland stofflich für die Säge-, Holz-, Holzwerkstoff- und Zellstoffindustrie, chemischen Industrie sowie energetisch vorwiegend

zur Wärmeerzeugung verwendet (siehe Kap. 1.2.2.1). Aufgrund der vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten und des Verbots der Deponierung von organischen Reststoffen wird der Rohstoff Holz vollständig genutzt. Primäres Ziel in der Nutzungskaskade ist aber die langfristige, stoffliche Verwendung von Holz zum Beispiel zum Bauen und Wohnen und die damit einhergehende CO<sub>2</sub>-Speicherung, mit anschließendem Recycling von Holzrohstoffen in einer möglichst langen Nutzungskaskade vor einer finalen thermischen Nutzung zur Substitution fossiler Energieträger. Bei der Gewinnung von Schnittholz fallen weitere Stoffströme wie Schwarten, Spreißel und Sägemehl an, die direkt an die Holzwerkstoff- oder Papierindustrie weitergeleitet werden oder auch zur Herstellung von Pellets dienen.

Ein Ausbau der Bioökonomie wird zu einer wachsenden Holzverwendung führen und erfordert einen Ausbau der Rohstoffbasis Holz (BÖR 2016, Weber-Blaschke 2019). Es bestehen noch hohe Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Nachfragestruktur und der damit verbundenen Erwartungen an eine Ressourcenbereitstellung durch die Waldwirtschaft (Menge, Sortimente, Arten). Effizienzsteigerungen in der Ressourcennutzung sind nötig: sie können in den Verarbeitungsprozessen (bessere Sortierung, Einschnittoptimierung („Holzindustrie 4.0“), durch Innovationen in den Herstellungs- und Verwendungsverfahren, und ein besseres, mit digitalen Methoden gekoppeltes Stoffstrommanagement inkl. der Kaskadennutzung realisiert werden (Purkus et al. 2020). Dabei stellt die Sicherung der nachhaltigen Bereitstellung der forstlichen Rohstoffe unter den Auswirkungen der Folgen des Klimawandels eine große Herausforderung dar.

In der europäisch angelegten Studie ClimWood2030 wurden anhand fünf alternativer Szenarien die Auswirkungen unterschiedlicher Holznutzungspfade auf die Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Forst- und Holzkette in der EU untersucht (Rüter et al. 2016). Dies beinhaltete sowohl deren Einfluss auf die biogenen Kohlenstoffspeicher im Wald und in Holzprodukten als auch die durch stoffliche und energetische Substitution alternativer Rohstoffe hervorgerufenen Treibhausgasminderungspotenziale. Dabei war es insbesondere wichtig, die Zusammenhänge der verschiedenen und zum Teil gegenläufigen Effekte zu verstehen, die durch dezidierte politische Vorgaben entstehen können. Im Ergebnis konnte aufgezeigt werden, dass sich die Holznutzung positiv auf die Treibhausgasbilanz auswirkt. Die in den Szenarien getroffenen Annahmen, z. B. zum Zeithorizont, oder dem zukünftigen Energieverbrauch sind dabei von entscheidender Bedeutung für die berechneten Effekte.

Die unterschiedlichen Aspekte der Holzindustrie, neuer Rohstoffquellen, deren Verarbeitungstechnolo-

gien sowie stofflichen Nutzung und wie diese sich verändern, werden in den nachfolgenden Kapiteln näher beleuchtet.

#### 3.2.1.1 Einfuhr von Holz und Produkten auf Basis Holz

Deutschland ist intensiv in den internationalen Handel mit Holz und Produkten auf Basis Holz eingebunden. Seit mehr als 15 Jahren schon gehört Deutschland zu den weltweit größten Exporteuren von Holz und Produkten auf Basis Holz, aktuell zusammen mit den USA und China, vormals mit den USA und Kanada. Die Außenhandelsbilanz Deutschlands ist dabei relativ ausgeglichen: Im Jahr 2018 standen in Mengen einer Ausfuhr von 138,8 Mio. m<sup>3</sup> Rohholzäquivalente (r) eine Einfuhr von 140,2 Mio. m<sup>3</sup> (r) gegenüber, Deutschland war also mit 1% des inländischen Verbrauchs (127,4 Mio. m<sup>3</sup> (r)) Nettoimporteur. Ausgedrückt in Werten ist es umgekehrt: einer Ausfuhr von 37,9 Mrd. Euro stand 2018 eine Einfuhr von 31,4 Mrd. Euro gegenüber. Deutschland ist also Nettoexporteur nach Werten (Thünen-Institut 2020c).

Charakteristisch an der Struktur des deutschen Außenhandels mit Holz und Produkten auf Basis Holz ist, dass in nahezu allen Warengruppen in der gleichen Größenordnung in beide Richtungen gehandelt wird. Lediglich bei der Warengruppe Holzschliff, Zellstoff und Altpapier liegt die Einfuhr bei mehr als dem Doppelten der Ausfuhr. Bei der Warengruppe Regenerative Zellulose u. a. ist es umgekehrt; hier liegt die Ausfuhr bei mehr als dem Doppelten der Einfuhr. Nach Menge überwiegt in beide Handelsrichtungen bei weitem der Handel mit Halbwaren, nach Werten sind der Handel mit Halb- und mit Fertigwaren in etwa gleich auf. Der Handel mit Rohholz spielt nur eine untergeordnete Rolle, wenngleich in der aktuellen Schadenssituation die Ausfuhren von Nadelrohholz deutlich angestiegen sind und zu einer spürbaren Marktentlastung geführt haben. Haupthandelspartner Deutschlands sind die anderen Mitgliedsstaaten der EU. In der Einfuhr entfallen knapp 80% des Handels nach Werten auf sie, bei der Ausfuhr sind es etwas weniger mit 70%.

Der Klimawandel kann zu stark veränderten Angebotsmengen an Rohholz in beide Richtungen führen: in Richtung Abfluss von Holz als auch Zufluss desselben. Die Umkehr der Handelsrichtung mit Rohholz als Folge des Überangebotes an Schadholz (siehe Kapitel 1.2.2.1) lässt erwarten, dass die Ausfuhr von Rohholz auch zukünftig einen Beitrag zur Entspannung der Lage auf dem deutschen Rohholzmarkt leisten kann; wenngleich aufgrund der hohen Transportkostenabhängigkeit von Holz sicher nur einen begrenzten.

In umgekehrter Richtung lassen die gute Einbin-

dung Deutschlands in den internationalen Handel sowie die im Kapitel 1.2.2.1 dargestellte flexible Reaktion des Marktes auf unterschiedliche Angebotsmengen in Deutschland grundsätzlich auch keine Unterversorgung der Bevölkerung mit Produkten auf Basis Holz erwarten; auch dann nicht, wenn zu späteren Zeitpunkten Rohholz, insbesondere Nadelholz mittlerer Dimensionen aus einheimischen Wäldern, knapp werden wird.

Gleichwohl stellt sich die Frage, in welchem Umfang mittel- und langfristig fehlendes Nadelholz nach Deutschland importiert werden kann, wenn auch in den europäischen Nachbarländern Trockenheit und Folgeschäden die nutzbaren Nadelholzressourcen drastisch reduzieren. Aufgrund der enormen Nadelholzvorkommen in der borealen Zone der nördlichen Hemisphäre kann aber global mittelfristig nicht von einer Nadelholzknappeit ausgegangen werden. Eher stellt sich die Frage, auf welcher Verarbeitungsstufe Holzprodukte unter diesen Umständen nach Deutschland kommen werden und welche Auswirkungen dies auf Einkommen und Beschäftigung im Cluster Forst und Holz haben wird.

#### 3.2.1.2 Erschließung neuer Rohstoffquellen

Die bisherigen aus der Waldmodellierung vorliegenden Prognosen zur Rohholzverfügbarkeit in Deutschland zeigen, dass der Nadelholzbedarf für die Deckung der benötigten Holzbausortimente (Nadelschnittholz) bis 2050 noch ausreichend durch inländische Versorgung gedeckt werden kann (WBW 2018). Dabei sind jedoch die Wirkungen der extremen Dürre- und Borkenkäferschäden der letzten beiden Jahre nicht ausreichend mitberücksichtigt. Auch sind Abschätzungen des Rohholzbedarfs für Neubauten im Gebäudesektor immer von den Wohn- /Nutzbedarfsprognosen und den Holzbauquoten abhängig; aktuelle Prognosen erstrecken sich bis zum Jahr 2030 (BBSR 2015).

Die Nadelholzversorgung wird sich demnach verringern, der Kulminationspunkt der Nadelholzdominanz wird voraussichtlich früher erreicht und die Bedeutung der Laubholzarten im Rohholzangebot aus den deutschen Wäldern wird zunehmen. Mittlerweile bestehen 80% der gesicherten Waldverjüngung aus Laubbäumen. Es wird allerdings keine dominante „Brotbaumart“ geben, weil die Eigenschaften und Verwendungspotenziale der Laubholzarten im Vergleich zum Nadelholz vielfältiger und heterogener sind (Krackler und Niemz 2011).

Viele bestandesbildende Laubbaumarten wachsen langsamer und benötigen somit längere Produktionszeiten als die meisten Nadelbaumarten und gleichzeitig weisen sie bezogen auf das Volumen einen deutlich geringeren Stammholzanteil an der geernteten

Biomasse auf. Wird dieser Trend fortgeschrieben, führt dies zu einer mittelfristigen Abnahme des allgemeinen Rundholzpotenzials, da je Zeiteinheit weniger Holzressourcen marktverfügbar gemacht werden können. Abhilfe kann eine Anpassung der Baumartenzusammensetzung hin zu produktiven Mischwäldern mit höherem Anteil von Nadelholzarten sein, die mischungs- und klimatolerant sind und gute Holzeigenschaften aufweisen.

Ein theoretisches Potenzial zur Steigerung des Rohholzaufkommens besteht vor allem im Kleinprivatwald, kann aber häufig nicht erschlossen werden. Oft scheitern eine forstliche Bewirtschaftung und Nutzung der Bestände an den individuellen Interessen, fehlendem Fachwissen und technischen Möglichkeiten der Besitzer. Initiativen um die Zersplitterung der Wälder im Klein- und Kleinstprivatwald zu überwinden, zum Beispiel durch freiwilligen Flächentausch, Waldflurneuordnung, Übergang zu ideellen Anteilen und Genossenschaftsmodellen finden allerdings bisher kaum Anwendung auf breiter Fläche.

Durch die Verwendung von ausgewähltem, qualifizierten und geprüftem Vermehrungsgut aus anerkannten Waldbeständen mit hoher Produktivität und Holzqualität kann die Holzproduktion deutlich erhöht werden, ein Mehrertrag zwischen 10% und 60% wird berichtet (BÖR 2016). Allerdings werden die Potenziale diesbezüglich in Deutschland bisher nur unzureichend genutzt. Mittlerweile liegen Strategien zur Züchtung in Deutschland vor und zwei Forschungsprojekte („FitForClim“ und „AdaptForClim“) zeigen beispielhaft, wie ausgewählte Plusbäume mit guten quantitativen und qualitativen Wuchseigenschaften eine Grundlage zur Saatgutproduktion sein können. Zielkonflikte zwischen einer Produktivitätssteigerung und der Trockenstresstoleranz müssen minimiert werden. Weiter ist zu berücksichtigen, dass der Biomassezuwachs nicht zulasten des Anpassungspotenzials der Gehölze zum Beispiel gegenüber Herbivoren und Pathogenen gehen darf (vgl. Kap. 3.1.1.1.2, Herms und Mattson 1992).

Die Möglichkeiten der Ausweitung der Produktionsflächen zur Holzproduktion in Deutschland sind begrenzt. Die bisherigen Erfahrungen zu Kurzumtriebsplantagen zur Biomasseerzeugung zeigen, dass dieses Produktionssystem bei den Landwirten in Deutschland bisher keine attraktive Alternative darstellt. Für die Bioenergienutzung liegt die Anbaufläche seit 2015 gleichbleibend auf nur 6.600 ha (FNR 2021). Gleiches gilt für die Einmischung von Laubbäumen in agrarische Landnutzungssysteme, auch hier ist das Potential regional begrenzt, und wird meist zur regionalen Wärmegewinnung eingesetzt. Derzeit können die Volumenpotenziale aus agroforstwirtschaftlichen Systemen nicht abgeschätzt werden, bestehende

Förderungen und begleitende Forschungen lassen aber einen zukünftigen Ausbau erwarten. Landschaftspflegeholz fällt regional an, wird ebenfalls vorwiegend thermisch genutzt oder kompostiert.

Das kurz- und mittelfristig höchste Potenzial zur Generierung neuer Holzquellen wird der Altholznutzung, also dem Sekundärrohstoff aus der Abfallentsorgung, beigemessen. Der Altholzmarkt wird von den Mengen gespeist, die aus dem Abfallstrom generiert werden, und wird von vielen Faktoren beeinflusst. So ist der Markt geprägt von konkurrierenden Marktteilnehmern, nicht vorhersehbaren Altholzqualitäten und der Auswirkung der Konjunktur auf das Altholzaufkommen als Folge der Möbelnachfrage oder des aktuellen Aufschwungs im Bausektor. Zudem haben die Preise für die Energiegewinnung aus Holzfeuerungen und die Situation im europäischen Ausland einen Einfluss auf die für die stoffliche Nutzung verfügbare Altholzmenge. Neben den genannten Faktoren beeinflusst auch der Gesetzgeber den Altholzmarkt grundlegend. So unterliegen die umwelt- und energiepolitischen Gesetzgebungen (z. B. Kreislaufwirtschaftsgesetz/Abfallgesetz, Altholzverordnung, Erneuerbare-Energien-Gesetz, Biomasseverordnung), welche die Abfallentsorgung und -verwertung regeln, Veränderungen – insbesondere im Zuge der Energiewende.

Beispielsweise hat das Erneuerbare-Energien-Gesetz zum Anstieg der energetischen Nutzung von Altholz beigetragen. Im Jahr 2016 betrug das gesamte Handelsvolumen der 1.056 Altholzentsorgungsbetriebe 7,7 Mio. t. Davon wurden 6,5 Mio. t in Feuerungsanlagen mit Wärmeleistungen ab 1 MW (BMA  $\geq$  1 MW) genutzt (Döring et al. 2018). Kleinfeuerungsanlagen (BMA  $<$  1 MW) nutzten nur 0,1 Mio. t Altholz. In der Holzwerkstoffindustrie wurden im Jahr 2017 1,8 Mio. m<sup>3</sup> Altholz verwendet (Döring et al. 2017).

Die derzeitige Altholzverwendung (Erfassung, Aufbereitung) reduziert die Dimensionen der Holzsortimente ab der zweiten Nutzungsstufe auf Schnitzel oder Spangrößen. Die Möglichkeiten des dimensionserhaltenden Rückführens von Holzsortimenten insbesondere aus Bauabbrüchen in der Kaskadennutzung sind am Markt noch kaum etabliert und müssen demzufolge entwickelt werden (siehe Kap. 3.3.2.8). Dafür bedarf es einer sortenreinen Sortierung und Schadstofffreiheit als Voraussetzung für eine optimierte Verwendung von Altholz in Folgeprodukten.

Die zukünftigen Sortimente zur Versorgung der Holzindustrie werden in ihrer Zusammensetzung und Qualität heterogener. Es bestehen Möglichkeiten zum Ausbau der Volumina insbesondere aus der Urproduktion und der Altholzwirtschaft, deren Nutzbarmachung gezielte Maßnahmen und Anreize erfordert.

#### 3.2.1.3 Verarbeitungstechnologien und Produkte sowie Holz als dezentral verfügbarer Rohstoff der Bioökonomie und Bio-Energie

Bioökonomie ist ein wichtiger Baustein zukünftigen Wirtschaftens. Die stoffliche Holznutzung im Bausektor wird als ein Teil der Bioökonomie gesehen, hier aber auf Grund seiner Wichtigkeit in Kapitel 3.2.4 behandelt.

Das heutige und zukünftige Laubholzaufkommen in Deutschland wurde von Knauf und Frühwald (2020) untersucht. Heute wird fast doppelt so viel Laubholz bereitgestellt wie noch vor 20 Jahren. Die zusätzlichen Mengen gehen überwiegend in die energetische Verwertung. Bei den Laubhölzern sind Buche und Eiche die dominierenden Baumarten in Deutschland. Sie machen 70% des Laubholzvorrats aus. Die Baumarten Esche, Birke, Erle und Ahorn haben einen Anteil am Vorrat von jeweils mehr als 3% (BMEL 2014). Zukünftig werden etwas mehr Buche und deutlich mehr Eiche sowie andere Laubhölzer als in der Vergangenheit zur Verfügung stehen. Das Potenzial an Laubstammholz wird ca. 60% höher liegen als das Holzvolumen, das im Zeitraum 2013 bis 2017 genutzt wurde (FNR 2020).

Allerdings kann Laubholz die Nadelholzanwendungen nur in begrenztem Umfang ersetzen. Die Holzwirtschaft mit der Schlüsselverwendung des Bauens mit Holz ist bisher insbesondere für die klimaeffizienten konstruktiven Bauanwendungen großflächig auf Nadelholz angewiesen. Die zuwachsenden Laubholzsortimente könnten, sofern die wirtschaftlichen und technischen Voraussetzungen für konkurrenzfähige Produkte geschaffen werden, mit einer höheren Wertschöpfung als heute genutzt werden, wenn beispielsweise ihre optische Farb- und Strukturvielfalt zur Geltung gebracht wird (Merz et al. 2020). Allerdings können sie Nadelholz in vergleichbaren Mengen, Qualitäten und mit denselben vorteilhaften Klima- und Umwelteffekten nicht substituieren.

Die Potenzialanalyse für eine verstärkte Laubholzverwendung hat ergeben, dass für die stoffliche Laubholznutzung die mit Abstand größten quantitativen Potenziale bei Verwendungen in preiswerten Holzsortimenten bestehen, insbesondere in den Sektoren Holzwerkstoffe und Verpackung. Für den Laubholzeinsatz in diesen Anwendungen ist – neben der Verfügbarkeit – ein im Vergleich zu Nadelholz konkurrenzfähiger Preis erforderlich.

Weitere Potenziale für den Einsatz höherwertiger Laubholzsortimente liegen beispielsweise in den Bereichen Möbel, Fenster und Außentüren, Massivparkett, und Massivholzplatten, einhergehend mit der Weiterentwicklung von spezifischen Verarbeitungs- und

Veredelungstechnologien, um aus der gegebenen Vielfalt der Laubholzarten und -eigenschaften höhere Wertschöpfung zu erzielen. Auch Hybridanwendungen von Nadel- und Laubhölzern werden zunehmen (Aicher et al. 2016, Auer und Rauch 2021).

Laub- und Nadelholz in geringeren Qualitäten könnte verstärkt in anderen Bereichen der Bioökonomie verwendet werden. Die Möglichkeiten zur Entwicklung neuer Materialien und chemischer Substanzen für die stoffliche Nutzung, aufbauend auf den molekularen Strukturen des Holzes – Cellulose, Hemicellulosen, Lignin und akzessorische Bestandteile – sind sehr vielfältig und unterschiedlich weit vorangeschritten (Miletzki et al. 2020). Die Nutzung der Zellulose in Form von Fasern für Papier, Vliesstoffe und daraus aufbaubaren Verbundmaterialien sowie in der nanoskaligen Auflösung wird bereits industriell betrieben, ebenso der Einsatz von Filamenten nach chemisch-physikalischen Umformungsprozessen in der Textilindustrie (Nechyporchuk et al. 2016).

Die Hemicellulosen der Holzarten haben das Potenzial, als Nahrungs- und Futterergänzungsmittel ebenso wie in Kosmetika und Pharmaprodukten mit hoher Wertschöpfung genutzt zu werden (Deutschmann und Dekker 2012). Auch Plattformchemikalien für Biokunststoffe wurden entwickelt. Zudem lassen sich alle Kohlehydratfraktionen des Holzes als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Biotreibstoffen nutzen, hier ist eine großindustrielle Anwendung in Deutschland beschlossen und in Vorbereitung.

Die wertschöpfenden Potenziale des aromatenreichen Lignins werden bisher vorwiegend in kleinskaligen Nischenanwendungen genutzt (Galkin und Samec 2016); hier können Umsetzungen in Klebstoffen und Kunstharzen und vor allem in der Karbonfaserherstellung erfolgen, wenn die Aufbereitung des Lignins weiter verbessert wird und die Zellstoff- und Papierindustrie auf alternative Formen der nachhaltigen Energieerzeugung zugreifen kann. Derzeit wird ein wesentlicher Teil der Prozessenergie aus Lignin und Aufschlussrückständen gedeckt, so dass die Industrie kein unmittelbares Interesse an der stofflichen Ligninnutzung zeigt.

Das Konkurrenzpotenzial zwischen der stofflichen und energetischen Verwertung minderer Waldholzqualitäten aus der Waldpflege und den Kalamitätsnutzungen wird durch die herrschenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Anreize beeinflusst. Beide Nutzungsarten sind wichtige Pfeiler der holzbasierten Bioökonomie und werden auch in den kommenden Dekaden am Holzmarkt partizipieren.

Die Kaskadennutzung präferiert die primäre stoffliche Nutzung des Holzes und sieht die energetische Verwertung als letzten Schritt der Wertschöpfungskette Holz. Neben meist geringeren



emissionsbasierten Umweltwirkungen führt die Kaskadennutzung zu einem reduzierten Verbrauch primärer Ressourcen, insbesondere Landfläche, sowie zu einer deutlichen Steigerung der Ressourceneffizienz im Vergleich zur Verwendung von Frischholz (Risse et al. 2017). Bisher ist die stoffliche Holzkaskade jedoch noch nicht industriell etabliert, aber das in der Gebäudeinfrastruktur eingebaute Holzvolumen steigt mit dem zunehmenden Holzbauanteil kontinuierlich an (Kalcher et al. 2016).

Es ist zu erwarten, dass vermehrte Kaskadennutzung mittelfristig den Holzenergiemarkt beeinflussen wird. Je mehr Bioraffinerieanwendungen den Waldbesitzern einen stofflichen Schwachholzabsatz zu wirtschaftlich lukrativen Angeboten garantieren, desto mehr werden sich vor allem die mittelgroßen Holzenergieerzeuger auf Altholz als primäre Sortimente ausrichten. Bei diesen zukünftigen Entwicklungen sind neben den wirtschaftlichen Aspekten auch die Umwelteffekte der Logistik zu berücksichtigen. Für eine umfassende Folgenabschätzung sollten produktbezogene Ökobilanzen eine wichtige Grundlage schaffen, die dann in den Gesamtkontext des Sektors gestellt werden müssen (Weber-Blaschke und Muys 2020).

#### 3.2.1.4 Stoffliche Nutzung im Gebäudebereich

Der Gebäudebereich stellt die Hauptnutzung für langlebige Holzprodukte dar. Die Erstellung von Gebäuden in Holz kann alternative Rohstoffe und Materialien in funktionsgleichen Produktsystemen ersetzen, die mit einem in der Regel höheren Energieaufwand hergestellt werden (stoffliche Substitution vgl. Rüter 2017, Hafner et al. 2017) und zugleich einen zusätzlichen Kohlenstoffspeicher aufbauen, der so lange bestehen bleibt, bis das Material am Ende der Nutzungskaskade verbrannt wird.

Der Beitrag zur Klimaanpassung ist vor allem in folgenden Aspekten zu finden: die kurzfristig umzusetzende Erstellung von Holzgebäuden, die dazu beitragen die Klimaneutralität 2045 zu erreichen, sowie die Nutzung von Nadelholz aus heimischen Wäldern, um damit den Waldumbau voranzubringen und den Kohlenstoffspeicher in langlebigen Holzprodukten zu erhöhen.

Die Abschätzung möglicher positiver Umwelteffekte, die durch eine Verschiebung von konventionellen Baumaterialien, Produkten oder Energieträgern zu dem nachwachsenden Rohstoff Holz verursacht

werden, kann immer nur auf Basis der gleichen definierten funktionalen Einheit vorgenommen werden, wofür die technisch-funktionale Äquivalenz im Kontext der Verwendung des jeweiligen Produkts (bzw. Gebäudes) sichergestellt werden muss. Die methodischen Vorgaben der relevanten Normen zum Nachhaltigen Bauen sehen hierfür u. a. die klare Trennung verschiedener Lebenszyklusabschnitte der zu bewertenden Bauprodukte vor und schließen potentielle Gutschriften durch die Nachnutzung des jeweiligen Baumaterials von der Bewertung auf Produktebene aus.

Das Projekt THG-Holzbau hat diese Abschätzung für den Wohnungsneubau in Deutschland vorgenommen (Hafner et al. 2017). Im Ergebnis zeigt sich, dass je nach Szenario in dem gewählten Projektionszeitraum (2016 – 2030) die Atmosphäre allein durch eine gesteigerte Holzverwendung (Szenario ‚55/15 steigend‘) bei der Konstruktion von Wohnungsneubauten um jahresdurchschnittlich 1,43 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq entlastet werden könnte. Über den gesamten Projektionszeitraum von 2016 bis 2030 wäre mit klimapositiven Einsparwirkungen zwischen knapp 5,0 (Szenario ‚BLMAX steigend‘) und ca. 21,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq (Szenario ‚55/15 steigend‘) zu rechnen (Hafner und Rüter 2018, Hafner et al. 2017).

Im Sinne einer ressourceneffizienten Verwendung des Baustoffes Holz sollte aber darauf geachtet werden, dass möglichst viel neu zu schaffender (Wohn-) Raum in Holzbauweise mit möglichst effizienten und der Bauaufgabe angepassten Holzkonstruktionen umgesetzt wird (Hafner und Schäfer 2018).

Große aktuelle Wohnbauprojekte in Holzbauweise wie zum Beispiel der Prinz-Eugen-Park München als derzeit größte Holzbausiedlung in Deutschland zeigen, dass hier mehr als 12.500 t CO<sub>2</sub>-Äq als Holzprodukte in Gebäuden eingelagert werden können (Djanshah et al. 2020, Hafner et al. 2020).

Ein langfristiges Ziel sollte sein, Kommunen und Städte sofort für mehr flächendeckend umgesetzten Holzbau anzuregen und nicht nur einige Vorzeigeprojekte zu bauen. Zusätzlich ist es hierbei wichtig darauf zu achten, dass die Gebäude gezielt sehr energieeffizient konzipiert und errichtet werden. Die dabei verwendeten Holzprodukte sollten aus einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung stammen. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung von zertifiziertem Holz oder den Nachweis einer Herkunft aus der Region erfolgen, wie dies bereits in der Gebäudezertifizierung und auch in speziellen Förderprogrammen<sup>1</sup>

1 CO<sub>2</sub>-Bonus Förderung Stadt München: [https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Klimaschutz\\_und\\_Energie/Energieeffizientes\\_Bauen/Foerderung\\_und\\_Qualitaet/FES.html](https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Klimaschutz_und_Energie/Energieeffizientes_Bauen/Foerderung_und_Qualitaet/FES.html); CO<sub>2</sub>-Bonus Förderung Hamburg: (Wohnungsbau) <https://www.ifbhh.de/wohnraum/mietwohnungen/neubau/mietwohnungsneubau/2-foerderweg/> und Nichtwohngebäude) [https://www.ifbhh.de/fileadmin/pdf/IFB\\_Download/IFB\\_Foerderrichtlinien/FoeRi\\_Mod\\_NWG.pdf](https://www.ifbhh.de/fileadmin/pdf/IFB_Download/IFB_Foerderrichtlinien/FoeRi_Mod_NWG.pdf)

der Fall ist und in entsprechenden Beschaffungsregeln des Bundes<sup>2</sup>.

Der Holzbau ist aktuell die einzige, großflächig umsetzbare Technologie, um Kohlenstoff im Gebäudebereich zu speichern (Kuittinen et al. 2021). Dieser kann mittelfristig durch andere Technologien erweitert werden. Zusätzlich könnte sich perspektivisch das Substitutionspotenzial durch die Holznutzung verringern, wenn auch andere Baumaterialien klimaneutral erzeugt werden können. Der Holzbau kann deshalb im Klimaschutz eine „Brückentechnologie“ darstellen, die aktuell eingesetzt werden sollte, um die Ziele eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2045 zu erreichen. Darüber hinaus wird Holz als ein nachwachsender Baustoff – unabhängig von der Frage Klimaschutz-Wirkung - weiter dazu beitragen müssen, Baustoffe auf Basis endlicher Ressourcen (z. B. Sand) zu schonen beziehungsweise zu ersetzen.

#### 3.2.1.5 Erforderliche Instrumente

Eine stoffliche Holznutzung im Baubereich erfordert eine flächendeckende Ausbildung von Architekten und Ingenieuren im Holzbau, um holzbauspezifische Fachplanungen in der Fläche und mit dem notwendigen Fachwissen gewährleisten zu können. Bei diesen Kompetenzen wird z. Z. Nachholbedarf gesehen (Purkus et al 2020).

Zusätzlich wird eine verstärkte Standardisierung als wichtige Voraussetzung betrachtet, um eine kostengünstigere Umsetzung mehrgeschossiger Holzgebäude zu ermöglichen und auch „holzfremden“ Planern und Ingenieuren einen leichteren Zugang zum Holzbau zu erlauben (Hafner et al. 2017, Winter et al. 2019, Purkus et al. 2020). Landesbauordnungen, allgemeine technische Baubestimmungen und Zulassungen von Bauprodukten sollten so weiterentwickelt werden, dass eine systemimmanente Benachteiligung von Holzbau bis zur Hochhausgrenze ausgeschlossen werden kann (Purkus et al. 2020). Zugleich sollten die genehmigenden Baubehörden befähigt sein, diese neueren Baukonstruktionen fachlich korrekt bewerten zu können. Kommunen und Projektentwickler müssen in die Lage versetzt werden, die Umsetzung von Holzbau schon im frühesten Projektstadium zu planen (Djahandschah et al. 2020).

Die Ausdehnung der Rohstoffbasis auf sekundäre Rohstoffe, die bereits mindestens einen Produktlebenszyklus durchlaufen haben, sollte als Maßnahme der Ressourcenpolitik und als politisches Ziel auf europäischer und nationaler Ebene verankert werden (EC 2014, BMUB 2015). Im Ergebnis bedeutet dies eine

Verringerung der energetischen Nutzung von Holz zugunsten einer höheren stofflichen Nutzung.

Der Anteil der Sekundärrohstoffe Altholz und Altpapier an der Gesamtholzbilanz in den Jahren 2010 und 2016 lag in der Summe stabil bei knapp über 21% (Thünen-Institut 2018). Eine materialerhaltende, sequentielle Nutzung von Holz insbesondere aus Gebäudekonstruktionen (Kaskadennutzung) könnte neben der verlängerten Kohlenstoffspeicherung zu einer merklichen Erhöhung der Rohstoffproduktivität beitragen.

Auch die Holzqualitäten, die zukünftig rückführbar sind, werden durch die heutige Bautechnologie wesentlich besser konserviert. Um die vorhandenen Potentiale der in der Gebäudeinfrastruktur eingelagerten Holzvolumen und -qualitäten nutzen zu können, sind u. a. folgende Maßnahmen und Anpassungen umzusetzen:

- Recyclinggerechte Entwicklung und Verwendung von Holzprodukten und Holzkonstruktionen durch angepasstes Produkt- und Verbindungsdesign (Design for Reuse/Recycling)
- Effiziente Aufbereitungs-, Reinigungs- und Sortierverfahren für Gebraucht- bzw. Altholz
- Anpassung und Novellierung der gesetzlichen Grundlagen (Altholzverordnung)
- Intensivierung der Kaskadennutzung durch finanzpolitische Modelle (C-Bindung, Konservierungsbonus)

#### 3.2.1.6 Veränderung von Wertschöpfungsketten

Die Holzwirtschaft zählt zu den traditionell rohstoffintensiven Wirtschaftssektoren. Die ausreichende Versorgung mit qualitativ und mengenmäßig ausreichenden Holzsortimenten ist eine zentrale Voraussetzung für die Wertschöpfung innerhalb der Branchen. Zudem bedarf es einer effizienten und robusten Maschinen- und Prozesstechnologie, um die volumestarken Rohholzsortimente logistisch verfügbar und effizient transformieren zu können.

Ein weiteres Charakteristikum der Branche ist der hohe Grad der Stoffstromverknüpfung innerhalb und zwischen den Wertschöpfungsketten, der zu einer fast vollständigen Ausnutzung der Rohstoffe in der bis heute dominierenden stofflichen sowie der energetischen Verwertung des Rohholzes führt, aber ein

<sup>2</sup> siehe: [https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_06102017\\_534625050005.htm](https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_06102017_534625050005.htm)

effizientes Supply-Chain Management bedingt (Taskhiri et al. 2016).

Eine Wertschöpfungskette stellt die Stufen der Herstellung von Produkten als eine geordnete Abfolge von Verfahrensschritten dar. Die Verfahrensschritte verbrauchen Rohstoffe und Energien, bieten Beschäftigung und Einkommen, und erzeugen Sach- und Geldwerte. Produkte der holzbasierten Wertschöpfungsketten basieren massen- oder volumenbezogen zum überwiegenden Anteil auf dem Rohstoff Holz oder auf Derivaten des Holzes wie z. B. Holzspäne, -fasern oder Zellstoff.

Die Wechselwirkungen zwischen der Waldbewirtschaftung, dem Rohholzaufkommen und der Holzmarktversorgung zeigen bereits unter normalen Planungsbedingungen unmittelbare Auswirkungen entlang der Wertschöpfungsketten, wenn Verknappungen oder ein Überangebot an Rohstoffen zu Änderungen der Versorgung führen. Bereits in der Vergangenheit haben lokal bis überregional auftretende extreme Sturmereignisse die Holzmärkte intensiv beeinflusst, die Auswirkungen auf die Einschlags- und Produktionsdaten wirkten dabei bis mehrere Jahre nach dem Schadereignis nach (Hartebrodt 2004).

Es ist inzwischen ein solider Erfahrungsstand zur temporären Zwischenlagerung von Kalamitätsholz (Logistik, Lagertechnik, Wirksamkeit, Umweltaspekte, rechtl. Aspekte, Kosten) vorhanden, sodass Möglichkeiten und Grenzen abgeschätzt werden können (Lutze 2014, Blom und Thornqvist 2014). Bisherige Erfahrungen zeigen, dass geeignete Lagerräume bzw. -kapazitäten begrenzt sind, und die Holzkonservierung mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden ist, sodass nur qualitativ gute Rohholzsortimente temporär eingelagert wurden (CTBA 2004).

Die in den Jahren 2018 und 2019 überregional auftretenden Trockenis- und Borkenkäferkalamitäten sind gegenüber den Schäden aufgrund von Sturmergebnissen mit erheblich weitreichenderen Störungen der planmäßigen Bewirtschaftung verbunden. Sowohl der Schadensumfang als auch die Auswirkungen der Kalamitäten auf die Rohholzqualität übersteigen die bisher in Mitteleuropa gemachten Erfahrungen. Die Auswirkungen der Störung auf die Holzqualität nach Sturmereignissen sind dann erheblich, wenn die Bäume geknickt vorliegen. Die Eignung für die Schnittholznutzung als Konstruktionsholz schließt sich aus, wenn Faserstauchungen vorliegen, die sowohl beim geworfenen als auch bei den noch stehenden Stämmen vorkommen können (Arnold und Steiger 2007, Gardiner 2021).

Die jüngst auftretenden Holzschäden bei der Buche sind deutlich komplexer und noch nicht umfassend einzuschätzen: sie reichen von Trockenrissen, Insektenbefall bis zum Auftreten von holzzersetzenden und

verfärbenden Pilzen. Um einen weiteren Verlust der Holzqualität am Schadholz vorzubeugen und um die Ausbereitung von Folgeschäden am Bestand zu vermeiden, sollte die Schadholzaufbereitung möglichst unmittelbar nach dem Schadenseintritt erfolgen.

Das stellt die betroffenen Betriebe und Forstunternehmen vor große Herausforderungen hinsichtlich der Arbeitskräfteplanung, Logistik und Holzabsatzplanung. Die Aufarbeitung von Kalamitätsholz ist häufig zudem mit besonderen Gefahren für die eingesetzten Waldarbeiter verbunden und erfordert die Einhaltung besonderer Vorschriften zur Unfallverhütung. Auch in der Holzverarbeitung erhöht die Verarbeitung von trockenem Schadholz die Unfallgefahr durch Staubexplosionen (Wong et al. 2013).

Die Auswirkungen der Kalamitäten für Waldbesitzer, Forstunternehmer und Holzmärkte sind bereits unmittelbar nach den ersten Schadenswellen sichtbar: Kapazitätsengpässe im Maschinenpark, sinkende Holzpreise durch Überangebote auf dem Holzmarkt, Unsicherheiten bzgl. Entwicklung der Holzqualität und Auswirkungen der Holzqualität auf die Verarbeitungsketten. Während das trockenengefallene Stammholz der Nadelbäume für die Schnittholzproduktion weiterhin holztechnologisch normal nutzbar scheint, können die mikrobiellen und pilzlichen Schäden für die Holzwerkstoffindustrie nachteilige Wirkungen zeigen. Das gilt unter Umständen auch für die Energie- und Bioraffinerienutzung, wenn der Masseverlust zu Heizwertreduktion oder Änderungen der holzchemischen Zusammensetzung führt. Es fehlen derzeit noch systematische Studien zu den Konsequenzen der Kalamitäten für die Holzverwendung in der Span-, Faser- und Zellstoffproduktion.

Mittelfristig betreffen die neuen großflächigen Waldschäden zudem die Planbarkeit der regionalen Holzwirtschaft. Der bereits initiierte Waldumbau wird zu einem veränderten Holzartenangebot führen, mit einem höheren Anteil an Laubholz, zu dem es nur wenige vergleichbaren Transformations- und Einsatz Erfahrungen gibt.

Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten in den Nutzungsketten:

- Bei der Holzernte müssen zunehmend große Mengen von Kalamitätsholz<sup>3</sup> verarbeitet werden (siehe Kap. 3.1). Forstliche Dienstleister müssen dabei sehr kurzfristig auf Nachfrage-Schwankungen reagieren: Von stark erhöhtem Verarbeitungsbedarf bis zur kurzfristigen Aufkündigung von Verträgen, falls die Holzmärkte kollabieren sollten.
- Da große Kalamitätsholzvolumen nicht zeitnah abtransportiert und verarbeitet werden können, kommt dem Wert-Erhalt dieses Holzes eine erhöhte Bedeutung zu. Entrindungsaggregate direkt im Harvester bieten einen problemorientierten Lösungsansatz, um die weitere Besiedelung des Holzes durch Borkenkäfer zu vermeiden und dadurch eine Trockenlagerung an der Waldstraße zu ermöglichen. Gleichzeitig werden dadurch mit der Rinde mehr Nährstoffe im Wald belassen.
- Zur Vorbereitung auf künftige Störungen kann die Lagerinfrastruktur im Wald, an Transportknoten und in den holzverarbeitenden Betrieben verbessert werden. Unterstützend beitragen können hierzu Investitionen in Digitalisierung, IT-basierte Logistik, und Industrie 4.0 Entwicklungen (Müller et al. 2019, Reitz et al. 2019, Kemmerer und Labelle 2021).
- Die Holztransport-Logistik ist ein weiterer potenzieller Flaschenhals in der Bewältigung großer Kalamitätsholzmengen. Beispielsweise mangelt es verbreitet an Verladestationen für den Bahntransport.
- Während aktuell fast überall die Verarbeitungskapazitäten hohe Ausnutzung erfahren, ist bereits abzusehen, dass es künftig regional zur Rohstoffknappheit kommen kann, dort wo in Folge der Borkenkäferkalamität auf großen Flächen Waldbestände vorzeitig genutzt wurden. Internationale Kooperation in der Industrie könnte in Zukunft helfen, um fluktuierende Nachfrage aufzufangen und dem Wertschöpfungsverlust innerhalb Europas entgegenzuwirken.
- Untersuchungen zur Verminderung der Auswirkungen von Klimawandel und verstärkten

Störungen in der holzverarbeitenden Industrie fehlen bislang noch weitgehend. Entwicklungsbedarf besteht beispielsweise zum Umgang mit heterogenen und minderen Holzqualitäten oder der Umstellung und Erweiterung von Produktsortimenten, um vermehrt Kalamitätsholz verarbeiten zu können.

- Die absehbare Verschiebung des Baumartenspektrums in Richtung von mehr Laubholz wird absehbar den Bedarf für technische Verfahren zur flexibleren Verarbeitung unterschiedlicher Holzsortimente erhöhen.
- Investitionszyklen in neue technische Verarbeitungstechnologien sind lang und müssen daher mit den prognostizierten Entwicklungen im Rohstoffsektor gekoppelt werden.

#### 3.2.2 Wechselbeziehungen und Anpassungshemmnisse

##### **Rohstoffmengen und Holzimport – ausreichende Mengen an Nadelholz für Holzverarbeitung**

Die möglichst kontinuierliche Belieferung mit Holz der erforderlichen Arten, Dimensionen und Qualitäten ist eine Grundvoraussetzung für den Beitrag unserer Wälder zum wirtschaftlichen Wandel in Richtung Bioökonomie (Kalt 2015). Die Sicherung der Rohstoffversorgung, auch unter zukünftig unsichereren klimatischen Rahmenbedingungen, ist damit eine zentrale gesellschaftliche Aufgabe der Forstbetriebe. Sie liegt aber ebenfalls in deren ureigenen Interesse, da die Forstbetriebe zumindest bisher den überwiegenden Anteil ihrer Einnahmen aus dem Holzverkauf erzielen. Die Verarbeitung von Holz zu langlebigen Produkten trägt ebenfalls zum gesellschaftlichen Ziel des Klimaschutzes bei (WBW 2016).

Weniger synergistisch sind jedoch zum Teil die Wechselbeziehungen zum Naturschutz. Durch Holzeinschlag entstehen zwar auch wichtige Lebensräume für lichtliebende Arten im Wald, die Entnahme des Holzes aus dem Bestand bedeutet aber auch immer einen Verlust an Lebensraumpotential für eine ganze Reihe von Waldarten, insbesondere solchen, die an die Strukturen späterer Waldsukzessionsphasen gebunden sind. Diese Konflikte können durch entsprechende

---

3 Das im Rahmen von zufälligen bzw. ungeplanten Nutzungen in Folge von Störungen (z. B. Windwurf, Borkenkäfer, Feuer) geerntete Holz. Dabei handelt es sich größtenteils um Holz abgestorbener oder absterbender Bäume. Das Holz kann je nach Art der Störung Beeinträchtigungen der möglichen Verwendungen im Vergleich zu Frischholz aufweisen bis hin zur Unbrauchbarkeit für bestimmte Verwendungsbereiche (z. B. gebrochenes Holz für Konstruktionsvollholz)

Waldbewirtschaftungssysteme wie Retention Forestry, das auf die kontinuierliche Bereitstellung von Waldstrukturen zum Erhalt lebensfähiger Populationen dieser Arten abzielt, abgemildert werden (Gutsafsson et al. 2020; siehe auch Kap. 3.3).

Knappheiten in der Rohstoffversorgung, ob aufgrund des Erreichens natürlicher Ressourcengrenzen oder aufgrund von gesellschaftlichen Entscheidungen über den lokalen Verzicht der Nutzung natürlicher Ressourcen, werden in einer globalisierten Welt in der Regel durch Einfuhren gemildert. Das konnte in der Vergangenheit beim Außenhandel mit Rohholz bereits gut beobachtet werden. Lösungen möglicher Zielkonflikte für Deutschland dürfen daher die Verlagerungswirkungen ins Ausland nicht außer Acht lassen.

Weder beim Klima- noch beim Biodiversitätsschutz dürften mit Verlagerungen ins Ausland netto, das heißt aus globaler Sicht, Verbesserungen zu erreichen sein. Solche klassischen Leakage-Effekte wurden in verschiedenen Studien gerade jüngst aufgezeigt (Dieter et al. 2020, Fuchs et al. 2020).

### **Erschließung neuer Rohstoffquellen**

Die durch Klimawandel und Waldanpassung bedingten Änderungen des Rohstoffangebots haben Auswirkungen auf die ökonomische Wertschöpfung aus der Rohholzvermarktung. Die Vielfalt an Holzarten und -qualitäten wird die Sortimentsbildung und -größe für Holzabnehmer beeinflussen, kleinere Sortimente und gegebenenfalls Mischsortimente sind zu erwarten. Die Rohholzbeschaffung wird in größeren Versorgungsradien realisiert, unterstützt durch einen weiteren Ausbau des elektronischen Informationsaustauschs zwischen Holzindustrie und Waldwirtschaft. Zudem werden neue Sortimentsparameter für die zukünftig vielfältiger zu nutzenden Holzarten und -mischungen zwischen den Marktpartnern zu definieren sein.

Das kurz- und mittelfristig höchste Potenzial zur Generierung neuer Holzquellen zur Kompensation der waldseitigen Angebotsänderungen wird der Kaskadennutzung und der Altholznutzung beigemessen. Diese Elemente einer Kreislaufwirtschaft werden den Rohstoffdruck auf die Waldwirtschaft abmindern und zur Stärkung weiterer Ökosystemleistungen beitragen. Diese müssen zukünftig angemessen finanziell abgegolten werden, um die ökonomische Tragfähigkeit der Waldwirtschaft bei geringeren Vermarktungspotenzialen zu sichern. Ein enormes Anpassungshemmnis wird die Umstellung der Holzbautechnologien auf die klimabedingt erweiterte Rohholzpalette darstellen.

Der Altholzmarkt wird von den Gebrauchtholz-mengen generiert. Menge und Qualität zukünftiger Altholzströme können durch eine Förderung der Recycle- und Rückbaubarkeit insbesondere in Holzbau- und

Möbelanwendungen gefördert werden. Die derzeitige stoffliche Altholzverwendung (Erfassung, Aufbereitung) reduziert die Dimensionen der Holzsortimente ab der zweiten Nutzungsstufe auf Schnitzel oder Spangrößen. Die Möglichkeiten des dimensionserhaltenden Rückführens von Holzsortimenten insbesondere aus Bauabbrüchen in der Kaskadennutzung sind am Markt noch kaum etabliert und müssen demzufolge entwickelt werden. Hierbei muss für die stoffliche Weiternutzung eine Schadstofffreiheit von rückzuführenden Holzteilen sichergestellt werden. Das Einplanen von Rückbaumöglichkeiten und die Vermeidung von Störstoffen beim späteren Recycling kann durch Anpassung der Herstellungs-, Verarbeitungs- und Ausbauprozesse der Primärverarbeitung erleichtert werden, muss aber gegenüber Vorbehalten der Marktpartner durchgesetzt werden, die Sicherheits-, Effizienz- und Traditionsaspekte kompromittiert sehen.

### **Wertschöpfungsketten**

Die Wechselwirkungen zwischen der Waldbewirtschaftung, dem Rohholzaufkommen und der Holzmarktversorgung zeigen bereits unter normalen Planungsbedingungen unmittelbare Auswirkungen auf die Wertschöpfungsketten. Durch klimawandelbedingte Extremwetterereignisse werden Störungen der Marktversorgung deutlich zunehmen mit direkten Auswirkungen auf die Wertschöpfungsketten.

Anpassungsbedarf besteht sowohl in der effizienten und sicheren Holzernte als auch zur temporären Zwischenlagerung von Kalamitätsholz im Wald (Logistik, Lagertechnik, Qualitätserhaltung, Umweltaspekte, rechtl. Aspekte, Kosten) und gegebenenfalls als Schnittholz (Herausforderung Lagerflächen, Kapitalverzinsung). Analysen zeigen, dass geeignete und ausreichende Lagerräume bzw. -kapazitäten begrenzt sind und die Holzkonservierung mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden ist, sodass bisher nur qualitativ gute Rohholzsortimente temporär eingelagert wurden.

Die im Rahmen der Bioraffinerietechnologien aufzubauenden Holzproduktwerke werden eine sichere und jahreszeitenunabhängige Belieferung mit den spezifischen Rohstoffsortimenten von der Waldwirtschaft fordern. Die Waldbesitzer müssen die Initialisierung von Wertschöpfungsketten frühzeitig mit den Kunden vornehmen und gegebenenfalls neue Sortimentsdefinitionen und -aushaltungen verhandeln. Die kontinuierliche Belieferung erfordert entweder, dass die Holzernte ganzjährig betrieben wird, mit Herausforderungen durch die zu erwartenden Klimaextreme (Bodenerweichung, die Arbeitsorganisation der Waldbewirtschaftung, und als supply-chain-management

einschl. der Logistik), oder entsprechend große Kapazitäten zur Zwischenlagerung. Die Bewältigung von großen Schadholzmengen wird flexiblere Holztransport-Logistik benötigen, was angesichts des Mangels an Verladestationen zum Bahntransport eine Herausforderung darstellt. Neue Wertschöpfungsketten werden aus den rückgeführten Gebrauchtholzsortimenten einzurichten sein.

#### **Bioökonomie**

Mit dem begonnenen Waldumbau zu Mischwäldern werden zukünftig vermehrt Laubhölzer verfügbar sein. Die Holzwirtschaft mit der Schlüsselverwendung des Bauens mit Holz ist jedoch insbesondere für die klimaeffizienten konstruktiven Bauanwendungen großflächig auf Nadelholz angewiesen.

Die zuwachsenden Laubholzsortimente könnten zukünftig mit einer höheren Wertschöpfung als heute in den Bioraffinerietechnologien genutzt werden. Dadurch ergeben sich Synergien mit der Anpassung der Wälder an den Klimawandel und einer Verbesserung der Natürlichkeit. Der kurzfristige Konkurrenzdruck in der Versorgung gegenüber den Energieholzsortimenten wird die Versorgungsplanung stark herausfordern, denn holzige Biomasse wird nach wie vor eine bedeutsame erneuerbare Energiequelle sein, wenn angesichts der Witterung nur wenig Wind- oder Solar-Energie produziert wird. Mittel- bis langfristig wird sich wahrscheinlich die stoffliche-chemische Nutzung schwach dimensionierten Laubholzes in der Bioraffinerie durchsetzen, unter anderem weil der Biomasseanteil im Energiesektor durch einen zunehmend besseren energetischen Standard der Gebäude abnehmen wird.

Die Anpassung der Bioraffinerieprozesse muss mit prozesstechnologischer Entwicklung und Skalierung für die Herstellung der Produkte begleitet werden. Dabei kommt, neben der Bewertung der techno-ökonomischen Machbarkeit, die mit den ausgewählten Verfahren und den angestrebten Produkten erzielbaren, positiven Auswirkungen auf die Ressourcenschonung und den Klimawandel eine essentielle Bedeutung zu.

Im Bereich des Holzbaus aber kann Laubholz Nadelholz nicht in vergleichbaren Mengen und Qualitäten substituieren. Eine Potenzialanalyse für eine verstärkte Laubholzverwendung hat ergeben, dass für die stoffliche Laubholznutzung die mit Abstand größten quantitativen Potenziale bei Verwendungen in preiswerten Holzsortimenten bestehen, insbesondere in den Sektoren Holzwerkstoffe und Verpackung (Knauf und Frühwald 2020). Für den Laubholzeinsatz in diesen Anwendungen ist – neben der Verfügbarkeit – ein im Vergleich zu Nadelholz konkurrenzfähiger

Preis erforderlich.

Weitere Potenziale für den Einsatz höherwertiger Laubholzsortimente liegen z. B. in den Bereichen Möbel, Fenster und Außentüren, Massivparkett, und Massivholzplatten, einhergehend mit der Weiterentwicklung von spezifischen Verarbeitungs- und Veredelungstechnologien, um aus der gegebenen Vielfalt der Laubholzarten und -eigenschaften höhere Wertschöpfung zu erzielen. Auch Hybridanwendungen von Nadel- und Laubhölzern werden zunehmen, müssen aber die zukünftige Trennbarkeit der Komponenten zulassen.

Die Rolle, Potenziale und Limitationen der holzbasierten Bioökonomie im wirtschaftlichen Transformationsprozess bilden eine weitere wichtige Ökosystemleistungen der Waldwirtschaft und müssen im Kontext mit den anderen Ökosystemleistungen diskutiert und kommuniziert werden.

#### **Stoffliche Holznutzung im Gebäudebereich**

Holzbau benötigt große Mengen an Nadelholz, das nach 2045 nur noch in geringeren Mengen zur Verfügung stehen wird. Es gibt keine verlässlichen Hochrechnungen, ob zu diesem Zeitpunkt die Nachfrage für den Gebäudebereich noch in einem Umfang wie heute gegeben ist. Die gesellschaftlichen Transformationsprozesse könnten im Baubereich langfristig dazu führen, dass mit weniger Neubau zu rechnen ist - für den dann auch weniger Rohholz benötigt würde. Aber auch die Modernisierung des Gebäudebestandes hat schon heute einen großen Anteil an der Holzverwendung (INFRO e. K. 2018).

Vorausgesetzt, dass das klimapolitische Ziel der EU, bis 2045 netto klimaneutral zu sein, erreicht wird, verringern sich spätestens ab dann die positiven Substitutionseffekte der Holzverwendung. Die Kohlenstoffspeicherung in langlebigen Produkten ist aber weiterhin vorhanden und kann als negative Emission ihren Beitrag leisten (Churkina et al. 2020). Bis dahin ist der Holzbau weiter eine wichtige „Brückentechnologie“, um die Ziele eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2045 zu erreichen. Deshalb sollten Kommunen und Städte dazu angeregt werden, kurzfristig und flächendeckend mehr Holzbau umzusetzen.

Diese Gebäude sollten gezielt sehr energieeffizient konzipiert und errichtet werden, um den Wärmeenergiebedarf zu senken und damit Energieholzanteile für andere stoffliche Nutzungen verfügbar zu machen. Auch sollten die im konstruktiven Holzbau dabei verwendeten Holzprodukte nachweislich aus einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung stammen. Im Sinne einer ressourceneffizienten Verwendung des Baustoffes Holz sollte dabei bedacht werden, dass möglichst viel neu zu schaffender (Wohn-)Raum in

Holzbauweise mit möglichst effizienten und der Bauaufgabe angepassten Holzkonstruktionen umgesetzt wird (Hafner und Schäfer 2018).

Eine weitere Wechselwirkung ist zwischen langfristiger Kohlenstoffspeicherung in langlebigen Produkten durch Holzbau, insbesondere vermehrt im mehrgeschossigen Bauen sowie in der Aufstockung, und den unterschiedlichen Landesbauordnungen und deren Behandlung von Brandschutzbelangen im Holzbau zu sehen. Hier besteht der Bedarf die Regelungen so weiterzuentwickeln, dass einheitlich eine abweichungsfreie Bauweise in Holz (bis zur Hochhausgrenze) genehmigungsfähig ist und dies in den Genehmigungsbehörden und mit den Planenden kommuniziert wird.

In der Kommunikation über die biogene Kohlenstoffspeicherung ist darauf hinzuweisen, dass eine Differenz besteht, wie der Kohlenstoffspeicher auf nationaler Ebene im LULUCF-Sektor berichtet und angerechnet wird und wie der biogene Kohlenstoff auf Gebäudeebene als materialinhärente Eigenschaft ausgewiesen wird. Nur auf nationaler Ebene in der Berichterstattungskategorie LULUCF kann der Speicher als Senke fungieren, sofern sich der Speicher über einen definierten Zeitraum vergrößert. Dies ist nicht gleichbedeutend mit den in einem oder mehreren Gebäuden aktuell gespeicherten Kohlenstoffmengen, die über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude ein Nullsummenspiel darstellen.

Zusätzlich werden durch Holzbau zukünftig große Mengen an Sekundärmaterial im Gebäudebestand gebunden, diese sollten so gestaltet werden, dass sie im Sinne einer Kaskadennutzung wiedereingesetzt werden können. Langfristig wird es auch durch den Waldumbau zu einer Veränderung der Produktpalette kommen hin zu mehr Laubholz. Allerdings ist noch nicht absehbar, ob die fehlenden Nadelholzmengen dann über Importe oder Änderungen in der Produktpalette umgesetzt werden.

### 3.3 Naturschutzmanagement

#### 3.3.1 Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen

##### 3.3.1.1 Arten- und Biotopschutz

Für die Entwicklung von Strategien zum Schutz von Arten und Biotopen im Klimawandel gibt es zwei zentrale Fragen. 1. Wohin werden sich Arten und Lebensgemeinschaften als Reaktion auf den zukünftigen Klimawandel hinbewegen? 2. Welche Arten und Lebensräume sind durch den zukünftigen Klimawandel

am stärksten gefährdet (Willis und Birks 2006)?

Hinter diesen Fragen verbergen sich wichtige Management- und Planungsfragen - zum Beispiel wie man sicherstellen kann, dass (a) potenzielle Verschiebungen des Artenspektrums und der Lebensräume in der Landschaft möglich sind und (b) die am meisten gefährdeten Arten und Regionen identifiziert und, sofern das möglich ist, geschützt werden (Thomas et al. 2004). Aufgrund der Klimaerwärmung verlagern bereits jetzt Arten aus einer Vielzahl von taxonomischen Gruppen ihr Verbreitungsgebiet in höhere geografische Breiten und Höhenlagen (z. B. Rosenzweig et al. 2007).

Obwohl in historischer Perspektive Schutzgebiete für den kurzfristigen Erhalt von Arten und Lebensräumen entscheidend waren, wurde bei ihrer Planung mit wenigen Ausnahmen nicht die langfristige und großräumige Dynamik von Ökosystemen als Teil dynamischer Landschaften berücksichtigt (Bengtsson et al. 2003). Das ist insbesondere der Fall in der ausgeprägten Kulturlandschaft Deutschlands, wo strikte Schutzgebiete nur einen geringen Flächenanteil ausmachen. So auch im Wald, in dem bis 2020 streng geschützte Waldschutzgebiete 5% der Waldfläche ausmachen sollten (BMUB 2007) und bisher ein Flächenanteil von ca. 3% erreicht worden ist (Engel 2019).

Dieses Defizit bestehender Schutzgebiete, die dynamische Entwicklung von Ökosystemen abbilden zu können, erhält mit dem Klimawandel eine noch größere Dimension. So wird geschätzt, dass global ca. 45% aller Schutzgebiete in temperierten Laub- und Mischwäldern bis 2070 bisher nicht dagewesene klimatische Bedingungen erfahren (Hoffmann et al. 2019). Der Klimawandel wird sich in den Schutzgebieten in diesen Breiten besonders stark auswirken, weil sie sich in vielen Fällen durch überwiegend kleine Flächen, eine geringe Höhenlage und geringe ökologische Heterogenität auszeichnen (Hoffmann et al. 2019). Die zu erwartenden Verschiebungen der Verbreitungsgebiete von Arten infolge des Klimawandels können in den meisten Fällen nicht innerhalb der Schutzgebietsgrenzen erfolgen (Araujo et al. 2011).

Daher kommt dem Schutz von Arten und Lebensräumen in der gesamten Waldlandschaft und über alle Waldbesitzformen hinweg eine Schlüsselfunktion bei der Anpassung an den Klimawandel zu (WBW und WBBGR 2020). Gleichzeitig ist es wichtig zu erkennen, dass die Lebensraumtypen, die wir bisher ausgewiesen haben, ein Konstrukt darstellen und sich in der Zukunft so nicht halten werden. Wie bereits jetzt zu beobachten ist, führt der Klimawandel zu einem selektiven Verschieben ganz bestimmter Arten auf Grund ihrer Eigenschaften (Bässler et al. 2013, Zeuss et al. 2014) und zu einer Verschiebung der Zusammensetzung der funktionalen Eigenschaften von Artengemeinschaften

(Blondeel et al. 2021). Daher kommt es zwangsläufig zu einer Neukombination von Arten in neu entstehenden und nur wenig vorhersehbaren Artengemeinschaften (siehe Kap. 1.2.1.4).

Weiterhin ist es wichtig zu realisieren, dass die Verbreitungsgebiete und Lebensräume nur bedingt verschiebbar sind. Die Arten, die z. B. in den Hochlagen der Mittelgebirge zu finden sind, können mit fortschreitender Erwärmung nicht in höhere Gebirgslagen ausweichen. Unter diesen Arten zeichnen sich bereits mögliche „Verlierer“ des Klimawandels ab, z. B. Auerhuhn und Ringdrossel, auch wenn bisher nicht in jedem Fall Klimawandeleffekte eindeutig von anderen Einflussfaktoren (Landnutzung, Waldbewirtschaftung, Prädation, etc.) zu trennen sind (Barras et al. 2021, Coppes et al. 2019).

Auch wenig mobile Arten, die an bestimmte Bodenbedingungen gebunden sind, z. B. den Wasserhaushalt, pH-Wert und Nährstoffausstattung, können nur schwerlich in neue, klimatisch zuträgliche Lebensräume mit ähnlichen Bodenbedingungen migrieren, wenn diese durch großflächige Standorte mit anderen Bodenverhältnissen abgetrennt sind (Baur und Baur 1993, Dirnböck et al. 2011). Arealverschiebungen insbesondere von wenig mobilen Arten werden zudem durch die Zerschneidung der Landschaft und Lebensräume behindert oder sogar unmöglich gemacht. Zum Beispiel reduziert die Fragmentierung des Waldlebensraums in Europa die Migrationsraten von Waldbodenpflanzen auf Werte, die um eine Größenordnung unter den Migrationsraten liegen, die erforderlich wären um mit der Geschwindigkeit der Klimawandels Schritt zu halten (Dullinger et al. 2015).

Diese Befunde geben einen deutlichen Hinweis darauf, dass, anstatt die Schutzbemühungen hauptsächlich auf Schutzgebiete zu konzentrieren, die Erleichterung der Bewegung von Arten durch die Landschaft eine Priorität für den Naturschutz darstellen sollte (siehe Kap. 3.3.1.3).

Angesichts des Klimawandels bieten sich für den Schutz von Arten und Lebensräumen in der Waldlandschaft außerhalb von strengen Schutzgebieten folgende Anpassungsziele und Handlungsoptionen. Zunächst sollten alle Arten in ihrem Vorkommen dort erhalten werden, wo dies aufgrund der zu erwartenden klimatischen Veränderungen möglich ist. Dabei sollten möglichst große, genetisch diverse Populationen erhalten oder geschaffen werden.

Da der Klimawandel in den meisten Situationen nur einer von mehreren Stressfaktoren ist, sollten negative Einflüsse anderer Faktoren wie Habitatfragmentierung, Nutzungsintensität, invasive Arten, möglichst reduziert werden. Beispielsweise profitieren viele Waldbodenpflanzen von dem kühleren und ausgeglicheneren Waldinnenklima unter einem geschlossenen

Kronendach (De Frenne et al. 2019). So können Auswirkungen der makroklimatischen Erwärmung in einem gewissen Rahmen durch mikroklimatische Effekte abgepuffert werden. Eine Heterogenität in der Beschaffenheit des Kronendachs in bewirtschafteten Wäldern könnte so dafür sorgen, dass sowohl licht- und wärmeliebende Arten wie auch schattentolerante und temperaturempfindliche Arten erhalten werden können (De Frenne et al. 2015, Seibold et al. 2016).

Auch die Restauration der Ökosysteme zur Aufwertung des Lebensraums spielt hier eine wichtige Rolle. Dazu zählt insbesondere die Gestaltung von arten- und strukturreichen Wäldern durch die Erhöhung des Baumartenreichtums, den Erhalt und die Schaffung von Habitatbäumen und Totholz (WBW und WBBGR 2020). Diese Maßnahmen können gut mit der Anpassung von Waldbeständen an den Klimawandel verbunden werden. Aufgrund der Wirtsspezifität oder Präferenz taxonomischer und funktioneller Gruppen wie pilzlicher Pathogene, holzbewohnender Pilze, xylobionter Käfer, Mykorrhizapilze oder Herbivoren (Brändle und Brandl 2001, Ishida et al. 2007, Purahong et al. 2018) bietet jede Baumart Lebensraum und Ressourcen für Hunderte anderer Arten im Nahrungsnetz des Ökosystems. Die Anzahl verschiedener Baumarten ist daher von großer Bedeutung für die Habitatvielfalt auf Bestandesebene und somit auch für die Zuträglichkeit und Durchlässigkeit für Arten, die ihre Verbreitungsgebiete verschieben.

Schwieriger gestaltet sich die Frage, wie man mit Arten umgehen soll, bei denen aufgrund Ihrer klimatischen Toleranz und/oder des klimabedingten Verlustes an Lebensraum konstatiert werden muss, dass sie lokal aussterben werden. Hier bieten sich eventuell Umsiedlungsmaßnahmen an, wenn an anderer Stelle passendes, und nicht bereits besetztes Habitat besteht (siehe Kap. 3.3.1.4). Bei vom Klimawandel bedrohten Vorkommen von Arten, die bisher durch aufwändige Schutzprogramme gestützt wurden, stellt sich die Frage, ob hier Abbruchkriterien definiert werden bzw. entwickelt werden sollten, um die knappen Ressourcen für den Naturschutz an anderer Stelle zielführender einzusetzen.

Bei Arten, von denen aufgrund vielfältiger Interaktionen wiederum viele andere Arten abhängen, zum Beispiel Bäume, sollte nach Möglichkeiten gesucht werden, durch Ersatzarten möglichst vielen dieser abhängigen Arten einen zukünftigen Lebensraum zu bieten. Gegenwärtig sind mehrere einheimische Baumarten bedroht oder haben einen Rückgang ihrer Populationen und Verbreitung aufgrund von Krankheiten. Der Verlust solcher strukturbildenden Arten kann zu einem massiven Artenschwund führen.

Die Holländische Ulmenkrankheit hat in Europa zu einem hohen Verlust von Ulmen geführt (Potter et al.



2011) und europäische Pinus-Arten inkl. *Pinus sylvestris* sind durch die Kiefernneematode bedroht (Hopf-Bizikis et al. 2016), die bereits auf der iberischen Halbinsel angekommen ist. Die Gemeine Esche, ist durch das Eschentriebsterben, verursacht durch den Ascomyceten *Hymenoscyphus fraxineus*, in ganz Europa in ihrem Bestand bedroht (Kjær et al. 2012).

Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Eschentriebsterben zeigten, dass mit dem Verschwinden der Gemeinen Esche sehr viele andere Arten aus europäischen Wäldern verloren gehen könnten; allein in Schweden wurden unter Berücksichtigung der Stärke der Assoziation mit der Esche und des Erhaltungszustands der Arten, insgesamt 115 Arten als regional stark gefährdet eingestuft (Hultberg et al. 2020). Um einem solch massiven Artenverlust entgegenwirken zu können, untersuchten Mitchell et al. (2016) in welchem Umfang der Artverlust durch andere einheimische Baumarten kompensiert werden kann. Ein möglichst hoher Anteil (in der Größenordnung von 20%) der am meisten gefährdeten Arten, die entweder obligat an der Gemeinen Esche gebunden oder eng mit ihr assoziiert sind, konnte nur durch den Ersatz der Esche mit einer Kombination mehrerer Ersatzbaumarten erreicht werden.

Um den erheblichen Artenschwund, der mit dem Verlust von Baumarten einhergeht, zu vermeiden oder zu reduzieren, sollte beim Auftreten neuer Krankheiten und Schadorganismen, die die Existenz bestimmter Baumarten bedrohen können, sehr schnell nach alternativen, funktional ähnlichen Baumarten(kombinationen) gesucht werden.

Mit dem Klimawandel gehen aber nicht nur Arten verloren, sondern es wandern auch neue Arten ein. Szenarioanalysen deuten darauf hin, dass die phylogenetische Diversität in Europa aufgrund des Klimawandels insgesamt abnehmen und es zu einer stärkeren Homogenisierung kommen wird (Thuiller et al. 2011). Durch die Migration der Arten wird das Risiko des Verlusts erheblich reduziert (Thuiller et al. 2005). Die Verlagerung der Verbreitungsgebiete der Arten bedeutet auch, dass sich lokale und regionale Zuständigkeiten für den Schutz bestimmter Arten verändern.

Wenn neue Arten einwandern, die in ihrem Gesamtbestand gefährdet sind, sollten diese in entsprechende Artenschutzprogramme aufgenommen werden. Daher sollten an zentraler Stelle, z. B. dem Bundesamt für Naturschutz, regelmäßige Überprüfungen des Zustandes von Arten erfolgen, etwa alle 5 Jahre, um festzustellen, welche Arten man in einer Region verliert und welche Arten man dazu gewinnt. Dafür wird ein robustes Biodiversitätsmonitoring

benötigt. Auf dieser Grundlage können Entscheidungen über die Aufnahme bzw. Aufgabe von Artenschutzprogrammen getroffen werden. Zu diesem Zweck sollten aber klare Kriterien entwickelt werden, ab wann man sich um neue Arten kümmern sollte. Die Empfehlungen zur Aufnahme bzw. Aufgabe von Artenschutzprogrammen könnten dann beispielsweise nach Konsultationen von Expertinnen und Experten und in Koordination mit Nachbarländern ausgesprochen werden, um eine europäische Perspektive auf den Erhaltungszustand der Arten zu berücksichtigen.

### 3.3.1.2 Design und Management von Schutzgebieten

Schutzgebiete in ihren unterschiedlichen rechtlichen Kategorien gelten als die Kernstücke des Flächenschutzes. Die Festlegung von Schutzziele ist dabei die wesentliche Grundlage des Managements dieser Gebiete. Es ist abzusehen, dass der Klimawandel manches Schutzziel beeinträchtigt oder gar obsolet werden lässt. Insofern sind Schutzziele künftig möglichst weit zu fassen. Im Falle zu eng gefasster, etwa an einzelnen Arten festgemachter Schutzziele besteht die Gefahr des allzu schnellen Wegfalls der Schutzwürdigkeit durch den Klimawandel. Jedenfalls wird es in solchen Fällen nötig werden, Schutzziele anzupassen.

Dies ist umso wahrscheinlicher, als die Ausweisung neuer geschützter Gebiete nur in Ausnahmefällen nötig sein wird und bestehende Schutzgebiete nicht beliebig vergrößert und verbunden werden können. Auch stößt eine klimawandelbedingte Verschiebung von Gebieten in bisher noch kühlere Regionen auf biologische, rechtliche und im Landbesitz liegende Hindernisse.

Wie mit Schutzziele umzugehen ist, wenn diese wegen Klimaänderungen nicht mehr erreicht werden können, muss für die betroffenen Gebiete geklärt werden. Dies gilt nicht für Prozessschutzgebiete. Da hierzu kaum Erfahrungen vorliegen, ist die Vorabfestlegung von „Sollbruchstellen“ für Schutzziele derzeit kaum möglich und am einzelnen Gebiet festzumachen. Ausdrücklich bezieht sich diese Feststellung auf klimawandelbedingte Änderungen. In Gebieten, bei denen wegen Bewirtschaftungseffekten das Schutzziel nicht zu halten ist oder die Befürchtung dazu besteht, sollte die Priorisierung unbedingt dahingehen, im Interesse der Erreichung und Bewahrung des Schutzzieles die Bewirtschaftungsform anzupassen.

Im Management von Schutzgebieten kann die Anpassung der Baumartenpalette an zukünftige Klimabedingungen im Rahmen einer „Prestation“<sup>4</sup>

4 Restoration, die darauf abzielt, die zukünftige Funktionsfähigkeit der Ökosysteme unter den Bedingungen des Klimawandels durch geeignete Baumarten(kombinationen) und Strukturen zu gewährleisten

vorgesehen werden, z. B. in bewirtschafteten FFH-Gebieten, wiederum aber nicht in Prozessschutzgebieten. Ein aufkommendes Problem können die für Natura 2000-Gebiete bestehenden Verschlechterungsverbote werden, wenn die Schutzziele eng gefasst sind und Prozesse des Klimawandels dazu führen, dass diese so nicht gehalten werden können. Insofern sollten Prozessschutzgebiete nicht mit Natura 2000-Status überlagert werden, da im Zuge des Klimawandels die Konflikte zwischen Schutzzielel znehmen werden, es sei denn, der Prozessschutz und nicht eine bestimmte Vegetationsform oder ein Lebensraumtyp bildet das Ziel der Unterschutzstellung.

Problematisch dürften sich insbesondere kleinere Schutzgebiete unter dem Einfluss des Klimawandels entwickeln, welche als repräsentative und vielfältige Lebensraumtypen in den Landschaften heute durchaus große Bedeutung und Berechtigung haben. Ihnen gilt im Interesse der Erhaltung der Diversität der Landschaft besonderes Augenmerk.

Für größere Schutzgebiete sind die Gefahren als weniger gravierend einzuschätzen. Insofern ist die seit Jahrzehnten geführte SLOSS-Debatte (Single Large or several small reserves) vor allem in Deutschland mit seinen vielen kleinen Naturschutzgebieten nicht zielführend, wenn das „Oder“ zu Ungunsten von kleinen Gebieten ausgelegt wird. Hierzu schlagen Förchler et al. (2013) zu Recht vor, das „Oder“ durch ein „Und“ zu ersetzen (Single Large and Several Small).

#### 3.3.1.3 Biotopverbund

Für viele Pflanzen- und Tierarten wurden Verschiebungen im Verbreitungsgebiet als Folge der klimatischen Veränderungen nachgewiesen (siehe Kap. 1.2.1.4). Damit dies möglich ist, müssen neben geeignetem Lebensraum in klimatisch passenden Regionen Korridore oder Biotopverbundsysteme vorhanden sein, die eine Verschiebung in klimatisch passende Regionen ermöglicht. Viele Waldarten werden diese Verbreitungsverschiebungen allerdings nicht mitmachen können, denn die meisten Bäume wandern mit Geschwindigkeiten von 115 bis 550 m pro Jahr, wobei Bäume der frühen Sukzessionsphase schneller wandern als Bäume der mittleren und späten Sukzessionsphase (Feurdean et al. 2013).

Auch viele Waldtierarten wie etwa Schnecken, flugunfähige Totholzkäfer, kleine Säugetiere und allgemein Bodenlebewesen weisen eine geringe Mobilität auf. Aufgrund der fortschreitenden Klimaerwärmung konnte mit Daten aus Monitoring-Programmen auf den britischen Inseln bei den meisten Arten eine Erweiterung der Verbreitungsgebiete nach Norden um 20 bis 80 km in etwa 25 Jahren nachgewiesen werden (Hickling et al. 2006). Die Ausnahme bildeten

Amphibien und Reptilien, aber auch anderen Gruppen zeigten große zwischenartliche Unterschiede.

Da das Ausmaß der Klimaerwärmung wesentlich größere Verschiebungen erfordert, ist es von zentraler Bedeutung, einen funktionierenden Biotopverbund zu schaffen, welcher klimabedingte Verbreitungsverschiebungen ermöglicht und damit gleichzeitig die Biodiversität, ihre Funktionen und Leistungen erhält (Drobik et al. 2013).

Zentrale Elemente des Biotopverbundsystems beinhalten die Vergrößerung und qualitative Verbesserung der Kernflächen und die Schaffung von Trittsteinen und Korridoren (Fahrig 2013, 2019). Hierbei sollte im Zuge des Klimawandels neben der qualitativen Verbesserung auch die klimatische Vielfalt der Schutzgebiete berücksichtigt werden, um eine Verschiebung von Arten im Gebiet selber zu ermöglichen. Hierzu sind große und genetisch diverse Populationen notwendig (Gregorius 1996, Wagner et al. 2010), um überhaupt ausreichend abwandernde Individuen zu erzeugen. Die Trittsteine und Korridore sollten so ausgewählt werden, dass klimatisch passende Biotope Wanderoptionen bieten.

Auch die umgebende Matrix sollte in der Bewirtschaftung so angepasst werden, dass die Durchlässigkeit für Wanderungen optimiert wird. Diese kann durch eine systematische Biotopverbundplanung mit einer ausreichenden Anzahl segregativer Kernflächen eingebettet in eine integrative Matrix erreicht werden. Hierbei sollte eher auf mehrere hochwertige Kernflächen mit klimatischer Vielfalt als auf die Ausweisung einer großen Fläche gesetzt werden (Fahrig 2013, 2019).

#### 3.3.1.4 Assisted Migration, Umsiedlung und Neuansiedlung von Arten

Auf Grund der langen Nutzungsgeschichte liegen in Deutschland viele Lebensräume nur noch in Fragmenten vor. Viele bedrohte Arten harren dabei in Restpopulationen auf noch geeigneten Flächen über zum Teil sehr lange Zeiträume aus. Wenn jetzt durch rasche Klimaveränderungen lokale Lebensräume ihre Eignung verlieren, droht ein Aussterben solch isolierter Vorkommen. Grundsätzlich kann man versuchen, mit Habitatverbesserungen oder Verbundelementen in der Landschaftsmatrix dagegen anzugehen. Bestimmte Habitate, wie beispielsweise alte Bäume, sind aber nicht in wenigen Jahrzehnten neu zu schaffen. Hier ist die aktive Verfrachtung von Arten ein Mittel, welches im Bereich von Baum- und Straucharten und anderen krautigen Pflanzenarten bereits heute regelmäßig zum Einsatz kommt.

Anders sieht die Situation bei Insekten oder wenig mobilen Wirbeltieren wie Amphibien und Reptilien

aus. Hier bestehen immer noch große Unsicherheiten über die Erfolgsaussichten und die Notwendigkeit. Dabei steigt die wissenschaftliche Erkenntnis, dass derartige Verfrachtungen insbesondere im Klimawandel notwendig werden und gleichzeitig nur geringe Risiken für andere Arten darstellen (Thomas 2011) soweit die Arten heimisch und die Ansiedlung im projizierten Verbreitungsraum erfolgt (Webber et al. 2011).

Gleichzeitig können Verfrachtungen auf Grund der geringen Kosten eine effiziente Ergänzung zu Ansätzen sein, in denen Lebensräume im Anschluss an bestehenden Populationen geschaffen werden (Tainio et al. 2016). Zum Beispiel wurde in England mithilfe von Habitatmodellen gezielt neuer Lebensraum für bedrohte Schmetterlingsarten im Klimawandel identifiziert und dort dann neue Populationen bedrohter Arten über Verfrachtung erfolgreich etabliert (Willis et al. 2009). Auch in Finnland wurden erfolgreich Schmetterlinge verfrachtet (Kuussaari et al. 2015). In Tschechien wurde eine bedrohte Totholzkäferart (*Cerambyx cerdo*), die gleichzeitig als Ökosystem-Ingenieur fungiert, angesiedelt (Drag und Cizek 2015). Dadurch wurden auch weitere bedrohte Arten gefördert.

Eine Meta-Analyse von 74 verschiedenen Verfrachtungsexperimenten von Insekten hat gezeigt, dass der wichtigste Erfolgsfaktor die Zahl der ausgebrachten Individuen war. Als weitere Faktoren wurden Wetter, Klima und Habitatqualität angeführt (Bellis et al. 2019). Die hohen Erfolgsaussichten und gleichzeitig geringen Kosten gegenüber Verfrachtungsexperimenten bei Wirbeltieren legen nahe, dieses Instrument auch für Wirbellose im Klimawandel besser zu etablieren.

Bei Pflanzen ist der Erhalt von Arten über Samenbanken und die gezielte Ansiedlung in ehemaligen Verbreitungsgebieten schon länger als Naturschutzmaßnahme etabliert. Im Klimawandel werden verschiedene Strategien vorgeschlagen, wie der Erhalt von Pflanzenarten durch aktive Maßnahmen unterstützt werden kann (Vitt et al. 2010). Pilze verfügen generell über eine sehr hohe Ausbreitungsfähigkeit über ihre Sporen. Trotzdem haben viele spezialisierte Arten Probleme die wenigen geeigneten Lebensräume, beispielsweise im Totholz, erfolgreich zu besiedeln. Daher wird auch hier aktive Ansiedlung durch eine Beimpfung erfolgreich eingesetzt (Abrego et al. 2016). Letztendlich sollten, auch um Misserfolge zu vermeiden, bei allen aktiven Ansiedlungen auch im Klimawandel die Grundsätze der IUCN Kriterien für Wiederansiedlung beachtet werden (IUCN 2013).

### 3.3.1.5 Management invasiver Arten

Biologische Invasionen werden weltweit als ein wichtiger Treiber des Verlustes von Biodiversität gesehen, auch in Wäldern. Durch die Globalisierung von Handel und Reisen nimmt die Ausbreitung nicht-heimischer Arten weiterhin zu (siehe 1.2.1.4). Ein Teil dieser Arten, von Viren und Bakterien bis hin zu Pilzen, Pflanzen und Tieren, etabliert sich und verursacht schwerwiegende Auswirkungen auf die Umwelt, die Wirtschaft und die menschliche Gesundheit (Keller et al. 2011). Im Naturschutz werden solche gebietsfremden Arten als invasiv bezeichnet, die erhebliche unerwünschte Auswirkungen auf andere Arten, Lebensgemeinschaften oder Biotope haben (Nehring et al. 2013). Zum Beispiel treten invasive Arten mit einheimischen Arten in Konkurrenz um Lebensraum und Ressourcen und verdrängen diese. Als Schadorganismen oder Krankheiten beeinträchtigen sie die Vitalität anderer Arten bzw. führen zur bestandsbedrohenden Mortalität (z. B. Eschentriebsterben). Sie können selbst auch als Überträger von Krankheiten und Parasiten auftreten oder als Räuber können sie die Populationen von Beutetieren negativ beeinflussen, was insbesondere bei gefährdeten Arten kritisch sein kann (Kauhala und Kowalczyk 2011, Hulme 2007, Soliman et al. 2012).

In Bezug auf die Anpassung der Wälder an den Klimawandel sind insbesondere zwei Aspekte von Bedeutung: 1) die mögliche Verstärkung der Ausbreitung invasiver Arten als Folge des Klimawandels und nachfolgende Auswirkungen auf Waldökosysteme, 2) die mögliche Etablierung und Ausbreitung invasiver Arten, z. B. eingeführter Baumarten, im Zuge von Anpassungsstrategien.

In ersterem Fall sind insbesondere solche invasiven Arten von Bedeutung, die als Pathogene und herbivore Insekten Baumarten in ihrem Bestand gefährden. Viele dieser Invasionen von herbivoren Insekten und Krankheitserregern haben erhebliche Verluste von Habitaten und Ökosystemleistungen, die von Bäumen bereitgestellt werden, sowie wirtschaftliche Auswirkungen verursacht. Auch wenn bisher die Wechselwirkungen zwischen invasiven Schadorganismen und dem Klimawandel nur schwer vorherzusagen sind, zeichnet sich ab, dass sich die kumulativen Auswirkungen auf die Waldökosysteme verschärfen (Ramsfield et al. 2016).

In einer Modellierungsstudie wurde anhand von fünf ausgewählten Schadorganismen und Pathogenen (Asiatischer Laubholzbockkäfer, *Anoplophora glabripennis*, Kiefernneematode, *Bursaphelenchus xilophilus*, Plötzlicher Eichentod, *Phytophthora ramorum*, Buchenkrebs, *Phytophthora kernoviae*, und Kiefernpechkrebs, *Fusarium circinatum*) gezeigt, dass

der Klimawandel bei einem moderaten Temperaturanstieg das potenzielle Verbreitungsgebiet dieser gebietsfremden, bereits in Europa auftretenden Arten deutlich vergrößern würde (Seidl et al. 2018). Das Schadpotenzial dieser Arten, vor allem der beiden erstgenannten, auf die lebende Baumbiomasse wird ähnlich gravierend eingeschätzt, wie das derzeitige natürliche Störungsregime in Europa, das im Wesentlichen durch Stürme, Feuer und Borkenkäfer bestimmt wird. Welche Auswirkungen eine weitere Verbreitung dieser Arten auf die Biodiversität haben könnte, ist bisher nicht bekannt.

Während Störungen, die für mehr Licht und Totholz in den Wäldern sorgen, in vielen Fällen zunächst positive Auswirkungen auf die Diversität vieler Waldarten haben (Hilmers et al. 2018), können über den regionalen oder den weitgehend vollständigen Verlust von Baumarten über invasive Krankheiten und Schadorganismen massive Verluste der Biodiversität eintreten. Die Abschätzungen der Verluste einheimischer Arten mit dem Verschwinden der Esche (*Fraxinus excelsior*) durch das Eschentriebsterben für Großbritannien und Schweden geben ein eindruckliches Bild der möglichen Konsequenzen (Mitchell et al. 2014, Hultberg et al. 2020). Die Habitat- und Ökosystemfunktionen einer Baumart können dabei nicht einfach durch eine andere Baumart übernommen werden, insbesondere wenn, wie im Falle der Esche, die der einzige Vertreter der Gattung in einer Waldgesellschaft ist (Mitchell et al. 2016, Broome et al. 2019).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass ein Verlust von Baumarten mit erheblichen negativen Konsequenzen für die Waldbiodiversität und die Funktionalität unserer ohnehin relativ baumartenarmen Wälder einhergehen wird. Daher müssen die Anstrengungen darauf konzentriert werden, die Einschleppung von Arten zu vermeiden, das Auftreten neuer Krankheiten und Schadorganismen möglichst früh zu erkennen, und die weitere Ausbreitung bereits eingeschleppter invasiver Organismen möglichst zu unterbinden.

Bisher war unsere Gesellschaft in den meisten Fällen nicht in der Lage, rechtzeitig und in effektiver Weise zu reagieren, um diese neuen und invasiven Krankheiten zu stoppen (Stenlid et al. 2011). Die Empfehlungen, die sich daraus zum Schutze der Biodiversität ableiten lassen, entsprechen weitgehend den Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Waldschutzes (siehe Kap. 4.2).

Während die forstliche Produktion zum Teil auf Ersatzbaumarten ausweichen kann, ist dies für die heimische Biodiversität nur bedingt möglich. Hier ist es notwendig, bei Auftreten artbedrohender Krankheiten zügig Forschungsprogramme zur Identifizierung von Resistenzen und wenn möglich zur Züchtung

resistenter Individuen und Populationen einzuleiten, wie dies gegenwärtig bei der Esche der Fall ist (Sollars et al. 2017, Enderle et al. 2019). Wie im Falle der Nordamerikanischen Esskastanie (*Castanea dentata*), die vom Kastanienrindenkrebs (*Cryphonectria parasitica*) in ihrem Bestand bedroht ist, demonstriert wurde, kann auch durch die Hybridisierung mit einer verwandten, resistenten Art der gleichen Gattung (*C. mollissima*) und nachfolgender Rückkreuzung eine Baumart entwickelt werden, die die ökologischen Funktionen der ursprünglichen Art übernehmen kann (Jacobs et al. 2013).

Um Wälder an den Klimawandel anzupassen, wird in der Waldwirtschaft neben bisher seltenen einheimischen auch auf eingeführte Baumarten zurückgegriffen (Vor et al. 2015, Thurm et al. 2018, Albrecht und de Avila 2018). Die Verwendung nicht heimischer Arten wird aus naturschutzfachlicher Sicht häufig kritisch gesehen, da diese Baumarten, bei einem geringen Grad der Verwandtschaft mit heimischen Baumarten (Gossner 2016), in der Regel weniger heimischen Arten Habitat bieten und einige von ihnen als invasiv oder potenziell invasiv angesehen werden (Felton et al. 2013, Dumas 2016).

Für die bereits in der Vergangenheit eingeführten Baumarten liegen eine Reihe von Beurteilungen ihrer (potenziellen) Invasivität vor (Nehring et al. 2013, Vor et al. 2015). Diese Beurteilungen divergieren teilweise erheblich, unter anderem weil unterschiedliche Kriterien verwendet und gleiche Kriterien unterschiedlich gewichtet werden, viele Bewertungen auf einer unzureichenden Datenbasis zur Quantifizierung von Invasionsrisiken vorgenommen werden und vielfach nicht zwischen Risiken, die von eingeführten Baumarten auf verschiedenen Standorten bzw. in unterschiedlichen Ökosystemen ausgehen, differenziert wird (Bindewald et al. 2020).

Grundsätzlich kann man aufgrund bisheriger Risikobewertungen zwischen solchen Baumarten unterscheiden, die a) als eindeutig invasiv eingestuft werden (z. B. *Prunus serotina*, *Fraxinus pennsylvanica*), b) als nicht invasiv eingestuft werden (z. B. *Larix kaempferi*), c) bei denen ein potenzielles Risiko als gering und durch die Waldbewirtschaftung kontrollierbar eingeschätzt wird (z. B. *Pseudotsuga menziesii*), und d) bei denen die Informationsgrundlage zu dürftig ist, um zu einer abschließenden Einschätzung zu gelangen (z. B. *Paulownia tomentosa*) (Vor et al. 2015).

In waldbaulichen Anpassungsstrategien sollte man sich daher auf Baumarten der Kategorien b) und c) fokussieren und gleichzeitig die Informationsgrundlage für Risikobewertungen durch ein explizites Monitoring dieser Baumarten in verschiedenen Inventuren (z. B. Bundeswaldinventur, Betriebsinventuren, Biotopkartierungen) laufend verbessern (Bindewald et

al. 2021). Letzteres erscheint vor allem in Hinblick auf die Unsicherheiten geboten, die mit der Populationsentwicklung eingeführter Arten unter zukünftig veränderten Störungsregimen einhergehen.

Die wenigen bisherigen Untersuchungen in Mitteleuropa, können die Rolle von Störungen als Auslöser für biologische Invasionen durch eingeführte Baumarten nicht bestätigen (Dyderski et al. 2018). Eine Bewertung des Risikos einer potenziellen Invasivität (oder anderer negativer ökologischer Auswirkungen) sollte fester Bestandteil der Überprüfung der Anbauwürdigkeit von Baumarten sein, wie dies bereits in den meisten Fällen geschieht (Albrecht und de Avila 2018). Für bereits in der Vergangenheit eingeführte, als invasiv eingestufte Baumarten sind waldbauliche Systeme und Bewirtschaftungsplanungen auf Landschaftsebene zu entwickeln, die geeignet sind, diese Arten zurückzudrängen bzw. eine weitere Verbreitung und negative Auswirkungen auf die Ökosysteme zu kontrollieren und zu reduzieren (Petersen 2014, Quadt et al. 2016). Vielfach fehlt es hier noch an den erforderlichen Grundlagen (Felton et al. 2013).

### 3.3.2 Wechselbeziehung und Anpassungshemmnisse

#### Konflikte zwischen waldbirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Zielen

Vor dem Hintergrund der Anpassung der Wälder und Waldwirtschaft an den Klimawandel ergeben sich einige mögliche Konflikte mit anderen Zielen wie beispielsweise naturschutzfachlichen Zielen (Reif et al. 2010). Dazu gehört eine vermehrte Verwendung eingeführter Baumarten, die in eine geringere Habitatfunktion als einheimische Baumarten aufweisen können und teilweise auch als potentiell invasiv angesehen werden (Vor et al. 2015). Die Diskussion über eingeführte Arten zwischen Forstwirtschaft und Naturschutz wird nach wie vor sehr emotional geführt, was zum guten Teil auch an der mangelnden Evidenz liegt (Gossner 2016).

Ein weiterer Bereich, in dem waldbauliche Anpassungsstrategien mit naturschutzfachlichen Zielen potenziell in Konflikt stehen, ist die Verkürzung der Produktionszeiten zur Verminderung der Vulnerabilität gegenüber Stürmen und Trockenstress (Reif et al. 2010). Zur Abmilderung dieser Zielkonflikte kann die Bereitstellung von Habitat in Form von alten und großen Bäumen durch separate Ausweisungen von Habitatbäumen, Altholzinseln und ähnliche integrative Naturschutzinstrumente erfolgen (Bollmann und Braunisch 2013, Gustafsson et al. 2020). Während von forstlicher Seite in vielen Fällen ein aktiver Waldumbau zur Anpassung der Baumartenzusammensetzung

an ein zukünftiges Klima als notwendig angesehen wird, wird seitens des Naturschutzes häufig eine passive Anpassung über natürliche Verjüngungs- und Sukzessionsprozesse bevorzugt (Reif et al. 2010).

Ein weiterer Zielkonflikt ergibt sich aus dem Schutz temperaturempfindlicher Arten durch den Erhalt eines geschlossenen Kronendachs auf der einen Seite (z. B. de Frenne et al. 2021) und der Förderung von Vorverjüngung durch Auflockerung des Kronendachs, um die Resilienz des Systems gegenüber Störungen zu erhöhen (Bauhus et al. 2013). Diese unterschiedlichen Ziele lassen sich offensichtlich nur durch eine räumliche Separation der verschiedenen Bestandesstrukturen erreichen.

In Bereichen des amtlichen und nichtamtlichen Naturschutzes besteht vielfach die Vorstellung, dass die Natürlichkeit von Prozessen (z. B. Naturverjüngung) im Sinne einer Eigendynamik für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel von größerer Bedeutung sei als ein aktiver Waldumbau, mit dem gezielt standortsangepasste Baumarten eingebracht werden, die eine höhere Toleranz gegenüber zukünftigen klimatischen Bedingungen aufweisen (BfN 2020). Dies wird vor allem mit einer hohen genetischen Diversität begründet, wobei die Frage der genetischen Eignung der Baumarten in den Hintergrund tritt. Möglicherweise besteht hier auch ein Misstrauen gegenüber modellierten zukünftigen Baumartenverteilungen, aus denen Entscheidungen zu der Baumartenzusammensetzung abgeleitet werden.

Eine Überschätzung des Potenzials der bisherigen am Standort vorkommenden Baumarten sich in kurzer Zeit „anzupassen“, kann durch die Verjüngungsfreudigkeit dieser Baumarten begründet sein. Dabei wird leicht verkannt, dass es zu einer Entkopplung kommen kann zwischen der Fähigkeit, sich zu verjüngen, und dem Potenzial, sich am Standort in reife und alte Bäume zu entwickeln, denn viele der Klimarisiken betreffen insbesondere große und alte Bäume. Diese Art von Entkopplung ist z. B. bei einigen Krankheiten wie dem Ulmensterben oder der Buchenrindennekrose (Elenitski et al. 2020) zu erkennen. Die sehr konkurrenzfähige Verjüngung einer Baumart wie der Buche kann daher sogar als „Anpassungsbremse“ wirken, wenn sie die künstliche oder natürliche Verjüngung anderer, besser angepasster Baumarten behindert.

#### Anpassungshemmnisse im Schutzgebietsmanagement

Obwohl das Problem seit einiger Zeit bekannt ist, wurden regionale Klimawandelszenarien bei der Ausweisung von Schutzgebieten bisher so gut wie nicht bzw. unzureichend berücksichtigt (Hoffmann et al. 2019).

Aufgrund ihrer vielfach geringen Größe bzw. einer geringen topographischen Variation, werden viele lebensraumtypische Arten dort zukünftig keine geeigneten Habitatbedingungen mehr vorfinden, so dass für bestimmte Schutzkategorien auch der Schutzzweck hinterfragt werden kann. Das Problem wird dadurch verschärft, dass eine Ausweitung bestehender Schutzgebiete wegen unterschiedlicher Waldbesitzverhältnisse bzw. der Fragmentierung der Landschaft häufig nicht möglich ist.

Der häufig sehr statische Ansatz in der Planung und der Bewirtschaftung von Schutzgebieten erschwert zudem die Anpassung. Dies betrifft z. B. auch das Verschlechterungsverbot in Natura 2000 Gebieten, wo nach §33 BNatSchG alle Handlungen von Waldbewirtschaftern, die zu Verschlechterungen von Natura 2000-Schutzgütern in den Natura 2000-Gebieten führen, verboten sind. Werden klima- oder störungsbedingte Verschlechterungen gegenüber einem im Managementplan beschriebenen Referenzzustand festgestellt, so sind diese nicht den Waldbewirtschaftern anzulasten, da sie nicht durch ein aktives Handeln des Bewirtschafters verursacht wurden, z. B. das Absterben eines FFH-Buchenwaldes aufgrund von Trockenstress. Mehr Totholz in Form der abgestorbenen Buchen könnte kurz- bis mittelfristig zunächst eine Aufwertung, also eine Verbesserung des Waldlebensraumtyps bedeuten. Wenn jedoch Waldbesitzende die abgestorbenen Buchen zur Begründung eines Folgebestandes einschlägt, um klimaangepasste Baumarten zu pflanzen, die nicht zu den lebensraumtypischen Gehölzen gehören, kann dies als Verschlechterung interpretiert werden.

Bisher bestehen keine Konzepte für temporäre Waldschutzgebiete, um einige der Probleme mit statischen Schutzgebieten zu überwinden. Temporäre Schutzgebiete könnten ein sinnvolles Konzept darstellen, wenn a) absehbar ist, dass die Schutzgüter nur von begrenzter Dauer sind wie z. B. eine totholzreiche, frühsukzessionale Phase der Bestandesentwicklung nach Störung (WBW und WBBGR 2020) oder b) die mittel- bis langfristige Erfüllung des Schutzzweckes vor dem Hintergrund der klimawandelbedingten Veränderungen zu unsicher ist und daher einer Überprüfung bedarf.

#### **Konflikte naturschutzfachlicher Ziele mit weiteren Sektoren**

Weitere Zielkonflikte mit naturschutzfachlichen Zielen bestehen auch mit anderen Sektoren. Andere Sektoren (Energie, Gebäude, Industrie) sind auf die Verwendung von Holz für die Erreichung ihrer Emissionsminderungsziele angewiesen. Eine Reduktion der Nutzung von Holz aus heimischen Wäldern zur

Erhöhung der Biomasse- und Totholzvorräte würde hier sehr wahrscheinlich zu einer erhöhten Einfuhr von Holz führen, die nicht zu einer Verbesserung des Klimaschutzes führt (WBW 2021). Auch um das knappe Gut Wasser wird die Konkurrenz zunehmen. Während trockener und heißer Witterung steigt der Bedarf für Wasser zur Kühlung in der industriellen Produktion, der Bewässerung in der Landwirtschaft und zum Verbrauch in privaten Haushalten. Dies führt zu vermehrter Entnahme von Grundwasser unter Wald. Diese Grundwasserentnahme führt zur Schwächung der Vitalität und Erhöhung der Baum mortalität in den betroffenen Wäldern (Skiadaresis et al. 2021). Davon sind insbesondere alte Bäume betroffen.

#### **Synergien zwischen waldwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Strategien**

Zwischen waldwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Anpassungsstrategien gibt es eine Vielzahl von Synergien (z. B. Reif et al. 2010). Dazu gehört die Diversifizierung der Baumarten, die Erhöhung der Mischungsanteile und der strukturellen Diversität in naturnahen Wäldern sowie die stärkere Berücksichtigung von bisher seltenen Baumarten im Waldumbau, weil eine höhere Baumartendiversität die Diversität anderer Artengruppen im Wald stärkt (Ampoorter et al. 2020).

Klimawandelbedingte Störungen sind zunächst kein Problem für den Naturschutz. Vielfach bieten sie Strukturen und Auflichtungen, die für eine Erhöhung der Diversität vieler Waldarten sorgen (z. B. Hilmers et al. 2018, Neff et al. 2021). Allerdings führen großflächige Störungen in aller Regel zu erheblichen wirtschaftlichen Einbußen der Waldbesitzenden, die sie möglicherweise darin beeinträchtigen, naturschutzfachlichen Maßnahmen durchzuführen. Durch im Klimawandel abnehmende Möglichkeiten, mit der Produktion von Holz Einkommen zu erzielen, könnten Waldbesitzende verstärkt bemüht sein, Maßnahmen des Vertragsnaturschutzes zu implementieren (z. B. Ökokonto-Maßnahmen), besonders auf Grenzertragsstandorten, wo häufig ohnehin die Wälder mit der höchsten Biodiversität vorzufinden sind.

Weitere Synergien sind auch durch mögliche Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft zu erwarten, die geeignet sind den Biotopverbund in der Kulturlandschaft zu verbessern, beispielsweise durch Formen der Agroforstwirtschaft wie Hecken oder „Alley-Cropping“ (z. B. Thaler et al. 2012, Hernández-Morcillo et al. 2018).

### 3.4 Erholung, Sport, Gesundheitsvorsorge und Tourismus

Die Gründe für einen privaten Waldbesuch sind vielfältig. Untersuchungen betonen vor allem die Rolle des Aufenthaltes in der Natur bzw. im Wald für die persönliche Regeneration (Hartig et al. 2003, Bowler et al. 2010). Verschiedene Faktoren tragen im Zusammenspiel zu gut belegten gesundheitlichen Wirkungen bei, etwa die Anregung zur Bewegung im Wald, das als angenehm empfundene Waldinnenklima, die Lärmdämpfung oder die Naturgeräuschkulisse (Hahne et al. 2012, Schraml 2009, Ensinger et al. 2013). Im Umfeld der Städte liegt ein Schwerpunkt der entsprechenden Nachfrage nach ruhiger Walderholung sowie Flächen für Sport und Training (Baumeister et al. 2020, Janeczko 2020, Konijnendijk 2003, Nowak und Dwyer 2007).

Während beim Thema „Erholung im Wald“ in der Regel die wohnortnahe Regeneration der Bevölkerung im Mittelpunkt steht, umfasst der „waldbezogene Tourismus“ Reisetätigkeiten und stellt als Wirtschaftssektor die Wertschöpfung für Unternehmen und Kommunen durch auswärtige Gäste in den Vordergrund (Arnberger et al. 2016). Im Sinne der Daseinsvorsorge (v.a. Erholung) und der Stärkung der Wirtschaftskraft ländlicher Räume (v.a. Tourismus), gilt es beide Ökosystemleistungen auch unter den Bedingungen des Klimawandels zu erhalten (siehe Auftrag der Bundes- und Landeswaldgesetze, Forest Europe 2019, Abiy et al 2015, Raumordnungsgesetz ROG § 2 Abs. 1 und 4).

Die diversen Nutzungsansprüche im Bereich Erholung und Tourismus werden neben verschiedenen gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen - etwa Digitalisierung oder aktuell die Pandemie - maßgeblich durch den Klimawandel beeinflusst (Hannam et al. 2021, Gössling et al. 2020, Wang et al. 2012, Larsen et al. 2007, Gössling & Hall 2006). Die Wirkungsweise und deren Intensität sind mit Blick auf die witterungsbedingten Voraussetzungen der einzelnen Aktivitäten sowie die jeweiligen räumlichen Gegebenheiten verschieden. Anpassungsmaßnahmen sollten in erster Linie darauf zielen, die wichtige Funktion des Waldes als Ort für Erholung, Sport und Tourismus zu erhalten.

#### 3.4.1 Erwartete Veränderungen, mögliche Anpassungsziele und Handlungsoptionen

##### 3.4.1.1 Erwartete Veränderungen im waldbezogenen Freizeitverhalten

Naturbezogene Erholung spielt in Deutschland eine große Rolle. Über 80% der Deutschen geben an, dass

sie sich auf diesem Wege regenerieren; sie gehen dabei 63 verschiedenen Tätigkeiten nach (Hermes et al. 2021). Diese Begeisterung für die naturbezogene Erholung resultiert jährlich in 3,3 Mrd. Tripps bzw. 16,6 Mrd. Stunden Aufenthalt in der Natur (ebd.). Wäldern kommt in diesem Feld eine besondere Bedeutung zu. Sie wurden und werden traditionell für Freizeitbetätigungen wie Wandern, Spaziergänge, Naturbeobachtung oder das Sammeln von Beeren und Pilzen genutzt (Hahne et al. 2012).

In den letzten Jahrzehnten hat sich das waldbezogene Freizeitverhalten deutlich diversifiziert. Wälder bilden zunehmend auch die Kulisse für diverse Sportarten wie Joggen und Walken, Mountainbiken und internetbasierte Freizeitbetätigungen wie Geocachen. Zunehmende Digitalisierung und Elektromobilität erweitern die Vielfalt der Tätigkeiten sowie das räumlich-zeitliche Muster der Nutzung. Die Vermarktung von naturbasierten Freizeitaktivitäten gilt als Wachstumsmarkt (Kirig & Schick 2008, Strasdas 2006). Vor allem Gesundheitsvorsorge bzw. Gesundheitstourismus haben diesbezüglich in den letzten Jahren eine größere Aufmerksamkeit erfahren, beispielsweise in Form des sogenannten „Waldbadens“ und diverser therapeutischer Angebote in Wäldern (Bachinger & Rau 2019, Schuh & Immich 2019, Pröbstl-Haider et al. 2021, Ihlow & Lamming 2020).

Dass die Inanspruchnahme von Wäldern als Erholungsraum dabei nicht nur neu aufkommende Trendsportarten und Freizeitaktivitäten widerspiegelt, sondern insgesamt stark vom gesellschaftlichen Kontext beeinflusst wird, wurde während des durch die Corona-Pandemie bedingten „Lockdowns“ im Frühjahr 2020 deutlich. Exemplarisch wurde in einer Studie im Bonner Kottenforst nachgewiesen, dass sich die Besucherzahlen in diesem Zeitraum mehr als verdoppelten und bislang wenig waldaffine Gruppen - auch in Ermangelung anderer Freizeitalternativen - den Wald für sich entdeckten (Derks et al. 2020, Weinbrenner et al. 2021).

Es ist zu erwarten, dass Wälder und ihr Management im Zuge der klimatischen Veränderungen weiter an Bedeutung gewinnen werden (Bell et al. 2005). Wenn Städte im Zuge des Klimawandels zu Hitzeinseln werden, steigt auch der Bedarf an einem im Wald erlebbaren klimatischen Ausgleich. Die zu erwartenden, im Kapitel 1.2.2.6 beschriebenen Veränderungen in Ökosystem bzw. Bioklima können sich dabei sowohl limitierend als auch förderlich auf waldbezogene Freizeit- und Erholungsaktivitäten auswirken. Zur Beurteilung der Sensitivität von waldbezogenem Tourismus und Erholung gegenüber klimatischen Veränderungen lassen sich teilweise vorliegende Ergebnisse aus der Tourismusdestinationsforschung heranziehen (Pröbstl-Haider 2021, Fleischhacker & Formayer

2007, Wolff 2005) und auf den Waldkontext übertragen. Dabei sind die folgenden Themen von Relevanz:

#### **Veränderungen gewohnter Wald- und Landschaftsbilder**

Für das Erholen im Wald spielt die persönliche Wahrnehmung der Waldnatur eine große Rolle (Kaplan & Kaplan 1989). Eine wesentliche Voraussetzung für positiv erlebte Freizeitaktivitäten im Wald sind somit als attraktiv bewertete Wald- und Landschaftsbilder, die als attraktiv empfunden werden. Diese Bewertung ist individuell und kulturell verschieden, zugleich zeigen Untersuchungen jedoch, dass über individuelle Unterschiede hinweg Vorlieben für bestimmte Waldbilder existieren, die breit geteilt werden. So werden lichtere Strukturen, der Zugang zu Wasser, eine moderate Baumartenvielfalt und alte Bäume generell besonders geschätzt und demzufolge auch als zentrale Elemente eines funktionsgerechten Erholungswaldes gesehen (Edwards et al. 2012, Hahne et al. 2012, Stölb 2005).

Auch das Management hat Einfluss auf Wohlbefinden und Erholung der Waldbesuchenden. Während Martens & Bauer (2010) auf der Basis eines Experiments mit 200 Personen zu dem Schluss kommen, der Erholungswert sei in einem „gepflegten“ Wald größer als in einem „verwilderten“ Wald, deutet die Studie von Kühne (2014) auf die Veränderlichkeit der ästhetischen Waldbewertung hin. Jüngere Personen bevorzugten den Studienergebnissen zufolge Waldbilder mit als natürlich betrachteten Elementen, während für Ältere „Ordnung“ einen höheren Wert darstelle.

Auch Arbeiten, die sich damit befassen, wie großflächige vom Borkenkäfer befallene Waldbestände auf Touristinnen und Touristen bzw. Waldbesuchende wirken, transportieren kein einheitliches Meinungsbild der Befragten. Auf der einen Seite wird großflächiger Borkenkäferbefall in vielen Regionen von Besuchern als negativ empfundene Landschaftsveränderung wahrgenommen (Arnberger et al. 2017 und 2018a, 2018b). Eine solche Veränderung erschwert nach Einschätzung von Fachleuten auch die touristische Bewerbung einer Region, für die konstant vorhandene Landschaftstereotypen wichtig seien (Aschenbrand & Michler 2019). Eine Einschätzung, die sich auch in den Befürchtungen touristischer Akteure widerspiegelt (Böhr 2015, Job et al. 2019). Tatsächlich zeigen die Reaktionen der Besuchenden und Anwohnenden auf den Anblick abgestorbener Bergfichtenbestände etwa in der Nationalparkregion Bayerischer Wald ein „stark polarisiertes Meinungsbild“ (Müller et al. 2008: 102). Während ein Teil der Besuchenden die Veränderung als negativ und zerstörerisch erlebte, empfanden andere den gleichen Anblick als einzigartiges Naturerlebnis. Ein Rückgang der Gästezahlen infolge der

Veränderungen konnte hier zunächst nicht festgestellt werden (ebd.).

Akzeptanzprobleme von Veränderungen im Landschaftsbild bleiben gegebenenfalls ohne nachteilige Wirkungen auf Tourismus und Erholung, wenn sie kommunikativ ausreichend begleitet werden (Aschenbrand & Michler 2019). Die Erholungswirkung des Waldes zu erhalten, bedeutet damit auch, die Waldnutzenden durch eine aktive Informationspolitik frühzeitig mit anstehenden Veränderungen der Waldbilder vertraut zu machen und Neugier auf neue Waldbilder zu wecken.

#### **Veränderungen von Wintersportaktivitäten**

Wintersportarten sind aufgrund ihrer Abhängigkeit von der Entwicklung der Schneeverhältnisse am stärksten vom Klimawandel betroffen. Steigende Temperaturen können hier sowohl für abnehmende natürliche Schneedecken, als auch für eine Beschränkung der von niedrigen Temperaturen abhängigen technischen Beschneiung sorgen. Saisonverkürzungen oder -ausfall sind insbesondere in niedrigeren Lagen zu erwarten (Steiger et al. 2021). Auch wenn mit einem Rückgang der Wintersportaktivitäten in ihrer derzeitigen Form zu rechnen sei, bedeute der Klimawandel kein zwangsläufiges Aus für den Wintersport, so Steiger et al. 2021.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Gäste an die veränderte Situation anpassen, z. B. durch das Ausweichen auf schneesichere Gebiete, andere Saisonzzeiten oder Freizeitaktivitäten wie z. B. Winterwandern. Fachleute vermuten, dass diese Anpassung nicht langsam und kontinuierlich erfolgt, sondern relativ rasch, wenn bestimmte Grenzwerte wie z. B. Schneehöhen unterschritten seien (Gössling & Hall 2006). Auswirkungen für den Wald und das Waldmanagement können sich aus dem Ausweichen von Gästen aus Wintersportgebieten auf andere, bewaldete Regionen ergeben. Damit könnte es zu Verschiebungen im räumlichen und zeitlichen Muster der Inanspruchnahme von Waldgebieten kommen.

#### **Veränderungen bei sportlichen Aktivitäten im Frühjahr, Sommer und Herbst**

Im Vergleich zu zahlreichen Studien in Bezug auf Wintersportaktivitäten sind Tourismus- bzw. Erholungsaktivitäten in den anderen Jahreszeiten weniger untersucht (Hahne et al. 2012). Unstrittig ist jedoch, dass Aktivitäten wie Wandern und Radfahren im Vergleich zum Wintersport weniger von klimatischen Rahmenbedingungen beeinflusst werden und ihre Ausübung stärker individuell geprägt ist, z. B. durch mögliche unterschiedliche körperliche Fitness und



Bekleidung (Wolff 2005). Wandern gilt demzufolge als Vier-Jahreszeiten-Aktivität mit Schwerpunkt auf dem Herbst; für das Radfahren werden Frühling bis Herbst als Aktivitätszeiträume angesehen (Formayer & Kromp-Kolb 2009). Mildere Temperaturen bieten die Möglichkeiten der Ausweitung des Radfahrens in den Winter hinein.

Dies gilt ebenso für Aktivitäten wie Walken, Joggen und Geocachen. All diese naturbezogenen Aktivitäten werden von ähnlichen Klimafaktoren (nach Hahne et al. 2012: Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Extremwetterereignisse) bestimmt, entsprechend lassen sich die Ergebnisse einer wanderbezogenen Studie als Grundlage zur Beurteilung ihrer Klimasensitivität heranziehen. Danach werden von Wandernden eine hohe tägliche Sonnenscheindauer sowie trockene Witterung bevorzugt (Wolff 2005).

Die durch den Klimawandel zu erwartende Verlängerung der Saison, eine längere tägliche Sonnenscheindauer und moderat wärmere Temperaturen können sich förderlich auf Aktivitäten wie Wandern und Radfahren auswirken. Extreme Hitzeereignisse dagegen führen auch im Wald zu gesundheitlichen Risiken bei sportlicher Betätigung. Dagegen können sich Extremwetterereignisse wie Starkregenniederschläge oder Sturmwurf einschränkend auf die Nutzbarkeit und Qualität der Wegeinfrastruktur auswirken (Hahne et al. 2012).

#### 3.4.1.2 Nachfrage nach Gesundheitsförderung im Wald

Die gesundheitsfördernde Wirkung von Wäldern wird seit einigen Jahren nicht nur als positive „Nebenwirkung“ des individuellen Waldbesuches gesehen, Aufenthalt im Wald wird systematisch als Instrument der Prävention und der Therapie konzipiert (Rajoo et al. 2020). Dabei erfahren die folgenden Themen aktuell besondere Aufmerksamkeit:

#### Waldbasierter Gesundheitstourismus / Waldbaden

Die Neuentdeckung der Waldtherapie hat die Verbreitung eines waldbasierten Gesundheitstourismus befördert, der die Verbindung zum Wald als Erfahrungsraum mit allen Sinnen ermöglichen will. Dieser kann in zwei Bereiche unterteilt werden: in einen präventiven Bereich zur Erhaltung von Wohlbefinden und Gesundheit, z. B. durch Waldbaden als angeleitetes „Eintauchen in die Waldatmosphäre“ (Schuh & Immich 2019: 22) und einen kurativen Bereich zu deren

Wiederherstellung bei Kranken, der spezifische Therapieangebote enthält (Rau & Bachinger 2020, Rulle et al. 2010). In beiden Bereichen dient die Nutzung gesundheitsbezogener Dienstleistungen als Reisemotiv.

Der Trend hin zur Inanspruchnahme waldbbezogener Gesundheitsangebote führt zu Etablierung eines eigenen Marktes mit der Entwicklung spezifischer Qualitätskriterien und Anforderungen an die Politik (Dodev et al. 2020). Es ist zu erwarten, dass dieser sich neu formierende Markt infolge seiner direkten Abhängigkeit vom Wald von den klimawandelbedingten Veränderungen im Ökosystem Wald betroffen sein wird. In aktuellen Veröffentlichungen zum Thema werden diese Betroffenheit und mögliche Handlungsoptionen bislang nicht thematisiert.

#### Bedeutung stadtnaher Wälder für Gesundheitsförderung bzw. Milderung von Hitzeauswirkungen

Wälder sind nicht nur betroffen von klimabedingten Veränderungen, sie können diese für den Menschen auch erträglicher machen. Vor allem stadtnahen Wäldern kommt für die wohnortnahe Erholung eine besondere Rolle zu. Wälder tragen infolge der Filterwirkung des Blattwerks in Bezug auf Pollen - je nach Baumartenzusammensetzung und Witterungsverhältnissen in unterschiedlichem Maß - zu einer Reduzierung des Allergie- und Erkrankungspotenzials bei (Schuh & Immich 2019).

Wälder und Grünflächen können insbesondere bei der Abmilderung der erwarteten Hitzewellen eine wichtige Rolle einnehmen. Denn basierend auf regionalen Zukunftssimulationen wird für Deutschland eine Verdreifachung der Zahl der jährlichen Hitzewellentage auf fast 40 Tage bis zum Ende des 21. Jahrhunderts angenommen (Zacharias & Koppe 2015). Besonders ältere Menschen – eine Bevölkerungsgruppe die aufgrund des aktuellen Altersaufbaus der Gesellschaft kontinuierlich zunimmt<sup>5</sup> – sind gefährdet. Wälder reflektieren Wärme und Licht, spenden Schatten und Kühlung und geben Wasser durch Verdunstung in die Umgebung ab.

Stadtnahe Wälder können so die negativen Auswirkungen von Hitzewellen in städtischen Gebieten zumindest teilweise reduzieren. Folglich kommt der Bewirtschaftung dieser Wälder und der engen Verzahnung von forstbetrieblicher Planung und städtischer Erholungsplanung eine besondere Rolle im Umgang mit Hitzewellen zu. In Anbetracht einer alternden Gesellschaft ist insbesondere auf eine gute Erreichbarkeit

<sup>5</sup> „Die Zahl der Menschen im Alter ab 67 Jahren stieg bereits zwischen 1990 und 2018 um 54% von 10,4 Millionen auf 15,9 Millionen. Sie wird bis 2039 um weitere 5 bis 6 Millionen auf mindestens 21 Millionen wachsen und anschließend bis 2060 relativ stabil

stadtnaher Wälder und das Vorhandensein barrierefreier Zugänge in stadtnahe Wälder zu achten.

#### **Einfluss von Biodiversität auf die Gesundheit**

Während der Zusammenhang zwischen Naturkontakt, bioklimatischer Wirkung von Wäldern und menschlichem Wohlbefinden gut belegt ist, ist der Einfluss von Biodiversität auf die Gesundheit erst in den letzten Jahren in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen gerückt (Marselle 2019). Auch politische Aktivitäten, wie die Sensibilisierungskampagne von Biodiversitätskonvention CBD und Weltgesundheitsorganisation WHO zur Bewusstmachung des Einflusses von Biodiversität auf die Gesundheit, wurden in den letzten Jahren initiiert (WHO und CBD 2015).

Aktuelle Studien, wie z. B. Untersuchungen des europäischen Forschungsverbundes „Dr. Forest“<sup>6</sup>, untersuchen, wie sich der Zusammenhang zwischen der Biodiversität von Wäldern (z. B. in Bezug auf die Baumartenzusammensetzung) und Gesundheit erklären lässt. Daran beteiligte Forschende gehen dabei davon aus, dass artenreiche Wälder Einfluss auf die Erholung haben, indem sie in besonderem Maß zur Verminderung von Stress, Ozon- und Feinstaubgehalt und einem angenehmen Mikroklima beitragen (Marselle et al. 2021).

#### **3.4.1.3 Gesundheitsgefährdungen**

Wälder bieten Schutz vor gesundheitlichen Auswirkungen klimatischer Veränderungen, zugleich aber werden auch Veränderungen in den Waldökosystemen erwartet, die neue oder erhöhte Gesundheitsgefährdungen mit sich bringen. Wissenschaftliche Studien bzw. Diskussionsbeiträge gehen dabei von folgenden Entwicklungen aus:

#### **Erhöhung des Allergiepotenzials durch Pollenflug und Schadorganismen**

Allergische Sensibilisierungen, die zu pollen-assoziierten Erkrankungen wie Heuschnupfen (*Allergische Rhinitis*) und allergischem Asthma führen können, gehen in Deutschland vor allem auf Gräser- und Baumarten zurück (Höflich 2018). Es wird erwartet, dass entsprechende gesundheitliche Probleme im Zuge des Klimawandels zunehmen (Lake 2017). Ursachen dafür können ein verändertes Artenspektrum, eine höhere Pollenproduktion, veränderte Zeiträume sowie eine

intensivere Verbreitung der produzierten Allergene sein (ebd.).

Im Zeitraum von 2008 bis 2011 wurde die Sensibilisierung der Bevölkerung gegenüber 50 verbreiteten Einzelallergene untersucht. Danach waren 18,1% der Erwachsenen gegen Lieschgraspollen sensibilisiert; 17,4% gegen Birkenpollen (Haftenberger et al. 2013). Eine auf Daten einer paneuropäischen Studie beruhende Publikation belegt, dass etwa 90 Prozent der gegen Gräser bzw. Baumpollen sensibilisierten Patienten in Deutschland bei Pollenkontakt auch tatsächlich entsprechende allergische Beschwerden entwickeln (Burbach et al. 2009).

Die mit dem Klimawandel einhergehende Verlängerung der Vegetationsperiode<sup>7</sup> führt von ehemals saisonalen Pollenflugereignissen zu einem fast ganzjährigen Pollenflug (Behrendt 2008). Zudem belegte eine in Innsbruck durchgeführte Studie für den zwischen 1980 und 2001 gemessenen Anstieg der mittleren Temperatur um 1,5°C eine damit einhergehende Zunahme der Pollenzahl um das 6,5-fache bei Eschen sowie um das 1,2-fache bei Birken (Bortenschlager & Bortenschlager 2005). Zusätzlich ist infolge der klimabedingten Verschiebung von Pflanzenarealen in Richtung Norden bzw. innerhalb der Höhenstufen von Gebirgen auch von einer Verschiebung der Pollenflugbelastungen auszugehen. Während der Pollenflug im norddeutschen Tiefland infolge der bei Hitze bereits vor der Blüte verdorrten Gräser voraussichtlich abnimmt, wird von einer Intensivierung von Gräserblüte und Pollenflug in Alpenrandnähe bzw. höheren Lagen ausgegangen (Behrendt 2008).

Auch mit der Zunahme wärmeliebender allergener Arten wie der vermehrt auch an Waldrändern und -wegen vorkommenden Beifuß-Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) ist zu rechnen. Pollen der Beifuß-Ambrosie führen im Vergleich zu Gräserpollen und Birkenpollen bereits bei deutlich geringeren Konzentrationen zu allergischen Beschwerden (Höflich 2018). Für die Beifuß-Ambrosie ist auch eine vermehrte Pollenbildung bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration belegt (Behrendt 2008).

Schadorganismen, die sich negativ auf die Waldgesundheit auswirken, können auch Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. So können die Brennhaare der Raupen des Eichenprozessionsspinners (*Thaumetopoea processionea*), die das Nesseltgift *Thaumetopora* enthalten, z. B. Hautausschlag, Bindehautentzündung, Atemwegsreizungen, Fieber oder Schwindel, in Einzelfällen auch allergische

<sup>6</sup> <https://www.dr-forest.eu/>

<sup>7</sup> Bereits 2003 ging die WHO in einem Bericht von einer europaweiten Vorverlagerung der Vegetationsperiode um zehn bis elf Tage in den vorangegangenen 30 Jahren aus (WHO 2003).

Schockreaktionen auslösen (UBA 2016). Der ursprünglich in Südeuropa vorkommende, wärmeliebende Eichenprozessionsspinner breitet sich seit den 90er Jahren zunehmend auch in trockenwarmen Regionen in Deutschland aus (Lobinger 2010).

Auch die durch den Pilz *Cryptomstroma corticale* ausgelöste Ahorn-Russrindenkrankheit hat sich infolge trockener Sommer deutlich verbreitet. Sie kann im letzten Stadium der Pilzinfektion auch für den Menschen gefährlich werden. Eingeatmete Sporen können zu Entzündungen der Lungenbläschen führen, die sich durch Reizhusten, Schüttelfrost, Fieber und Atemnot äußern können (Burgdorf 2019).

### Etablierung und Zunahme von Vektoren und Infektionskrankheiten

Zu den indirekten Auswirkungen des Klimawandels zählen auch Veränderungen in der Ausbreitung vektorbasierter Erkrankungen. Vektoren übertragen Parasiten, Viren oder Bakterien von einem Wirt auf den Menschen. Während Stechmücken oder Zecken durch Blutsaugen Krankheitserreger von befallenen Wildtieren auf den Menschen übertragen können, kann in anderen Fällen der bloße Kontakt mit infizierten Tieren oder mit deren Ausscheidungen zu einer Infektion führen. Als wichtigste Vektoren human- und veterinärmedizinisch bedeutsamer Krankheitserreger in Europa gelten Zecken (Petney et al. 2011).

Wärmeres Klima verkürzt generell die Generationszeiten heimischer Vektoren und sorgt damit für längere Aktivitätsperioden der Krankheitsüberträger. Insofern wird in Publikationen ganz allgemein von einer Zunahme entsprechender Infektionskrankheiten im Zuge des Klimawandels ausgegangen (UBA 2010, LUBW 2021). Dass die Informationslage lineare Rückschlüsse jedoch kaum zulässt, macht eine 2011 veröffentlichte Literaturrecherche zum Thema Zecken und durch Zecken übertragene Krankheiten deutlich (Petney et al. 2011). So seien erhöhte Fallzahlen an durch Zeckenstich übertragener Frühsommer-Meningoenzephalitis (FSME) des Jahres 2006 statistisch nicht wie vermutet auf klimabedingte Veränderungen, sondern vielmehr auf vermehrte menschliche Freizeitaktivitäten bei bestimmten Wetterlagen rückführbar gewesen (ebd. mit Verweis auf Studien von Sumilo et al. 2007, Randolph et al. 2008 und Randolph 2000). Auch würden Aussagen von Modellen zur Korrelation zwischen Krankheitsausbrei-

tung und Klimaentwicklung, die eine tendenzielle Abnahme von FSME in Mitteleuropa annehmen, der derzeit zu beobachtenden Ausbreitung des Virus widersprechen (Petney et al. 2011 mit Verweis auf Randolph und Rogers 2000).

Diskutiert wird auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich tropische Krankheiten wie Malaria, Dengue- oder Gelbfieber infolge höherer Temperaturen verstärkt in Deutschland ausbreiten. So wird die in Südeuropa mittlerweile verbreitete asiatische Tigermücke (*Aedes albopictus*), die diese und weitere Krankheitserreger überträgt, durch Wärme sowie die im Zuge der Klimawandelanpassung gewollte Wasserretention etwa in Auwäldern begünstigt. Eine Ausbreitung nach Norden ist zu beobachten, wird aber vor allem dem Waren- und Reiseverkehr, nicht dem Klimawandel zugeschrieben (UBA 2015).

Letztlich ist bei der Betrachtung vektorübertragener Krankheiten von einem komplexen Beziehungsgeflecht verschiedener Faktoren auszugehen. Hierzu gehören klimabedingte Faktoren wie Temperatur, Niederschlagsmenge und Luftfeuchtigkeit, ökologische Faktoren wie Biotopstruktur und Nahrungsangebot für Wirte und Vektoren sowie anthropogene Faktoren wie z. B. das menschliche Risikoverhalten (Müller et al. 2019). Aufgrund der geschilderten Komplexität ist eine Vorhersage der weiteren Ausbreitung von vektorübertragenen Infektionen kaum möglich (Eis et al. 2010). Ein kontinuierliches Monitoring erfolgt auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene (WHO 2017, EFSA 2007, RKI 2020).

Aktuelle Forschungsprojekte untersuchen den Zusammenhang zwischen Baumartenvielfalt und der Häufigkeit von Zecken und Eichenprozessionsspinnern in Wäldern und gehen dabei bislang von der Hypothese aus, dass eine hohe Biodiversität zu einer Abnahme von Schadorganismen führen<sup>8</sup>. Insgesamt legen diese Studien und der im Zuge der Corona-Pandemie vermehrt ins öffentliche Bewusstsein gerückte One-Health-Ansatz<sup>9</sup> nahe, verstärkt Synergien zwischen Gesundheitswesen, Klimawandelanpassung und Naturschutzmanagement zu suchen (Marselle et al. 2019). Von den geschilderten Vektoren betroffen sind vor allem Personen, die sich beruflich oder in ihrer Freizeit im Wald aufhalten und die daher in besonderem Maß bei der Konzipierung von Präventions- und Kontrollmaßnahmen berücksichtigt und informiert werden sollten.

8 <https://www.dr-forest.eu/>

9 Der im letzten Jahrzehnt entwickelte, interdisziplinär angelegte One Health-Ansatz zielt darauf ab, die „menschliche Gesundheit ganzheitlich unter Einbeziehung der Tiergesundheit und einer gesunden Umwelt zu schützen. ...] Hierbei wird auch die Integration von Themen der biologischen Vielfalt immer entscheidender.“ (Doyle et al. 2020: 65)

#### Gewährleistung der Verkehrssicherheit

Durch Extremwetterereignisse wie Starkregen, Sturm, Dürre oder Waldbrand, aber auch auftretende Krankheiten und Insektengradation kommt es vermehrt zu herabfallenden Ästen oder umstürzenden Bäumen. Dadurch wird nicht nur die Wegequalität, sondern vor allem auch die Verkehrssicherheit für die Waldbesuchenden und die im Wald Beschäftigten beeinträchtigt. Zum Schutz vor herabfallenden Ästen oder umstürzenden Bäumen müssen Waldgebiete wenigstens temporär für Waldbesucherinnen und -besucher gesperrt werden.

Die Aufrechterhaltung der Wegequalität und der Verkehrssicherheitspflicht nach Extremwetterereignissen führen zu einem höheren Arbeitsaufwand der verantwortlichen Waldeigentümer bzw. Forstbetriebe. Hier setzen Programme zur Förderung der Wegeinstandsetzung an, wie z. B. auf Bundesebene die Förderung von „Maßnahmen zur Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald“ im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK) und ergänzende Programme der Länder.

Neben der Kostenbewältigung stellen sich den Waldbesitzenden auch Fragen der Haftung. Hier ist die Rechtsprechung im Kontext des Klimawandels gefordert, die Grenzen zwischen höherer Gewalt und der Verantwortung des Waldeigentümers neu auszuloten und zu definieren, welche walddtypischen Gefahren von den Waldbesuchenden in Kauf zu nehmen sind (Staatsbetrieb Sachsenforst 2013). Auch die Möglichkeit einer Priorisierung der Verkehrssicherungsmaßnahmen in Wäldern, d. h. einer bevorzugten Behandlung von Wäldern mit starker Freizeit- und Erholungsnutzung, sollte juristisch geprüft werden, um Aufwand und Kosten überschaubar zu halten.

#### 3.4.2 Wechselbeziehung und Anpassungshemmnisse

Der Wald in Deutschland wird von einer großen Mehrheit der deutschen Bevölkerung für Freizeit- und Erholungsaktivitäten genutzt: In einer Online-Untersuchung von 2021 waren es 87% der Befragten, die aussagten, gern Zeit im Wald zu verbringen (SINUS-Institut & YouGov 2021). Die 2018 aktualisierte Erholungswaldkartierung von Baden-Württemberg belegt eine Ausweitung der intensiv für Zwecke der Erholung genutzten Wälder von 28% (Stand 1989/1990) auf jetzt 71% der Waldfläche des Landes (Schraml 2019). Diese Zahlen belegen die Bedeutung und intensive Nutzung der Wälder für Erholungszwecke.

Dabei steigt die Inanspruchnahme von Wäldern mit zunehmender Nähe zu Ballungsgebieten (Bilecen

& Kleiber 2002) – ein Trend, der durch den Klimawandel weiter forciert wird. Die verstärkte Nachfrage kann zu Konflikten sowohl mit anderen Waldnutzungen, als auch zwischen verschiedenen Freizeit- und Erholungsnutzungen (wie z. B. Mountainbiken und Jagen) führen. Die folgenden Aspekte sind im Umgang mit Konflikten bzw. zur Nutzung von Synergien von besonderer Bedeutung:

#### Konflikte zwischen Erholungsnutzung und Waldwirtschaft

Im Zuge des Klimawandels ist allein wegen der sogenannten Kalamitätsnutzungen mit einer zeitlichen und räumlichen Ausweitung der forstbetrieblichen Arbeiten im Wald zu rechnen. Diese können auch mit erheblichen Belastungen für Waldbesuchende einhergehen (Lärm, Wegebeschaffenheit, Sperrungen). Ein Grund für die verbesserungsfähige Rücksichtnahme auf die Belange von Erholungssuchenden ist die fehlende Datengrundlage über Bedürfnisse und Aktivitäten der Freizeitaktiven im Wald. In diesem Bereich wird derzeit in Deutschland – auch im Vergleich zu dem in Finnland, Dänemark und Schweden betriebenen Langzeitmonitoring oder dem soziokulturellen Monitoring in der Schweiz – noch ein erhebliches Defizit gesehen (Lupp et al. 2016, Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (2020).

Hier bietet die in Baden-Württemberg von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt entwickelte Kartierung von Ökosystemleistungen bietet Möglichkeiten der Verschneidung von Erholungsdaten mit forstbetrieblichen Daten (Gerstenberg et al. 2019). Auch Beispiele der Einbindung von Waldbesuchenden in die Kartierung (z. B. durch deren Benennung von Aktivitäten, in Anspruch genommenen Ökosystemleistungen oder Störfaktoren) und die Aufbereitung der Daten für die Forsteinrichtung liegen vor (Gerstenberg & Schubert 2020).

Waldbesitzende und Forstbetriebe erleben wiederum eine besonders Betroffenheit durch die steigenden Erholungs-, Sport- und Freizeitansprüchen (Leibfried & Schraml 2018). Die mangelnde Erkennbarkeit der Eigentumsverhältnisse im jederzeit frei zugänglichen Wald trägt zudem dazu bei, dass die Heterogenität der Waldbesitzenden und ihrer Leistungsfähigkeit in der öffentlichen Debatte um die Erholungsleistung des Waldes kaum Berücksichtigung finden. Dabei geht die Bundesplattform „Wald – Sport, Erholung, Gesundheit“ (WaSEG) davon aus, dass allein die Betriebe im Privat- und Körperschaftswald Kosten in Höhe von 100 Mio. € pro Jahr für die Bereitstellung von Erholungsleistungen erbringen (WaSEG 2019).

Insbesondere in stadtnahen Wäldern übernehmen die Forstbetriebe Mehraufwendungen für

Erholungsleistungen, wie z. B. für zusätzlichen Wegeunterhalt und Baumkontrolle (Bilecen und Kleiber 2002, Bernasconi et al. 2003, Dög et al. 2016). Hier ist infolge eines klimawandelbedingt vermutlich steigenden Erholungsbedarfs im Wald sowie der Auswirkungen zu erwartender Extremwetterereignisse auf die Infrastruktur mit steigenden Mehraufwendungen zu rechnen.

Öffentliche Waldbesitzer können sich vor dem Hintergrund der zu erwartenden zunehmenden Bedeutung von Wäldern im Klimawandel auf Teilen ihrer Fläche bewusst für eine Schwerpunktsetzung zugunsten der Bereitstellung von Erholungsräumen für ihre Bevölkerung entscheiden. Diese Schwerpunktsetzung ist häufig mit höheren Kosten bzw. dem Verzicht auf Einnahmen verbunden, die anderweitig ausgeglichen werden müssen. Privatwaldbesitzende haben diese Möglichkeit selten.

Bislang bestehen kaum praktizierte Finanzierungsmodelle für Freizeit und Erholung im Wald (Wilkes-Allemand & Pütz 2017). Mehraufwendungen für die allgemeine Freizeit- und Erholungsnutzung der Wälder gemäß § 14 BWaldG bedürfen aus Sicht der Waldbesitzenden eines finanziellen Ausgleiches, insbesondere in Zeiten kalamitätsbedingter Mehraufwendungen und Mindereinnahmen im traditionellen Marktsegment der Holzproduktion. Die Nutzung der Wälder für kommerzielle Gesundheits- und Sportangebote ist dagegen nicht durch das allgemeine Betretungsrecht nach § 14 BWaldG abgedeckt, weshalb dafür bereits heute Ausgleichszahlungen von den Forstbetrieben verlangt werden können. Hierzu liegen beispielweise Wertermittlungen mit Vorschlägen zur Unterteilung unterschiedlicher Kategorien von Wäldern (Bernasconi et al. 2003) sowie Untersuchungen zur Zahlungsbereitschaft von Erholungssuchenden vor (Elsasser, Weller 2013, Naturkapitel Deutschland - TEEB DE 2016, Bösch et al. 2018).

Für Deutschland geht das Thünen-Institut basierend auf einer repräsentativen Umfrage von 2013 von einer jährlichen Zahlungsbereitschaft von 30 € pro Person für Wälder im eigenen Wohnumfeld aus; hochgerechnet auf die gesamte deutsche Bevölkerung ergibt sich eine Zahlungsbereitschaft von 2,4 Mrd. € pro Jahr (Elsasser et al. 2021). Bezogen auf den Hektar Waldfläche in Deutschland liegt damit der Nutzen des Waldes als Naherholungsraum (aggregierte Zahlungsbereitschaften) bei 211 €/ha. Die Kosten des Waldbesitzes (hier konkret des Privatwaldbesitzes) in Form von Mehraufwendungen und Mindererträgen liegen hingegen bei 13 €/ha (Dög et al. 2016). Die Bereitstellung der Erholungsleistung des Waldes ist somit gesamtwirtschaftlich lohnend, da der Nutzen deutlich über den Kosten liegt. Ob der Ausschluss der Waldbesitzenden von dem gesamtwirtschaftlichen Nutzen

jedoch gerecht ist, muss auf politischer Ebene beurteilt werden.

Das am Thünen-Institut entwickelte Modell zur Regionalisierung ökonomischer Werte von Waldleistungen (ReWaLe) zeigt auf, wie unterschiedlich sich dieser Wert und damit die Erholungs- und Freizeitleistung des Waldes regional verteilt. Schwerpunkte ergäben sich demnach im Umfeld städtischer Bevölkerungsschwerpunkte, dagegen konzentrierten sich Rohholzproduktion und Klimaschutzleistungen im ländlichen Raum. Das ReWaLe-Modell empfiehlt, das hohe Nachfragepotenzial in Ballungsräumen zu nutzen, um neue Märkte für Leistungen wie Sportangebote, Friedwälder oder Waldkindergärten zu schaffen und die Erholungsleistung des Waldes damit in einem Mix aus Märkten und staatlichen Zahlungen zu honorieren (Elsasser et al. 2020).

### **Konflikte der Erholungsnutzung mit dem Arten-, Natur- und Wildtierschutz**

Das steigende Interesse am Aufenthalt in der Natur hat Auswirkungen auf die Qualität von Wildtierlebensräumen bzw. die Lebensraumnutzung durch diese Wildtiere (Marion et al. 2020, Bateman & Fleming 2017). Es sind viele Wirkungen von Outdooraktivitäten sowohl auf Wildtierindividuen wie auch auf Populationsebene beschrieben. Dazu zählen neben der veränderten Lebensraumnutzung etwa das gesteigerte Fluchtverhalten, der Verlust von Energie bzw. Fitness, reduzierte Fürsorge für den Nachwuchs sowie eine insgesamt geringere Reproduktion (Filla et al. 2017, Houston 2012, Sato et al. 2013, Steven et al. 2011). In Summe kann die Störung durch Freizeitaktive somit ähnliche Wirkungen auf Wildtiere und deren Populationen haben, wie es für die Prädation beschrieben ist (Frid & Dill 2002).

Für einzelne Arten oder Artengruppen sind Störungen in einem Umfang belegt, die eine intensive Erholungsnutzung von Waldlebensräumen auch zu einem artenschutzrechtlichen Problem machen (Coppes et al. 2017, Coppes et al. 2018). So sind die Hochlagen der Mittelgebirge in Deutschland seit langer Zeit ein touristischer Magnet. Hier kommt es bereits jetzt zu vielfältigen Konflikten zwischen Nutzung der Wälder für Tourismus und Freizeit und naturschutzfachlichen Belangen, z. B. des Artenschutzes (Rösner et al. 2014). Für bestimmte Artengruppen und Ökosysteme, deren Verbreitungsgebiete sich im Zuge des Klimawandels nach oben verschieben werden, wo dann auch eine geringere Fläche zur Verfügung steht, verschärfen sich dadurch möglicherweise diese Konflikte.

Aus Sicht der Freizeitaktiven und deren Interessenvertretung sowie des touristischen Destinationsmanagements ergeben sich aus diesen Problemen

bisweilen ein hoher Aufwand in der Vorbereitung von Veranstaltungen oder der Genehmigung von dauerhafter Infrastruktur. Für das Management von Schutzgebieten ist umgekehrt die Durchsetzung von Regeln eine große Herausforderung (Tomczyk 2013, Mehri et al. 2017, D'Antonio 2013).

#### Synergien zwischen Waldbewirtschaftung und Freizeit- und Erholungsnutzungen

Das Wissen um die Präferenzen der Waldbesuchenden kann auch zu Synergien zwischen Waldbewirtschaftung und Freizeit- und Erholungsnutzungen führen. So schaffen waldbauliche Strategien, die auf klimaangepasste und strukturreiche Wälder abzielen, mittel- und langfristig Waldbilder und Waldstrukturen, die von weiten Teilen der Bevölkerung geschätzt werden und deren Naturbewusstsein entsprechen (Kleinhüchelkotten et al. 2009, BfN 2011, Lupp et al. 2016). Zugleich deuten Studien darauf hin, dass Artenvielfalt und Struktureichtum von Wäldern eine positive Auswirkung auf das Erholungspotenzial haben und zu einer Abnahme von Schadorganismen führen können (Marselle et al. 2021).

Synergien zwischen verschiedenen Sektoren lassen sich auch in Bezug auf den Schutz von Boden- und Kulturdenkmalen herstellen. Mit der Aufnahme der Denkmale in die Waldfunktionenkartierung (siehe Projektgruppe Waldfunktionenkartierung der AG Forsteinrichtung 2015) ergibt sich die Möglichkeit, diese auch in die im Gutachten vorgeschlagene Digitalisierung von Forstwegen und Rückegassen zu integrieren (siehe Kap. 4.5) Zum Schutz von Waldboden und Denkmalen können so bei Räumungsarbeiten im Nachgang von Extremwetterereignissen besonders bodenpflegliche Arbeitsverfahren beziehungsweise Forstmaschinen eingesetzt werden.

Auch auf die Zusammenhänge zwischen dem Aufenthalt in der Natur und einem umweltfreundlichen Verhalten wurde immer wieder hingewiesen. Es wurde gezeigt, dass die Erholung in der Natur tatsächlich eine gute Basis für die Entwicklung von umweltfreundlichem Verhalten darstellt (Larson et al. 2018,

Cheng & Wu 2015). Insofern gewinnt der oft zitierte Satz, dass nur das effektiv geschützt wird, was Menschen kennen und schätzen, tatsächlich eine empirische Basis.

### 3.5 Monitoring

Das Forstliche Umweltmonitoring ist in Deutschland eine gesetzliche Aufgabe des Bundes und der Länder (BWaldG §41a). Die Verordnung über Erhebungen zum forstlichen Umweltmonitoring (ForUmV, 20.12.2013) sowie ein zwischen dem Bund und den Ländern abgestimmtes Durchführungskonzept definiert die Mindestkriterien der Erhebungsdaten sowie die anzuwendenden Verfahren. Danach ist die Bereitstellung von Umweltinformationen zur Vitalität der Wälder und zu Wirkungszusammenhängen in Waldökosystemen für folgende elf Parametergruppen vorgeschrieben (ForUmV, § 1):

- 1.) Kronenzustand (WZE<sup>10</sup>, Level 1)
- 2.) Baumwachstum (BWI<sup>11</sup>, Level 2)
- 3.) Nadel- und Blattanalysen (BWI, Level 2)
- 4.) Bodenvegetation (BWI, Level 2)
- 5.) atmosphärische Stoffeinträge (Level 2)
- 6.) Streufall (Level 2)
- 7.) Bodenwasser nach Menge und Zusammensetzung (Level 2)
- 8.) Bodenzustand (BZE<sup>12</sup>, Level 2)
- 9.) meteorologische Parameter (Level 2)
- 10.) Phänologie (Level 2)
- 11.) Luftqualität (Level 2)

10 Die Waldzustandserfassung wird seit 1980 bundesweit jährlich nach einer einheitlichen Methode im Juli und August auf einem systematischen Stichprobennetz (Level 1) von mind. 16km \* 16 km durchgeführt. Manche Bundesländer haben das Netz verdichtet.

11 Die Bundeswaldinventur ist eine forstliche Großrauminventur, die durch das Bundeswaldgesetz (BWaldG § 41a) vorgeschrieben ist und als terrestrische Stichprobeninventur deutschlandweit durchgeführt wird. Sie erfasst die großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten und liefert eine unentbehrliche Grundlage für forst-, handels- und umweltpolitische Planungen und Entscheidungen.

12 Im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung werden der Zustand und die Veränderung von Waldböden, Vegetation, Kronenzustand und der Waldernährung untersucht. Die Erhebung der ersten bundesweiten BZE fand von 1987 bis 1992 statt. In den Jahren 2006–2008 fand eine Folgeinventur (BZE II) statt. Eine Unterstichprobe im 16 km\*16 km Raster ist identisch mit der WZE.

Ebenso sind als Mindestkriterien das 16 km x 16 km-Stichprobenraster für die Kronenzustandserhebung (WZE, ForUmV § 2) sowie die Auswahl von einer Intensiv-Beobachtungsfläche pro 256 tausend Hektar Waldfläche festgelegt (Level 2, ForUmV § 3). Die öffentlich verfügbaren Ergebnisse dienen vorrangig der Politikberatung in Bund und Ländern, fließen aber auch gleichfalls in das internationale Monitoring unter ICP Forests (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) ein.

Die langen, teilweise bis zu 30-jährigen Zeitreihen des Forstlichen Umweltmonitorings ermöglichen einzigartige Analysen zum Zustand und der Entwicklung der Wälder in Deutschland in den letzten Jahrzehnten, deren Auswertung erst am Anfang steht. Grundlage hierfür sind die Vielfalt von Erhebungen auf verschiedenen räumlichen Ebenen, die langen Zeitreihen der Beobachtungen und die erfolgreiche Zusammenarbeit von Einrichtungen des Bundes und der Länder. U. a. bietet die Kombination aus Rasternetzhebungen (Level 1: WZE, BZE) sowie Intensiv-Monitoring (Level 2) zeit-, ereignis- und raumbezogene Abschätzungen der Waldentwicklung.

Wachsende Ansprüche an die Datengrundlagen, z. B. hervorgerufen durch die internationale Klimarahmenkonvention haben dazu geführt, dass zwischen dem zehnjährigen Turnus der Bundeswaldinventur (BWI) und der Bodenzustandserhebung (BZE) zusätzlich Kohlenstoffinventuren durchgeführt werden. Diese Kohlenstoffinventuren sind methodisch identisch zur Bundeswaldinventur, konzentrieren sich jedoch nur auf die zu berichtenden Kohlenstoffpools ober- und unterirdisch lebender Biomasse sowie Totholz. Zur Erfüllung der europäischen Fauna-Flora Habitat-Richtlinie verpflichten sich die Mitgliedstaaten in Art. 11 zur Überwachung des Erhaltungszustandes der Lebensraumtypen und -arten von europäischem Interesse.

Für den Nationalen FFH-Bericht wurde die Bundeswaldinventur um eine Methodik zur Erfassung und Bewertung verbreiteter Waldlebensraumtypen (WLRten) ergänzt. Erstmals bei der vierten Bundeswaldinventur werden zudem DNA-Proben zur Ermittlung der genetischen Vielfalt gesammelt. Abhängig vom Bundesland und Waldbesitzart werden zudem ein Waldschutzmonitoring, Verbissmonitoring, Genmonitoring bzw. eine Betriebsinventur regelmäßig durchgeführt. In Schutzgebieten, wie z. B. in Nationalparks findet außerdem ein sehr intensives floristisches und faunistische Monitoring statt. Im Testbetriebsnetz Forst (TBN-Forst) erheben die Länder (für den Bund) betriebswirtschaftliche Daten aus Forstbetrieben aller Eigentumsarten und erfüllen so den walddesetzlichen Auftrag zu Berichterstattung über

Forstwirtschaft.

Vor dem Hintergrund zunehmender Witterungsanomalien muss auch das Forstliche Umweltmonitoring an die neuen Herausforderungen angepasst werden. Dem Mangel an Wissen zur künftigen Waldentwicklung und zu den Auswirkungen ungekannter Extremwetterereignisse auf Wälder muss durch eine Intensivierung des Monitorings entgegengewirkt werden, um rechtzeitige Korrekturen an den Handlungsempfehlungen zu ermöglichen.

Folgende Schwachstellen des forstlichen Monitorings sind aktuell zu identifizieren:

- Die verfahrensbedingte Ausrichtung auf Hauptbaumarten (bzw. Zusammenfassung zu „Nebenbaumarten“) führt zu einem Informationsmangel zur Vitalitätsentwicklung von weniger häufigen Baumarten, die aber im Zuge des Klimawandels zunehmend an Bedeutung gewinnen können.
- Mit der räumlichen und zeitlichen Eingrenzung der Beobachtung auf Rasterpunkte und Aufnahmephasen sinkt die Aussagesicherheit bei kleiner werdendem Raumbezug (Bundesland->Landkreis->Forstbetrieb->Waldbestand).
- Im Zuge des Klimawandels steigt der Informationsbedarf zur Vitalitätsentwicklung von Waldbeständen aller Eigentumsarten zu ganzjährigen bzw. ereignisbezogenen (Sturm, Kalamitäten) Zeitpunkten, in unterschiedlichen Ökosystemtypen, Bewirtschaftungssystemen und Waldstrukturen (Rein- und Mischbeständen). Physiologisch aussagekräftige Stressindikatoren mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung werden benötigt (Schuldt et al. 2020)
- Die Aufnahme meteorologischer Daten zur Ermittlung des Waldinnenklimas sollte intensiviert werden, dabei sollte auf automatisierte Messungen zurückgegriffen werden, die auch die Bodentemperatur erfassbar machen. Ebenso sollte die Quantifizierung des Bestandesniederschlags im Messnetz des DWD gefördert werden.
- Eine Verknüpfung von Verfahren und Ergebnissen des Forstlichen Umweltmonitorings mit anderen Monitoringprogrammen z. B. zur Biodiversitätsmonitoring, zum Verbissmonitoring, zum Waldschutzmonitoring und zum Genetischen Monitoring fehlt weitgehend.
- Erschwerend kommt hinzu, dass in den begleitenden Monitoringerhebungen auf Länderebene (z. B. Verbissmonitoring, Waldschutzmonitoring) keine

zwischen Bund und Ländern abgestimmten Verfahren angewendet werden.

Parallel zur terrestrischen stichprobenartigen Waldzustandserfassung ist die forstliche Fernerkundung seit mehreren Jahrzehnten bestrebt, diese Informationslücke zu schließen. Erfassung des Waldzustandes durch Befliegung und unter Verwendung von z. B. Multispektralkameras ist seit vielen Jahren erprobt und wird großflächig für ganze Bundesländer eingesetzt. Die Auswertung der Luftbilder erfolgt meist teilautomatisiert mittels traditioneller Bildverarbeitungsmethoden.

Mit der Verbesserung der Bildauflösung, neuester Sensoren und Kameras (z. B. hyperspektral, LiDAR), kostenfreiem Zugang zu zeitlich hochaufgelösten Satellitenzeitreihen (Sentinel, Landsat), dem kostengünstigen Einsatz von eigenen Fluggeräten (z. B. Drohnen) und der verbesserten Datenspeicherung und -verarbeitung steigen die Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungsverfahren für die Vitalitätsbewertung von Gehölzen. Allerdings ist die Unterscheidung von Baumarten bzw. -gattungen besonders in Mischbeständen und eine differenzierte Abschätzung des Vitalitätszustands mittels Satellitendaten noch immer nicht problemlos operationell einsetzbar.

In Artikel 11 der europäischen Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH) ist die Überwachung des Erhaltungszustandes (Monitoring) der Lebensraumtypen (LRT) (Anhang I) und Arten (Anhänge II, IV und V) von europäischem Interesse vorgesehen. Es liegen dazu zwischen Bund und Ländern abgestimmte Bewertungsschemata mit Empfehlungen zum methodischen Vorgehen für die Erfassung und Bewertung des Erhaltungsgrades einzelner Vorkommen vor (BfN 2017). In den deutschen FFH-Gebieten sind die Wald-Lebensraumtypen mit einer Gesamtfläche von ca. 800.000 ha vertreten, zu denen alle sechs Jahre ein Bericht, unter der Verantwortung der Länder, erstellt wird. Die Qualität einzelner Vorkommen wird regelmäßig in einer repräsentativen Stichprobe im Rahmen des bundesweiten FFH-Monitorings erhoben. Häufigere Lebensraumtypen und Arten werden in mindestens 63 Stichproben je biogeografischer Region untersucht, während bei seltenen Arten und Lebensraumtypen alle bekannten Vorkommen erfasst werden.

Darüber hinaus existieren bundesweit weitere für den Wald relevante Monitoringprogramme, die alle das Ziel haben, durch ein systematisches Vorgehen repräsentative Daten über die Veränderung der Natur und Landschaft zu erheben. Zu nennen sind hier beispielhaft das Insektenmonitoring, Tagfaltermonitoring, Vogelmonitoring, Monitoring häufiger bzw. seltener Brutvögel, WILD Monitoring, Wolfmonitoring, Bodenzustandserhebung (BZE), Bodendauererhebung.

Bei vielen der Monitoringerhebungen werden hauptamtliche von ehrenamtlichen Kartiererinnen und Kartierern unterstützt.

Zum nationalen Ausbau des Biodiversitätsmonitorings wurde im Frühjahr 2021 vom Bundesumweltministerium das Nationale Monitoringzentrum zur Biodiversität (NMZB) in Leipzig eröffnet. Ziel ist es Monitoringakteure zu vernetzen, mit ihnen das bundesweite Biodiversitätsmonitoring weiterzuentwickeln, die Monitoringpraxis und -forschung zusammenzubringen, Methoden weiterzuentwickeln sowie Informationen über die Aktivitäten zum Biodiversitätsmonitoring bereitzustellen. Im Rahmen des internationalen Biodiversitätsmonitorings wurden von Pereira et al. (2013) bereits ein Konzept der Essentiellen Biodiversität Variablen (EBV) vorgeschlagen, was die Basis für ein weltweites Biodiversitätsmonitoringprogramm sein soll.

Auch das sogenannte Testbetriebsnetz Forst (TBN-Forst) erfüllt einen gesetzlichen Auftrag, denn gem. § 41 BWaldG ist die Bundesregierung verpflichtet, dem Deutschen Bundestag auf Grund der Wirtschaftsergebnisse der Staatsforstverwaltungen und der Forstbetriebsstatistik über die Lage und Entwicklung der Forstwirtschaft und der Struktur der Holzwirtschaft des Bundesgebiets sowie über die zur Förderung der Forstwirtschaft erforderlichen Maßnahmen zu berichten. Dieser Bericht erstreckt sich auch auf die Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion.

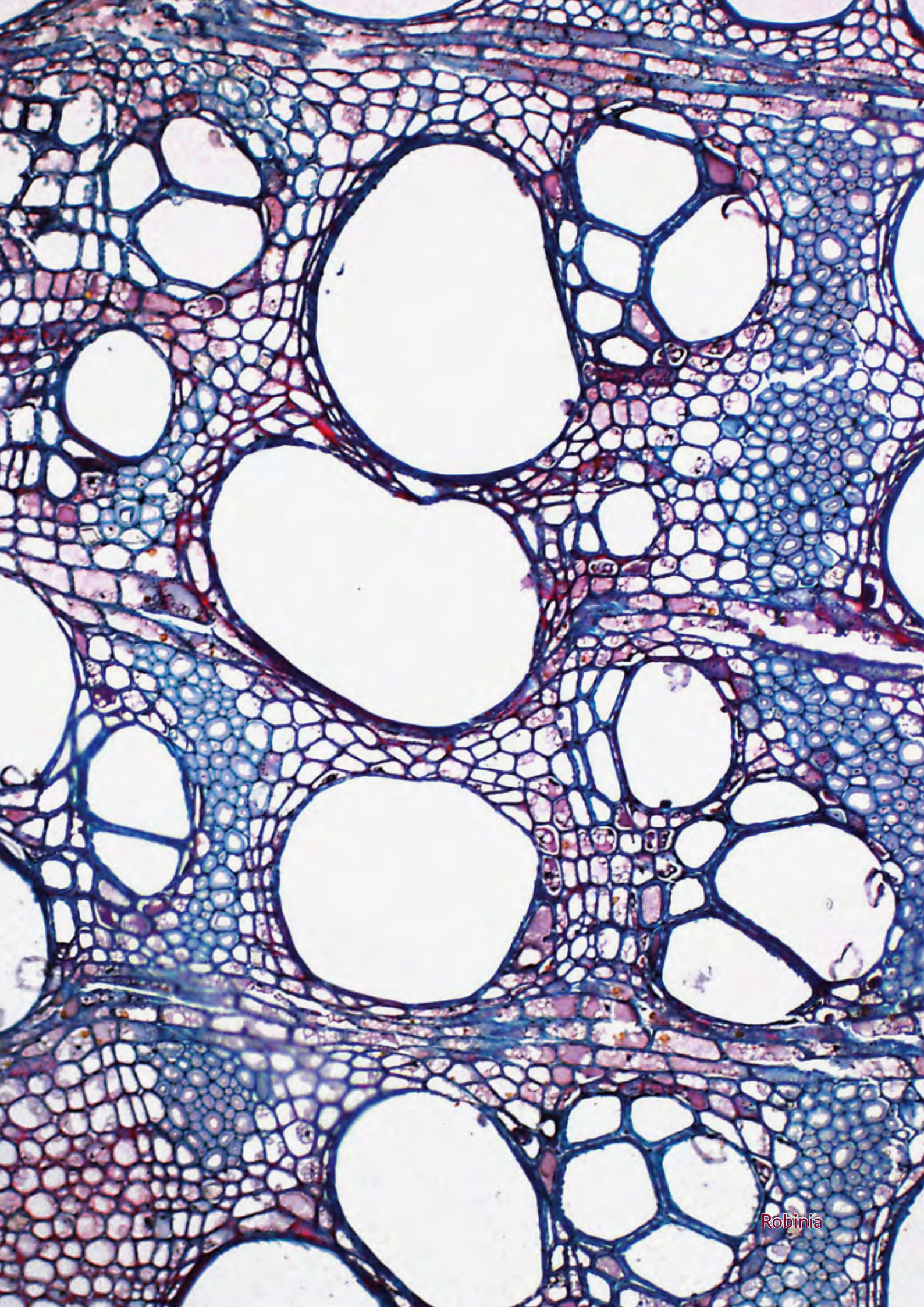
Das TBN Forst wurde bereits im Jahr 1951 eingerichtet, um Buchführungsdaten von deutschen Forstbetrieben zu erfassen, auszuwerten und in der Entwicklung zu beobachten. Das Testbetriebsnetz Forst befindet sich seit dem Jahr 1976 im Zuständigkeitsbereich des heutigen BMEL. Es wird durch den Bund und die Länder betrieben. Die Länder sind im Wesentlichen zuständig für die Datenerhebung bei den Forstbetrieben und die Datenplausibilisierung. Der Bund ist im Wesentlichen zuständig für Datenmanagement und -auswertungen sowie die Berichterstattung und Dokumentation (Bauer et al. 2016).

Beim Testbetriebsnetz Forst handelt es sich um eine freiwillige Beurteilungsstichprobe. Nach dem „Bedarfsplan“ des Testbetriebsnetz Forst wird, neben der Teilnahme der 13 Staatswaldbetriebe der Flächenbundesländer, die Teilnahme von rund 270 Forstbetrieben des Körperschaftswaldes und 160 Forstbetrieben des Privatwald, differenziert nach Bundesländern und Flächengrößenklassen, angestrebt (Seintsch et al. 2017). Die tatsächliche Teilnahme war in den vergangenen Jahren jedoch deutlich geringer und beständig rückläufig, wobei sich der Negativtrend in jüngster Zeit deutlich verstärkt hat. Diese Negativentwicklung beim Testbetriebsnetz Forst verdeutlicht den dringenden Handlungsbedarf zur Weiterentwicklung



des Testbetriebsnetz Forst, um diese bedeutende und zwingend erforderliche Datenquelle zu erhalten, denn die amtliche Statistik, die Forstpolitik des Bundes und der Länder aber auch die Forstbetriebe selbst und deren Interessenvertretung sind auf valide forstbetriebswirtschaftliche Informationen angewiesen.

Die aktuellen forstwirtschaftlichen Herausforderungen durch die großflächigen Waldschäden und den Klimawandel aber auch die allgemeinen gesellschaftlichen Entwicklungen (demografischer Wandel, Schutzes der Biodiversität, Förderung der Bioökonomie, Honorierung von Ökosystemleistungen etc.) machen die Lösung dieses Problems noch dringender. Darüber hinaus müssen die Prozesse zur Information der Öffentlichkeit (EU Inspire-Richtlinie, Geodatenzugangsgesetz, Umweltinformationsgesetz) zum Zustand und zur Entwicklung der Wälder optimiert und an moderne Kommunikationsmedien angepasst werden.



Robinia

# 4

## Handlungsempfehlungen

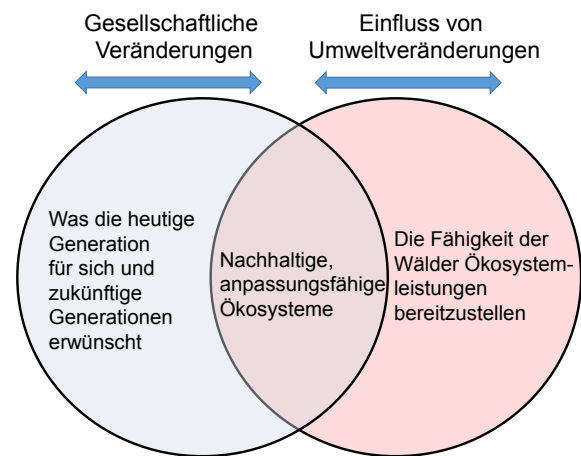
### 4.0 Einführung und Zusammenfassung der wichtigsten Empfehlungen

Die Empfehlungen, die der Wissenschaftliche Beirat (WBW) in diesem Kapitel zur Anpassung an den Klimawandel ausspricht, basieren auf den vorangegangenen Kapiteln. Dort wurden die Auswirkungen der Klimaänderungen auf Wälder und ihre Ökosystemleistungen analysiert (Kap. 1.2), die für die Klimaanpassung relevanten Strukturen, Politiken und Steuerungsinstrumente dargestellt (Kap. 2), die zu erwartenden Veränderungen in den verschiedenen, von den Ökosystemleistungen des Waldes abhängigen Bereichen (Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, Bioökonomie, Naturschutz, Gesundheitsvorsorge, Erholung und Tourismus) ergründet und die für diese Bereiche identifizierten möglichen Wechselbeziehungen und Anpassungshemmnisse erörtert (Kap. 3).

Die Empfehlungen erstrecken sich dabei auf dreizehn verschiedene Handlungsfelder. Sie richten sich nicht nur an die Politik auf Ebene des Bundes, der Länder, Landkreise und Kommunen, sondern auch an andere Akteure in den oben genannten Bereichen, die einen relevanten Beitrag zu den notwendigen Transformationen leisten können. Da die Generationenaufgabe der Anpassung unserer Wälder und ihrer Bewirtschaftung an den Klimawandel zur Sicherung der Ökosystemleistungen viele Bereiche betrifft, finden sich in den Handlungsempfehlungen entsprechend zahlreiche und zum Teil detaillierte Empfehlungen. An dieser Stelle werden zunächst die wichtigsten Empfehlungen zusammengefasst.

Unsere Empfehlungen spiegeln ein Leitbild für den Wald der Zukunft sowie für die Art und Weise wider, wie er zum Wohle der Gesellschaft nachhaltig genutzt werden sollte. Die zukünftige Entwicklung des Waldes in diesem Jahrhundert könnte auf sehr unterschiedlichen Pfaden verlaufen. Diese Entwicklungspfade werden nicht nur vom Klimawandel, sondern auch von den Änderungen der Ansprüche der Waldbesitzer/innen und Gesellschaft an den Wald sowie vom technischen Fortschritt beeinflusst werden. Die Treiber dieser Entwicklungen wurden bereits vom WBW in seiner Stellungnahme „Eckpunkte der Waldstrategie 2050“ (WBW 2020) skizziert. Konkrete Entwicklungspfade, die sich aus den vielfältigen Kombinationen der verschiedenen Einflussfaktoren ergeben, und welche

Auswirkungen sie auf Wald und Gesellschaft im Einzelnen haben werden, lassen sich aufgrund der Vielzahl notwendiger Annahmen nicht glaubwürdig darstellen. Selbst sehr weit entwickelte Klimamodelle können Extremwetterereignisse, die einen entscheidenden Einfluss auf Wälder und ihre Ökosystemleistungen haben, nur unzureichend abbilden. Technische und gesellschaftliche Entwicklungen wie zum Beispiel die Umsetzung der bis zum Jahr 2045 geplanten Klimaneutralität oder die zukünftige Nachfrage nach Ökosystemleistungen sind ebenfalls sehr schwierig zu prognostizieren. Gleichzeitig haben unsere gegenwärtigen Bedürfnisse und auch unsere Vorstellungen der Zukunft Einfluss darauf, wie Wälder und unsere Beziehung zu ihnen zukünftig aussehen.



**Abb. 30:** Nachhaltige, anpassungsfähige Wälder als Schnittmenge von gesellschaftlichen Werten und nachgefragten Ökosystemleistungen einerseits sowie der Kapazität der Wälder diese Ökosystemleistungen bereitzustellen. Veränderungen der Umwelt und Gesellschaft beeinflussen den Überlappungsbereich, in dem gesellschaftliche Anforderungen von den Ökosystemen auch bedient werden können. Das Ziel einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Waldpolitik und -bewirtschaftung muss es sein, diesen Überlappungsbereich jetzt und in Zukunft möglichst groß zu gestalten (verändert nach Bauhus et al. 2017b).

Die Empfehlungen des WBW zielen darauf ab, die Entscheidungen und Handlungen für eine Klimaanpassung unserer Wälder darauf auszurichten, dass zukünftige Generationen die gleichen Optionen auf die Ökosystemleistungen der Wälder haben wie die

heutige. Bei der nachhaltigen Steuerung des Ökosystems Wald mit den langen Lebenszeiten von Bäumen und ausgedehnten Produktionszeiträumen spielt das Nachhaltigkeitsprinzip der Generationengerechtigkeit eine besondere Rolle für eine nachhaltige Transformation. Auch wenn es durch den Wandel von Klima und Gesellschaft sehr wahrscheinlich zu Veränderungen in den Gewichtungen zwischen den verschiedenen Ökosystemleistungen kommen wird, sollten unsere Wälder auch in Zukunft ein Hort der Biodiversität sein, so dass wir dort weitgehend die gleichen Arten vorfinden werden wie heute, wenngleich in veränderten ökologischen Gemeinschaften und möglicherweise an anderen Orten in der Landschaft. Die Wälder sollten nach wie vor in ausreichenden Mengen sauberes Trinkwasser liefern, Böden schützen, CO<sub>2</sub> in Biomasse, Böden und Holzprodukten speichern, der Gesellschaft von morgen einen Raum für Erholung, Gesundheit und Freizeitaktivitäten bieten, Waldbesitzer/innen eine Einkommensquelle ermöglichen und mit der Bereitstellung der erneuerbaren Ressource Holz den bereits eingeschlagenen Weg zur Klimaneutralität der Wirtschaft befördern. Nicht jeder Wald wird in gleicher Weise all diese verschiedenen Ökosystemleistungen bieten können, noch werden sie überall in ähnlicher Intensität nachgefragt werden. Daher wird es, wie bereits auch jetzt, durch die verschiedenen Waldbesitzer/innen und unterschiedlichen standörtlichen Voraussetzungen zu Schwerpunktsetzungen kommen. Aufgrund der kleinräumigen Vermischung der unterschiedlichen Waldbesitzformen und auch der Standortvielfalt in Deutschland kann jedoch ein Ausgleich und eine Erreichung der übergeordneten Ziele auf Landschaftsebene erfolgen.

Die Empfehlungen des WBW zielen darauf ab, diese Optionenvielfalt für Ökosystemleistungen langfristig sicherzustellen. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### 1. Erhalt und Entwicklung diverser, resilienter und anpassungsfähiger Wälder.

Funktionsfähige und produktive Ökosysteme sind die Grundlage für Ökosystemleistungen. Daher müssen Wälder, die heute als nicht anpassungsfähig angesehen werden, in diese Richtung entwickelt werden (siehe 4.1). Da die natürlichen Anpassungsprozesse in vielen Fällen nicht mit der Geschwindigkeit des Klimawandels Schritt halten können, muss dieser Prozess, wenigstens zum Teil, aktiv gesteuert und unterstützt werden. Dabei geht es vor allem um den Erhalt und die Entwicklung vielfältiger Wälder. Neben der Vielfalt standortangepasster Baumarten und deren

funktionaler und genetischer Diversität geht es dabei auch um den Struktur- und Artenreichtum allgemein. Denn vielfältige Waldökosysteme weisen aufgrund der Risikostreuung und der vielfältigen Interaktionen tendenziell eine höhere Resistenz, Resilienz und in der Regel auch Anpassungsfähigkeit auf. Der Schutz der Waldböden und ihrer Funktionen trägt wesentlich zur ökologischen Stabilität der Wälder bei. Die Empfehlungen des WBW zielen darauf ab, die Waldbesitzenden mit den notwendigen Ressourcen in die Lage zu versetzen, diese erforderliche Anpassung der Wälder bei gleichzeitigem Schutz von Biodiversität (siehe 4.4) und Böden (siehe 4.5) auf einer gesicherten wissenschaftlichen Grundlage voranzutreiben. Damit Wälder auch unter den Bedingungen des Klimawandels als Orte für die Freizeit- und Erholungsnutzung gut geeignet sind, müssen neben den Ökosystemveränderungen die gesellschaftlichen Ansprüche und Veränderungen gleichermaßen adressiert werden (siehe 4.7).

### 2. Verbesserung des Risikomanagements.

Walderhalt setzt in vielen Fällen auch voraus, die Wälder aktiv vor biotischen und abiotischen Gefahren zu schützen, die voraussichtlich in Zukunft zunehmen werden (siehe 4.2). Daher bedarf es einer deutlichen Verbesserung des Risikomanagements (siehe 4.3) in enger Verknüpfung mit einem zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Monitoring (siehe 4.9). Sowohl Risiken als auch eingetretene Störungen müssen besser als bisher rechtzeitig erkannt, lokalisiert und hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Folgen bewertet werden, um rechtzeitig Präventions-, Vorsorge-, und Bekämpfungsmaßnahmen einleiten zu können. Neue Verfahren des Waldschutzmonitorings spielen dabei eine große Rolle. Da Störungen trotzdem eintreten werden, sind auch Strukturen und Kapazitäten, wie zum Beispiel Nasslagerplätze dauerhaft in einsatzfähigem Zustand vorzuhalten, um zukünftige Schäden effektiv zu bewältigen. Zur Stärkung des Risikomanagements im Privat- und Körperschaftswald sollte die Erstellung von betrieblichen Risikomanagementplänen im Rahmen der GAK (Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes) gefördert werden.

### 3. Aufbau eines überbetrieblichen, hoch aufgelösten Waldmonitorings (siehe 4.9).

Waldmonitoring nimmt nicht nur aufgrund seiner Bedeutung im Risikomanagement, zum Beispiel bei der Identifizierung von Risiken und Quantifizierung von Schäden, eine Schlüsselstellung in dem Prozess der Anpassung der Wälder ein. Es kann auch der

Quantifizierung von Waldentwicklungen, der Biodiversität, Ökosystemleistungen und ihrer Inanspruchnahme sowie der Überprüfung der Wirksamkeit forstlicher Maßnahmen dienen. In Ergänzung von Inventuren auf Betriebsebene liefert es dadurch auch die Evidenzbasis für ein adaptives Management und gesellschaftliche Diskurse über Waldwirtschaft. Da das gegenwärtige Waldmonitoring, das im Wesentlichen aus Waldzustandserfassung, Bodenzustandserhebung, Bundeswaldinventur und Testbetriebsnetz Forst besteht, den aktuellen und künftigen Anforderungen an räumliche und zeitliche Auflösung in vielen Fällen nicht mehr gerecht wird, soll es durch moderne Methoden der Digitalisierung und Fernerkundung, der Artidentifikation und Monitorings sozialer und ökonomischer Indikatoren so erweitert werden, dass flächenbezogene Aussagen ermöglicht, die Vernetzung möglichst vieler Elemente des forstlichen Monitorings gewährleistet, die Bereitstellung von Informationen beschleunigt, und das Artenspektrum der Zielorganismen erweitert wird. Dies erfordert erhebliche Investitionen in Forschung und den Aufbau von Kapazitäten.

#### **4. Anpassung von institutionellen Strukturen (siehe 4.10).**

Zunehmende Schadereignisse, eine Reduktion der Produktivität der Wälder und Veränderungen im Baumartenspektrum werden bei gleichzeitig steigenden Kosten für Anpassung, Risikomanagement, Monitoring und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen die Erträge aus der traditionellen Waldbewirtschaftung mit Fokus auf Rohholzproduktion langfristig reduzieren. Diese Entwicklungen verschärfen die ohnehin schon bestehenden strukturellen Probleme im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald und erfordern die Schaffung stabiler institutioneller Strukturen, welche langfristig finanziell abgesichert sind. Nur so können private und körperschaftliche Kleinwaldbesitzer dauerhaft die vielfältigen Ansprüche an den Wald erfüllen. Dafür empfehlen wir die Etablierung stabiler, leistungsfähiger Strukturen für die Betreuung des Nichtstaatswaldes und den Aufbau von Informationsplattformen, die Schaffung von Anreizen zur aktiven Waldbewirtschaftung und Bildung von größeren Bewirtschaftungseinheiten, sowie eine effizientere Gestaltung der forstlichen Förderung.

#### **5. Ökosystemleistungen honorieren (siehe 4.8).**

Die aktuell größte forstpolitische Herausforderung auf dem Weg zu einer raschen und effektiven Anpassung der Wälder an den Klimawandel sehen wir darin, dass die Einnahmen der Forstbetriebe gegenwärtig

fast ausschließlich auf Erlösen aus dem Holzverkauf beruhen, wohingegen andere Leistungen für Klimaschutz, Wasserschutz, Naturschutz, Erholung etc. für die Forstbetriebe in der Regel als Lasten wahrgenommen werden, da ihre Bereitstellung nicht zu Einnahmen, sondern meist zu Erlöseinbußen oder Mehrkosten führen. Daher empfehlen wir, dass die öffentliche Hand Finanzierungs- und Geschäftsmodelle unterstützt, die den Forstbetrieben langfristig planbare Einnahmen aus der Bereitstellung von Ökosystemleistungen ermöglichen. Eine grundsätzliche Möglichkeit hierfür sehen wir darin, die Anpassung bzw. Anpassbarkeit der Wälder an den Klimawandel, welche die Grundlage für die zukünftige Erbringung aller Ökosystemleistungen darstellt, zu honorieren. Diese Art der Honorierung sollte in Ergänzung zur Förderung nach GAK erfolgen. Im Gegensatz zur GAK würden nicht die einzelnen Maßnahmen, die zur Anpassung führen (z. B. Waldumbau), sondern das Ergebnis honoriert werden. Forstbetriebe erhielten somit für den Teil ihrer Wälder eine laufende Honorierung, der als hinreichend resilient und anpassungsfähig betrachtet werden kann. Für ein solches System wäre eine gewisse Differenzierung nach dem Grad der Anpassbarkeit und Anpassungsfähigkeit möglich, beispielsweise in Form eines Ampelsystems. Ein solches System sollte unterscheiden zwischen Wäldern, die nach jetzigem Wissensstand als weitgehend resilient und anpassungsfähig betrachtet werden können, solchen, die durch Waldumbaumaßnahmen in diese Richtung entwickelt werden, und solchen, die als Risikobestockung einzustufen sind. Die für diese Einstufungen erforderlichen Kriterien und valide und standardisiert zu erhebenden Indikatoren, müssten wissenschaftlich fundiert von einer breit aufgestellten Arbeitsgruppe, zum Beispiel mit Vertreterinnen und Vertretern der Wissenschaft, der forstlichen Praxis, sowie der Zertifizierungsunternehmen entwickelt und dem BMEL als Vertreter des Bundes vorgeschlagen werden.

#### **6. Nachhaltige Holzverwendung fördern (siehe 4.6).**

Eine für die Gesellschaft wesentliche Ökosystemleistung der Wälder ist die Bereitstellung von Holz. Die in diesem Gutachten vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen verändern das Holzangebot in seiner Menge und Zusammensetzung. Damit sie überhaupt realisiert werden können und nicht an Marktwiderständen scheitern, ist eine Anpassung der nachgelagerten Holzwirtschaft und Holzverwendung an die geänderte Produktivität und Baumartenzusammensetzung der Wälder, an andere Sortimente und einen höheren Anteil zufälliger Nutzungen erforderlich. Für den Erhalt und Ausbau dieser Ökosystemleistung nachhaltige

Versorgung mit Holz müssen zeitnah Wertschöpfungsketten etabliert werden, die die wirtschaftliche und klimawirksame Nutzung aus einheimischen Holzrohstoffen optimieren und damit die Transformation zu einer Bioökonomie maßgeblich stützen. Dabei sollten Anreizsysteme stärker für die stoffliche als für die direkte energetische Nutzung ausgebildet werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei der Holzbau, dessen Anteil an Baukonstruktionen durch die rasche Umsetzung einer möglichst hohen und langfristigen Verwendung von Holz im Baubereich signifikant gesteigert werden sollte. Weiterhin sind technische Verfahren zu entwickeln, die geeignet sind, bisher schwer zu vermarktende Holzsortimente wie Kalamitätsholz, Nadelstarkholz oder Laubholz, mit hoher Wertschöpfung zu verarbeiten. Um die in Zukunft im Inland zurückgehende Bereitstellung von Nadelholzsortimenten teilweise ersetzen zu können, müssen Voraussetzungen für die Generierung neuer Holzstoffquellen aus Gebraucht- und Altholz geschaffen werden.

### **7. Forschungskapazitäten stärken, besser vernetzen und neu ausrichten (siehe 4.13).**

Um die Forschung zur Anpassung von Wäldern, Forst- und Holzwirtschaft und anderen relevanten Sektoren an den Klimawandel effektiv und effizient zu gestalten, wird eine Neuausrichtung forstwissenschaftlicher, waldökologischer und holzproduktbezogener Forschung empfohlen. Dabei geht es nicht primär um neue Forschungsinhalte, die sich aus den Herausforderungen ergeben, sondern um eine verstärkte strategische Ausrichtung und die Entwicklung neuer Forschungsansätze im Sinne einer an Dringlichkeit, Lösungsorientierung und Implementierung ausgerichteten Nachhaltigkeitsforschung, die Schaffung von entsprechend langfristig angelegten Forschungsinfrastrukturen und Kapazitäten beispielsweise in regionalen Clustern angesiedelten und in Verbundforschungsvorhaben bearbeiteten Waldlaboren, der besseren Vernetzung und Kooperation zwischen bestehenden Forschungseinrichtungen sowie der verbesserten Bereitstellung und dem verstärkten Austausch von Daten und Modellen, unter anderem um gemeinsame Synthesen zu befördern.

Zur Beförderung des Transformationsprozesses sprechen wir darüber hinaus Empfehlungen zu Änderungen in der Aus- und Weiterbildung (siehe 4.12) und zur Kommunikation von Klimaanpassungsstrategien (siehe 4.11) aus. Die Empfehlungen sind im Einzelnen in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.



### **4.1 Resiliente und anpassungsfähige Wälder erhalten und entwickeln**

Eine Förderung und Ausweitung resilienter, anpassungsfähiger Wälder kann im Wesentlichen während der Verjüngungsphase von Wäldern, aber auch mit Maßnahmen in der Bestandespflegephase gefördert werden. Daher sind die folgenden Empfehlungen auf diese beiden Phasen aufgeteilt.

Mit geeigneten Verjüngungsmaßnahmen können wesentliche Weichen zur Erhöhung der Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit von Waldbeständen gestellt werden. Dazu wird den sich ändernden Umweltfaktoren eine möglichst große Anzahl genetisch verschiedener Individuen zur Selektion gegenübergestellt. Dies kann über die Zusammensetzung der Verjüngung aus verschiedenen Baumarten, unterschiedlichen Herkünften einer Baumart, einer individuenreichen Naturverjüngung einer Baumart sowie durch unterschiedliche Verjüngungsalter erreicht werden. Wichtige Voraussetzung dafür sind: (1) Dynamisierung der Waldentwicklungstypen und Verwendung standortgerechter Baumarten unter Berücksichtigung des Klimawandels, (2) eine kontinuierliche Förderung von Verjüngung und Vorausverjüngung bestehender Bestände, (3) der Erhalt und die Erweiterung der Baumartendiversität, (4) die Sicherung und gezielte Verbesserung einer hohen genetischen Vielfalt, (5) die Nutzung von Störungen zur Umgestaltung der Wälder, (6) sowie eine Änderung bestehender Regelungen zur Verlängerung der Wiederbewaldungsfristen nach Ernte bzw. Störungen. Bei der Neuanlage von Wald und Wiederaufforstung sollte zudem die (7) Vernetzung und Erweiterung von Habitaten berücksichtigt werden. Empfehlungen zum Waldschutz und Risikomanagement, die dem Aufbau und Erhalt resilienter Wälder dienen, finden sich unter 4.2 und 4.3. Zur Erhöhung der Resilienz und Anpassungsfähigkeit der Wälder in den Bestandesentwicklungsphasen, die sich an die gesicherte Verjüngung anschließen, empfehlen

wir zusätzlich (8) Pflegemaßnahmen zur Entwicklung strukturierter, ökologisch stabiler Mischbestände.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

### 1. Eine dynamische Zieltypenplanung für Waldbestände auf standörtlicher Grundlage entwickeln

- Waldentwicklungstypen bzw. Betriebszieltypen sind eine wichtige Grundlage für die waldbauliche Planung und Beratung. Sie bieten die Möglichkeit, Baumarten mit unterschiedlichen Anteilen und bei gleichzeitiger hoher Überlebenswahrscheinlichkeit unter aktuellen und künftigen Standortbedingungen zu kombinieren. Die bisherigen bundeslandspezifischen Waldentwicklungstypen sollten, sofern noch nicht geschehen, dringend auf der Grundlage von Baumarteneignungsmodellen dynamisiert werden. Für die Einschätzung des zukünftigen Bodenwasserhaushalts unter verschiedenen Szenarien des Klimawandels sind vielfach zusätzliche bodenbezogene Informationen notwendig (siehe 4.5).
- Die den Waldentwicklungstypen zugrundeliegenden Klima- und Baumarteneignungsmodelle sollten künftig auf regionaler bzw. Bundesebene miteinander vergleichbar gemacht werden. Dies würde die Beratungssicherheit erhöhen und den Wissenstransfer vereinfachen. Regelmäßige Revisionen der Waldentwicklungstypen sollten zunehmende Information zu genetischer Variation innerhalb von Baumarten sowie dokumentierte Praxiserfahrungen integrieren.

### 2. Verjüngung und Vorausverjüngung kontinuierlich fördern

- Die Resilienz der Wälder sollte durch die Etablierung von Vorausverjüngung erhöht werden. Dadurch können vielfältige Probleme und hohe Aufwendungen die mit der Verjüngung nach Störungen verbunden sind, vermieden werden. Insbesondere Risikobestände sollten konsequent im Rahmen von Waldumbaumaßnahmen mit Baumarten des jeweiligen Waldentwicklungstyps vorverjüngt werden. Schattenintolerante Baumarten, die sich unter Schirm nicht oder nur schlecht vorverjüngen lassen, sollten so in die Bestandesmatrix integriert werden, zum Beispiel entlang von äußeren und inneren Waldrändern wie Forststraßen, dass sie nach Störungen über natürliche Samenverbreitung auf die zu verjüngenden Flächen

gelangen können. Die Etablierung von Pionieren und seltenen Baumarten als zukünftige Samenquellen in die Bestandesmatrix sollte ebenso gefördert werden wie der Erhalt alter Samenbäume.

- Zur Förderung von strukturierten, artenreichen und produktiven Wäldern sollte auf ausreichend großen Waldflächen, welche auch mehrere Bestände umfassen können, der Verjüngungsprozess zeitlich ausgedehnt und räumlich differenziert erfolgen. Die entstehenden Mehrkosten durch häufigere Pflegeeingriffe sollten im Rahmen der bestehenden Förderung der Jungbestandspflege durch an längere Zeiträume angepasste Fördersätze kompensiert werden.

### 3. Baumartendiversität erhalten und erweitern

- Zur Streuung von Risiken und Stärkung der Anpassungsfähigkeit sollte die Verjüngung der Wälder baumartenreich, genetisch divers und angepasst sein. Innerhalb des gewählten Waldentwicklungstyps sollten zukünftige Bestände mit wenigsten drei standortgerechten Baumarten in stabilen Mischungsformen begründet werden, wo das standörtlich möglich ist. Die Mischung sollte eine Bedingung für die Gewährung von Förderung der Verjüngungsmaßnahmen sein. Für diese Baumartenkombinationen sollten geeignete bzw. stabile Mischungsformen empfohlen werden. Die verschiedenen Baumarten des jeweiligen Waldentwicklungstyps sollten unterschiedlichen funktionalen Typen hinsichtlich ihrer Stress- und Störungstoleranz angehören, um so die Reaktionsmuster in Bezug auf Störungen zu diversifizieren, zum Beispiel die Vermeidung von drei Nadelbaumarten, die in ähnlicher Weise durch Trockenheit, Hitze und Borkenkäfer gefährdet sind. Da auf vielen Standorten das Anbaurisiko einiger standortsheimischer Baumarten deutlich zunehmen wird, sollte die Baumartendiversität, wo nötig, durch Integration zusätzlicher Baumarten aufrechterhalten bzw. erhöht werden.
- Die Frage der Baumartenwahl spielt eine zentrale Rolle bei der Anpassung der Wälder, da viele Ökosystemleistungen eng mit den Baumarten verknüpft sind. Viele unterstützende und regulierende Ökosystemleistungen sind eng mit den vielfältigen Interaktionen und der Biodiversität des gesamten Ökosystems verbunden. Sie werden daher insbesondere von heimischen Baumarten befördert. Bei einigen bereitstellenden Ökosystemleistungen kommt es auf spezifische Eigenschaften der Baumarten an, z. B. Nadelholz für die Bereitstellung

von sägefähigem Stammholz für den Holzbau. Daher muss die Wahl der Baumarten am konkreten Standort sowie die Planung der Baumartenanteile in der Waldlandschaft die Bereitstellung der Ökosystemleistungen im Wald sowie für Wertschöpfungsketten im Blick haben. Dort wo wir einheimische Baumarten verlieren (z. B. Esche), sollten alternative Baumarten in der Lage sein, einem möglichst großen Teil der Arten, die von den heimischen Baumarten abhängen, eine Grundlage zu bieten. Zum Schutze der Biodiversität sollte zunächst das genetische Potenzial der heimischen Baumarten, inklusive bisher seltener Arten, und ihrer Provenienzen ausgeschöpft werden. Dort wo Anpassungsziele mit diesen Arten nicht erreicht werden können, sollten Baumarten eingesetzt werden, die durch ihre nahe Verwandtschaft zu heimischen Arten am ehesten erwarten lassen, dass ein großer Teil der abhängigen Biodiversität unterstützt wird (z. B. Zerreiche, Türkische Tanne). Dort wo Baumarten mit wichtigen Produktionsfunktionen ausfallen (z. B. Fichte), sollten Alternativbaumarten diese Funktion übernehmen können (z. B. Tanne, Douglasie).

- Dort wo eingeführte Baumarten angebaut werden, sollten diese in eine Matrix einheimischer Baumarten eingebettet und ihre Flächenanteile an Beständen und Landschaften auf ein Maß begrenzt werden, das die heimische Biodiversität nicht gefährdet. Diese Anteile sind bisher weitgehend unbekannt und sollten daher erforscht werden. In jedem Fall sollten für verwendete Alternativbaumarten eine Güterabwägung zwischen Anbauwürdigkeit und -risiken durchgeführt werden. Diese sollte auf langfristige Erfahrungen und Risikoabschätzungen, zum Beispiel zur Invasivität, in Deutschland, anderen Anbaugebieten und im natürlichen Verbreitungsgebiet beruhen. Diese Güterabwägung sollte in Leitlinien der Länder zur Förderfähigkeit alternativer Baumarten berücksichtigt werden (Positiv- bzw. Negativlisten).
- Zu den Alternativbaumarten gehören standortsgerechte (seltene) einheimische Baumarten, bereits eingeführte Baumarten (z. B. Roteiche oder Douglasie), Arten aus angrenzenden Regionen Süd(ost)europas, sowie andere Baumarten, für die bisher noch keine oder nur eine geringe Anbauerfahrung in Mitteleuropa vorliegt. Dabei müssen geeignete Herkünfte und bei Bäumen, die nicht dem Forstvermehrungsgutgesetz (FoVG) unterliegen, geeignete Vorkommensgebiete verwendet werden. Vor dem Hintergrund des Klimawandels sind die rechtlichen Regelungen zum Forstvermehrungsgut von

besonderer Bedeutung. Insbesondere ist die Artenliste der dem FoVG unterliegenden Baumarten unter Beibehaltung der derzeitigen Kategorien zu erweitern. Dieses hat konsequenterweise für alle im Wald zukünftig für den Anbau vorgesehenen Gehölzarten zu gelten. Weiterhin sind die Herkunftsgebiete neu zu strukturieren, so dass für alle Gehölzarten eine gleiche Anzahl von einheitlichen Herkunftsgebieten existiert. Hierfür bieten sich die 46 ökologischen Grundeinheiten in Verbindung mit einer Höhenzonierung an. Von einer Wiedereinführung der Kategorie „Quellengesichert“ wird abgeraten. Stattdessen könnten für ausgewählte Gehölzarten bei einigen der Mindestkriterien für die Zulassung von Ausgangsmaterial der Kategorie „Ausgewählt“ Abstriche in der Forstvermehrungsgut-Zulassungsverordnung (FoVZV) gemacht werden.

- Die nach jetzigem Kenntnisstand meistversprechenden, alternativen Baumarten mit bisher geringer Anbauerfahrung, sind dringend in koordinierten Verbundversuchen in Deutschland bzw. Mitteleuropa auf einem möglichst breiten Standortsspektrum zu prüfen. Die Empfehlungen der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „Forstliche Genressourcen und Forstsaatgutrecht“ zu den Arbeitsaufträgen der Waldbaureferenten der Länder bilden dafür eine gute Grundlage, die um weitere Baumarten erweitert werden sollte.
- Praxisanbauversuche mit neuen Baumarten sollten nur dann gefördert werden, wenn bestimmte Kriterien bezüglich des Versuchsdesigns (z. B. Mindestgröße der Versuchsfelder, Verbissschutz, Überschilderung, Referenzbaumarten) und der Baumarten erfüllt werden und eine Mindestlaufzeit, wissenschaftliche Begleitung und Dokumentation sichergestellt ist.

### 4. Die genetische Vielfalt sichern und erhöhen

- Neben der Baumartenvielfalt ist die innerartliche phänotypische Plastizität eine entscheidende Grundlage für die Anpassungsfähigkeit auf der Populationsebene. Für phänotypische Merkmale, die eine (epi-)genetische Basis (Vererbbarkeit) haben (z. B. diverse Stresstoleranzen, phänologische Merkmale), ist daher die Funktion des genetischen Systems (Blüte, Samenbildung und -verbreitung, Migration u. a.) und die Aufrechterhaltung der genetischen Vielfalt essenziell. Dies bedeutet zunächst, die Quellen der Saatgutproduktion („Ausgewählte Bestände“, Samenplantagen) hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit zu prüfen und



gegebenenfalls neu zu bewerten oder zu ersetzen. Gleichzeitig sollten ihre aktuellen Standortbedingungen in den Erntezulassungsregistern miteingefasst werden. Dies wäre eine Voraussetzung, um bei künstlicher Verjüngung gezielt standortangepasstes und nicht nur „herkunftsgesichertes“ Vermehrungsgut verwenden zu können.

- Die Herkunftsempfehlungen, einschließlich der Empfehlung von Austauschherkünften („klimaangepasste Saatgutbestände“) bzw. die gezielte Mischung von Vermehrungsgut aus verschiedenen Herkunftsgebieten sind neu zu konzipieren. Vor dem Hintergrund der Standortvielfalt innerhalb von Herkunftsgebieten ist die Tauglichkeit der bestehenden Grenzen des Herkunftsgebietes mittelfristig zu überdenken.
- Um die Einbringung europäischer Alternativbaumarten einschließlich der Gewinnung von Vermehrungsgut aus angepassten heimischen Beständen zu erleichtern, sollten für Deutschland Herkunftsgebiete bzw. ein Herkunftsgebiet ausgewiesen werden. Dies gilt für Baumarten, die nur im europäischen, nicht aber im deutschen Forstsaatgutrecht geregelt sind wie beispielsweise Zerreiche, Flaumeiche und diverse Kiefernarten. Darüber hinaus muss die Ausweisung von geeigneten Erntebeständen nach Forstsaatgutrecht für Baumarten ermöglicht werden, die bisher keiner saatzutrechtlichen Regelung unterliegen, beispielsweise Elsbeere. Notwendig ist die Initiative zur Beschaffung von Saatgut geeigneter Herkünfte/Baumarten im Ausland unter anderem auf der Grundlage von vertraglichen Vereinbarungen und Mindeststandards.

## 5. Störungen zur Umgestaltung der Wälder nutzen

- Großflächige Störungen wie die Trockenschäden der Jahre 2018 – 2020 stellen einerseits große Herausforderungen für die Bewältigung der Schäden und Verjüngung der Schadflächen dar, andererseits bieten sie auch die Gelegenheit, die geplante Anpassung der Wälder substantiell voranzutreiben. Um Störungen für die Anpassung durch künstliche Verjüngung nutzen zu können, sind allerdings entsprechende Kapazitäten für die rasche Anzucht einer hohen Anzahl von Individuen gewünschter Baumarten/Herkünfte erforderlich. Da sich in den vergangenen Jahrzehnten die natürliche Verjüngung auf den meisten Flächen – derzeit 85% – in deutschen Wäldern durchgesetzt hatte, sind die Produktionskapazitäten für Pflanzgut entsprechend zurückgegangen. Die Verfügbarkeit und der Bedarf an Saat- und Pflanzgut sind einer

starken Fluktuation und Zufälligkeit unterworfen, die nicht leicht zu synchronisieren sind. Bei Baumarten bei denen das Saatgut lagerfähig ist, sollten daher ausreichende Saatgutreserven zum Beispiel durch die staatlichen Forstbetriebe angelegt werden. In diesem Zusammenhang kommt auch dem Aufbau von Saatgutreserven z. B. in staatlichen Baumschulen zur Überbrückung von kalamitätsbedingten Engpässen bei der Erzeugung von Pflanzen eine größere Bedeutung zu. Um die Produktionskapazitäten in privaten Baumschulen dauerhaft zu erhöhen, könnten staatliche Forstbetriebe, die nur eine geringe eigene Anzuchtkapazität haben, langfristige Lieferverträge mit Mindestabnahmemengen mit privaten Baumschulen abschließen. Dies würde einerseits den Baumschulen Sicherheit gewähren und andererseits den Verlust von wertvollem Vermehrungsgut entgegenwirken.

- Die Knappheit von Pflanzen zur Wiederbewaldung von Störungsflächen kann auch dadurch gemildert werden, dass die Wiederbewaldungsfristen verlängert oder zunächst Vorwälder begründet werden (siehe Punkt 6). Zudem kann der Bedarf von Pflanzgut für die Wiederbewaldung durch eine Reduktion der Pflanzanzahl je Flächeneinheit verringert werden. Zu diesem Zweck eignen sich beispielsweise Trupppflanzungen in Kombination mit natürlicher Verjüngung zwischen den Trupps.
- Die klimatischen Bedingungen auf den nach Störung entstandenen Freiflächen sind häufig extrem und können zu großen Schwierigkeiten bei der Verjüngung eines Folgebstandes führen. Reliktische Strukturen wie tote stehende und liegende Bäume, hohe Stubben, Kronentotholz, etc. könnten genutzt werden, um Verjüngungsprozesse durch Reduktion der Ein- und Ausstrahlung, der Windbewegung und auch des Verbisses zu fördern. Hier fehlt es allerdings noch an gesicherten Erkenntnissen zur Effektivität dieser Strukturen; diese sollten durch gezielte Forschung gewonnen werden. Der erhöhte Aufwand infolge des Belassens bzw. der Gestaltung dieser Strukturelemente sollte ebenso gefördert werden wie die Anlage von Vorwäldern. Die Schulung zu waldbaulichen Steuerungsmöglichkeiten im Zuge einer Wiederbewaldung nach Störung sollten verstärkt in Weiterbildungsprogrammen angeboten werden.

## 6. Wiederbewaldungsfristen verlängern

- Waldbesitzer sind gesetzlich zur rechtzeitigen Wiederbewaldung von Kahlfeldern verpflichtet. Unbestockte Waldflächen müssen je nach Landesgesetz

in der Regel innerhalb von 2–3 (in wenigen Fällen 5–6) Jahren wieder aufgeforstet bzw. erfolgreich verjüngt werden. Bei unvollständiger Verjüngung muss diese innerhalb von 5 Jahren ergänzt werden. Zur Erzielung strukturierter, ungleichaltriger Bestände sind deutlich längere Zeiträume nötig und sinnvoll. Daher empfehlen wir, dort wo dies unter Berücksichtigung des Bodenschutzes möglich ist, eine Anpassung der Landeswaldgesetze, um längere Zeiträume für die Wiederbewaldung bis zu 10 Jahren zu ermöglichen. Ausgedehnte Verjüngungszeiträume würden die Möglichkeit eröffnen, der natürlichen Verjüngung einen Etablierungsfortschritt einzuräumen, und diese erst anschließend, wo das notwendig ist, durch künstliche Verjüngung gezielt zu ergänzen. Längere Verjüngungszeiträume bedürfen allerdings eines intensiven Monitorings des Verjüngungsfortschritts und der Entwicklung der Begleitvegetation damit das Zeitfenster für eine unproblematische Etablierung der Jungpflanzen ohne kostspielige Bekämpfung der Konkurrenzvegetation nicht verpasst wird.

### 7. Vernetzung und Biotopverbund bei der Neuanlage von Wald und Wiederaufforstung berücksichtigen

- Bei der Neuanlage von Wald sowie bei der Wiederaufforstung sollte die Vernetzung bzw. die Erweiterung von Habitatflächen berücksichtigt werden, um die Migration von Arten und den genetischen Austausch von Populationen zu verbessern.

### 8. Pflege zur Entwicklung strukturierter, ökologisch stabiler Mischbeständen fördern

- Zum Erhalt von strukturierten, ökologisch stabilen Mischbeständen ist eine kontinuierliche und anfänglich intensive Pflege notwendig. Dies erhöht die Einzelbaumvitalität und -stabilität, verkürzt die Produktions- und Gefährdungszeiträume, beugt einer Entmischung vor und trägt zum Erhalt klimaangepasster Baumarten bei. Wirtschaftlich defizitäre Bestandespflegeeingriffe zur Entwicklung resistenter, resilienter und anpassungsfähiger Wälder sollten daher durch die Programme des Bundes und der Länder im Privat- und Körperschaftswald gefördert werden.



## 4.2 Den Waldschutz gegenüber biotischen Risiken verbessern

Der Klimawandel führt bei langlebigen Organismen wie Bäumen immer wieder zu einer erhöhten Prädisposition für den Befall durch Pathogene und phytophage Insekten. Zusätzlich fördert die Erwärmung die Aktivität und Populationsentwicklung vieler relevanter Arten einschließlich Insekten, Säugetiere und Pilze. Massenvermehrungen in Beständen mit prädisponierten Bäumen ermöglichen dann auch den Befall vitaler Individuen. Darüber hinaus sind durch die Kombination aus Globalisierung und Klimawandel auch neue Arten und Artenkombinationen zu erwarten.

Als wichtigste vorbeugende Strategie werden heute struktur- und baumartenreiche Wälder und Waldlandschaften angesehen (siehe Kap. 4.1). Wichtig ist auch die Überwachung der Populationen und der Schadwirkungen auf Bäume (siehe Kap. 4.9). Die sehr unterschiedlichen Lebenszyklen und Habitatpräferenzen der einzelnen Arten machen räumlich, zeitlich und technisch sehr differenzierte Strategien notwendig. Dabei wird eine Beseitigung von Populationen nur bei eingeschleppten Arten angestrebt beispielsweise bei Quarantäne-Schadorganismen wie dem Asiatischen Laubholzbockkäfer. Bei heimischen Schadorganismen reichen die Ziele von der lokalen Reduktion zum Schutz einer Baumgruppe wie beim Eichenprozessionsspinner, über den Schutz eines Bestandes wie beim Schwammspinner, bis hin zu einer landschaftsweiten Kontrolle zur Abwehr von Schäden an vitalen Bäumen, zum Beispiel vor Buchdruckern.

Um diese sich verschärfende Situation abzumildern, werden konkret folgende Vorschläge zum Waldschutzmanagement und der Kontrolle und Bekämpfung von Schadorganismen gemacht:

### 1. Waldschutzmanagement auf überregionaler Ebene etablieren und Strategien wissenschaftlich begleiten

- Da Schadorganismen sich nicht an Besitzgrenzen orientieren, können Waldschutzmaßnahmen nur besitzübergreifend organisiert werden. In der Krisensituation der Jahre 2018 – 2020 hat sich gezeigt, dass die aktuellen Strukturen insbesondere im Privat- und Körperschaftswald nicht geeignet sind, die Herausforderungen im Bereich des Waldschutzes einschließlich der Verkehrssicherung zu meistern. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, ein flächendeckendes eigentumsartenübergreifendes Waldschadens-Monitoring und Waldschadens-Management einschließlich der Sicherung der Finanzierung zu etablieren; siehe dazu auch die Stellungnahme des WBW (2019) zum Thema „Risikoversorge und der Umgang mit Extremereignissen in der Forstwirtschaft“.
- Dabei sollte die Prävention gegenüber Schadensbekämpfung und Katastrophenmanagement Vorrang haben. Wir empfehlen, dass lange vor dem Eintreten von Massenvermehrungen Musterverfahren mit klaren Abläufen, Schwellenwerten, Genehmigungen aber auch Ausschlussflächen für Bekämpfungsmaßnahmen erarbeitet werden sollten. Dabei ist eine Differenzierung des Schutzgrades beziehungsweise der Wertigkeit der Bestände auf überregionaler Ebene pro oder contra Bekämpfung vorzunehmen, beispielsweise für Saatgutbestände, Vorkommen hochbedrohter Arten oder Wälder mit hoher Bedeutung für Erholung und Tourismus.
- Da die Wirksamkeit sowie die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen vieler Praxisstrategien oft unklar sind, sollten alle wesentlichen Waldschutzstrategien auf überregionaler Ebene von den zuständigen forstlichen Versuchsanstalten der Länder wissenschaftlich begleitet werden, um eine entsprechende, öffentlich zugängliche Evidenzbasis zu erstellen.
- Bei den Empfehlungen für die waldbauliche Verwendung rezent eingeführter Baumarten sind von Beginn an Erkenntnisse der Invasionsbiologie zu berücksichtigen. So ist bei vielen Baumarten, auch bei bisher seltenen einheimischen Arten, bei

Ausweitung der Anbaufläche mit einem wachsenden Waldschutzrisiko zu rechnen, welches es abzuschätzen gilt.

### 2. Schadorganismen besser kontrollieren

- Waldschutz sollte grundsätzlich dem Lösungsansatz eines integrierten Pflanzenschutzes folgen. Dabei kommen Kombinationen von waldbaulichen, mechanisch/technischen sowie biologischen oder biotechnischen Verfahren zum Einsatz und, bei akuter Gefährdung von lokalen Schutzgütern, auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM). Dabei ist das vorrangige Ziel, die Populationen von Schadorganismen unter einer definierten Schadensschwelle zu halten und Kollateralschäden, zum Beispiel an anderen Organismen als den Zielarten oder dem Grundwasser, so gering wie möglich zu halten. Verfahren, die bisher keine ausreichende Evidenzbasis haben, sollten durch replizierte, wissenschaftliche Studien mit Kontrollflächen begleitet werden.
- Forstwirtschaft ist für die Hersteller von Pflanzenschutzmitteln ein wirtschaftlich unbedeutender Sektor. Daher sind nur relativ wenige Pflanzenschutzmittel zugelassen. Selbst bei bewährten Mitteln wird oft eine Verlängerung der Zulassung wegen des damit verbundenen Aufwandes nicht angestrebt. Hier sollte sichergestellt werden, dass für die wichtigsten Anwendungsbereiche von Pflanzenschutzmitteln in der Forstwirtschaft dauerhaft eine ausreichende Anzahl geeigneter Mittel zur Verfügung steht. Wenn nötig, sollte hier eine staatliche Förderung der Entwicklung und Zulassung der Pflanzenschutzmittel erfolgen, idealerweise auf EU-Ebene.
- Gerade die Einschleppung von Schaderregern im Zuge der Globalisierung sowie deren Einwanderung in Folge des Klimawandels macht ein Überdenken der immer restriktiveren politischen und verwaltungsseitigen Rahmenseitzungen für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Wald notwendig. Dies gilt insbesondere dann, wenn ganze Waldbestände und ihre natürliche Verjüngungsfähigkeit durch Schaderreger gefährdet werden. Eine schnelle Ausbreitung von Schaderregern in neue Räume verhindert naturgemäß, dass sich die Waldbäume dort als Wirtspflanzen an sie anpassen können. Bei Waldbäumen sind die Reproduktionszeiten so lang, dass sie gegenüber den sich viel schneller reproduzierenden Schadorganismen kaum anpassungsfähig sind. Vor diesem Hintergrund ist es unbedingt notwendig,

dass die politischen Voraussetzungen für die Bereitstellung, Neu- und Weiterentwicklung, Zulassung und den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln für die Anwendung im Wald geschaffen und durch die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten unterstützt werden und dass bei der Genehmigung ihrer Zulassung und ihres Einsatzes Aspekte der Umweltverträglichkeit, der Ökonomie und der Walderhaltung angemessen berücksichtigt werden.

### 3. Verbisschäden an der Verjüngung effektiv abwehren

- Die in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegenen Schalenwildpopulationen sind vielerorts das Haupthindernis für das Aufwachsen einer artenreichen Naturverjüngung. Die gesellschaftliche und politische Debatte zu diesem Thema hat bisher keine substantielle Veränderung der Situation bewirkt. Daher sollte der Bau von Zäunen zum Schutz von Kulturen und Naturverjüngungsflächen im Privat- und Körperschaftswald wo nötig gefördert werden. Darüber hinaus sollten ökonomische Anreize für die erfolgreiche Etablierung artenreicher Verjüngung ohne Zaun geschaffen werden. Generelle Verbote des Zaunbaus im Staatswald sollten aufgehoben werden. Zusätzlich sind die Jagdgesetze so anzupassen, dass Waldbesitzer die Möglichkeiten haben, die Wildbestände in ihren Wäldern so anzupassen, dass die Verjüngung aller Baumarten auch ohne Verbisschutzmaßnahmen möglich ist.



### 4.3 Risikomanagement zum Umgang mit Extremereignissen weiterentwickeln

Im Zuge klimawandelbedingter Änderungen treten häufiger Extremereignisse mit höherer Amplitude auf. Um den daraus resultierenden Störungen zu begegnen, bedarf es eines systematischen Risikomanagements. Grundlage jedes Risikomanagements ist die Definition von Schutzgütern, also Menschen, Ökosystemleistungen, Waldvermögen sowie Infrastruktur. Das eigentliche Risikomanagement umfasst (1) die Analyse und Bewertung von Risiken, also Auftretenswahrscheinlichkeit und Ausmaß des Risikos sowie seine wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Folgen), (2) die Entwicklung von Präventionsstrategien wie die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Ökosystems oder Eindämmungsmaßnahmen, (3) Vorsorge und Bereitschaft mittels Frühwarnsystemen, Reaktionsinfrastruktur, Mobilisierungs- und Koordinationsplänen und kompetentem Personal (4) als auch erste Reaktion sprich Bekämpfung und (5) die Bewältigung der Störung im Schadensfall. Unsere Empfehlungen zielen sowohl auf Änderungen in diesen verschiedenen Komponenten des Risikomanagements ab, wie auch auf die Verbesserung des betrieblichen Risikomanagements insgesamt (6). Zu den mit dem Risikomanagement eng verknüpften Aspekten des Monitorings verweisen wir auf die Empfehlungen in Kapitel 4.9.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

#### 1. Risiken analysieren und bewerten

- Zur Unterstützung der Prävention und Vorbereitung werden belastbare Analysen der Vulnerabilität von Wäldern und Modelle für die Auftretenswahrscheinlichkeit sowie die mögliche Ausbreitung

verschiedener Störungen wie Feuer, Borkenkäfer oder Sturm in Abhängigkeit von klimatischen Faktoren, Böden, Bestockung, und Landschaftskontext einschließlich Topographie, benötigt. Diese Modelle könnten insbesondere von den forstlichen Versuchsanstalten in enger Abstimmung und Kooperation (weiter)entwickelt und regelmäßig aktualisiert werden, und ihre Ergebnisse, zum Beispiel in Form von Risikokarten und Simulationen, allen Waldbesitzern zugänglich gemacht werden.

- Die Konkretisierung der Risikoanalyse und situationsabhängig notwendiger Überprüfungsinstrumente sollte bestandesbezogen im Rahmen der Forsteinrichtung erfolgen.

## 2. Präventionsmaßnahmen ausbauen und weiterentwickeln

- Bereits jetzt gibt es Instrumente, um Präventionsmaßnahmen in Betrieben durchzuführen und auch zu fördern (GAK), um das Störungsrisiko in Wäldern zu reduzieren, z. B. durch Anlage und Unterhalt von vegetationslosen Schutzstreifen oder Laubholzriegeln zum Waldbrandschutz, den Laubholz-Unter- und Voranbau in Nadelholzbeständen, Schaffung von Mischbeständen etc. (siehe auch Empfehlungen zu resilienten und anpassungsfähigen Wäldern, Kap. 4.1). Allerdings gibt es viele, vor allem kleinere Betriebe, denen es sowohl an Bewusstsein wie auch Kapazitäten fehlt, um solche Präventionsmaßnahmen umzusetzen.
- Zur Prävention von großflächigen Störungen wie beispielsweise durch Feuer oder Borkenkäfer bedarf es zudem der Entwicklung und Implementierung überbetrieblicher Präventionsmaßnahmen. Dazu gehört die Planung von Waldbrandriegeln und Bekämpfungslinien auf Landschaftsebene, die Räumung von Munitionsresten in belasteten Wäldern, die sowohl das Waldbrandrisiko erhöhen als auch die Bekämpfung erschweren sowie Unterhaltung von technischer Infrastruktur (siehe Punkt 3).
- Zur Prävention gehört auch, dass die Forstwege, die für die Bewirtschaftung der Wälder gebaut und unterhalten werden, so ausgelegt sind, dass sie Extremwetterereignissen standhalten.

## 3. Vorsorge für den Katastrophenfall treffen

- Im Schadensfall ist es erforderlich, das Ausmaß der Schäden möglichst rasch und genau mittels Fernerkundung mittels Drohnen-, Flugzeug- und Satelliten gestützten Verfahren, sowie mobiler

Apps zur Dokumentation der Schäden zu lokalisieren und zu quantifizieren, um betriebliche Gegenmaßnahmen bzw. administrative Maßnahmen zur Unterstützung der Waldbesitzer bei der Aufarbeitung und Behebung der Schäden sowie dem Wiederaufbau der Wälder einzuleiten (siehe Kap. 4.2 und Kap. 4.9).

- Um auf großflächige Störungen adäquat reagieren zu können, bedarf es gut ausgebildeten Personals, der Schaffung und des Erhalts überbetrieblicher Infrastruktur zur Bekämpfung von Schäden, wie beispielsweise im Falle eines Waldbrandes Löschteiche, Wasserzapfstellen, etc. sowie zur Bewältigung von Schäden, wie beispielsweise ausreichend Nasslagerplätze nach eingetretenen Sturmschäden). Da die Risikovorsorge in der Regel sehr kostenintensiv ist und nur im Rahmen eines nachhaltigen Waldmanagements umgesetzt werden kann, wird empfohlen, die entsprechenden Maßnahmen im überwiegend kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald mit einer angemessenen Förderung zu unterstützen, ähnlich wie gegenwärtig im GAK Rahmenplan vorgesehen (siehe Punkt 6). Überbetriebliche Infrastruktur zur Bekämpfung von Schäden sollte im Rahmen der hoheitlichen Aufgaben von zuständigen Landesbehörden errichtet und unterhalten werden. Zur Vorsorge gehören auch die Entwicklung und fortlaufende Aktualisierung von Einsatzplänen und der Aufbau von Kommunikationsnetzwerken, inklusive kompletter Netzabdeckung im Wald. Regionale Katastrophenpläne sollten unter Einbeziehung der lokalen Forstbetriebe erstellt werden. Die Förderung der Waldschutzinfrastruktur sollte dauerhaft angelegt sein und ihre Tauglichkeit im Ernstfall durch regelmäßige Übungen überprüft werden.
- Ein wichtiges Instrument der betrieblichen Risikovorsorge ist die Bildung angemessener finanzieller Rücklagen. Daher sollten die gesetzlichen Grundlagen so geändert werden, dass private Forstbetriebe im Sinne der Eigenvorsorge eine steuerfreie Rücklage bilden können. Die steuerpflichtige Inanspruchnahme dieser Rücklage sollte den Forstbetrieben ganz allgemein überlassen bleiben. Im öffentlichen Wald sollten zur Risikovorsorge die Satzungen und Errichtungsgesetze entsprechend angepasst werden.
- Auch die Übertragung von existenzgefährdenden, seltenen Gefahren auf Versicherungen sollte als Instrument der betrieblichen Risikovorsorge gefördert werden. Es hilft insbesondere einen hohen Liquiditätsbedarf nach einem Schadereignis zu

decken, beispielsweise für eine Wiederaufforstung. Die anteilige Förderung von Waldschadensversicherungen kann bei den Waldbesitzern die Bereitschaft zum Versicherungsabschluss deutlich erhöhen. Die Förderung von Versicherungslösungen ließe sich durch das öffentliche Interesse an einer raschen Wiederbewaldung und der damit verbundenen Aufrechterhaltung oder schnellstmöglichen Wiederherstellung der Waldleistungen rechtfertigen. Die Förderung einer Versicherungslösung durch die öffentliche Hand erscheint verwaltungsmäßig deutlich einfacher zu handhaben, als jeweils nach Kalamitätsereignissen einzelfallweise politische Aushandlungen und Umsetzungen zu organisieren.

### 4. Intervention und Einleitung von Sofortmaßnahmen verbessern

- Bestimmte Arten der Störung können weitere Störungen befördern; so kann Sturmwurf in Nadelholzbeständen zu Borkenkäferkalamitäten oder einer Erhöhung des Waldbrandrisikos führen. Daher sind hier besonders rasche Reaktionen erforderlich.
- Der gezielte Einsatz von Sofortmaßnahmen erfordert eine genaue und zeitnahe Lokalisierung und Quantifizierung von Störungen und Schäden und die effiziente Abstimmung zwischen Einsatzkräften. Dies kann nur durch ein flächendeckendes, besitzübergreifendes Monitoring gewährleistet werden; siehe Empfehlungen zu „Früherkennung von Störungen und zeitnahe Informationsbereitstellung“ in Kap. 4.9. Für die Entwicklung und Unterhalt der notwendigen Monitoringsysteme sind die Forstlichen Versuchsanstalten der Länder entsprechend mit Personal und Infrastruktur auszustatten und ihre Monitoringsysteme aufeinander abzustimmen, so dass die Information problemlos auf überregionaler und Bundesebene aggregiert werden kann.

### 5. Nachsorge und Restauration optimieren

- Dort wo befallene oder abgestorbene Bäume eine Gefahr für menschliches Leben oder benachbarte Wälder darstellen, sollten diese unverzüglich beseitigt werden. In diesem Fall sollte die Aufarbeitung des Holzes möglichst hoch mechanisiert erfolgen, um die im Wald arbeitenden Menschen soweit wie möglich zu schützen. Sofern die Maßnahmen notwendig erscheinen aber nicht kostendeckend durchgeführt werden können, sollten sie gefördert werden, wie dies bereits in Folge der Schäden

von 2018 – 2020 passiert ist. Wo keine Notwendigkeit der Entnahme dieser Bäume besteht und Einschränkungen der künftigen Bewirtschaftung nicht zu erwarten sind, kann das Schadholz in Form von stehendem und liegendem Totholz auch gänzlich oder partiell auf der Fläche belassen werden, um damit freilandähnliche Verhältnisse zu vermeiden, Böden zu schützen und Biodiversität sowie natürliche Regenerationsprozesse zu fördern. Der gezielte Erhalt dieser Totholzstrukturen könnte im Rahmen betrieblicher Waldnaturschutzkonzepte erfolgen und im Privat- und Körperschaftswald über Vertragsnaturschutzmaßnahmen honoriert werden.

- Störungsflächen bieten, dort wo erforderlich, auch die Möglichkeit eines beschleunigten Waldumbaus mit klimaangepassten, lichtliebenden Baumarten, die auf Freiflächen gute Wachstumsbedingungen finden. Die Wiederaufforstung wird daher bereits jetzt im Rahmen der GAK gefördert. Um diese unregelmäßig auftretenden Situationen infolge von Störungen tatsächlich nutzen zu können, müssen entsprechende Kapazitäten für die Anzucht der gewünschten Baumarten und Herkünfte aufgebaut und vorgehalten werden, damit kurzfristig ausreichende Stückzahlen der benötigten Baumarten aus den vorgesehenen Herkunftsgebieten und mit ausreichender genetischer Diversität bereitgestellt werden können; siehe dazu Empfehlungen zur Entwicklung resilienter Wälder, Kap. 4.1.

### 6. Betriebliches Risikomanagement fördern

- Die sorgfältige, umfassende Planung unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Komponenten ist eine notwendige und gleichzeitig kostenintensive Grundlage des Risikomanagements. Daher empfiehlt der WBW die Förderung der Erstellung von betrieblichen Risikomanagementplänen im Privat- und Körperschaftswald im Rahmen der GAK. Im Rahmen der Förderung dieser Pläne sollten Mindeststandards im Risikomanagement gesetzt und die Berücksichtigung überbetrieblicher Aspekte eingefordert werden.



#### 4.4 Biodiversität sichern und erhöhen

Bei der Anpassung der Wälder an den Klimawandel muss das Ziel sein, die Biodiversität von der genetischen bis zur Ökosystemebene umfassend zu erhalten. Dazu muss (1) auf ganzer Fläche, auch außerhalb von Schutzgebieten, die Vielfalt an Biotopen, Habitaten und Ökosystemen erhalten und gefördert werden. Dies beinhaltet (2) die Restauration strukturarmer und wenig anpassungsfähiger Wälder im Sinne einer „Prestoration“, also eine Restauration, die darauf abzielt, die zukünftige Funktionsfähigkeit der Ökosysteme unter den Bedingungen des Klimawandels durch geeignete Baumarten(kombinationen) und Strukturen zu gewährleisten. Um klimawandelbedingte Verschiebungen von Arten und Lebensgemeinschaften in der Landschaft zu ermöglichen, sollte (3) eine Durchlässigkeit und Vernetzung von Ökosystemen gewährleistet werden. Bei Arten, deren Verbreitungsareale und Populationen durch den Klimawandel schwinden und die nicht in der Lage sind, neue geeignete Lebensräume auf natürliche Weise zu besiedeln, sollte (4) die gezielte Ansiedlung gefördert werden. (5) Die Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzziele und -güter müssen auch im Waldnaturschutz berücksichtigt werden. Aspekte des Biodiversitätsschutzes, die mit der Baumartenwahl verbunden sind, wurden bereits unter Kap. 4.1 behandelt. Um die Auswirkungen von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen auf die Biodiversität verfolgen zu können, müssen zudem Ansätze für ein repräsentatives Biodiversitätsmonitoring entwickelt werden (siehe Kap. 4.9). Die Empfehlungen in diesem Bereich basieren zu einem großen Teil auf der 2020 veröffentlichten Stellungnahme des WWF und WWBGR „Wege zu einem effizienten Waldnaturschutz in Deutschland“.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

##### 1. Wertvolle Waldbiotope, -habitate und -ökosysteme erhalten, erweitern und entwickeln

- Maßnahmen, um Wälder an den Klimawandel anzupassen, können wie beim Prozessschutz sowohl passiver oder wie beim Habitatmanagement auch aktiver Natur sein. Generell gilt es, möglichst viele, naturschutzfachlich wertvolle Waldbiotope, -habitate und -ökosysteme so zu entwickeln, erweitern und zu sichern, dass diese eine hohe Überlebensfähigkeit im Klimawandel aufweisen. Zu diesem Zweck sind Waldnaturschutzstrategien weiterzuentwickeln und mit Strategien zur Anpassung an den Klimawandel abzustimmen (siehe Kap. 4.1). Insbesondere im öffentlichen Wald empfiehlt sich die Beteiligung von Stakeholdern in diese Strategie- und Planungsprozesse.

##### 2. Zielvorgaben und Szenarien zur Restauration von Waldökosystemen erarbeiten

- Um eine zukunftsorientierte Restauration der Waldökosysteme zu ermöglichen, müssen zunächst Ziele und Modelle für zukünftige Wälder auf der Grundlage des Verständnisses der Zusammenhänge zwischen Waldstruktur, Habitatangebot, sowie Ökosystemfunktionen und -leistung entwickelt werden. Dieses Verständnis, das bisher nur unzureichend vorhanden ist, muss durch Forschung und Monitoring weiterentwickelt werden. Die Restauration sollte insbesondere bei Risikobeständen und bereits durch Klimawandel geschädigten Wäldern ansetzen (siehe Kap. 4.1 und 4.3).

##### 3. Durchlässigkeit und Vernetzung von Waldökosystemen gewährleisten

- Um klimawandelbedingte Verschiebungen von Arten und Lebensgemeinschaften sowie einen genetischen Austausch zwischen Populationen in der Landschaft zu ermöglichen, bedarf es der Durchlässigkeit und Vernetzung von Waldökosystemen. Bei der Ausweisung von Naturschutzvorrangflächen, auch außerhalb des Waldes, ist in Zukunft stärker auf deren Vernetzungscharakter zu achten, sowie auch deren Beitrag für die Vernetzung zu berücksichtigen, wie etwa von Hecken, Knicks, Alleen, Parks etc.

### 4. Arten gezielt an- und umsiedeln

- Um die Biodiversität zu unterstützen, kann eine gezielte An- und Umsiedlung von Arten gefördert werden, insbesondere von solchen, die wenig mobil sind und solchen, die einen wichtigen Beitrag zur Struktur- und Habitatbildung sowie zur Funktions- und Leistungsfähigkeit des Ökosystems liefern können.

### 5. Schutzgebiete für die Untersuchung einer passiven Anpassung der Wälder nutzen

- Schutzgebiete, in denen der Prozessschutz das vorrangige Schutzziel ist, werden wertvolle Laboratorien für die Untersuchung einer passiven Anpassung der Wälder an den Klimawandel darstellen; hier wird das Schutzziel nicht durch den Klimawandel gefährdet. In Schutzgebieten, in denen der Erhalt bestimmter Lebensräume und Arten das vorrangige Schutzziel ist, kann der Klimawandel die Erreichung dieser Ziele gefährden bzw. in Frage stellen. In FFH-Gebieten, deren Ausweisung sich primär an natürlichen Pflanzengesellschaften unter konstanten Standortbedingungen orientiert, wird man in Zukunft auch mit Verschlechterungen der Habitatstrukturen, des lebensraumtypischen Arteninventars und anderen klimawandelbedingten Veränderungen rechnen müssen. Hier müssen Ansätze entwickelt werden, um klar zwischen bewirtschaftungs- und klimawandelbedingten Verschlechterungen zu unterscheiden und um Referenzsysteme wie zum Beispiel das lebensraumtypische Arteninventar anzupassen.



## 4.5 Boden und Wasser schützen

Der Erhalt der Waldfläche bedeutet Schutz des Bodens sowie des Wasser- und Nährstoffkreislaufs und gleichzeitig fördert der Bodenschutz die Vitalität und die Resilienz der Wälder. Die Kohlenstoffspeicherung in Waldböden trägt entscheidend zur Klimaschutzwirkung der Wälder bei. Waldböden und ihre Wasserspeicherkapazität sind essentiell, um längere Trockenphasen auszugleichen und den damit einhergehenden Trockenstress bzw. Schäden für Wälder zu vermeiden. Die lockere Lagerung und intensive Durchwurzelung der Oberböden bilden die Voraussetzung der Funktion als Wasserspeicher. Diese Wasserspeicherkapazität sowie den Zugang von Bäumen zum Grundwasser gilt es in Anbetracht zunehmender Trockenperioden zu erhalten und zu fördern. Gleichzeitig mindert Wald negative Einflüsse auf Böden und deren mikrobielle Gemeinschaft, die entscheidend ist für die Waldernährung.

Zu diesem Zweck sind (1) standortsbezogene Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen, (2) negative Effekte forstlicher Maßnahmen auf den Kohlenstoff-, Nährstoff- und Wasserhaushalt zu vermeiden, (3) Bodenverdichtung zu vermeiden und (4) Kontamination zu verhindern, (5) Entwässerung, wo möglich zu reduzieren und es sollen (6) Grundwasserentnahmen unter Wald beschränkt werden.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

### 1. Standortsbezogene Entscheidungsgrundlagen bereitstellen

- Die forstliche Standortkartierung ist eine bedeutende Grundlage für Managemententscheidungen, von der Baumartenwahl bis zum Bodenschutz. Für die Baumartenwahl sowie die Bewertung der Klimarisiken für Boden und Wasser sind



standortspezifische Empfehlungen und Leitlinien essentiell. Daher sollte die forstliche Standortkartierung durch Einbeziehung neuer Forschungsansätze weiterentwickelt werden. Besonders wichtig sind dabei Ansätze, die der Dynamik der Standorteigenschaften gerecht werden. Fördermittel für die Standortkartierung zur Schließung von Kartierungslücken, zur Aktualisierung alter Kartierungswerke und ihrer Fortschreibung müssen insbesondere auch für den Privat- und Kommunalwald und in digitaler Form bereitgestellt werden. Zur Anpassung an die Trockenheit ist die Verbesserung des Kenntnisstandes über die räumliche Verbreitung des Wasserspeichervermögens von Waldböden von großer Bedeutung (einschließlich Skelettgehalt, Gründigkeit, Benetzungshemmung sowie Zwischenabfluss in hängigen Lagen). Viele der im Folgenden aufgeführten Maßnahmen müssen standortgerecht umgesetzt werden. Dies ist nur auf Basis dieser standörtlichen Informationen möglich.

## 2. Negative Effekte forstlicher Maßnahmen auf den Kohlenstoff-, Nährstoff- und Wasserhaushalt vermeiden

- Bei der Baumartenwahl muss der langfristige Einfluss auf Böden und Grundwasserneubildung insbesondere bezüglich der Nährstoffverfügbarkeit, dem Porenvolumen und dem Humusgehalt berücksichtigt werden. Dazu sollte vorhandenes Wissen bei der forstlichen Planung entsprechend genutzt und wo nötig erweitert werden. Um mögliche Risiken von Baumarten mit unbekanntem Einfluss auf Böden und Wasser (zum Beispiel Einfluss auf den N-Haushalt, Protonenbilanz, Humusbilanz, Benetzungshemmung, mikrobielle Gemeinschaft des Bodens) zu minimieren, sollte deren Anteil in Mischbeständen begrenzt und erst schrittweise entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen erhöht werden.
- Aus Sicht des Boden- und Grundwasserschutzes empfehlen wir die Förderung strukturreicher Wälder. Ihre Ökosystemkompartimente wie Totholz, ausgeprägte Krautschicht, Bestandeslücken oder die Humusaufgabe fördern die Kohlenstoffspeicherung, die Grundwasserneubildung oder den Wasserrückhalt im Bestand.
- Bodenrisiken wie eine negative Nährstoffbilanz, Bodenverdichtung, Erosion oder Humuszehrung und negative Einflüsse auf den Wasserhaushalt wie Benetzungshemmung der Waldböden bei Austrocknung, Erhöhung des Oberflächenabflusses, Verminderung der Infiltrationskapazität und der Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers, sollten auch bei der forstlichen Planung bezüglich Waldbau, Holzernte, Wegebau etc., stets berücksichtigt werden.
- Nach natürlichen oder direkt anthropogen bedingten Störungen wie Windwurf, Trockenschäden, Massenvermehrungen von Schadorganismen oder Feuer, sollte die Humusaufgabe möglichst wenig gestört und die Vegetationsdecke rasch wiederhergestellt werden, um Bodenabtrag und Oberflächenabfluss von Wasser zu verhindern. Bei Entscheidungskonflikten sollte hier der Schutz von Boden und Wasserhaushalt priorisiert werden beispielsweise durch Anlage von Vorwäldern, da es sonst zu irreversiblen Schäden von Wäldern und Gewässern kommen kann.
- Um den Export organischer Substanz zu reduzieren, sollte keine Vollbaumernte stattfinden, sondern Holz unterhalb der Derbholzgrenze im Wald verbleiben, sofern dem keine Aspekte des Waldschutzes entgegenstehen. Das Belassen von Rinde im Wald kann durch den Einsatz von Harvesterköpfen mit Entrindungskapazitäten gefördert werden, wie beispielsweise durch das BMEL „Investitionsprogramm Wald“. Entsprechende Umrüstungsmaßnahmen an Harvestern sollten gefördert werden. Mittelfristig, sollte dies, wo möglich und sinnvoll, zum Standard erhoben werden. Diese Maßnahmen dienen auch der Nährstoffnachhaltigkeit und Reduktion des Forstschutzrisikos.

## 3. Bodenverdichtung vermeiden

- Förderung technischer Weiterentwicklung von bodenungebundenen Verfahren der Holzernte wie zum Beispiel Seilkransysteme.
- Betriebe sollen in Hinblick auf eine schonende, hochmechanisierte Holzernte unterstützt werden, z. B. durch Anreizsysteme wie Prämien für Waldeigentümer und Forstunternehmern, die dem Schutz der Böden dienen. Nicht nur durch geeignete technische Ausstattung, sondern vor allem auch durch eine verbesserte Organisation beim Einsatz von Forsttechnik können wesentliche Beiträge zur Bodenschonung geleistet werden. Dabei können Boden-Witterungsmodelle helfen, die mit lokalem Bezug zu entwickeln sind.
- Durch die Digitalisierung von Rückegassen und die Schaffung von Informationsplattformen kann die bestehende Walderschließung auch nach flächigen

## 4 Handlungsempfehlungen

Störungen wie Windwürfen dauerhaft und zielgenau genutzt werden, so dass keine neuen Befahrungslinien angelegt werden müssen. Die Erstellung digitaler Karten für den zukünftigen Einsatz von Ernte- und Rückemaschinen sowie ebenso der Einsatz von Globalen Positionsbestimmungssystemen (GPS) sollte daher im Privat- und Körperschaftswald gefördert werden.

### 4. Kontamination verhindern

- Der chemische Zustand der Böden ist entscheidend für die Resilienz im Klimawandel. Daher ist für die Klimaanpassung der Wälder auch der Schutz vor stofflicher Kontamination essentiell. Wichtig ist dabei die Reduktion der Stickstoffeinträge und Vermeidung der Belastung der Waldökosysteme durch organische Schadstoffe. Der Eintrag von Stickstoff aus angrenzenden, vor allem landwirtschaftlich genutzten Systemen muss weiter reduziert werden. Dazu sind entsprechende Regelungen mit der Landwirtschaft notwendig.
- Der Austrag von organischen Lasten wie Phenole oder Polterschutzmittel, ist bei der Anlage von Holzlagerplätzen zu berücksichtigen, um Schäden an Böden und Grundwasser zu vermeiden. Bei Maschineneinsätzen sollte die Verwendung von biologisch abbaubaren Betriebsstoffen Standard werden.

### 5. Entwässerung wo möglich reduzieren und die Wasserspeicherfunktion erhalten und verbessern

- Der Einfluss von Entwässerungsmaßnahmen im Bestand auf den Wasserhaushalt von Standorten, auf Wassereinzugsgebiete und die Einspeisung in Vorflutssysteme sollte stärker berücksichtigt werden. Wo durch diese Maßnahme nicht die Stabilität der Wälder reduziert und Teillebensräume bedrohter Arten wie zum Beispiel Amphibien, gefährdet werden, sollte der Rückbau von Entwässerungsgräben im Bestand erfolgen. Betriebe sollten bei der Planung auch den Erhalt von Wasserspeichern berücksichtigen.
- Im Zuge der Walderschließung ist auf die Erhaltung bzw. Erhöhung der Wasserhaltekapazität hinzuwirken, das heißt Wasser sollte aus Entwässerungsgräben, die zum Schutz von Infrastruktur angelegt wurden, in den Wald rückgeleitet oder zur Speisung von Kleingewässern, Weihern und Löschteichen verwendet werden. Bei diesen Maßnahmen sollte auch an die Optimierung des

ökologischen Potenzials gedacht werden, die solche Infrastruktur bietet wie kurzlebige Kleinstgewässer als Laichplätze.

- Zum Schutz und zur Renaturierung von Waldmooren bedarf es finanzieller Anreize, um den Kohlenstoffgehalt der Böden zu erhöhen bzw. Moore als Ökosystem und Wasserspeicher in Abstimmung mit anderen Ökosystemleistungen zu erhalten.

### 6. Grundwasserentnahmen unter Wald beschränken

- Eine schädigende Intensivierung der Grundwasserentnahmen unter Wald sollte vermieden werden. Auf keinen Fall dürfen diese zu flächigen und so starken Absenkungen des Grundwasserstandes führen, dass dadurch der kapillare Anschluss der Baumwurzeln betroffener Bestände an das Grundwasser unterbrochen wird. Dies ist besonders in Gegenden zu berücksichtigen, wo das Trockenheitsrisiko für Wälder hoch ist. Dort muss gegebenenfalls die Grundwasserentnahme den klimatischen Bedingungen angepasst und reduziert werden. Da Grundwasserentnahmen durch Landwirtschaft, Industrie und für den privaten Verbrauch besonders in trockenen und heißen Zeiten steigen, sind hier Sektor übergreifende Regelungen erforderlich.



### 4.6 Nachhaltige Holzverwendung fördern

Die Änderungen in der Produktivität, Baumartenzusammensetzung, den Sortimenten und dem Anteil zufälliger Nutzungen erfordern eine Anpassung der nachgelagerten Holzwirtschaft und Holzverwendung. Zur Etablierung und zum Ausbau der nachhaltigen

Verwendung von Holz sollten zeitnah Wertschöpfungsketten etabliert werden, die die wirtschaftliche und klimawirksame Nutzung aus einheimischen Holzrohstoffen optimieren und damit die Transformation zu einer Bioökonomie maßgeblich stützen. Begleitende Anreizsysteme sollten stärker auf die stoffliche als auf die direkte energetische Nutzung ausgerichtet werden. Eine zentrale, unmittelbar verfügbare Technologie zur Speicherung von Kohlenstoff ist vor allem der Holzbau (1) (siehe Kap. 3.2.1.4.), dessen Anteil an Baukonstruktionen bundesweit durch die sofortige Umsetzung von möglichst zahlreichen Holzbauten im mehrgeschossigen Wohn-, sowie im Gewerbe-, Büro- und Industriebau bis 2050 signifikant gesteigert werden kann.

Um die benötigten Holzmengen und -qualitäten aus einheimischer Waldwirtschaft verfügbar zu machen, sind (2) reaktionsfähige und aufnahmebereite Märkte sowie geeignete Logistik- und Lagerstrukturen zu schaffen, insbesondere für die Werterhaltung von Stammholz aus Störungsereignissen und gegebenenfalls Holzhalbwaren. Es sind (3) technische Verfahren zur flexibleren Verarbeitung unterschiedlicher, bisher schwer vermarktbarer Holzsortimente wie Kalamitätsholz, Nadelstarkholz oder Laubholz, einzuführen. (4) Um den von der Industrie benötigten Nadelholzanteil zu erhalten, ist ein ausreichender Anteil von klimatisch angepassten Nadelbaumarten erforderlich. (5) Die Voraussetzungen für die zukünftige Generierung neuer Holzstoffquellen aus Gebraucht- und Altholz ist voranzutreiben, um zurückgehende Nadelholzsortimente teilweise ersetzen zu können und (6) vorhandene Chancen der bioökonomischen Holznutzung zu realisieren. Dazu gehört auch, Zielkonflikte zwischen Holzverwendung und Naturschutz in der Kommunikation zu adressieren (siehe Kap. 4.11).

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

### 1. Förderung des konstruktiven Holzbaus weiterführen, konkretisieren sowie Anreize verbessern

- Eine Steigerung der Holzbauquote durch sofortige Umsetzung von möglichst zahlreichen Holzbauten im mehrgeschossigen Wohn-, sowie im Gewerbe-, Büro- und Industriebau bis 2050 ist eine aktive Klimaschutzleistung durch stoffliche Substitution und Erhöhung des Kohlenstoffspeichers in langlebigen Produkten. Hierbei sollte im Sinne der Ressourceneffizienz das Ziel verfolgt werden, möglichst viel Wohn- oder Nutzraum aus der eingesetzten Holzmenge zu schaffen. Eine Begrenzung der Treibhausgasemissionen für Gebäude, nachgewiesen

durch normkonforme Nachweise der CO<sub>2</sub>-Bilanz, sollte mit einer Förderung auf dieser Grundlage, zum Beispiel dem Gebäudeenergiegesetz mit Berücksichtigung der materialbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Lebenszyklus, verbunden werden.

- Die Vergrößerung des Kohlenstoffspeichers in Gebäuden sollte durch Anreizsysteme honoriert werden, zum Beispiel in Form eines zusätzlichen Förderatbestandes in der KfW-Förderung für die Einlagerung von Kohlenstoff in Gebäuden.

### 2. Reaktionsfähige und aufnahmebereite Märkte sowie Logistik- und Lagerstrukturen schaffen und Lagerkapazitäten zur Abpufferung von Holzmarktfluktuationen vorhalten

- Als Grundlage sind Prognosemodelle über die Ressourcenverfügbarkeiten und Rohstoffpotenziale mittels mengen- und zeitaufgelöster Stoffströme durch die Fachstellen des Bundes- und der Länder bereitzustellen und über Forschungsarbeiten sind Holzaufkommensszenarien mit Störungseinflüssen zu ergänzen. Damit könnten die starken Preisreaktionen nach den Kalamitätsjahren abgemindert werden.
- Zusätzlich zur Verbesserung der Kapazitäten für Frischholz-Nasslagerung (siehe Kap. 4.3) sollten ähnliche Förderinstrumente zur Einrichtung von Lagerungskapazitäten für Halbwaren wie beispielsweise Schnittholz in Betrieben der Nutzungskette etabliert werden.
- Die Transportlogistik sollte sich auf vermehrt auftretende ungeplante Nutzungen in Folge von Störungen vorbereiten, beispielsweise durch Förderung des Erhalts oder Wiedereinrichtung von Verladestationen für Bahntransport von Kalamitätsholz. „Kabotage“, also Transportdienstleistungen innerhalb eines Landes, die von ausländischen Verkehrsunternehmen erbracht werden, sollte ermöglicht werden. Dabei sind die EU-rechtlichen Vorgaben einzuhalten, um Preis- und Lohndumping zu vermeiden.

### 3. Technische Verfahren zur flexibleren stofflichen Verarbeitung unterschiedlicher Holzsortimente entwickeln und einführen

- Eine Erweiterung von Produktsortimenten auch aus Laubholz ist anzustreben. Deshalb sollten Förderzentren durch Public-Private-Partnerships aufgebaut und Investitionsanreize für die Umstellung der Produktion von Nadelholz- auf

Laubholztechnologien in der Holzverarbeitenden Industrie weiterentwickelt werden.

- Kurzfristig müssen Technologien und Verfahren zur stofflichen Aufarbeitung der vorhandenen Starkholzvorräte in Holzbauprodukten errichtet werden. Hierzu sollten privatwirtschaftlich regionale Infrastrukturen und Technologien für die kombinierbare Nutzung von starkem Nadel- und Laubstammholz in konstruktiven Produkten geschaffen werden. Zusätzlich sollten durch öffentliche Anreizsysteme Pilot- und Demonstrationsanlagen für regionale Holzproduktwerke inklusive der notwendigen Infrastruktur und Logistik etabliert werden. Aktives Cross-Cluster Innovationsmanagement für die Nutzung der aufgeschlossenen Holzbestandteile (Cellulose, Lignin) einheimischer Holzarten in bisher holzfernen Technologiesektoren (Chemie, Pharmazie, Energiespeicherung, Elektronik) sollte über die landesspezifische Wirtschaftsförderung betrieben werden.
- Förderung einer Startup-Kultur in der Holzwirtschaft durch Einrichtung eines Risiko-Kapitalfonds zur Finanzierung dieser Startups.

### 4. Grundlagen für die zukünftige Versorgung mit benötigten Holzsortimenten schaffen

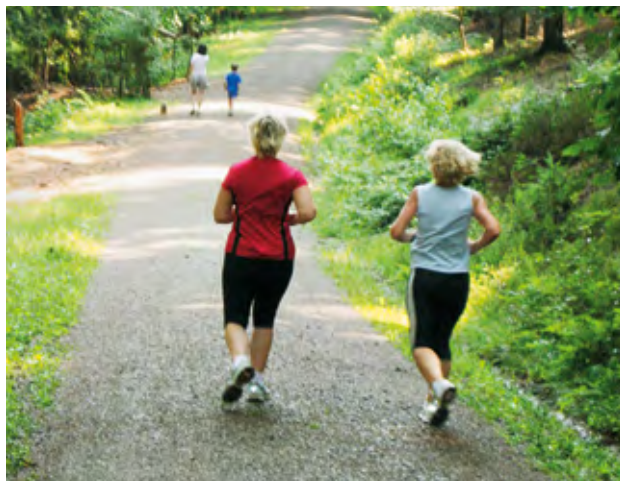
- Die Waldumbaukonzepte zur Förderung resilienter und anpassungsfähiger Mischbestände sollten den risikoarmen Anbau klimaangepasster Nadelbaumarten berücksichtigen.
- Erforschung der Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten von Alternativbaumarten.

### 5. Neue Holzstoffquellen aus Altholz generieren

- Für eine flächendeckende stoffliche Weiternutzung von Gebraucht- und Altholz in der Holzwerkstoffindustrie braucht es privatwirtschaftliche Anreize für effiziente Rückbau-, Aufbereitungs-, Reinigungs- und Sortierverfahren mit Schadstoffentfrachtung. Um die nötige Sicherstellung der Versorgung mit ausreichenden Mengen zu sichern, müssen die Bestimmungen der Altholzverordnung angepasst werden.
- Die recyclinggerechte Entwicklung und Verwendung von Holzprodukten und Holzkonstruktionen soll durch angepasstes Produkt- und Verbindungsdesign im Sinne des „Design for Reuse/Recycling“ erweitert werden.

### 6. Potentiale und Herausforderungen der holzbasierten Bioökonomie im Dialog mit verschiedenen Akteursgruppen herausarbeiten

- Erarbeitung wissenschaftlich fundierten Informationsmaterials über die Potentiale und Herausforderungen der holzbasierten Bioökonomie unter Einbeziehung breiter Interessensgruppen (insbesondere des Naturschutzes, öffentlicher Verwaltungen, Planer, Entscheider). Dies kann am Beispiel der Holznutzung im Bauwesen (Best practices) sowie bestehender ökologischer „Safeguards“ vollzogen werden.



### 4.7 Wälder als Orte für Erholung, Sport und Tourismus entwickeln

Damit Wälder auch unter den Bedingungen des Klimawandels als Orte für die Freizeit- und Erholungsnutzung gut geeignet sind, müssen die erwarteten bzw. bereits erlebbaren Ökosystemveränderungen gleichermaßen adressiert werden wie die gesellschaftlichen Ansprüche und Veränderungen. Hierfür sollten (1) Informationen über die Freizeit- und Erholungsnutzung flächendeckend zur Verfügung stehen, um sie systematisch in die forstbetriebliche Planung integrieren zu können, (2) sich die lokale Erholungsplanung sowie die Kommunikation mit den Waldbesuchenden auf ein sozialwissenschaftliches Monitoring sowie den Dialog mit den Nutzungsgruppen stützen können, (3) Leistungen von Waldbesitzenden honoriert und neue Verantwortungszusammenhänge hergestellt werden sowie (4) die Erholungsinfrastruktur an den sich ändernden Bedarf und erwartete Extremereignisse angepasst sein.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

### **1. Informationen über kulturelle Ökosystemleistungen der Wälder flächendeckend erheben, um diese Informationen in die forstbetriebliche Planung integrieren zu können**

- Insbesondere in urbanen und intensiv für Erholung, Sport, Gesundheit und Tourismus genutzten Wäldern bedarf es einer systematischen Erfassung der Freizeit- und Erholungsnutzung. So können die Perspektiven der Nutzer und Nutzerinnen für die forstbetriebliche Planung aufbereitet und Interessenkonflikte frühzeitig ausgeglichen werden. Damit werden – neben forstwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Daten – Informationen über die soziale bzw. kulturelle Dimension der Waldnutzung zu einer weiteren Informationsquelle für die Forsteinrichtung und die Planung der Anpassung der Wälder. Zu klären ist dabei, wie die Erhebungen und Abstimmungsprozesse pragmatisch in die Forsteinrichtung integriert werden können und wer für den erhöhten Aufwand der Einbindung von Waldbesuchenden außerhalb des Staatswaldes aufkommt.
- Die Erfassung von Daten zur Nutzung von Wäldern für Sport und Erholung dient zugleich als fachliche und argumentative Grundlage für eine angemessene Honorierung kultureller Ökosystemleistungen von Wäldern (siehe Punkt 3). Sie zeigt insbesondere qualitative und quantitative Trends der Entwicklung auf und ermöglicht eine räumliche Differenzierung in der Abschätzung der von den Waldbesitzenden erduldeten Belastungen bzw. deren entsprechenden Aufwand für die Bereitstellung dieser Leistungen.

### **2. Die lokale Erholungsplanung sowie die Kommunikation mit den Waldbesuchenden auf sozialwissenschaftliches Monitoring und den Dialog mit den Nutzern stützen**

- Ein proaktives Management von Konflikten zwischen den einzelnen Freizeit- und Erholungsnutzungen, aber auch zwischen Waldanpassung, Bewirtschaftung und Erholungsnutzung setzt ein systematisches Monitoring zur Gewinnung von Daten als Kommunikations-, Entscheidungs- und Evaluierungsgrundlage voraus. Mit sozialwissenschaftlichem Monitoring können Muster von Nutzungsverhalten abgebildet, in ihrer Veränderung beschrieben und Erholungskonflikte frühzeitig

erkannt werden (siehe Kap. 4.9). Ein solches Monitoring ist nicht als zusätzliche Aufgabe der Forstbetriebe, sondern als öffentliche Aufgabe zu sehen. Dabei ist deutlich zu machen, dass mit der Erfassung von Nutzungsansprüchen keine Umsetzungsgarantie durch Waldeigentümerschaft bzw. Forstbetriebe verbunden ist.

- Mit dem Monitoring der Aktivitäten und Erwartungen werden auch Grundlagen für die - im Idealfall digital unterstützte - Lenkung des Besucherverhaltens geschaffen sowie Zielgruppen und Inhalte für die Kommunikation der Forstbetriebe mit den Besuchenden identifiziert.
- Dialogprozesse zwischen den vor Ort fachlich Verantwortlichen sowie den anderen Nutzerinnen und Nutzern des Waldes sind – vor dem Hintergrund der starken Identifizierung der Bürgerschaft mit wohnortnahen Wäldern und des insgesamt gestiegenen Mitspracheanspruchs – in den Wäldern der öffentlichen Hand zu stärken. So kann klassische Fachexpertise um örtliches Erfahrungswissen der Nutzenden erweitert werden. Thematisiert werden sollten dabei auch die unterschiedlichen Eigentumsverhältnisse im Wald, um zu verhindern, dass die an öffentliche Eigentümer von Wäldern gestellten Ansprüche auf den Privatwald übertragen werden. Dialogprozesse können aber auch den Umgang mit Unsicherheit und Veränderung thematisieren, zum Beispiel in Bezug auf Schad- und Krankheitserreger, sowie das Management von Nutzungskonflikten selbst zum Thema haben.

### **3. Leistungen von Waldbesitzenden honorieren und neue Verantwortungszusammenhänge herstellen**

- Die erheblichen Mehraufwendungen und Mindererträge, die mit der Erholungsnutzung von Wald für die Eigentümer verbunden sind, sollten steuerfinanziert kompensiert werden, um damit auch der durch den Klimawandel erschwerten Bewirtschaftung und einem erhöhten Betriebsrisiko bei gleichzeitig steigender Nachfrage gerecht zu werden. Neue Honorierungsmodelle können basierend auf den in Kap. 3.4.2 vorgestellten Vorschlägen der Bundesplattform „Wald – Sport, Erholung, Gesundheit“ (WaSEG) und dem am Thünen-Institut entwickelten Modell zur Regionalisierung ökonomischer Werte von Waldleistungen (ReWaLe) fachlich weiterentwickelt und politisch begründet werden.

## 4 Handlungsempfehlungen

- Kartierungen der tatsächlichen Freizeit- und Erholungsnutzung und sozialwissenschaftliche Monitoringsysteme sind geeignet, Datengrundlagen für eine je nach Intensität der Nutzung regional differenzierte flächenbezogene Prämie zu liefern.
- Wie die WaSEG spricht sich auch der WBW gegen eine alleinige Finanzierung der Alltagserholung im Wald durch die Nutzer („Waldmaut“) aus, sondern plädiert für eine zweistufige Finanzierung der erholungsbedingten Aufwendungen. Die erste Stufe beinhaltet einen pauschalen Kostenausgleich, der Waldbesitzende in Abhängigkeit von der jeweiligen lokalen Besucherfrequentierung für das allgemeine Waldbetretungsrecht entschädigt. Diese Prämie könnte in die Strukturen der Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes GAK integriert werden. Mit der zweiten Stufe sollen gezielt Anreize für freiwillige Mehrleistungen zur Verbesserung der Erholungswirkung des Waldes geschaffen werden, die dann vor allem von den konkreten Nutzergruppen bzw. deren Interessengemeinschaften, etwa über Mitgliedsbeiträge von Vereinen, Crowd Funding, oder Sponsoring, auf vertraglicher Basis bezahlt werden müssten.

### 4. Erholungsinfrastruktur an den sich ändernden Bedarf und die erwarteten Extremereignisse anpassen

- Das Betretungsrecht, das sich aus Wald- und Naturschutzgesetzen ableitet, sollte länderübergreifend harmonisiert werden, um Waldbesuchenden die Rechtskenntnis zu erleichtern und die Chance auf regelkonformes Verhalten zu erhöhen (WaSEG 2019). Diesem Ziel dienen generell verständliche, gut begründete und überregional ähnliche Regelungen, die im Zweifelsfall auch im Interesse des Eigentums beziehungsweise des Natur- und Artenschutzes mit Sanktionen durchgesetzt werden sollten.
- Urbanes Grün und stadtnahe Wälder sollten auf Grundlage einer regionalen Erholungsplanung stärker verzahnt werden. Dabei gilt es, disziplinäre und administrative Grenzen etwa zwischen Grün- bzw. Gartenbauämtern und Forstverwaltungen zu überwinden.
- Traditionell gilt Ästhetik als wichtiger Maßstab bei der Gestaltung und Bewirtschaftung von stadtnahen Wäldern und Grünflächen. Vor allem Wälder, in denen die Erholung gegenüber anderen

Nutzungen Vorrang hat, können beispielsweise durch eine moderate Strukturvielfalt, einen lockeren Kronenschluss, geschwungene Waldränder, Freiflächen sowie alte Bäume allgemein bekannte Präferenzen von Waldbesuchenden aufgreifen.

- Die Erholungsinfrastruktur basiert im Wesentlichen auf dem vorhandenen Forstwegenetz, das regional auch barrierefreie Angebote umfassen sollte. Die Planung sowie die Instandhaltung der Infrastruktur müssen an häufigere Extremwetterereignisse angepasst werden und so gestaltet sein, dass kein erhöhter Wasserabfluss aus den Wäldern erfolgt.



### 4.8 Ökosystemleistungen honorieren

Das aktuell größte forstpolitische Problem wird vom WBW darin gesehen, dass Wälder zukünftig wichtige Ökosystemleistungen wie Klimaschutz, Wasserschutz, Naturschutz, Erholung nicht mehr in dem gesellschaftlich gewünschten Maß erbringen können, wenn nicht verstärkt in die Anpassung der Wälder investiert wird. Das ist mit Erlöseinbußen oder Mehrkosten für den Waldbesitz verbunden. Die Einnahmen der Forstbetriebe beruhen aber fast ausschließlich auf Erlösen aus dem Holzverkauf, die gesellschaftlich ebenfalls wichtigen Leistungen für Klimaschutz, Wasserschutz, Naturschutz, Erholung etc. erfahren kaum eine Honorierung.

Vor diesem Hintergrund kann es wegen mangelnder Finanzierung und fehlender Anreizwirkung zur gesellschaftlichen Fehlsteuerung (Marktversagen) kommen. Dieses Problem wird durch die aktuelle Krisensituation mit langen Dürreperioden und den verbreiteten, massiven Waldschäden, wie sie auch langfristig im Klimawandel zu erwarten sind, deutlich verschärft. Deshalb erscheint es dringend geboten, dass die öffentliche Hand Finanzierungs- und

Geschäftsmodelle unterstützt, die den Forstbetrieben langfristig planbare Einnahmen aus der Bereitstellung von Ökosystemleistungen ermöglichen.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

### 1. Zuständigkeiten für die Honorierung gesellschaftlicher Leistungen klären und umsetzbare Mechanismen entwickeln

- Die Honorierung von Leistungen, die überregional wirken und für die der Bund auch eine Leistungsverpflichtung gegenüber Anderen – in aller Regel der internationalen Staatengemeinschaft – eingegangen ist, sollte bundeseinheitlich geregelt werden. Hierunter fallen in erster Linie die Leistungen zum Schutz des globalen Klimas, durch CO<sub>2</sub>-Bindung im Wald und in Holzprodukten sowie durch Substitution, sowie Leistungen zum Schutz der biologischen Vielfalt oder Naturschutzleistungen.
- Es gibt aber auch Ökosystemleistungen, für die eine regionale Nachfrage besteht, wie beispielsweise die Erholungsleistung der Wälder. Für diese sind vorrangig örtlich wirksame Mechanismen zur Honorierung zu etablieren; die Zuständigkeiten liegen entsprechend auf Länder-, Kreis- oder Gemeindeebene.
- Insbesondere für die Honorierung von Leistungen, die überregional wirken, sind zusätzlich zu den bestehenden nationalen Inventursystemen wie Bundeswaldinventur oder Bodenzustandserhebung fernerkundungsbasierte Monitoringsysteme zu erarbeiten, die valide Indikatoren für die jeweiligen Kriterien wie Klimaschutzleistung, Anpassungsfähigkeit oder Vorhandensein bestimmter Waldstrukturen für den Naturschutz ohne aufwendige terrestrische Aufnahmen bestimmen lassen (siehe Kap. 4.9). Die dafür notwendige technische Infrastruktur und Verarbeitungskapazitäten sind gezielt vom Bund zu fördern und, wenn vorliegend, für die Leistungskontrollen einzusetzen.

### 2. Klimaschutzleistung und Anpassung der Wälder honorieren

- Ein wichtiges Instrument der Klimapolitik ist die CO<sub>2</sub>-Bepreisung. Um die erstrebte Internalisierung der negativen externen Effekte zu erreichen, muss dabei der CO<sub>2</sub>-Preis für alle Aktivitäten soweit angehoben werden, bis er die gesellschaftlichen Kosten abbildet. Durch den CO<sub>2</sub>-Preis werden die Substitutionsprodukte wie Stahl, Beton, Aluminium,

Kohle, oder Erdöl im Vergleich zu dem mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen verbundenen Rohstoff Holz teurer, was insgesamt Anreize für die nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holznutzung setzt. Deshalb begrüßt der WBW die Einführung und geplante Anpassung eines CO<sub>2</sub>-Preises. Im Rahmen des Gesetzes über einen nationalen Zertifikathandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG) als Ergänzung des Europäischen Emissionshandelssystems (European Emission Trading System) hat die Bundesregierung eine solche CO<sub>2</sub>-Bepreisung zwischenzeitlich eingeführt.

- Da die Wälder und deren Klimaschutzfunktion durch den Klimawandel bedroht werden, sollte ein Teil der Einnahmen des Bundes aus der CO<sub>2</sub>-Abgabe für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel und damit zur Sicherung der Klimaschutzleistung durch die Wälder und nachhaltige Holznutzung eingesetzt werden. In diesem Sinne ist die im Jahr 2020/21 von der Bundesregierung mit einem Volumen von 500 Mio. Euro im Rahmen des Konjunkturpakets für den Erhalt und die nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder etablierte „Nachhaltigkeitsprämie Wald“ weiterzuentwickeln und zu verstetigen.
- Derzeit findet im politischen Raum eine rege Diskussion alternativer Konzepte zur Honorierung von Ökosystemleistungen statt. Für die Entwicklung und Umsetzung eines solchen Konzeptes, welches die Waldwirtschaft in Deutschland auf eine neue Finanzierungsbasis stellen würde, sind klare politische Zielvorgaben und auch langfristig tragfähige Finanzierungskonzepte erforderlich. Wichtig ist auch, dass ein solches Konzept praktikabel in der Umsetzung sein muss und nicht mit zu hohen Transaktionskosten belastet sein darf. Mit einem solchen Konzept sollten die konkreten GAK-Fördermaßnahmen nicht ersetzt, sondern sinnvoll ergänzt werden.
- Eine grundsätzliche Möglichkeit hierfür sieht der WBW darin, die Anpassungsfähigkeit bzw. Anpassbarkeit der Wälder an den Klimawandel, welche die Grundlage für die zukünftige Erbringung aller Ökosystemleistungen darstellt, zu honorieren. Die Begründung ist, damit öffentliche Mittel für die Aufrechterhaltung und Sicherung des öffentlichen Gutes Klimaschutz einzusetzen. Um diese Art der Honorierung von einer Förderung nach GAK sinnvoll abzugrenzen, würden nicht die einzelnen Maßnahmen, die die Anpassungsfähigkeit erhöhen, wie beispielsweise Waldumbau, sondern

das Ergebnis bzw. der Zustand honoriert werden. Forstbetriebe erhielten somit für den Teil ihrer Wälder eine laufende Honorierung, der nach aktuell vorliegenden Erkenntnissen als hinreichend resilient und anpassungsfähig betrachtet werden kann. Für ein solches System wäre eine gewisse Differenzierung der Zahlungshöhe nach dem Grad der Angepasstheit bzw. Anpassungsfähigkeit möglich. Exemplarisch könnte in Form eines Stufensystems unterschieden werden zwischen Wäldern, die nach jetzigem Wissensstand als weitgehend resilient und anpassungsfähig betrachtet werden können, solchen, die durch Waldumbaumaßnahmen in diese Richtung entwickelt werden, und solchen, die derzeit als Risikobestockung einzustufen sind. Um einen Anreiz für einen möglichst niedrigschwelligen Einstieg in die Anpassung der Wälder zu bieten, könnte auch eine gewisse Honorierung für solche Bestände bereitgestellt werden, für die bereits eine verbindliche Planung zur Anpassung, zum Beispiel im Rahmen der Forsteinrichtung, vorliegt. Valide und standardisiert zu erhebende Indikatoren für die Quantifizierung der Kriterien Resilienz und Anpassungsfähigkeit müssten wissenschaftlich fundiert von einer breit aufgestellten Arbeitsgruppe aus Vertreterinnen und Vertretern der Wissenschaft, der forstlichen Praxis, Bund und Ländern, sowie der Zertifizierungsorganisationen, entwickelt und dem BMEL als Vertreter des Bundes vorgeschlagen werden.

- Waldflächen, die mit Baumarten bzw. Herkünften bestockt wurden, für die naturgemäß noch keine gesicherten Erfahrungen über deren Eignung im Klimawandel vorliegen, sollten ebenfalls in dieses Honorierungsinstrument einbezogen werden, zum Beispiel ähnlich wie Bestände mit begonnem Waldumbau eingestuft werden.
- Solange die energetische Holznutzung nicht zu einer Reduktion der durchschnittlichen Biomassevorräte der Wälder führt und somit nur das der Luft zuvor entnommene CO<sub>2</sub> wieder freisetzt, sollte die Verbrennung von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft weiterhin, wie aktuell im Brennstoffemissionshandelsgesetz umgesetzt, von CO<sub>2</sub>-Abgaben befreit bleiben. Gegenüber der direkten Verbrennung von Holz wird eine höhere Klimaschutzleistung aber durch Kaskadennutzung mit energetischer Nutzung an deren Ende erreicht. Daher sollten Anreize entwickelt werden, Holz so weit wie möglich und sinnvoll zuerst stofflich zu nutzen, bevor es verbrannt wird (siehe Kap. 4.6).

### 3. Instrumente zur Honorierung von Naturschutzleistungen im Wald entwickeln und anwenden

- Auch über die Honorierung von Naturschutzleistungen lässt sich die Klimaanpassung unserer Wälder effektiv unterstützen. Zum einen ist davon auszugehen, dass Wälder mit höherer Biodiversität auch eine höhere Resilienz gegenüber dem Klimawandel haben. Zum anderen würden Zahlungen für Naturschutzleistungen, beispielsweise zur Wiedervernässung, im Wald auch dazu beitragen, dass Forstbetriebe in die Lage versetzt werden, die notwendigen Maßnahmen für die Klimaanpassung ihrer Wälder zu finanzieren.
- Naturschutz ist zudem eine weitere gesellschaftlich wichtige Ökosystemleistung der Wälder. In einem gemeinsamen Gutachten über Wege zu einem effizienten Waldnaturschutz in Deutschland haben die beiden Wissenschaftlichen Beiräte für Waldpolitik sowie für Biodiversität und Genetische Ressourcen dem BMEL Vorschläge unterbreitet, wie ein Instrument zur Honorierung von Naturschutz im Wald ausgestaltet sein sollte; siehe WBW und WBGR 2020, Kapitel 3.4.
- Basierend auf diesen sowie anderen vorliegenden Vorschlägen sollte die Politik konkrete Instrumente zur langfristigen Finanzierung von Naturschutzleistungen im Wald entwickeln und umsetzen. In Anbetracht der großen naturschutzfachlichen Bedeutung und der großen flächenbezogenen Betroffenheit der Forstbetriebe durch die FFH-Richtlinie sowie der Höhe der wirtschaftlichen Belastungen sollte die Honorierung von Naturschutzleistungen im Wald insbesondere auch die FFH-Gebietskulisse bzw. FFH-Lebensraumtypen einbeziehen. Das FFH-Monitoring ist dafür so weiterzuentwickeln, dass dessen Ergebnisse für diese Honorierung zugrunde gelegt werden können. Hierbei ist, wie bereits unter Kapitel 4.4 ausgeführt, darauf zu achten, dass zwischen klimawandelbedingten und bewirtschaftungsbedingten Änderungen des Erhaltungszustandes unterschieden wird.





## 4.9 Monitoring optimieren

Das Waldmonitoring ist eine wesentliche Grundlage zur Wahrnehmung und Bewertung von Risikofaktoren und ihren Wirkungen, von Waldentwicklungen sowie Ökosystemleistungen und zur Überprüfung der Wirksamkeit forstlicher Maßnahmen. Es nimmt daher eine Schlüsselstellung in den Anpassungsstrategien zum Klimawandel ein. Jeglicher Handlungsbedarf u. a. zur Entwicklung von Waldbaustrategien, Fördermaßnahmen, Forschungsthemen und Gesetzesänderungen entsteht auf der Grundlage von Beobachtungen. Das gegenwärtige forstliche Monitoring wird den aktuellen und künftigen Anforderungen an räumliche und zeitliche Auflösung in vielen Fällen nicht mehr gerecht (siehe Kap 3.5).

Aufbauend auf dem aktuellen Stand des forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland und der Vielzahl der erhobenen Indikatoren soll die Aussagekraft des Waldmonitorings daher verstärkt und zu einem transparenten Instrument der Risikoanalyse weiterentwickelt werden. Zu diesem Zweck werden Maßnahmen vorgeschlagen, die flächenbezogene Aussagen ermöglichen, die Vernetzung möglichst vieler Elemente des forstlichen Monitorings gewährleisten, die Bereitstellung von Informationen beschleunigen und das Artenspektrum der Zielorganismen erweitern.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

### 1. Aktuelle, bundesweite Risikobewertungen für Sturm, Waldbrand, Insektenkalamitäten und Trockenstress bereitstellen

- Zur Verbesserung der bestehenden Monitoringkonzepte sowie der Präventivmaßnahmen sollten bundesweite, regelmäßig aktualisierte Risikobewertungen für Sturm, Waldbrand, Insektenkalamitäten und Trockenstress durchgeführt werden,

beispielsweise durch die Forstlichen Versuchsanstalten. Anhand dieser Bewertung kann dann mit Risikokarten eine Priorisierung und gegebenenfalls Neueinrichtung von Monitoringpunkten, -flächen und -maßnahmen erfolgen. Solche aktuellen Risikobewertungen bieten die Grundlage für angepasste Präventivmaßnahmen, zum Beispiel für ein angepasstes Vegetationsmanagement entlang von kritischen Infrastrukturen wie Straßen, Bahnlinien oder Energietrassen.

### 2. Wirksamkeit von waldbaulichen Anpassungs- und Präventivmaßnahmen und deren Wirkung auf Ökosystemleistungen überprüfen

- Das aktuelle forstliche Monitoring klammert die Beobachtung der Auswirkung waldbaulichen Handelns, wie der Nutzungsintensität (Frequenz und Intensität der Eingriffe) oder der Pflege- und Schutzmaßnahmen wie Läuterung oder Zäunung aus. Informationen hierüber werden aus dem forstlichen Versuchswesen und der Naturwaldforschung bereitgestellt (siehe Kap 4.14). Auf der Ökosystemebene sollte die Dynamik der Entwicklung bewirtschafteter Wälder und der bereitgestellten Ökosystemleistungen neben entsprechenden Experimenten auch langfristig unter den methodischen Grundsätzen des Monitorings beobachtet werden, beispielsweise unter der Federführung der forstlichen Versuchsanstalten. Eine wichtige Grundlage hierfür bilden die Waldentwicklungstypen für bewirtschaftete Wälder und das Netzwerk nicht bewirtschafteter Wälder (Naturwaldreservate, Bannwälder). Auch ein breit angelegtes forstbetriebliches Monitoring auf der Basis eines weiterentwickelten Testbetriebsnetzes Forst kann hier einen wichtigen Beitrag leisten.
- Bisher im forstlichen Umweltmonitoring weitgehend unberücksichtigt ist die Quantifizierung von Ökosystemleistungen. Hierzu müssen entsprechende Konzepte in Kooperation von Wissenschaft, Forstwirtschaft, Zertifizierungsunternehmen, Waldbesitzern und den Nachfragern der Ökosystemleistungen erarbeitet werden (siehe Kapitel 4.13).
- Das im forstlichen Monitoring bisher erfasste Baumartenspektrum sollte hinsichtlich potenziell klimatoleranterer Arten erweitert werden. Beide Monitoringebenen, Level 1 und 2, der Forstlichen Umweltbeobachtung sind auf wenige Hauptbaumarten fokussiert (siehe Kap. 3.5). Für die Indikatoren Vitalität, Wachstum und Fruktifikation muss auf der autökologischen Ebene das zu

beobachtende Baumartenspektrum insbesondere hinsichtlich potenziell klimatoleranterer Arten wie Hainbuche, Douglasie, Rot-Eiche, und Ahornarten erweitert und hierzu repräsentative Monitoringkonzepte entwickelt werden. Da dies kaum durch eine Verdichtung der Rasternetze erfolgen kann, müssen hierzu repräsentative Monitoringbestände ausgewählt werden.

### 3. Monitoringdaten und Datenbereitstellung zum besseren Verständnis komplexer Waldveränderungen auf Ökosystem- und Landschaftsebene verknüpfen

- Die etablierten Monitoringverfahren laufen angesichts unterschiedlicher Teilziele weitgehend parallel, mit unterschiedlichen Zuständigkeiten und teilweise auf verschobenen Rasternetzen (z. B. Bundeswaldinventur und Waldzustandserhebung). Dies erschwert die Verknüpfung von Daten und bedeutet einen Informationsverlust. Um das Verständnis komplexer Waldveränderungen auf Ökosystem- und Landschaftsebene zu verbessern, müssen die verschiedenen Monitoringergebnisse zueinander in Beziehung gesetzt werden können. Dafür bedarf es der frühzeitigen und kontinuierlichen Abstimmung mit der Entwicklung von Monitoringinitiativen anderer Fachressorts (Landwirtschaft, Naturschutz). Hierfür sind auf Bundes- und Länderebene die notwendigen Strukturen ressortübergreifend zu entwickeln.

### 4. Fernerkundungsverfahren zum Erhalt flächenbezogener Aussagen erweitern und anwenden

- Das aktuelle, überregionale forstliche Monitoring basiert überwiegend auf terrestrischen Stichprobeninventuren mit einem weitmaschigen Raster um Aussagen für große Straten zu generieren (BZE, WZE, BWI). Die Ableitung von Aussagen für konkrete Waldflächen ist auf der Grundlage von Punktdaten mit relativ großen Unsicherheiten verbunden. Daher sollen die terrestrischen Verfahren durch Fernerkundungsverfahren, zum Beispiel durch kostenfreie Satellitenbilder, mit unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung ergänzt werden, um (1) jährlich bundesweit flächendeckend den Zustand der Wälder abschätzen zu können, (2) ereignisbasierte Störungen wie Feuer, Sturm, Trockenheit oder Insektenkalamitäten zeitnah zu quantifizieren, sowie (3) weitere Flächeninformationen wie Baumart, Biomasse oder Strukturvielfalt, bereitstellen zu können, um zum Beispiel den Grad der Anpasstheit zu

quantifizieren. Dazu muss bei den zuständigen Einrichtungen wie den Forstlichen Versuchsanstalten, Thünen Institut, Forstplanungsämtern und Nationalparks, die Kompetenz und Infrastruktur im Bereich Fernerkundung und Statistik weiter ausgebaut und gebündelt werden.

- Zudem müssen die Monitoringdaten zur Kalibrierung und Validierung der Fernerkundungsverfahren frei zur Verfügung gestellt werden, um die Verfahren zu verbessern.
- Da die Fernerkundung kein direktes Messverfahren am Objekt ist, ist es immer mit bestimmten Unsicherheiten verbunden. Diese sollten stets bei der Ergebnisdarstellung mit den in der Praxis gängigen Unsicherheitsmaßen quantifiziert werden.

### 5. Kompetenzen zur Früherkennung von Störungen ausbauen, Informationen zeitnah bereitstellen

- Die Zeiträume vom Auftreten bis zum umfassenden Erkennen und Bewerten von Störungsereignissen wie Waldbrand, Sturm, Insektenkalamitäten etc., müssen weiter verkürzt werden, insbesondere um diese rasch an Entscheidungsträger zu kommunizieren. Bei der Überführung von neuen Verfahren und Forschungsmethoden in die Routineanwendung nehmen die Forstlichen Versuchsanstalten der Bundesländer eine Schlüsselstellung ein. Diese müssen über die hierzu notwendigen personellen und technischen Ressourcen verfügen.
- Dies betrifft unter anderem den Ausbau des Waldbrandmonitorings zur frühzeitigen Erkennung von Waldbränden als Voraussetzung zur Reduktion des Schadausmaßes mit moderner terrestrischer und satellitenbasierter Fernerkundung.
- Speziell für wirtschaftlich relevante Schadorganismen ist ein bundesweit einheitliches Waldschutzmonitoring und -meldewesen aufzubauen. Dabei sind sowohl (1) artspezifische Schwellenwerte wie lokale Populationsdichten an Messpunkten abzugleichen als auch (2) das Schadausmaß, wie Blattverlust, Mortalität auf ganzer Fläche, durch biotische Schadorganismen z. B. mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren zu quantifizieren. Diese Abstimmung könnte durch eine Bund-Länder Arbeitsgruppe vorangetrieben werden.
- Vor dem Hintergrund globaler Ausbreitungswege muss Forstpersonal weitergebildet werden, um auch frühzeitig neue Schadorganismen zu

erkennen. Zusätzlich müssen die Versuchsanstalten mit Ressourcen ausgestattet werden, um auch moderne Methoden wie das DNA-Barcoding von Insekten und Pathogenen in Routineverfahren anwenden zu können.

- Auf Länder- und Bundesebene müssen stabile Kommunikationswege und einheitliche Erfassungsverfahren für großflächige Störungsereignisse entwickelt beziehungsweise ausgebaut werden.

## 6. Indikatoren bestehender Monitoringverfahren an neue Erfordernisse anpassen

- Zur Gewährleistung von Zeitreihen ist jegliches Monitoring definitionsgemäß auf die wiederholte Aufnahme von Zielgrößen mit identischen Verfahren angewiesen. Im Laufe der Zeit können sich jedoch Monitoringziele ändern und neue Methoden entwickelt werden. Dadurch ergibt sich die Herausforderung, Monitoringverfahren an die Erfassung neuer Risiken anzupassen und gleichzeitig bestehende, wertvolle Zeitreihen fortzuführen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt der WBW das intensive Forstliche Monitoring (ICP Forests Level II), welches in Folge der Waldschäden der 1970–1980er Jahre entwickelt wurde und unter anderem auf Akkumulationsindikatoren, wie zum Beispiel Stickstoff, Schwefel, Aluminium, aufbaut, um Reaktionsindikatoren (zum Beispiel physiologische und genetische Marker) zu ergänzen. Nur so können vor dem Hintergrund des Klimawandels und der sich damit ändernden abiotischen Einflussfaktoren wie Trockenheit, Hitze, Sturm, die Ursache-Wirkungs-Beziehungen abgeleitet und Frühwarnsysteme (siehe Pkt. 5) entwickelt werden. Für die bisherigen Akkumulationsindikatoren können beispielsweise über die Streckung von Aufnahmeintervallen Kosten eingespart werden.

## 7. Waldverjüngung, Biodiversität und genetische Struktur von Populationen in das Monitoring einbeziehen

- Das aktuelle forstliche Monitoring ist überwiegend auf ausgewählte Indikatoren des Hauptbestandes der Hauptbaumarten ausgerichtet. Bundesweit fehlt es an Informationen insbesondere für kürzere Zeitintervalle als die der Bundeswaldinventur zur Waldverjüngung und Artenvielfalt außerhalb geschützter Biotope. Das in den Bundesländern bisher mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Verfahren stattfindende Verbissmonitoring (bzw. Verbiss- und Schälschadeninventur) soll in Abstimmung von Bund und Ländern zu

einem Wald-Verjüngungsmonitoring mit vereinheitlichten Aufnahmeverfahren weiterentwickelt werden.

- Punktuelle, fach- und ressortspezifische Erhebungen zum Vorkommen und zur Populationsdynamik von Pflanzen-, Tier- und Pilzarten sollten zu einem Biodiversitätsmonitoring auf Landschaftsebene entwickelt werden. Dafür bedarf es einer ressortübergreifenden bundesweiten Konzeption und Koordinierung beispielsweise im Nationalen Monitoringzentrum zur Biodiversität in Leipzig.
- Im Rahmen mehrerer Projekte wurde in Deutschland das Genetische Monitoring für Buche und Fichte entwickelt, das unter anderem den Einfluss von Klimavariablen auf das genetische System (Bestäubung, Blüte, Fruktifikation) und die genetische Struktur von Populationen überwacht. Dieses Programm muss über den Projektstatus hinaus als Daueraufgabe fortgesetzt und auf andere Baumarten ausgeweitet werden.

## 8. Soziales Monitoring zur Abbildung von Nutzungsmustern und -konflikten etablieren

- Mit dem Klimawandel wird sich auch die Nutzung der Wälder durch die Bevölkerung ändern, was gleichzeitig Auswirkungen auf die Nutzung haben wird. Ein proaktives Management von Konflikten setzt Monitoring zur Schaffung von Daten als Kommunikations-, Entscheidungs- und Evaluierungsgrundlage voraus. Hierzu gehört auch ein soziales Monitoring, das zum Beispiel Muster von Nutzungsverhalten und -konflikten in Bezug auf die Inanspruchnahme verschiedener Ökosystemleistungen abbildet (siehe Kap. 4.7).

## 9. Monitoring der wirtschaftlichen Situation der Forstbetriebe sicherstellen

- Die Umsetzung der in diesem Gutachten vorgeschlagenen Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel einschließlich der damit verbundenen Maßnahmen zum Erhalt der biologischen Vielfalt, zum Boden- und Wasserschutz sowie zur Konfliktlösung und Kommunikation wird im Wesentlichen auf Ebene der Forstbetriebe erfolgen. Dies setzt hohe fachliche Kenntnisse in den Betrieben voraus und diese müssen auch kontinuierlich weiter ausgebaut werden. Zum anderen ist zu erwarten, dass der betriebliche Aufwand für die Umsetzung der Maßnahmen erheblich sein wird. Um rechtzeitig erkennen zu können, ob die Forstbetriebe diesen Aufwand tragen können – als

Voraussetzung für die Umsetzung der hier vorgeschlagenen Maßnahmen, ist auch ein Monitoring der wirtschaftlichen Situation der Forstbetriebe dringend geboten. Vor dem Hintergrund des drastischen Rückgangs der Teilnehmerzahlen am Testbetriebsnetz Forstwirtschaft des BMEL sollten daher unverzüglich Konzepte zur Weiterentwicklung oder gangbare Alternativen für ein flächendeckendes und repräsentatives wirtschaftliches Monitoring der Forstbetriebe entwickelt und vom Bund und den Ländern auch umgesetzt werden.



### 4.10 Institutionelle Strukturen anpassen

Zwei Entwicklungen verschärfen die ohnehin schon bestehenden Probleme der Waldwirtschaft insbesondere im kleinparzellierten Privat- und Körperschaftswald. Erstens werden im Klimawandel aufgrund zunehmender Risiken und des erforderlichen Baumartenwechsels die Erträge aus der traditionellen Waldbewirtschaftung mit Fokus auf Rohholzproduktion abnehmen. Zweitens entstehen zusätzliche Kosten durch Anpassungsmaßnahmen beim Waldumbau, bei der Waldpflege und beim Waldschutz einschließlich der Verkehrssicherung, die mehr Aktivitäten und Akteure auf der Fläche vor Ort erfordern. Aus diesem Grund müssen insbesondere im kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald dringend stabile institutionelle Strukturen geschaffen werden, welche langfristig finanziell abgesichert sind. Darauf hat der WBW bereits im Juni 2018 in der Stellungnahme „Betreuung und Förderung im kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald“ hingewiesen.

Zur Verbesserung der institutionellen Rahmenbedingungen für den Nicht-Staatswald werden im Einzelnen die folgenden Maßnahmen empfohlen:

#### 1. Langfristig stabile Strukturen zur Betreuung des Nichtstaatswaldes etablieren

- Die bisher überwiegend durch die staatlichen Forstverwaltungen der Länder erbrachte indirekte Förderung des Privat- und Körperschaftswaldes in Form von kostengünstigen beziehungsweise kostenfreien Leistungsangeboten wird in den Ländern derzeit zu einer den kartell- und beihilferechtlichen Vorgaben entsprechenden direkten Förderung umgestaltet. Das erfordert langfristig eine ungeschmälerterte und unbürokratische Bereitstellung entsprechender öffentlicher Finanzmittel (siehe WBW 2018).
- Wegen der gesellschaftlichen Bedeutung von Wald-erhaltung, Waldpflege und Holznutzung für die flächendeckende Bereitstellung von Ökosystemleistungen ist die gemeinschaftliche Betreuung und Bewirtschaftung des (kleinstrukturierten) Privat- und Kommunalwaldes finanziell langfristig abzusichern. In diesem Zusammenhang sollte man das Leitbild der „befristeten Hilfe zur Selbsthilfe“ aufgeben, welches bisher die Förderpolitik bezüglich der „forstlichen Selbsthilfeeinrichtungen“, gemeint sind hier Forstbetriebsgemeinschaften, für den Nicht-Staatswald bestimmt hat. Dies ist auch deshalb erforderlich, weil es vor dem Hintergrund der Urbanisierung, zunehmender Mechanisierung und technischer Spezialisierung sowie der rapiden Erosion des Erfahrungswissens sowie der Unsicherheiten aufgrund des Klimawandels für die Waldbesitzer ohnehin zunehmend schwerer wird, im Wald „selber Hand anzulegen“.
- Forstbetriebsgemeinschaften und andere Formen überbetrieblicher forstlicher Kooperation, zum Beispiel genossenschaftliche Waldbewirtschaftung, sollten durch öffentlich finanzierte, langfristig gesicherte Waldpflege-, Holzmobilisierungs- oder Ökosystemleistungsprämien beim Aufbau und Erhalt personeller und organisatorischer Strukturen unterstützt werden. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung anpassungsfähiger Wälder im kleinstrukturierten Privatwald.
- Auch der Aufbau und Unterhalt von Informations-Plattformen für nicht-staatliche Waldbesitzer ist eine wichtige, langfristig öffentlich mitzufinanzierende Aufgabe. So ist beispielsweise die

Fortführung der Internet-Plattform „Wald wird mobil“, einer im Jahr 2007 als öffentlich-private Partnerschaft für die Kleinprivatwaldmobilisierung gegründeten gemeinnützigen GmbH, nach Auslaufen der Projektförderung aktuell gefährdet. Hier könnte zur langfristigen institutionellen Absicherung gegebenenfalls auch über ein Stiftungsmodell nachgedacht werden.

## 2. Organisatorische und finanzielle Anreize zur Übertragung der Waldbewirtschaftung schaffen

- Es sollten organisatorische und finanzielle Anreize geschaffen werden, welche es „inaktiven“ Waldbesitzern ermöglichen, das Waldmanagement beispielsweise durch Waldpacht- oder Waldpflegeverträge längerfristig Dritten zu übertragen. Entsprechende Anreize könnten beispielsweise davon ausgehen, dass sie in diesem Fall von der Zahlung der Beiträge für die Berufsgenossenschaft freigestellt werden.

## 3. Forstliche Förderung effizienter gestalten

- Die forstliche Förderung in Deutschland sollte durch mehr Beständigkeit in den Regelungen, mehr Austausch und Abstimmung zwischen den Ländern über Best-Practice-Verfahren bezüglich der Förderinhalte und organisatorischer Prozesse und Vereinfachung und Standardisierung bei den Inhalten und Verwaltungsabläufen effektiver und effizienter gestaltet werden.
- Die öffentliche Förderung sollte vorrangig auf den gesellschaftlichen Nutzen der Ökosystemleistungen des Waldes fokussieren, wobei auch die Holzproduktion als Beitrag zu Klimaschutz, Beschäftigung und regionaler Wertschöpfung etc. dabei ein sehr wesentlicher Aspekt ist. Andere gemeinwohlrelevante Aspekte sind beispielsweise die Anpassung der Wälder an den Klimawandel, der Schutz der Wälder vor großflächigen Störungen oder der Schutz der biologischen Vielfalt.
- Gefördert werden sollten nicht nur die jeweiligen Maßnahmenkosten, sondern auch die Organisationskosten. Darüber hinaus sollte die Förderung für die Waldbesitzer attraktiver gestaltet werden, beispielsweise durch Verminderung des Eigenanteils und die Reduktion der Risiken bezüglich der Rückzahlung beispielsweise im Falle einer unverschuldeten Nichterreichung der Verjüngungsziele.
- Auch sollte der Kreis der von der forstlichen Förderung Begünstigten erweitert werden,

beispielsweise um forstliche Dienstleistungsunternehmen. Wenn es sich für Unternehmer lohnt, im Wald Initiativen für Waldbau, Waldschutz (Kalamitätsholz), Waldpflege etc. zu ergreifen, werden diese in Abstimmung mit den Flächeneigentümern umgesetzt. Das könnte beispielsweise auch bei der Umsetzung von Naturschutzmaßnahmen im Wald hilfreich sein, beispielsweise der Anlage und Pflege von Waldrändern, Blühstreifen im Wald etc.



## 4.11 Anpassungsstrategien kommunizieren, Konfliktmanagement gestalten

Wälder haben in unserer Gesellschaft einen hohen Stellenwert. Veränderungen und Störungen der Waldökosysteme werden daher, insbesondere wenn sie beliebte Ausflugsregionen betreffen, in der Öffentlichkeit bzw. von den betroffenen Nutzergruppen teils mit starken emotionalen Reaktionen begleitet. Die gesellschaftlichen Ansprüche an Wälder sind gestiegen; der Aufenthalt in den klimaausgleichend wirkenden Wäldern wird weiter an Beliebtheit gewinnen. Diesem Bedeutungszuwachs entsprechend stieg in den letzten Jahren auch das Mitsprachebedürfnis waldinteressierter Laien in Bezug auf die Gestaltung und Bewirtschaftung der Wälder. Wie auch in Fachkreisen divergieren die Meinungen gesellschaftlicher Gruppen zur adäquaten Anpassung der Wälder an den Klimawandel im Spannungsfeld zwischen passiver und aktiver Anpassung.

Um daraus resultierenden Konflikten entgegenzuwirken und zu tragfähigen Konzepten der Anpassung von Wäldern an den Klimawandel zu kommen, bedarf es einer verstärkten Kommunikation des Themas in der Öffentlichkeit und der aktiven Gestaltung von Konfliktlösungsprozessen. Dies umfasst auch das aktive Führen einer gesellschaftlichen Debatte, die

sowohl Fachwissen und aktuelle Forschungsansätze, als auch Nutzungsansprüche verschiedener gesellschaftlicher Gruppen einbezieht.

Ziel einer solchen, auch dem gesellschaftlichen Zusammenhalt dienenden Kommunikation in der Öffentlichkeit sollte es sein, (1) neue, dem Klimawandel angepasste Leitbilder von Wald und Forstwirtschaft zu entwickeln und zentrale Kommunikationsbotschaften dafür zu erarbeiten, (2) die Kommunikation zur Anpassung von Wäldern an den Klimawandel in der forstlichen Aus- und Weiterbildung zu verankern (3) Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation in einer großen Bandbreite zu fördern, (4) Dialogprozesse zur Waldanpassung, insbesondere auf kommunaler bzw. regionaler Ebene zu initiieren und (5) bürgerschaftliches Engagement im Wald zu ermöglichen.

Hierzu werden die folgenden Strategien und Maßnahmen empfohlen:

### 1. Leitbilder dynamisieren, zentrale Kommunikationsbotschaften herausarbeiten

Die Kommunikation der für das Thema Klimawandel und Wald verantwortlichen Verwaltungen sowie sich in diesem Bereich engagierenden Verbände und Vereine sollte der Dynamik der sich derzeit vollziehenden sozial-ökologischen Prozesse angepasst sein, und die folgenden Inhalte aufgreifen und in Kommunikationsbotschaften übersetzen:

- Klimawandel umfasst alle Ökosystemleistungen des Waldes. In der öffentlichen Debatte zum Klimawandel im Wald dominieren derzeit einzelne Fragestellungen, wie die Suche nach zukünftig passenden Baumarten oder der Umgang mit verstärkt auftretenden Störungen. Information und Kommunikation müssen hier breiter ansetzen und verdeutlichen, dass der Klimawandel alle Ökosystemleistungen des Waldes betrifft und deren Verfügbarkeit für zukünftige Generationen gefährdet.
- Dynamische Leitbilder von Wald und Forstwirtschaft entwickeln: Das Bild der Öffentlichkeit von Wald und Waldökosystemen ist geprägt von Wald- und Naturbildern, die den klimabedingten Änderungen nicht standhalten. Beispiele hierfür sind die Bezeichnung „Buchenland Deutschland“, die Definition statischer Erhaltungszustände in Schutzgebieten und die Dichotomie von heimisch und fremd bzw. von natürlich im Sinne von gestrig/unbeeinflusst und nicht natürlich im Sinne von durch den Menschen beeinflusst. Diese gewohnten Denkmuster sollten durch dynamische Leitbilder, die auch Fragen von Nichtwissen und Unsicherheit

positiv aufgreifen, ersetzt werden. Jahrzehntlang kultivierte Gegensätze von Forstwirtschaft und Naturschutz sollten als konstruktive Debatten um Zukunftswaldbilder begriffen und damit nutzbar gemacht werden. Auch rückwärtsgerichtete Fokussierungen der Forstwirtschaft auf Wald- und Forstgeschichte müssen überwunden und an die fortschreitende Dynamik der natürlichen Prozesse angepasst werden nach dem Motto: „Wald entwickelt sich dynamisch – wir auch“. Zugleich bedarf es der Erarbeitung und Vermittlung von Kriterien, die auch in dynamischen Prozessen handlungs- und kommunikationsleitend sind. Der teils negativen Bewertung von Waldbewirtschaftung in der Bevölkerung die Bedeutung funktionsfähiger Forstbetriebe für Walderhalt und Klimaanpassung, die Bereitstellung von Ökosystemleistungen und die Rolle von Wald und Holz im Kontext des Klimaschutzes gegenüberzustellen, ist eine weitere zentrale Kommunikationsaufgabe, die z. B. über das Darstellen von Fortschritten bei der Anpassung der Forstbetriebe an den Klimawandel und das Erzählen guter Beispiele erfolgen kann.

- Vernetztheit und Trade-Offs der Maßnahmen zur Klimaanpassung kommunizieren: Maßnahmen zur Klimaanpassung von Wäldern erfolgen nicht nur in den Wäldern selbst. Durch Handlungsveränderungen im sozial-ökologischen System, in das Wälder eingebettet sind, werden wesentliche Voraussetzungen für den Erfolg der Klimaanpassung geschaffen. Beispiele sind etwa die Reduktion der Nutzung von Grundwasser, die Vermeidung der Einschleppung von Schadorganismen durch den Warenverkehr, oder die Regulierung von Schalenwildbeständen um die Waldverjüngung zu ermöglichen. Diese systemischen Wirkungen und Zusammenhänge gilt es ebenso zu kommunizieren, wie Konkurrenzen und trade-offs zwischen anderen Ökosystemleistungen und Klimaanpassung.
- Emotionale Bedeutung von Wäldern in die Kommunikation einbeziehen: Wälder erbringen auch wichtige kulturelle Ökosystemleistungen. So bieten sie Heimat, Rückzugsräume, Begegnungsorte. Waldbezogene Umwelt- und Klimawandelkommunikation sollte daher den Wandel dieser emotionalen Bezüge durch Klimaauswirkungen bzw. Klimaanpassungsmaßnahmen thematisieren und Wertschätzung für die emotionale Bindung von Menschen an den Wald zeigen.

## 2. Kommunikation zur Anpassung von Wäldern an den Klimawandel in der forstlichen Aus- und Weiterbildung verankern

- Das im Wald tätige Forstpersonal ist eine der ersten Anlaufstellen für Waldbesuchende und sollte die oben dargestellten zentralen Botschaften glaubhaft verkörpern können. Hierzu wurden in den letzten Jahren Formate wie z. B. eine Seminarreihe zur Verbesserung der Kommunikation im forstlichen Arbeitsalltag<sup>1</sup> ins Leben gerufen, die weiterentwickelt und etabliert werden sollten (siehe auch Kap. 4.12).

## 3. Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation in ganzer Breite fördern

- Die Aufbereitung und Vermittlung komplexer Wissenszusammenhänge im Kontext Klima und Wald gehört zum staatlichen Bildungsauftrag. Sie ist zeitintensiv und bedarf gezielter Förderung. Sowohl staatliche Forsteinrichtungen, freie Bildungsträger, als auch wald- und umweltbezogene Forschungseinrichtungen können über die Förderung von derartigen Angeboten im Wald sowie Internetplattformen, Infokampagnen oder Wettbewerbe in ihren Kommunikationsaktivitäten unterstützt werden. Insbesondere auch die Arbeit mit Online-Angeboten und den sozialen Medien ist zu stärken, um jüngere Generationen schulisch und außerschulischen besser zu erreichen und dabei auch ‚in den Wald zu führen‘. Bündnisse mit Akteuren aus dem Bereich der Bildung für nachhaltige Entwicklung, ‚Waldfluencern‘ oder Klimaschutzaktivitäten können hier ebenso hilfreich sein wie der Aufbau von Medienpartnerschaften.

## 4. Dialogprozesse zur Waldanpassung auf kommunaler bzw. regionaler Ebene initiieren

- Walddialoge können auf kommunaler bzw. regionaler Ebene ein geeignetes Element sein, um zum einen unterschiedliche Ansprüche verschiedener Interessen- bzw. Nutzungsgruppen zu adressieren, wie zum Beispiel an Holzernteverfahren und -zeitpunkte. Zum anderen können sie dazu dienen, Waldentwicklungen plastisch zu machen und mit interessierten Bevölkerungsgruppen zu diskutieren sowie durch den Klimawandel nötige Maßnahmen verständlich zu machen, wie beispielsweise die Einschränkung des Zugangs zu Waldgebieten

infolge mangelnder Verkehrssicherheit. Hier kann an vertraute Formate, wie die Besprechung von Waldthemen in Gemeinderatssitzungen, klassische Beteiligungselementen der forstlichen Planung oder Exkursionen durch Revierverantwortliche angeknüpft werden. Zugleich bieten Walddialoge auch einen Resonanzraum für die emotionale Beziehung von Menschen zu den sie umgebenden Wäldern und die Möglichkeit eines intensiveren Austauschs zwischen Forstfachleuten und Laien schon vor einem möglichen Konfliktfall.

## 5. Gesellschaftliches Engagement im Wald ermöglichen

- Ein direkter Bezug der Bevölkerung zum Wald kann zum Verständnis für die Veränderung von Waldökosystemen beitragen. Geeignete und förderwürdige Formate sind zum Beispiel Waldpatenschaften, neue Formen des Eigentums wie Waldgenossenschaften und Möglichkeiten der privaten Finanzierung von Maßnahmen im Wald, z. B. unter dem Stichwort Waldklimaprojekte im Rahmen eines freiwilligen Kohlenstoffmarktes. Zur Adressierung interessierter Bevölkerungsgruppen eignen sich Pflanzaktionen zur Wiederaufforstung abgestorbener Wälder oder Aktivitäten im Bereich Citizen Science wie beispielsweise das Biodiversitätsmonitoring.

1 <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/wie-man-in-den-wald-hineinruft> [Zugriff am 05.07.2021]



### 4.12 Ausbildung und lebenslanges Lernen neu aufstellen

Die Halbwertszeit unseres Wissens nimmt ständig ab. Traditionelle Konzepte zum Schutz und der Bewirtschaftung der Wälder sind jedoch tief verankert. Praktische Veranschaulichungen funktionieren nur begrenzt bei sich schnell ändernden klimatischen und standörtlichen Rahmenbedingungen. Ein empirisch basiertes Management, das auf traditionellen „evidenzbasierten“ Ansätzen beruht, kann sich daher nicht schnell genug entwickeln, um effektive zukünftige Bewirtschaftungsoptionen zu bieten. Durch die Beschleunigung des Klimawandels mit seinen Auswirkungen auf Waldökosysteme und Forstwirtschaft und Prozesse wie die Digitalisierung nimmt dieser Verlust der Relevanz von Erfahrungswissen zusätzlich an Fahrt auf. Gleichzeitig nimmt die Komplexität vieler zu lösender Probleme zu. Daher gewinnen die Fähigkeiten, sich neues Wissen rasch anzueignen und Probleme interdisziplinär zu lösen im Vergleich zu Fakten- und Erfahrungswissen oder rein disziplinären Problemzugängen deutlich an Bedeutung. Daher muss die Vermittlung dieser Kompetenzen noch stärker als bisher in den Fokus der Ausbildung rücken und neues Wissen unter Berücksichtigung des Erfahrungswissens auch schneller und effektiver in den Institutionen, die sich mit der Bewirtschaftung von Wald befassen, verbreitet und aufgenommen werden, damit sich auch die Akteure mit ihren Kompetenzen laufend anpassen können. Gleichzeitig bietet die Notwendigkeit zum lebenslangen Lernen in forstlichen Berufen die Möglichkeit, diese attraktiver zu gestalten.

Zu diesem Zweck sind (1) die Curricula forstlicher Studiengänge noch stärker als bisher auf Forschungskompetenzen, Methodenwissen, Interdisziplinarität und Problemlösungsfähigkeit auszurichten, (2) die Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote für Fachpersonal in Forstbetrieben und relevanten Fachbehörden (Naturschutz, Jagd, Wasser, etc.) sowie für

Waldbesitzer und Forstsachverständige deutlich zu erhöhen, (3) Aspekte der Digitalisierung und Kommunikation stärker als bisher in der Ausbildung der Forstwirte/innen zu integrieren, (4) der Umgang mit Unsicherheiten und Nichtwissen explizit in Aus- und Weiterbildungsprogrammen und in die Beratung zu integrieren.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

#### 1. Curricula forstlicher Studiengänge an Hochschulen auf aktuelle Kompetenzerfordernisse ausrichten

- Die Inhalte forstlicher Studiengänge an Hochschulen sollten neben Aspekten des Klimawandels und der Anpassung noch stärker auf Forschungskompetenzen, Methodenwissen, Interdisziplinarität und Problemlösungsfähigkeit ausgerichtet werden. Dafür bedarf es eines intensiven Austausches zwischen forstlicher Praxis und Hochschulen, u. a. hinsichtlich der Anforderungsprofile an Absolventen/innen.

#### 2. Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote für Forstbetriebe, Fachbehörden sowie für Waldbesitzer und Forstsachverständige ausbauen

- Um die Weiterbildungs- und Qualifizierungsangebote für Fachpersonal in Forstbetrieben und relevanten Fachbehörden (Naturschutz, Jagd, Wasser, etc.) sowie für Waldbesitzer und Forstsachverständige zu erhöhen, müssen die Kapazitäten und Kompetenzen in diesem Bereich ausgebaut werden, beispielsweise in der Didaktik. Die regelmäßige Teilnahme der Bediensteten an Weiterbildungsmaßnahmen sollte durch eine entsprechende Motivation und Anerkennung durch die Institution intensiviert werden. Ein rascher Ausbau der Angebote könnte durch eine bessere Arbeitsteilung und Vernetzung auf überregionaler Ebene, insbesondere durch den Einsatz neuer Medien, erreicht werden. Nicht jedes Thema muss von allen Institutionen in Eigenregie entwickelt werden. Zur Wahrnehmung solcher Angebote müssen bisherige Barrieren, zum Beispiel Bundeslandbegrenzungen der Angebote und Teilnahmen, beseitigt werden.



### 3. Aspekte der Digitalisierung und Kommunikation stärker als bisher in der Ausbildung und Weiterbildung des Fachpersonals integrierten

- Durch die zunehmenden Waldschäden und die offensichtliche Umgestaltung der Wälder gewinnt die Kommunikation der im Wald tätigen Forstleute mit Waldbesuchern und einer sensibilisierten Öffentlichkeit an Bedeutung (siehe Kap. 4.11). Dafür muss auch das technische Forstpersonal in diesem Bereich stärker geschult werden.
- Da bei der Erfassung und dem Monitoring der klimawandelbedingten Gefahren und Veränderungen sowie bei neuen Arbeitsverfahren verstärkt digitale und sensorbasierte Technologien zum Einsatz kommen, müssen in der Aus- und Weiterbildung des Fachpersonals in der gesamten Wertschöpfungskette die entsprechenden Kompetenzen vermittelt werden.

### 4. Aus- und Weiterbildungsprogramme sowie Beratung zum Umgang mit Unsicherheiten etablieren

- Eine der großen Herausforderungen des Waldmanagements im Klimawandel ist der Umgang mit Unsicherheiten und Nichtwissen. Dies betrifft die Forschungs-, Planungs- und Ausführungsebene. Daher sollten diese Aspekte insbesondere auch in den Aus- und Weiterbildungsprogrammen einen entsprechenden Raum einnehmen.
- In einer Zeit in der selbst Fachleute verunsichert sind, wissen viele Waldeigentümer, insbesondere im Kleinprivatwald, nicht mehr was sie tun sollen. Da eine Anpassung der Wälder und ihrer Bewirtschaftung selten unter großer Unsicherheit erfolgt, resultiert häufig eher die Aufgabe der Bewirtschaftung. Daher sollte der Umgang mit Unsicherheiten insbesondere auch in der Beratung der Waldeigentümer/innen einen wichtigen Platz einnehmen.



## 4.13 Forschungskapazitäten stärken, besser vernetzen und neu ausrichten

Um die Forschung zur Anpassung von Waldökosystemen, Forst- und Holzwirtschaft und anderen relevanten Sektoren an den Klimawandel effektiv und effizient zu gestalten, wird eine Neuausrichtung forstwissenschaftlicher, wald- und holzproduktbezogener Forschung nicht nur in Hinblick auf neue Forschungsinhalte, sondern auch für (1) die strategische Entwicklung neuer Forschungsansätze, (2) die Schaffung von langfristigen Infrastrukturen und Kapazitäten, der (3) Vernetzung und Kooperation, auch zur gemeinsamen Nutzung von Infrastrukturen, sowie (4) dem Austausch von Daten und Informationen und der Förderung von Synthese-Arbeiten empfohlen. Eine Ausrichtung der Forschungsinhalte an aktuelle Problemfelder erfolgt ohnehin kontinuierlich und ist daher nicht Gegenstand dieser Empfehlungen. Die Empfehlungen zielen auf eine Ergänzung, nicht den Ersatz bestehender Programme wie beispielsweise Waldklimafond oder die Förderprogramme der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe oder der Länder ab.

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen empfohlen:

#### 1. Neue Forschungsansätze formulieren

- Viele Herausforderungen des Klimawandels und der Anpassung daran sind nicht auf einzelne Sektoren beschränkt. Daher werden Forschungsprogramme benötigt, die eine Förderung transsektoraler Projekte in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Naturschutz, ermöglichen wie zum Beispiel zu Fragen der Steuerung des Landschaftswasserhaushalts oder des Schutzes der Biodiversität.

- Die vielfach drängenden Anpassungsnotwendigkeiten erfordern zudem eine enge Vernetzung von Forschenden mit Entscheidungsträgern und anderen Akteuren und Stakeholdern im Rahmen von transdisziplinären Projekten zur Ermöglichung des schnellen Transfers zwischen Wissenschaft und Praxis und Anwendung des Wissens für praxisrelevante Lösungen. Die Beförderung von Interdisziplinarität zwischen Natur-, Technik-, Sozial und Geisteswissenschaften sowie Transdisziplinarität in Forschungsprojekten erfordert eine andere Form der Begutachtung und andere Indikatoren zur Bewertung des Erfolges als dies in klassischen, disziplinären Projekten der Fall ist.
- Zudem können viele Fragen der Anpassung an den Klimawandel nur durch langfristige Forschung beantwortet werden wie zum Beispiel die Identifizierung geeigneter Baumarten und Provenienzen durch Anbauversuche, Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen auf die Biodiversität und Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Daher sollten in den relevanten Forschungsprogrammen des Bundes und der Länder Optionen für die Förderung längerfristiger Verbundforschungsvorhaben, ähnlich wie die Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft, bereitgestellt werden.

### 2. Forschungskapazitäten erhöhen

- In vielen forst- und holzwissenschaftlichen Disziplinen, die für die Bearbeitung wichtiger zukünftiger Forschungsfragen eine tragende Rolle spielen, gibt es nur wenig wissenschaftlichen Nachwuchs zum Beispiel in der Pathologie, Forstschutz, Forstgenetik, Forstpflanzenzüchtung. Das hat auf der einen Seite damit zu tun, dass es in einigen dieser Bereiche für längere Zeiträume keine Professuren an den Universitäten mehr gegeben hat. Auf der anderen Seite gibt es für den wissenschaftlichen Nachwuchs aufgrund der wenigen fachspezifischen Stellen in den meisten forstwissenschaftlichen Disziplinen nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten, wissenschaftliche Karrieren zu entwickeln oder verlässlich zu planen. Kurz- bis mittelfristig könnte dieses Problem durch die gezielte Förderung von Nachwuchsgruppen in Bereichen, die für die Erforschung der Anpassung der Wälder an den Klimawandel von besonderer Bedeutung sind, abgemildert werden. So können langfristig die benötigten Disziplinen durch personelle Kapazitäten wieder aufgebaut und entwickelt werden. Zusätzliche Kapazitäten werden auch dringend im Bereich von Forschungsinfrastruktur

benötigt. Dazu zählen insbesondere auch langfristige Verbundversuche und Beobachtungsflächen mit einheitlichem Design und vergleichbarer Instrumentierung zur überregionalen Auswertung. Die Förderung dieser Infrastruktur muss über die Einrichtung und kurzfristige Projektzeiträume hinaus ermöglicht werden, ähnlich wie beim Netzwerk für ökologische und ökosystemare Langzeitforschung LTER (Long Term Ecological Research). Die Möglichkeiten zur Kooperation zwischen Bund und Ländern sollten genutzt werden, um Vereinbarungen zu treffen, die überregionale Forschung zur Anpassung an den Klimawandel gemeinsam zu finanzieren. Fragestellungen, die in dieser Weise bearbeitet werden sollten, finden sich im nächsten Punkt.

### 3. Vernetzung und Kooperation verbessern

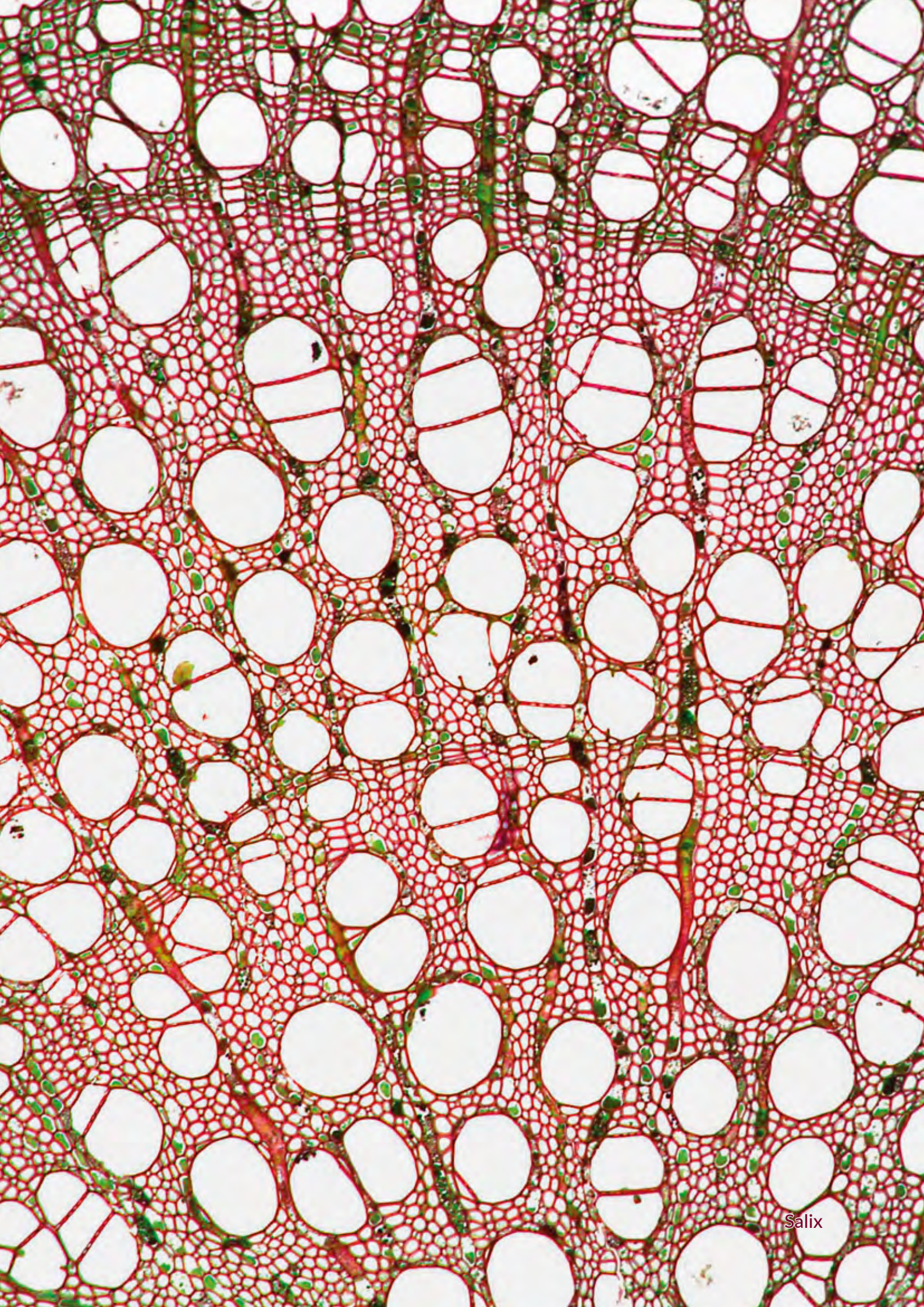
- Aufgrund der föderalen Struktur und Organisation des Staatswaldes hat auch die anwendungsorientierte, forstliche Forschung traditionell einen an den Bundesländern orientierten und damit einen regionalen Bezug. Für gemeinsame Fragestellungen gab es aber auch bereits in der Vergangenheit abgestimmte, koordinierte Versuchsanlagen zwecks einer länderübergreifenden Auswertung. Gegenwärtig ist ein Mangel an koordinierten Verbundversuchen zu wichtigen Fragen der Anpassung der Wälder an den Klimawandel mit einem Design, das eine gemeinsame Auswertung ermöglicht, festzustellen. Gerade die Identifizierung von geeigneten Baumarten und Herkünften sollte von möglichst vielen Akteuren in der Forschung gleichzeitig betrieben werden, um die standörtliche Variation möglichst vollständig zu erfassen, und um die erheblichen Kosten für Etablierung und langfristige Betreuung der Versuche zu verteilen. Weitere relevante Fragestellungen für bundesweite koordinierte Verbundversuche sind zum Beispiel die Performance von Mischbestandstypen und Mischungsformen in Hinblick auf Ökosystemleistungen oder der Einfluss der Bewirtschaftungsintensität auf Biodiversität und Resilienz gegenüber Extremereignissen. Neben gemeinsam entwickelten Versuchsanlagen sollte auch die Entwicklung innovativer und komplexer Methoden zum Waldzustands- und Waldentwicklungsmonitoring in schlagkräftigen Forschungsverbänden erfolgen.
- Die Vernetzung und Kooperation zu den drängenden Fragen der Anpassung der Wälder und Waldwirtschaft an den Klimawandel sind nicht auf Deutschland beschränkt. Der Erkenntnisfortschritt und die notwendige Kooperation würden

sehr beflügelt, wenn Förderung in den bedeutsamen nationalen Forschungsprogrammen der FNR und im Waldklimafonds auch für internationale Verbundvorhaben für Fragestellungen mit Relevanz für Deutschland zur Verfügung gestellt würden, beispielsweise für Arbeiten zu Genressourcen europäischer Baumarten oder im Umgang mit Störungen.

und Daten verbunden werden. Bei der Bereitstellung von Wissen und Information für die Praxis sollte auf bewährte und bekannte Plattformen gesetzt werden wie zum Beispiel Informationsdienst Holz, Waldwissen, statt zusätzliche, parallele Plattformen zu schaffen.

#### 4. Austausch, Synthese und Sichtbarkeit von Daten verbessern

- Eine wichtige Grundlage für die Vernetzung und Kooperation ist der Austausch und die gemeinsame Auswertung von Daten. Die Zusammenarbeit im Rahmen der Analyse großer, gemeinsamer Datensätze findet innerhalb Deutschlands bisher nur eingeschränkt und projektspezifisch statt. Austausch und Verfügbarmachung von Daten, auch solchen, die mit öffentlichen Mitteln erhoben wurden, wird häufig durch Konkurrenzgedanken und mangelndes Vertrauen beeinträchtigt. Die Verfügbarmachung und Veröffentlichung von Datensätzen, die im Rahmen von Drittmittelprojekten erhoben werden, wird nicht von allen Forschungsförderungseinrichtungen verlangt. Gemeinsame Analysen und Synthesen basierend auf existierenden Daten könnten durch eine systematische Veröffentlichung beziehungsweise Zugänglichkeit von Daten, die von den Forschungseinrichtungen mit öffentlichen Mitteln erhoben worden sind, befördert werden. Da es sehr viele ältere Datensätze gibt, die teilweise noch nicht in Datenbanken vorliegen oder nicht ausreichend qualitätsgeprüft sind, müsste man die Aufbereitung dieser Daten für konkrete Auswertungsziele entsprechend fördern. In diesem Zusammenhang sollten von Drittmittelgebern auch explizit Syntheseprojekte gefördert werden, deren Ziel es ist, bestehende Daten auszuwerten. Die Förderung von Forschungsprojekten durch öffentliche Mittel sollte konsequent von der Einhaltung der FAIR Grundsätze (Findability, Accessibility, Interoperability, and Reuse of digital assets) im Forschungsdatenmanagement abhängig gemacht werden.
- Vielfach werden wichtige Forschungsergebnisse von Forschungseinrichtungen „nur“ in der deutschsprachigen, nicht wissenschaftlich begutachteten Literatur, sogenannte „graue Literatur“, publiziert oder werden gar nicht veröffentlicht. Da diese fehlende Sichtbarkeit und Auffindbarkeit den allgemeinen Erkenntnisgewinn deutlich behindert, sollten mit der Forschungsförderung klare Auflagen zur Veröffentlichung von Ergebnissen



Salix

# Literaturverzeichnis

- Abrego N, Oivanen P, Viner I et al. (2016) Reintroduction of threatened fungal species via inoculation. *Biological Conservation* 203:120-124
- Achat David L, Fortin M, Landmann G et al. (2015) Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific reports* 5:15991
- Ahrends J, Suttmöller P, Schmidt-Walter H, Meesenburg H (2018) Beitrag von Waldflächen zur Sickerwasserbildung in Niedersachsen. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 39 (18):173-189
- Abiy, M, Baum C, Bergen, P et al. (2015) Leitfaden zu Kartierung der Schutz und Erholungsfunktionen des Waldes - Wald-funktionenkartierung (WFK). Projektgruppe Waldfunktionen-kartierung der AG Forsteinrichtung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg
- Aicher S, Hiersch M, Christian Z (2016) Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers. *Construction and Building Materials* 124:1007-1018
- Albrecht A, Hanewinkel M, Bauhus J, Kohnle U (2012) How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *Eur J Forest Res* 131:229-247
- Albrecht A, Schindler D, Grebhan K et al. H (2008) Klimawandel und Stürme über Europa – eine Literaturübersicht. *FVA Einblick* 01:20-23
- Albrecht AT, De Avila AL (2019) Ein Vorschlag zur literatur-basierten Ermittlung möglicher Alternativbaumarten im Klimawandel am Beispiel der Artensteckbriefe in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 189:129-143
- Albrecht J, Berens DG, Blüthgen N et al. (2013) Logging and forest edges reduce redundancy in plant-frugivore networks in an old-growth European forest. *Journal of Ecology* 101:990-999
- Albrecht J, Berens DG, Jaroszewicz B et al. (2014) Correlated loss of ecosystem services in coupled mutualistic networks. *Nature Communications* 5:3810
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H et al. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4):660-684
- Allgaier Leuch B, Streit K, Brang P (2017) Naturnaher Waldbau im Klimawandel, Merkblatt für die Praxis 59.1. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf
- Ammer C, Albrecht L, Borchert H et al. (2005) Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 176: 60-67
- Ampoorter E, Barbaro L, Jactel H et al. (2020) Tree diversity is key for promoting the diversity and abundance of forest-associated taxa in Europe. *Oikos* 129(2):133-146
- Anderegg WR, Hicke JA, Fisher RA et al. (2015) Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist* 208:674-683
- Anderson PK, Cunningham AA, Patel NG et al. (2004) Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 19:535-544
- Aplet GH, Mckinley PS (2017) A portfolio approach to managing ecological risks of global change. *Ecosystem Health and Sustainability* 3:e01261
- Araujo MB, Alagador D, Cabeza et al. (2011) Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14:484-492
- Arbeitskreis Standortskartierung (2016) Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. IHW-Verlag, Eching
- Arend M, Braun S, Buttler A et al., (2016) Ökophysiologie: Reaktionen von Waldbäumen auf Klimaänderungen. In: Plüss A, Augustin S, Brang P (eds) *Wald im Klimawandel: Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Haupt Verlag: 77-91
- Arnberger, A, Grieshofer, A., Embacher, H et al. (2016) Destination WALD. Das Handbuch zur Entwicklung forsttouristischer Angebote. Verfügbar unter [http://www.bfw.ac.at/webshop/index.php?id\\_product=345&controller=product](http://www.bfw.ac.at/webshop/index.php?id_product=345&controller=product). Letzter Zugriff 29 Dec 2018
- Arnberger A, Ebenberger M, Schneider IE et al. (2018a) Visitor Preferences for Visual Changes in Bark Beetle-Impacted Forest Recreation Settings in the United States and Germany. *Environmental Management* 61:209-223
- Arnberger A, Eder R, Alex B et al. (2018b) Trade-offs between wind energy, recreational, and bark-beetle impacts on visual preferences of national park visitors. *Land Use Policy* 76:166-177
- Arnberger A, Schneider IE, Ebenberger M et al. (2017) Emerald ash borer impacts on visual preferences for urban forest recreation settings. *Urban Urban Green* 27:235-245
- Arnold M, Steiger R (2007) The influence of wind-induced compression failures on the mechanical properties of spruce structural timber. *Materials and Structures* 40: 57-68
- Aschenbrand E, Michler T (2019) Gestörte Heimat. Nationalparks zwischen Naturschutz, Tourismus und lokaler Akzeptanz. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 51:160-165
- Attiwill PM (1994) The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management. *Forest Ecology and Management* 63:247-300
- Aubin I, Munson AD, Cardou F et al. (2016) Traits to stay, traits to move: a review of functional traits to assess sensitivity and adaptive capacity of temperate and boreal trees to climate change. *Environmental Reviews* 24: 164-186
- Aubin I, Boisvert-Marsh L, Kebli H et al. (2018) Tree vulnerability to climate change: improving exposure-based assessments using traits as indicators of sensitivity. *Ecosphere* 9:e02108
- Auer V, Rauch P (2021) Developing and evaluating strategies to increase the material utilisation rate of hardwoods: a hybrid policy Delphi-SWOT analysis. *European Journal of Wood and Wood Products*. Verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01725-y>. Letzter Zugriff 6 Sept 2021
- Augustynczyk A, Derci L, Asbeck T et al. (2019) Diversification of forest management regimes secures tree microhabitats and bird abundance under climate change. *Science of the Total Environment* 650:2717-2730.
- Austin MP, Smith TM (1989) A new model for the continuum concept. *Vegetation* 83:35-47

- Bachinger M, Rau H** (2019) Forest-Based Health Tourism as a Tool for Promoting Sustainability. In: Schmidpeter R., Capaldi N., Idowu S., Stürenberg Herrera A. (eds) International Dimensions of Sustainable Management. CSR, Sustainability, Ethics & Governance. Springer, Cham
- Badeck FW, Lasch P, Hauf Y et al.** (2004) Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko – Eine Prognose bis 2050. *AFZ, der Wald* 59(2):90-93
- Bässler C, Hothorn T, Brandl R, Müller J** (2013) Insects Overshoot the Expected Upslope Shift Caused by Climate Warming. *PLoS ONE* 8(6): e65842
- Baeten L, Bruelheide H, van der Plas F et al.** (2019) Identifying the tree species compositions that maximize ecosystem functioning in European forests. *Journal of Applied Ecology* 56:733-744
- Baltensweiler W** (1993) Why the larch bud-moth cycle collapsed in the subalpine larch-cembra pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. *Oecologia* 94:62-66
- Barras AG, Braunisch V, Arlettaz R** (2021) Predictive models of distribution and abundance of a threatened mountain species show that impacts of climate change overrule those of land use change. *Diversity and Distributions* 27(6):1-16
- Bartsch N, Röhrig E** (2016) *Waldökologie: Einführung für Mitteleuropa*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Bartsch N, von Lüpke B, Röhrig E** (2020) *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Bateman PW, Fleming PA** (2017) Are negative effects of tourist activities on wildlife over-reported? A review of assessment methods and empirical results. *Biological Conservation* 211:10-19
- Battisti A, Stastny M, Netherer S et al.** (2005) Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications* 15:2084-2096
- Bauer A, Buhrmester C, Ellermann W et al.** (2016) Zuständigkeiten und Organisation des TBN-Forst. *AFZ Der Wald* 71(17):37-40
- Bauer N, Roe J, Martens D** (2016) Der Einfluss von physischer Umwelt auf den Menschen: Erholung, Wohlbefinden, Gesundheit und Lebensqualität. *Umweltpsychologie* 20:3-14
- Bauhus J, Puettmann KJ, Kuehne C** (2013) Close-to-nature forest management in Europe: does it support complexity and adaptability of forest ecosystems? In: Messier C, Puettmann KJ, Coates KD (eds) *Managing Forests as Complex Adaptive Systems: building resilience to the challenge of global change*, Routledge, The Earthscan Forest Library: 187-213
- Bauhus J, Pyttel P** (2015) *Managed forests*. In: Peh KSH, Corlett RT, Bergeron Y (eds) *Routledge Handbook of Forest Ecology*, Routledge, Oxon: 75-90
- Bauhus J, Forrester D, Gardiner B, Jactel H, Vallejo R, Pretzsch H** (2017a) Ecological stability of mixed-species forests. In: Pretzsch H, Forrester DI, Bauhus J (eds) *Mixed-Species Forests - Ecology and Management*, Springer Verlag, Heidelberg: 337-382
- Bauhus J, Forrester DI, Pretzsch H** (2017b) From Observations to Evidence About Effects of Mixed-Species Stands. In: Pretzsch H, Forrester DI, Bauhus J (eds) *Mixed-Species Forests - Ecology and Management*, Springer Verlag, Heidelberg: 27-71
- Bauhus J, Forrester D, Pretzsch H, Felton A, Pyttel P, Benneter A** (2017c) Silvicultural options for mixed-species stands. In: Pretzsch H, Forrester DI, Bauhus J (eds) *Mixed-Species Forests - Ecology and Management*, Springer Verlag, Heidelberg: 433-501
- Baumeister C, Gerstenberg T, Plieninger T, Schraml U** (2020) Exploring cultural ecosystem service hotspots: Linking multiple urban forest features with public participation mapping data. *Urban Forestry & Urban Greening* 48:126561
- Baumgarten M, Kayser J, Michiels H.-G, von Teuffel K** (2005) Umbaubedarf in Fichtenwäldern Baden-Württembergs in: von Teuffel K.F, Baumgarten M, Hanewinkel M, Sauter U.H, von Wilpert K, Konold W, Spiecker H. (Eds.) *Waldumbau: für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft Ergebnisse aus dem Südschwarzwald*. Springer Berlin Heidelberg Berlin Heidelberg: 25-58
- Baur B, Baur A** (1993) Climatic warming due to thermal radiation from an urban area as possible cause for the local extinction of a land snail. *Journal of Applied Ecology* 30(2):333-340
- Baur B, Jung J, Rusterholz H-P** (2019) Defoliation of wild native box trees (*Buxus sempervirens*): Does box rust (*Puccinia buxi*) infection influence herbivory, survival and growth of the invasive *Cydalima perspectalis*? *Journal of Applied Entomology* 143:766-755
- BBSR** (Bundes-Institut für Bau-Forschung, Stadt-Forschung und Raum-Forschung) (2015) *BBSR-Analysen Kompakt 07/2015: Wohnungsmarktprognose 2030*. Verfügbar unter BBSR: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/AK072015.html>. Letzter Zugriff 31 Jul 2021
- Becher G** (2016) *Clusterstatistik Forst und Holz: Tabellen für das Bundesgebiet und die Länder 2000 bis 2014*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper, Braunschweig
- Bechtold M, Tiemeyer B, Laggner A et al.** (2014) Large-scale regionalization of water table depth in peatlands optimized for greenhouse gas emission upscaling. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:3319-3339
- Beck W** (2010) Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland – Waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMELV. In: Nagel J (ed) *Beiträge Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Jahrestagung 17. – 19. Mai 2010, Körbecke am Möhnesee*. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: 56-65
- Becker N, Schön S, Klein AM et al.** (2017) First mass development of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) – its surveillance and control in Germany. *Parasitology Research* 116: 847-858
- Becker P, Deutschländer T, Koßmann M et al.** (2008) Klimaszenarien und Klimafolgen. In: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (ed) *Räumliche Anpassung an den Klimawandel*, Bonn: 341-351
- Behrendt H** (2008) Klimawandel und Allergie. In: Gostomzyk JG, Enke MC (eds) *Globaler Klimawandel und Gesundheit*, Schriftenreihe der Landeszentrale für Gesundheit in Bayern 19:73-85
- Bell S, Blom D, Rautamäki M, Castel-Branco C et al.** (2005) Design of Urban Forests. In: Konijnendijk C, Nilsson K, Randrup T, Schipperijn J (eds) *Urban Forests and Trees*, Springer, Berlin, Heidelberg: 149-186
- Bellis J, Bourke D, Williams C, Dalrymple S** (2019) Identifying factors associated with the success and failure of terrestrial insect translocations. *Biological Conservation* 236:29-36
- Belote RT, Carroll C, Martinuzzi S** (2018) Assessing agreement among alternative climate change projections to inform conservation recommendations in the contiguous United States. *Scientific Reports* 8: 1-13
- Bender S, Wieseahn J, Jánosi K, Bolte A** (2019) Bundesweite Projektion der Überlebensraten wichtiger Baumarten. *AFZ-DerWald* 74(2):18-20

- Bengtsson J, Angelstam P, Elmqvist T et al. (2003) Reserves, resilience and dynamic landscapes. *Ambio* 32:389–396
- Bennett AC, McDowell NG, Allen CD, Anderson-Teixeira KJ (2015) Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants* 1(10): 1–5
- Bentz BJ and Jönsson AM (2015) Modeling bark beetle responses to climate change. Chapter 13. In: Vega F, Hofstetter R (eds) *Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species*, Elsevier: 543–549
- Benz JP, Chen S, Dang S et al. (2020) Multifunctionality of forests: a white paper on challenges and opportunities in China and Germany. *Forests* 11:266
- Bernasconi A, Schrott U (2008) Freizeit und Erholung im Wald. Grundlagen, Instrumente, Beispiele. Umwelt-Wissen Nr. 0819. Bundesamt für Umwelt, Bern
- Bernasconi A, Mohr C, Weibel F (2003) Erholung und Wald-dynamik: Herleitung von Grundlagen zur Kostenermittlung im Erholungswald am Fallbeispiel Region Bern
- Bertram C, Larondelle N (2017) Going to the Woods Is Going Home: Recreational Benefits of a Larger Urban Forest Site – A Travel Cost Analysis for Berlin, Germany. *Ecological Economics* 132:255–263
- Beschta RL, Pyles MR, Skaugset AE, Surfleet CG (2000) Peakflow responses to forestpractices in the western cascades of Oregon, USA. *Journal of Hydrology* 233:102–120
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2020) Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Diskussionspapier, 2. korrigierte Version. Verfügbar unter [https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/BfN-Positionspapier\\_Waelder\\_im\\_Klimawandel\\_bf.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/BfN-Positionspapier_Waelder_im_Klimawandel_bf.pdf). Letzter Zugriff am 30.08.2021
- Biedermann PHW, Muller J, Gregoire JC et al. (2019) Bark Beetle Population Dynamics in the Anthropocene: Challenges and Solutions. *Trends in Ecology & Evolution* 34:914–924
- Bigler C, Bräker O, Bugmann H et al. (2006) Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9:330–343
- Bilecen E, Kleiber O (2002) Des einen Freud des andern Leid: Kosten für Waldeigentümer und deren Einflussfaktoren. Verfügbar unter [http://fox.leuphana.de/portal/files/1198825/Bilecen\\_Kleiber.pdf](http://fox.leuphana.de/portal/files/1198825/Bilecen_Kleiber.pdf). Letzter Zugriff 6 Sept 2021
- Bindewald A, Michiels HG, Bauhus J (2020) Risk is in the eye of the assessor: comparing risk assessments of four non-native tree species in Germany. *Forestry* 93(4):519–534
- Bindewald A, Miocic S, Wedler A, Bauhus J (2021) Forest inventory-based assessments of the invasion risk of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco and *Quercus rubra* L. in Germany. *European Journal of Forest Research* 140: 883–899
- BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2020) Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2019. Verfügbar unter [https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Wald/wald\\_node.html](https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Wald/wald_node.html). Letzter Zugriff 4 Jul 2021
- Block J, Dieler J, Gauer J et al. (2016) Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei der Holz- und Biomassenutzung im Rheinland-Pfälzischen Wald. *Mitteilung FAWF* 79:230
- Blom A, Thornqvist T (2014). Live storage and drying of storm-felled Norway spruce (*Picea abies*, L. Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Wood Material Science and Engineering* 9(4): 209–213
- Blondeel H, Perring MP, Depauw L et al. (2020) Light and warming drive forest understorey community development in different environments. *Global Change Biology* 26:1681–1696
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2020) Nationale Bioökonomiestrategie. Verfügbar unter [https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2020-06/bmbf\\_nationale\\_biooekonomiestrategie\\_langfassung\\_deutsch.pdf](https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2020-06/bmbf_nationale_biooekonomiestrategie_langfassung_deutsch.pdf). Letzter Zugriff 10 Apr 2021
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2011) Waldstrategie 2020. Verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Waldstrategie2020.html>. Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2014) Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bonn
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2017) Buchführung der Testbetriebe (Forstwirtschaft), Ausführungsanweisung zum Erhebungsbogen für Forstbetriebe. Verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/BFB-0113005-2016.pdf>. Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2017) Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0. Verfügbar unter <https://www.charta-fuer-holz.de/charta-service/mediathek>. Letzter Zugriff am 30.08.2021
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2018) Testbetriebsnetz Forst. Verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/forst-holz>. Letzter Zugriff 4 Sept 2020
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2018) Der Wald in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2019a) Die wirtschaftliche Lage der forstwirtschaftlichen Betriebe: Buchführungsergebnisse (laufende Jahrgänge). Berlin
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2019b) Buchführungsergebnisse Landwirtschaft, Statistik und Berichte des BMEL, Unternehmensbezogene Direktzahlungen und Zuschüsse in landwirtschaftlichen Betrieben. Verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/testbetriebsnetz/testbetriebsnetz-landwirtschaft-buchfuehrungsergebnisse>. Letzter Zugriff am 30 Jul 2021
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2020) Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2019. Bonn
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2020) Massive Schäden - Einsatz für die Wälder. Verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html>. Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021) Waldbericht der Bundesregierung. Verfügbar unter [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldbericht2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldbericht2021.pdf?__blob=publicationFile&v=7). Letzter Zugriff 18 Jul 2021
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021) Die wirtschaftliche Lage der forstwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse (laufende Jahrgänge). <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/BFB-0113002-2019.pdf>. Letzter Zugriff 6 Sept 2021
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2011) Waldstrategie 2020. Verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Waldstrategie2020.html>. Letzter Zugriff 30 Jul 2021

- BMELV** (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2013) Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/NAP-NationalerAktionsplanPflanzenschutz2017.html>. Letzter Zugriff 06 Sept 2021
- BMU** (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2016) Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf). Letzter Zugriff 30 Aug 2021
- BMU** (Bundesumweltministerium) (2020) Moorschutzstrategie der Bundesregierung: Diskussionspapier. Verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Naturschutz/diskussionspapier\\_moorschutzstrategie\\_bundesregierung\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/diskussionspapier_moorschutzstrategie_bundesregierung_bf.pdf). Letzter Zugriff 6 Sept 2021
- BMU** (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019) Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>. Letzter Zugriff 30 Aug 2021
- BMUB** (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2007) Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt: Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. Verfügbar unter [https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/biologischevielfalt/Dokumente/broschuere\\_biolog\\_vielfalt\\_strategie\\_bf.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/biologischevielfalt/Dokumente/broschuere_biolog_vielfalt_strategie_bf.pdf). Letzter Zugriff am 6 Sept 2021
- BMUB** (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2015) Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) II: Fortschrittsbericht 2012-2015 und Fortschreibung 2016-2019. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin
- Bogich TL, Liebhold AM, Shea K** (2008) To sample or eradicate? A cost minimization model for monitor and managing an invasive species. *Journal of Applied Ecology* 45:1134-1142
- Böhr B** (2015) Partizipation und Akzeptanz im Nationalpark Schwarzwald – bis hierher... und wie weiter? In: Finck P, Klein M, Riecken U, Paulsch C (eds) *Wildnis im Dialog. Wege zu mehr Wildnis in Deutschland*. BfN-Skripten 404:87-98. Verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/284431224\\_Partizipation\\_und\\_Akzeptanz\\_im\\_Nationalpark\\_Schwarzwald\\_Bis\\_hierher\\_und\\_wie\\_weiter](https://www.researchgate.net/publication/284431224_Partizipation_und_Akzeptanz_im_Nationalpark_Schwarzwald_Bis_hierher_und_wie_weiter). Letzter Zugriff 6 Sept 2021
- Bollmann K, Braunsch V** (2013) To integrate or to segregate: balancing commodity production and biodiversity conservation in European forests. Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity. In: Kraus D, Krumm F (eds) *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*. European Forest Institute, Freiburg: 18-31
- Bolte A** (2016) Chance und Risiken der Buche im Klimawandel. *AFZ-Der Wald* 71(12):17-19
- Bolte A, Ammer C, Löf M et al.** (2009) Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24: 473-482
- Bolte A, Ammer C, Annighöfer P et al.** (2021) Fakten zum Thema: Wälder und Klimaschutz. *AFZ-Der Wald* 76(11):12-15
- BÖR** (Bioökonomierat) (2016) Holz in der Bioökonomie – Chancen und Grenzen. BÖRMEMO 05. [https://www.biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/BOER\\_Memo\\_Holz.pdf](https://www.biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/BOER_Memo_Holz.pdf). Letzter Zugriff am 30.08.2021
- Bortenschlager S, Bortenschlager I** (2005) Altering airborne pollen concentrations due to the Global Warming. A comparative analysis of airborne pollen records from Innsbruck and Obergurgl (Austria) for the period 1980–2001. *Grana* 44(3):172-180
- Bosch JM, Hewlett JD** (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55:3-23
- Bösch M, Elsasser P, Franz K et al.** (2018) Forest ecosystem services in rural areas of Germany: Insights from the national TEEB study. *Ecosystem Services* 31:77-83
- Bösch M, Jochem D, Weimar H, Dieter M** (2015) Physical input-output accounting of the wood and paper flow in Germany. *Resources Conservation Recycling* 94:99-109
- Bosela M, Tumajer J, Cienciala E, Dobor L, Kulla L, Marčíš P, Popa I, Sedmák R, Sedmáková D, Sitko R, Šebeň V, Štěpánek P, Büntgen U** (2021) Climate warming induced synchronous growth decline in Norway spruce populations across biogeographical gradients since 2000. *Science of The Total Environment* 752:141794
- Both C, Bouwhuis S, Lessells CM, Visser ME** (2006) Climate change and population declines in a long-distance migrant. *Nature* 441:81–83
- Both C, van Asch M, Bijlsma RG et al.** (2009) Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constrains or adaptations? *Journal of Animal Ecology* 78:73–83
- Boulanger V, Dupouey JL, Archaux F et al.** (2018) Ungulates increase forest plant species richness to the benefit of non-forest specialists. *Global Change Biology* 24: 485-495
- Bowler DE, Buyung-Ali LM, Knight TM. et al.** (2010) A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments. *BMC Public Health* 10:456–465
- Boyd J, Banzhaf S** (2007) What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63:616-626
- Brabänder HD** (1995) *Ausgewählte Beiträge zur Forstlichen Betriebswirtschaftslehre. Schriften zur Forstökonomie Band 8*. Frankfurt am Main, Sauerländer
- Brändle M, Brandl R** (2001) Species richness of insects and mites on trees: expanding Southwood. *Journal of Animal Ecology* 70:491-504
- Brandt LA, Butler PR, Handler SD** (2017) Integrating Science and Management to Assess Forest Ecosystem Vulnerability to Climate Change. *Journal of Forestry* 115: 212-221
- Braun J** (1996) Dimensionen der Organisationsgestaltung. In: Bullinger H-J, Warnecke H-J (eds) *Neue Organisationsformen im Unternehmen*, Berlin: 65-86
- Bräutigam K, Vining KJ, Lafon-Placette C et al.** (2013). Epigenetic regulation of adaptive responses of forest tree species to the environment. *Ecology and evolution* 3(2):399-415
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E** (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63:625-644
- Brödl D, Kaiser K, Kesler A, Hagedorn F** (2019) Drying and rewetting foster phosphorus depletion of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 128:22-34
- Bronstert A, Fritsch U, Katzenmaier D** (2001) Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Umweltbundesamt und Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam



- Broome A, Ray D, Mitchell R, Harmer R (2019) Responding to ash dieback (*Hymenoscyphus fraxineus*) in the UK: woodland composition and replacement tree species. *Forestry* 92(1):108-119
- Büntgen U, Urban O, Krusic PJ et al. (2021) Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience* 14:190-196
- Burbach GJ, Heinzerling LM, Edenharter G et al. (2009) GA2LEN skin test study II: Clinical relevance of inhalant allergen sensitizations in Europe. *Allergy* 64(10):1507-1515
- Burgdorf N (2019) Rußrindenkrankheit an Ahorn in Bayern. *AFZ-DerWald* 20:36-39
- Buras, A., Rammig, A., Zang, CS (2020) Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences* 17:1655-1672
- Buse J, Schröder B, Assmann T (2007) Modelling habitat and spatial distribution of an endangered longhorn beetle a case study for saproxylic insect conservation. *Biological Conservation* 137:372-381
- Buse J, Griebeler EM, Niehuis M (2013) Rising temperatures explain past immigration of the thermophilic oak-inhabiting beetle *Coraeus florentinus* (Coleoptera: Buprestidae) in south-west Germany. *Biodiversity and Conservation* 22:1115-1131
- Bußkamp J, Langer GJ (2018) Diplodia-Triebsterben - ein neues Phänomen? In: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (ed.) Klimawandel, Stadtwald, Schaderreger: 9-11
- Bussler H, Bouget C, Brustel H et al. (2011) Abundance and pest classification of scolytid species (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) follow different patterns. *Forest Ecology and Management* 262:1887-1894
- Butler JH, Montzka, SA (2020) The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI); Global Monitoring Laboratory. Verfügbar unter <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>. Letzter Zugriff 29 Jul 2020
- Calama R, Conde M, De Dios GJ et al. (2019) Linking climate, annual growth and competition in a Mediterranean forest: *Pinus pinea* in the Spanish northern plateau. *Agricultural and Forest Meteorology* 264:309-21
- Callan R, Nibbelink NP, Rooney TP et al. (2013) Recolonizing wolves trigger a trophic cascade in Wisconsin (USA). *Journal of Ecology* 101:837-845
- Castagneyrol B, Jactel H, Vacher C et al. (2014) Effects of plant phylogenetic diversity on herbivory depend on herbivore specialization. *Journal of Applied Ecology* 51:134-141
- Cerdà A, Robichaud PR (2009) Fire effects on soil infiltration. In: Cerdà A (Hrsg.) Fire effects on soils and restoration strategies. CRC Press: 97-120
- Cervinka R, Höltge J, Pirgic L et al. (2014) Zur Gesundheitswirkung von Waldlandschaften. *BFW-Berichte* 147:35-38
- Cescatti A, Piutti E (1998) Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. *Forest Ecology and Management* 102(2-3):213-223
- Charru M, Seynave I, Hervé J-C et al. (2017) Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Annals of Forest Science* 74: 33
- Chen X (2003) East Asia. In: Schwarz MD (ed) Phenology: An integrative Environmental Science. Kluwer: 11-25
- Cheng T-M, Wu HC (2015) How do environmental knowledge, environmental sensitivity, and place attachment affect environmentally responsible behavior? An integrated approach for sustainable island tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, 23(4): 557-576
- Cho KS, Lim Y, Lee K et al. (2017) Terpenes from Forests and Human Health. *Toxicological Research* 33(2):97-106
- Christiansen, E, Bakke A (1988) The spruce bark beetle of Eurasia. In: Berryman A (ed) Dynamics of forest insect populations. Springer, Boston, MA, pp 479-503
- Churkina G, Organschi A, Reyer CPO et al. (2020) Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* 3:269-276
- Cleland EE, Chuine I, Menzel A et al. (2007) Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution* 22:357-365
- CBD (Convention on biodiversity) (2017) Guidance on integrating biodiversity considerations into one health. Subsidiary body on scientific, technical and technological advice. CBD/SBSTTA/21/9.
- Cook J, Nuccitelli D, Green SA et al. (2013) Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters* 8(2):24024
- Coomes DA, Grubb PJ (2000) Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. *Ecological Monographs* 70: 171-207
- Coppes J, Ehrlicher J, Thiel D et al. (2017) Outdoor recreation causes effective habitat reduction in capercaillie *Tetrao urogallus*: a major threat for geographically restricted populations. *Journal of Avian Biology*, 48: 1583-1594
- Coppes J, Nopp-Mayr U, Grünschachner-Berger V et al. (2018): Habitat suitability modulates the response of wildlife to human recreation. *Biological Conservation* 227:56-64
- Coppes J, Ehrlicher J, Müller G et al. (2019) Dramatischer Rückgang der Auerhuhnpopulation *Tetrao urogallus* im Schwarzwald. *Vogelwarte* 57:115-122
- Côté P, Tittler R, Messier C et al. (2010) Comparing different forest zoning options for landscape-scale management of the boreal forest: Possible benefits of the TRIAD. *Forest Ecology and Management* 259: 418-427
- CTBA (2004) Technical Guide on Harvesting and Conservation of Storm Damaged Timber. Technical report STODAFOR European Commission, within the 5th Framework Programme, Quality of Life
- Cudlín P, Klopčič M, Tognetti R et al. (2017) Drivers of treeline shift in different European mountains. *Climate Research* 73:135-150
- Cuervo-Alarcon L, Arend M, Müller M et al. (2021) A candidate gene association analysis identifies SNPs potentially involved in drought tolerance in European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Scientific Reports* 11: 2386
- D'Antonio A, Monz C, Newman P et al. (2013) Enhancing the utility of visitor impact assessment in parks and protected areas: A combined social-ecological approach. *Journal of Environmental Management* 124:72-81
- Dadvand P, Bartoll X, Basagaña X et al. (2016) Green spaces and General Health: Roles of mental health status, social support, and physical activity. *Environment international* 91:161-167
- Dale VH, Joyce LA, McNulty S et al. (2001) Climate change and forest disturbances. *BioScience* 51:723-734

- D'Amato D, Veijonaho S, Toppinen A (2020) Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. *Forest Policy and Economics* 110:101848
- Dawud SM, Raulund-Rasmussen K, Domisch T et al. (2016) Is Tree Species Diversity or Species Identity the More important Driver of Soil Carbon Stocks, C/N Ratio, and pH? *Ecosystems* 19: 645-660
- De Avila AL, Albrecht A (2017) Alternative Baumarten im Klimawandel: Artensteckbriefe – eine Stoffsammlung, FVA, Freiburg
- De Frenne P, Zellweger F, Rodríguez-Sánchez F et al. (2019) Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution* 3(5):744–749.
- De Vos B, Cools N, Ilvesniemi H et al. (2015) Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large-scale forest soil survey. *Geoderma* 251–252:33–46
- Derks J, Giessen L, Winkel G (2020) COVID-19-induced visitor boom reveals the importance of forests as critical Infrastructure. *Forest Policy and Economics* 118:102253
- Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, *klimafakten.de* (2020) Was wir heute übers Klima wissen. Basisfakten zum Klimawandel, die in der Wissenschaft unumstritten sind. Verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle\\_meldungen/200910/dkk\\_faktensammlung.pdf;jsessionid=19A7B9D458D6158A31A4EE4A1A5B691B.live11041?\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/200910/dkk_faktensammlung.pdf;jsessionid=19A7B9D458D6158A31A4EE4A1A5B691B.live11041?_blob=publicationFile&v=2). Letzter Zugriff 7 Sept 2021
- Deutschmann R, Dekker R.F.H. (2012) From plant biomass to bio-based chemicals: Latest developments in xylan research. *Biotechnology advances* 30(6):1627-40
- DFWR – Deutscher Forstwirtschaftsrat (2020) Positionspapier AG „Kalamitäten“, Stand: 15.01.2020. Verfügbar unter [https://www.dfwr.de/images/PDFs/Postionspapiere/Positionspapier\\_Kalamit%C3%A4ten\\_DFWR.pdf](https://www.dfwr.de/images/PDFs/Postionspapiere/Positionspapier_Kalamit%C3%A4ten_DFWR.pdf). Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- Die Bundesregierung (2020) Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. 61 S. Verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimawandel\\_das\\_2\\_fortschrittsbericht\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf). Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- Dieter M, Weimar H, Iost S et al. (2020) Abschätzung möglicher Verlagerungseffekte durch Umsetzung der EU-KOM-Vorschläge zur EU-Biodiversitätsstrategie auf Forstwirtschaft und Wälder in Drittstaaten. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper 159a, Braunschweig
- Dieter M, Weimar H, Iost S et al. (2020) Assessment of possible leakage effects of implementing EU COM proposals for the EU Biodiversity Strategy on forests and forest management in non-EU countries. Thünen Working Paper 159, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
- Dieterich, V (1953) Forstwirtschaftspolitik. Paul Parey, Hamburg und Berlin
- Ding J, Nilsson O (2016) Molecular regulation of phenology in trees – because the seasons they are a-changin'. *Current Opinion in Plant Biology* 29:73-79
- Dirnböck T, Essl F, Rabitsch W (2011) Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change. *Global Change Biology* 17(2):990-996
- Dittmar C, Fricke W, Elling W (2006) Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Germany. *European Journal of Forest Research* 125: 249–259
- Djahanschah S, Hafner A, Seidel A (2020) DBU Bauband 4: Wohnquartier in Holz – Mustersiedlung in München. Detail Business Information GmbH, München
- DJV – Deutscher Jagdverein (2021) Jagdscheininhaber in der Bundesrepublik Deutschland. Verfügbar unter [https://www.jagdverband.de/sites/default/files/2021-01/2021-01\\_Info-grafik\\_Jagdscheininhaber\\_Deutschland\\_2020.jpg](https://www.jagdverband.de/sites/default/files/2021-01/2021-01_Info-grafik_Jagdscheininhaber_Deutschland_2020.jpg). Letzter Zugriff 8 Jul 2021
- Dobor L, Hlásny T, Rammer W et al. (2020) Spatial configuration matters when removing windfelled trees to manage bark beetle disturbances in Central European Forest landscapes. *Journal of Environmental Management* 254:109792
- Dodev Y, Zhiyanski M, Glushkova M, Shin WS (2020) Forest welfare services - the missing link between forest policy and management in the EU. *Forest Policy and Economics* 118:102249
- Dög M, Seintsch B, Rosenkranz L, Dieter M (2016) Belastungen der deutschen Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes. *Landbauforschung Applied Agricultural Forestry Research* 66(2):71-92
- Domínguez G, Shannon M (2011) A wish, a fear and a complaint: understanding the (dis)engagement of forest owners in forest management. *European Journal of Forest Research* 130:435-450
- Döring P, Cords M, Mantau U (2018) Altholz im Entsorgungsmarkt. Aufkommen und Verwendung 2016. Rohstoffmonitoring Holz, Schriftenreihe FNR 38:141-157
- Döring P, Glasenapp S, Mantau U (2017) Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2014. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Rohstoffmonitoring Holz, Schriftenreihe FNR 38:5–37
- Drag L, Cizek L (2015) Successful reintroduction of an endangered veteran tree specialist: conservation and genetics of the Great Capricorn beetle (*Cerambyx cerdo*). *Conservation Genetics* 16:267-276
- Drobik, J, Finck P, Riecken U (2013) Die Bedeutung von Korridoren im Hinblick auf die Umsetzung des länderübergreifenden Biotopverbunds in Deutschland. BfN-Skripten 346.
- Dudney J, Hobbs RJ, Heilmayr R et al. (2018) Navigating Novelty and Risk in Resilience Management. *Trends in Ecology & Evolution* 33:863–873
- Dullinger S, Dendoncker N, Gattringer A et al. (2015) Modelling the effect of habitat fragmentation on climate-driven migration of European forest understorey plants. *Diversity and Distributions* 21(12):1375-1387
- Dumas Y (2016) Einführung von Baumarten in Wälder und die Auswirkungen auf die Biodiversität. In: Krumm, F, Vitkova L (eds) *Eingeführte Baumarten in europäischen Wäldern: Chancen und Herausforderungen*, European Forest Institute: 306-314
- Duran P, Thiergart T, Garrido-Oter R et al. (2018) Microbial interkingdom interactions in roots promote Arabidopsis survival. *Cell* 175(4):973-983
- DWD Deutscher Wetterdienst (2007) Phänologie. *Meteorologische Fortbildung* 33 (1/2)
- DWD Deutscher Wetterdienst (2018) Warnkriterien. Verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882). 7 Jul 2020
- DWD Deutscher Wetterdienst (2019) Newsletter Attributionsforschung. Stahnsdorf, Deutschland 1:6
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2020) Deutscher Klimaatlas. Verfügbar unter [www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html). Letzter Zugriff 10 Oct 2020

- DWD Deutscher Wetterdienst** (2020a) Wetterlexikon. Verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon>. Letzter Zugriff 31 Oct 2020.
- DWD Deutscher Wetterdienst** (2020b) Nationaler Klimareport, 4. Auflage. Wetterdienst Potsdam, 54 S.
- DWD Deutscher Wetterdienst** (2020c): Phänologische Jahresstatistik. Rotbuche: Blattentfaltung; Region Deutschland. Verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno\\_sta/phaenosta.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno_sta/phaenosta.html) Letzter Zugriff 20 Oct 2020
- DWD Deutscher Wetterdienst** (2021): Szenarien für die nächste Generation Klimaprojektionen (CMIP6). Verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/naechste-generation\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/naechste-generation_node.html). Letzter Zugriff 26 Apr 2021
- Dyderski MK, Jagodziński AM** (2018) Low impact of disturbance on ecological success of invasive tree and shrub species in temperate forests. *Plant Ecology* 219(11):1369-1380
- Dyderski MK, Paž S, Frelich LE, Jagodziński AM** (2018) How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24:1150-1163
- EC - European Commission** (2014) Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe, Brüssel. Verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014SC0206R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014SC0206R(01)). Letzter Zugriff 21 Jul 2021
- Edwards DM, Jay M, Jensen FS et al.** (2012) Public Preferences Across Europe for Different Forest Stand Types as Sites for Recreation. *Ecology and Society* 17(1):27
- Edwards M, Richardson AJ** (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430:881-884
- EEA - European Environment Agency** (2015) Water-retention potential of Europe's forests. A European overview to support natural water-retention measures. EEA Technical report 13
- EFSA - European Food Safety Authority** (2017) Vector-borne diseases. *EFSA Journal*
- Ehrhart S, Schraml U** (2014) Wahrnehmung und Bewertung natürlicher Walddynamik. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 7-8:166-183
- Eis D, Helm D, Laußmann D, Stark K** (2010) Klimawandel und Gesundheit – Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut, Berlin
- Eis D, Helm D, Laußmann D, Stark K** (2019) Klimawandel und Gesundheit. Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut, Berlin. Verfügbar unter <https://edoc.rki.de/bitstream/handle/176904/877/29ETCuO6ZOtk.pdf?sequence=1>, Letzter Zugriff 29 Jul 2021
- Elenitsky LM, Walters MB, Farinosi EJ** (2020) Tree regeneration structure following beech bark disease-motivated harvests: factors associated with patterns and management implications. *Forests* 11(2):180
- Ellenbergh H, Leuschner C** (2010) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. UTB 8104
- Elssasser P, Meyerhoff J, Montagné C, Stenger A** (2009) A bibliography and database on forest benefit valuation studies from Austria, France, Germany, and Switzerland – A possible base for a concerted European approach. *Journal of Forest Economics* 15(1-2):93-107
- Elssasser P, Weller P** (2013) Aktuelle und potentielle Erholungsleistung der Wälder in Deutschland: monetärer Nutzen der Erholung im Wald aus Sicht der Bevölkerung. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 184(3-4):84-96
- Elssasser P, Köthke M, Dieter M** (2020) Ein Konzept zur Honorierung der Ökosystemleistungen der Wälder. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper 152, Braunschweig
- Enderle R, Fussi B, Lenz HD et al.** (2017) Ash dieback in Germany: research on disease development, resistance and management options. In: Vasaitis R, Enderle R (eds) *Dieback of European Ash (Fraxinus spp.): Consequences and Guidelines for Sustainable Management*: 89-105
- Enderle R, Stenlid J, Vasaitis R** (2019) An overview of ash (*Fraxinus* spp.) and the ash dieback disease in Europe. *CAB Rev* 14:1-12
- Endler C, Matzarakis A** (2011) Climatic potential for tourism in the Black Forest, Germany – winter season. *International Journal of Biometeorology* 55:339-351
- Engel F, Bauhus J, Gärtner S et al.** (2016) Wilder mit natürlicher Entwicklung in Deutschland: Bilanzierung und Bewertung. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 145, Münster
- Engel H** (2019) Natürliche Waldentwicklung in Deutschland: Perspektiven und Potenziale für die Entwicklung eines kohärenten NWE-Systems. Präsentation der Hauptergebnisse Berlin, 04.04.2019, Vorhaben NWePP FKZ: 3515840200. Verfügbar unter <https://www.nw-fva.de>. Letzter Zugriff 11 Mai 2021
- Ennos R, Cottrell J, Hall J O'Brien D** (2019) Is the introduction of novel exotic forest tree species a rational response to rapid environmental change? A British perspective. *Forest Ecology and Management* 432:718-728
- Ensinger K., Wurster M, Selter A. et al.** (2013) Immersing into another world. A study on concepts of recreation and recreation potential in the forest. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 184(3/4):70-83
- Environment Agency** (2017) Climate change impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 419 S. Verfügbar unter [http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016/at_download/file). Letzter Zugriff 2 Jun 2020
- Erfurt M, Skiadaresis G, Tjardeman E et al.** (2020) A multidisciplinary drought catalogue for southwestern Germany dating back to 1801. *Natural Hazards Earth System Science* 20:2979-2995
- Eriksson G, Ekberg I, Clapham D** (2001) An introduction to forest genetics. Genetic Center, Department of Plant Biology and Forest Genetics, SLU
- Eriksson L, Björkman C, Klapwijk MJ** (2018) General Public Acceptance of Forest Risk Management Strategies in Sweden: Comparing Three Approaches to Acceptability. *Environment and Behavior* 50:159-186
- Eriksson L, Nordlund AM, Olsson O, Westin K** (2012) Recreation in Different Forest Settings: A Scene Preference Study *Forests* 3(4):923-943
- Ermisch N, Seintsch B, Dieter M** (2013) Analyse des TBN-Forst zum Erlösbeitrag der Holzartengruppen: Holzartengruppe Fichte 2003 bis 2011 konstant mit höchstem Erlösbeitrag. *AFZ Wald* 68(23):6-9
- Ermisch N, Seintsch B, Englert H** (2015) Anteil des Holzertes am Gesamtertrag der TBN-Betriebe. *AFZ Wald* 70(23):14-16
- Ermisch N, Franz K, Seintsch B, Englert H, Dieter M** (2016) Bedeutung der Fördermittel für den Ertrag der TBN-Forstbetriebe. *AFZ Wald* 71(17):22-25
- Ettl R, Göttlein A** (2007) Waldhackschnitzelproduktion in Fichtenreinbeständen – Monetäre Bewertung des Nährstoffexportes bei Biomassenutzung. *AFZ-DerWald* 14:756-758

- Etzold S, Ferretti M, Reinds GJ et al. (2020) Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests. *Forest Ecology and Management* 458:117762
- EU-COM (2014): Rahmenregelung der Europäischen Union für staatliche Beihilfen im Agrar- und Forstsektor und in ländlichen Gebieten 2014-2020. Amtsblatt der Europäischen Union 2014/C 204/01 DE, 97
- Europäische Kommission (2020) Europäische Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 Mehr Raum für die Natur in unserem Leben.
- European Commission (2021) New EU Forest Strategy for 2030. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Com(2021) 572 Final.
- EUWID - Europäischer Wirtschaftsdienst (2020) Schadholz-Prognosen regional deutlich korrigiert: Bundesweite Schadholzschatzung bleibt 2020 mit 72,5 Mio. m<sup>3</sup> kaum verändert. 45/2020, 05.11.2020
- Faccoli M (2002) Winter mortality in sub-corticolous populations of *Ips typographus* (Coleoptera Scolytidae) and its parasitoids in the South-eastern Alps. *Journal of Pest Science* 75:62–68
- Faccoli M (2009) Effect of weather on *Ips typographus* (Coleoptera Curculionidae) phenology, voltinism, and associated spruce mortality in the South-Eastern Alps. *Environmental Entomology* 38:307–316
- Fahrig L (2013) Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography* 40:1649–1663
- Fahrig L (2019) Habitat fragmentation: A long and tangled tale. *Global Ecology and Biogeography* 28:33–41
- Fährmann B, Grajewski R, Bergschmidt A et al. (2018) Der ELER in der Gemeinsamen Agrarpolitik nach 2020 : wie bewerten EvaluatorInnen die europäischen Verordnungsentwürfe? Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper 107, Braunschweig
- FAO (2020) Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rom
- Fei S, Morin RS, Oswald CM, Liebhold AM (2019). Biomass losses resulting from insect and disease invasions in US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(35):17371–17376
- Feldmann R (1974) Wassergefüllte Wagenspuren auf Forstwegen als Amphibien-Laichplätze. *Salamandra*, Frankfurt am Main
- Felton A, Boberg J, Björkman C, Widenfalk O (2013) Identifying and managing the ecological risks of using introduced tree species in Sweden's production forestry. *Forest Ecology and Management* 307:165–177
- Fenton L (2016) 'Bushcraft' and 'Indigenous Knowledge': transformations of a concept in the modern world. Doctor of Philosophy (PhD) thesis, University of Kent
- Fenton L, Playdon Z Prince HE (2020) Bushcraft education as radical pedagogy, *Pedagogy, Culture & Society*
- Feurdean A, Bhagwat SA, Willis KJ et al. (2013) Tree Migration Rates: Narrowing the Gap between Inferred Post-Glacial Rates and Projected Rates. *PLoS ONE* 8(8): e71797
- Frid A, Dill L (2002) Human-caused disturbance stimuli as a form of predation risk. *Conservation Ecology* 6:11
- Filla M, Premier J, Magg N et al. (2017) Habitat selection by Eurasian lynx (*Lynx lynx*) is primarily driven by avoidance of human activity during day and prey availability during night. *Ecol. Evol.*, 7:6367–6381
- Fischer EM, Knutti R (2016) Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Clim Change* 6 (11):986–991
- Fladung M (2008) Domestikation von Bäumen. *AFZ-Der Wald* 63(5):229–231
- Fleischhacker, V, Formayer, H (2007) Die Sensitivität des Sommertourismus in Österreich auf den Klimawandel, Endbericht von StartClim2006.D1 in StartClim2006: Klimawandel und Gesundheit, Tourismus, Energie
- FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2021) Entwicklung der Anbauflächen. <https://www.fnr.de/nachwachsende-rohstoffe/anbau>. Letzter Zugriff am 29.08.2021
- Förschler M, Ebel C, Schlund W (2013) SLASS statt SLOSS - Warum ein Nationalpark im Nordschwarzwald doch die bessere Lösung darstellt. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 45(4):122–124.
- Forbrig A, Hofmann R, Seeling U (2008) Bodenschonende Holzernnte. Abschlussbericht zum Auftrag der FCK an das KWF. KWF-Eigenverlag, 40 S.
- Forest Europe (2015) State of Europe's Forests 2015. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Forest Europe, <http://foresteurope.org/state-europes-forests-2015-report/>
- Formayer H, Kromp-Kolb H (2009) Klimawandel und Tourismus in Oberösterreich. BOKU-Met Report 18. Wien, 45 S.
- Forst Brandenburg (2016) Waldmonitoring Bericht 2016 Klimaindikator 1.1c Sturmrisiko. p 2. Verfügbar unter [www.forstliche-umweltkontrolle-bb.de](http://www.forstliche-umweltkontrolle-bb.de). Aufgerufen am 10 Juli 2020
- Forster M, Falk W, Reger B et al.. (2019) Klima-Boden-Baumartenwahl. Hrsg. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Praxishilfe, 110 S.
- Forzieri G, Girardello M, Ceccherini G et al. (2021) Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature communications* 12(1):1–12
- Franic I, Prospero S, Hartmann M et al. (2019) Are traded forest tree seeds a potential source of nonnative pests? *Ecological Applications* 29(7): e01971
- Franklin JF, Forman RT (1987) Creating landscape patterns by forest cutting: ecological consequences and principles. *Landscape ecology* 1(1):5–18
- Franz K (2017) Zahlungen für Naturschutz im Wald - Problem und Lösungsansatz aus Sicht des Agency-Ansatzes [online]. Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Diss, 189 S. Verfügbar unter <http://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/00-1735-0000-0023-3E47-2>. Letzter Zugriff am 23 Mai 2017
- Franz K, Blomberg M von, Demant L et al. (2018) Perspektiven für den Vertragsnaturschutz. *AFZ Wald* 73(21):30–33
- Franz K, Dieter M, Möhring B (2017) Naturschutzförderung neu gedacht. *AFZ Wald* 72(13):44–47
- Frei E, Streit K, Brang P (2018) Baumartenwahl für Testpflanzungen. Bericht, WSL, [https://www.wsl.ch/fileadmin/user\\_upload/WSL/Projekte/testpflanzungen/Dokumente\\_deutsch/Baumartenwahl\\_Testpflanzungen\\_V2.pdf](https://www.wsl.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Projekte/testpflanzungen/Dokumente_deutsch/Baumartenwahl_Testpflanzungen_V2.pdf), letzter Zugriff am 16.08.2021

- Friederich T, Westhauser A** (2019) Der 4-3-2-Krisenmanagement-Zyklus. Verfügbar unter <https://www.waldwissen.net/de/wald-wirtschaft/schadensmanagement/praeventivmassnahmen-bei-krise-mit-schadpotential>. Aufgerufen am 27 Juli 2021
- Frumkin H, Bratman GN, Breslow SJ et al.** (2017) Nature contact and human health: a research agenda. *Environ Health Perspect* 125(7):075001
- Fuchs R, Brown C, Rounsevell M** (2020) Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations. *Nature Comment* 586:671-673
- Galkin MV, Samec JSM** (2016) Lignin Valorization through Catalytic Lignocellulose Fractionation: A Fundamental Platform for the Future Biorefinery. *Chemsuschem*
- Gallart F, Llorens P** (2003) Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources, *Water Int* 28:334-340
- Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R et al.** (2013) Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nat Commun* 4:1-8
- Gardiner B** (2021) Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests. *Journal of Forest Research*, 1
- Garland G, Banerjee S, Edlinger A et al.** (2020) A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review. *Journal of Ecology* 109(51):1-14
- Geiger R** (1961) Das Klima der bodennahen Luftschicht – Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. 4. Aufl. Vieweg, Braunschweig
- Geise U, Messlinger U, Schlumprecht H** (2020) Möglichkeiten der Entwicklung eines Kleingewässernetzes zur Förderung der Gelbbauchunke im Rahmen der forstwirtschaftlichen Nutzung. *Mertensiella, Salzhemmendorf*: 209-222
- Geng L, Xu J, Ye L, Zhou W, Zhou K** (2015) Connection with nature and environmental behaviors. *PLoS One* 10(5): e0127247
- Gerstenberg, T, Schubert M** (2020) Partizipationsprozess im Rahmen der Forsteinrichtung. *AFZ Der Wald* 19: 28-30
- Gerstenberg T, Baumeister CF, Schraml U** (2019) Visualisierung kultureller Ökosystemleistungen und Wegenutzung in stadtnahen Wäldern. *FVA-Einblick* 1:23-26
- Gerstenberg T, Baumeister CF, Schraml U, Plieninger T** (2020) Hot routes in urban forests: The impact of multiple landscape features on recreational use intensity. *Landscape and Urban Planning* 203:103888
- Gessler A, Keitel C, Kreuzwieser J et al.** (2007) Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21(1):1-11
- Gessler A, Schaub M, McDowell NG** (2017) The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery. *New Phytologist* 214:513-520
- Getzner M, Meyerhoff J** (2020) The Benefits of Local Forest Recreation in Austria and Its Dependence on Naturalness and Quietude. *Forests* 11(3):326
- Gill R, Morgan G** (2010) The effects of varying deer density on natural regeneration in woodlands in lowland Britain. *Forestry* 83:53-63
- Gitau CW, Bashford R, Carnegie AJ, Gurr GM** (2013) A review of semiochemicals associated with bark beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) pests of coniferous trees: A focus on beetle interactions with other pests and their associates. *Forest Ecology and Management* 297:1-14
- Giuggiola A, Bugmann H, Zingg A et al.** (2013) Reduction of stand density increases drought resistance in xeric Scots pine forests. *Forest Ecology and Management* 310:827-835
- Glade T, Hoffmann P, Thonicke K** (2017) Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. In: *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Brasseur GP, Jacob D, S Schuck-Zöllner (eds), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 111-121
- Gössling S, Hall MC** (2006) Uncertainties in predicting tourist flows under scenarios of climate change. *Climatic Change* 79(3-4):163-173
- Gömann H, Bender A, Bolte A et al.** (2015) Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Braunschweig: Thünen-Institut, 289 S. Verfügbar unter [http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/dn055248.pdf](http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn055248.pdf). Aufgerufen am 7 Juni 2020
- Goldbecker S** (2013) Fachbereich WD5, Wirtschaft und Technologie; Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Wissenschaftliche Dienste. Klimawirkung der Moore. Deutscher Bundestag
- Gómez-Aparicio L, Zamora R, Gómez JM et al.** (2004) Applying plant facilitation to forest restoration: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14: 1128-1138
- González G et al.** (2008) Decay of aspen (*Populus tremuloides* Michx.) wood in moist and dry boreal, temperate, and tropical forest fragments. *Ambio* 37:588-597
- Gossner MM** (2016) Eingeführte Baumarten in Mitteleuropa-Auswirkungen auf Arthropodengemeinschaften und Wechselwirkungen zwischen Arten. In: *Krumm F, Vitkova L (eds) Eingeführte Baumarten in europäischen Wäldern: Chancen und Herausforderungen*, European Forest Institute: 284-303
- Gregorius HR** (1996) The contribution of the genetics of populations to ecosystem stability. *Silvae Genetica* 45:267-271
- Griess VC, Acevedo R, Härtl F et al.** (2012) Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. *Forest Ecology and Management* 267:284-296
- Grimm V, Wissel C** (1997) Babel, or the ecological stability discussions: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia* 109:323-334
- Grodzki W, McManus M, Knížek M et al.** (2004) Occurrence of spruce bark beetles in forest stands at different levels of air pollution stress. *Environmental Pollution* 130:73-83.
- Grosdidier M, Ios R, Husson C et al.** (2018) Tracking the invasion: dispersal of *Hymenoscyphus fraxineus* airborne inoculum at different scales. *FEMS Microbiology Ecology* 94(5)
- Grossiord C** (2019) Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests. *New Phytologist* 228:42-49
- Grote R, Gessler A, Hommel R et al.** (2016) Importance of tree height and social position for drought-related stress on tree growth and mortality. *Trees* 30(5):1467-1482
- Grüneberg E, Riek W, Schöning I et al.** (2016) Kohlenstoffvorräte und deren zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: *Wellbrock N, Bolte A, Flessa H (eds) Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Thünen Report 43:181-209

- Grünwald NJ, Garbelotto M, Goss EM et al. (2012) Emergence of the sudden oak death pathogen *Phytophthora ramorum*. *Trends Microbiol* 20:131–138
- Gu L, Hanson PJ, Post WM et al. (2008) The 2007 Eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? *Bio-science* 58:253–262
- Guan H, Wei H, He X et al. (2017) The tree-species-specific effect of forest bathing on perceived anxiety alleviation of young-adults in urban forests. *Ann For Res* 60:327–341
- Guisan A, Zimmermann NE (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147–186
- Gundersen VS, Frivold LH (2008) Public preferences for forest structures: A review of quantitative surveys from Finland, Norway and Sweden. *Urban Forestry & Urban Greening* 7(4):241–258
- Gustafsson L, Bauhus J, Asbeck T et al. (2020) Retention as an integrated biodiversity conservation approach for continuous-cover forestry in Europe. *Ambio* 49:85–97
- Haack RA, Herard F, Sun JH, Turgeon JJ (2010) Managing Invasive Populations of Asian Longhorned Beetle and Citrus Longhorned Beetle: A Worldwide Perspective. *Annual Review of Entomology* 55:521–546
- Haas J, Schack-Kirchner H und Lang F (2020) Modeling soil erosion after mechanized logging operations on steep terrain in the Northern Black Forest, Germany. *European Journal of Forest Research* 139:549–565
- Hafner A, Rüter S (2018) Method for Assessing the National Implications from Timber Buildings – an Environmental Study for residential Buildings in Germany. *Journal of Wood and Fiber Science* 50:139–154. Verfügbar unter <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2682/2430>. Aufgerufen am 31 Juli 2021
- Hafner A, Rüter S, Ebert S et al. (2017) Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. BMEL/BMUB. Technische Universität München, Bochum
- Hafner A, Schäfer S (2017) Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. *Journal of Cleaner Production* 167:630–642. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.203
- Hafner A, Schäfer S (2018) Environmental Aspects of Material Efficiency versus Carbon Storage in Timber Buildings. *European Journal of Wood and Wood Products* 76(3):1045–1059
- Hafner A., Slabik S, Storck M (2020) Urban Site Development as Temporal Carbon Storage—A Case Study in Germany. *Sustainability* 12(14):5827
- Haftenberger M, Laußmann D, Ellert U et al. (2013) Prävalenz von Sensibilisierungen gegen Inhalations- und Nahrungsmittel-allergene. *Bundesgesundheitsblatt* 56:687–697
- Hagedorn F, Martin M, Rixen CH et al. (2010) Short-term responses of ecosystem carbon fluxes to experimental soil warming at the Swiss alpine treeline. *Biogeochemistry* (2010) 97:7–19
- Hahn S (2021) Waldschutz-Forschung des Julius Kühn-Instituts wird durch Einrichtung eines neuen Institutes in Quedlinburg gestärkt. Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen. Verfügbar unter <https://idw-online.de/de/news764604>. Aufgerufen am 27 Juli 2021
- Hahne U, Kahl C, von Kampen S (2012) Tourismus in Nordhessen und regionale Betroffenheit durch den Klimawandel Tourismus in Nordhessen Band 1. Schriftenreihe des Fachbereichs Architektur Stadtplanung Landschaftsplanung der Universität Kassel, 277 S.
- Halbritter A, Deegen P, Susaeta A (2020) An economic analysis of thinnings and rotation lengths in the presence of natural risks in even-managed forest stands. *Forest Policy and Economics* 118:102223
- Hall C, Scott D, Gössling S (2011) Forests, climate change and tourism. *Journal of Heritage Tourism* 6(4): 353–363
- Hampicke U, Schäfer A (2021) Ökonomische Bewertung der Ökosystemleistungen des Waldes der Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern. DUENE e.V., Greifswald. Verfügbar unter <https://www.wald-mv.de/landesforst%E2%80%933mv/aktuelles/?id=169262&processor=processor.sa.pressemitteilung>. Letzter Zugriff am 30 Juli 2021
- Hanewinkel M, Cullmann DA, Schelhaas MJ et al. (2013) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change* 3(3):203–207
- Hardulak LA, Moriniere J, Hausmann A et al. (2020) DNA metabarcoding for biodiversity monitoring in a national park: Screening for invasive and pest species. *Molecular Ecology Resources* 20:1542–1557
- Hari V, Rakovec O, Markonis Y et al. (2020) Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports* 10:12207
- Härkönen S, Neumann M, Mues V et al. (2019) A climate-sensitive forest model for assessing impacts of forest management in Europe. *Environmental Modelling and Software* 115:128–143
- Harrington R, Woivod I, Sparks T (1999) Climate change and trophic interactions. *Trends in Ecology and Evolution* 14:146–150
- Härtel I (2010) Eigentumsgarantie und Waldrecht. In: Depenheuer O, Möhring B (eds) *Waldeigentum - Dimensionen und Perspektiven*. Bibliothek des Eigentums, Band 9, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Hartebrödt C (2004) The impact of storm damage on small-scale forest enterprises in the south-west of Germany. *Small-scale Forest Economics, Management and Policy* 3: 203–208
- Hartig T, Mitchell R, de Vries S, Frumkin H (2014) Nature and health. *Annu Rev Public Health* 35:207–228
- Hartig, T, Evans GW, Jamner LD et al. (2003). Tracking restoration in natural and urban field settings. *Journal of Environmental Psychology* 23:109–123
- Hartmann H (2011) Will a 385 million year-struggle for light become a struggle for water and for carbon? – How trees may cope with more frequent climate change-type drought events. *Global Change Biology* 17:642–655
- Hasel K (1985) *Forstgeschichte*. Ein Grundriß für Studium und Praxis. Paul Parey, Hamburg und Berlin, 257 S.
- Hausrath H (1936) Zur Wald- und Siedlungsgeschichte Deutschlands. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 112:261–271
- Hector A, Bagchi R (2007) Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature* 448:188–190
- Heemsbergen DA, Berg MP, Loreau M et al. (2004) Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science* 306(5698):1019–1020
- Heidrich L, Bae S, Levick S et al. (2020) Heterogeneity-diversity relationships differ between and within trophic levels in temperate forests. *Nat Ecol Evol*

- Heimann M, Reichstein M (2008) Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451:289–292. doi: 10.1038/nature06591
- Helmholtz-Gesellschaft (2020) Regionaler Klimaatlas Deutschland. Verfügbar unter <https://www.regionaler-klimaatlas.de>. Aufgerufen am 10 Nov 2020
- Hennig P, Schnell S, Riedel T (2019) Produktivität der Wälder. *AFZ-DerWald* 14:28–31
- Hermes J, von Haaren C, Schmücker D (2021) Nature-based recreation in Germany: Insights into volume and economic significance. *Ecological Economics* 188:107136
- Herms DA, Mattson WJ (1992) The dilemma of plants: to grow or defend. *Quart Rev Biol* 67:283–335
- Hernández-Morcillo M, Burgess P et al. T (2018) Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. *Environmental Science & Policy* 80:44–52
- Herrero C, Berraondo I, Bravo F et al. (2019) Predicting mushroom productivity from long-term field-data series in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. forests in the context of climate change. *Forests* 288–299:108015
- Hickling R, Roy DB, Hill JK et al. (2006) The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology* 12:450–455
- Hilmers T, Friess N, Bässler C et al. (2018) Biodiversity along temperate forest succession. *Journal of Applied Ecology* 55:2756–2766
- Hlásny T, König L, Krokene P et al. (2021) Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management. *Current Forestry Reports*
- Hlásny T, Krokene P, Liebhold A et al. (2019) Living with bark beetles: impacts, outlook and management options. *From Science to Policy* 8. European Forest Institute. 50 S.
- HLNUG (Hrsg) (2018a) ReKliEs-De. Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. Verfügbar unter <http://reklies.hlnug.de>. aufgerufen am 7 Okt 2020
- Hoffmann S, Irl DH, Beierkuhnlein S (2019) Predicted climate shifts within terrestrial protected areas worldwide. *Nature communications* 10(1):1–10
- Höflich C (2018) Pollen-assoziierte allergische Erkrankungen in Zeiten des Klimawandels – Neue Daten zur Entwicklung in Deutschland. *UMID* 1:5–14
- Hofstetter RW, Dempsey TD, Klepzig KD, Ayres MP (2007) Temperature-dependent effects on mutualistic, antagonistic, and commensalistic interactions among insects, fungi and mites. *Community Ecology* 8:47–56
- Holling CS (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:1–23
- Holthausen N, Hanewinkel M, Holec J (2004) Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos. *Forst-archiv* 75:149–157
- Honkaniemi J, Rammer W, Seidl R (2020) Norway spruce at the trailing edge: the effect of landscape configuration and composition on climate resilience. *Landscape Ecology* 35:591–606
- Hood SM (2020) Fire and Bark Beetle Interactions. In: Manzello SL (ed) *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer International Publishing, Cham, S. 328–334
- Hopf-Biziks A, Schröder T, Schütz S (2016) The pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle, and its pathogenicity to German *Pinus sylvestris* provenances. *Journal of Plant Diseases and Protection* 123(1):43–49
- Hothorn T, Müller J, Held L et al. (2015) Temporal Patterns of Deer-vehicle Collisions Consistent with Deer Activity Pattern and Density Increase but not General Accident Risk. *Accident Analysis & Prevention* 81:143–152
- Houston AI, Prosser E, Sans E (2012) The cost of disturbance: a waste of time and energy? *Oikos* 121: 597–604
- Hulme PE (2007) Biological invasions in Europe: drivers, pressures, states, impacts and responses. In: Hester RE, Harrison RM (eds) *Biodiversity under Threat, Issues in Environmental Science and Technology* 25:56–80
- Hultberg T, Sandström J, Felton A et al. (2020) Ash dieback risks an extinction cascade. *Biological Conservation* 244:108516
- Huston M, Smith T (1987) Plant Succession: Life History and Competition. *The American Naturalist* 130:168–198
- Hutchinson GE (1961) The paradox of the plankton. *American Naturalist* 95:137–145
- Incropera FP (2016) Climate change: a wicked problem. Complexity and uncertainty at the intersection of science, economics, politics, and human behavior. Cambridge University Press, New York, 337 S.
- Informationssysteme für Rohstoffe (INFRO) e. K. (2018) Monitoring und Verwendung von Holzprodukten im Bausektor und Bestimmung der Potenziale für CO<sub>2</sub>-Bindung. Schlussbericht. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) <https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22WB403201.pdf>, letzter Zugriff am 16.08.2021
- Ionita M, Dima M, Nagavciuc V, Scholz P, Lohmann G (2021) Past megadroughts in central Europe were longer, more severe and less warm than modern droughts. *Commun Earth Environ* 2(61). doi: 10.1038/s43247-021-00130-w
- IPBES – Intergovernmental Platform on Biodiversity & Ecosystem Services (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany. doi: 10.5281/zenodo.3553579
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2000) SRES – Special Report Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, 27 S.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, Hanson CE, van der Linden PJ (eds) *Klimaänderung: Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung*. 22 S.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report; Cambridge University Press, 594 S. Verfügbar unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX\\_Full\\_Report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf). Aufgerufen am 11 Nov 2020
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013/2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change

- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change** (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York. Verfügbar unter [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/). Aufgerufen am 29 Juli 2021
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change** (2019) Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land de-gradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 906 S. Verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SRCCL-Complete-BOOK-LRES.pdf>. Aufgerufen 17 Mai 2020
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change** (2013/2014) Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt. ProClim, Bonn, Wien, Bern
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change** (2019) IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems Summary for Policymakers. Verfügbar via IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page>. Aufgerufen am 7 Juni 2021
- Ionita M, Dima M, Nagavciuc V et al.** (2021) Past megadroughts in central Europe were longer, more severe and less warm than modern droughts. *Commun Earth Environ* 2(61)
- IRENA - International Renewable Energy Agency** (2019) Bioenergy from boreal forests. Swedish approach to sustainable wood use. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Verfügbar unter [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA\\_Swedish\\_forest\\_bioenergy\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_Swedish_forest_bioenergy_2019.pdf). Letzter Zugriff am 30 Juli 2021
- Isermeyer F, Teutsch G, Ammer C et al.** (2021) Stärkung der Wald- und Holzforschung in Deutschland. <https://www.ufz.de/index.php?de=48513>, letzter Zugriff am 20.09.2021
- Ishida TA, Nara K, Hogetsu T** (2007) Host effects on ectomycorrhizal fungal communities: insight from eight host species in mixed conifer-broadleaf forests. *New Phytologist* 174:430-440
- IUCN Species Survival Commission** (2013) Guidelines for reintroductions and other conservation translocations. Gland, Switzerland, 72 S.
- Jacobs DF, Dalglish HJ, Nelson CD** (2013) A conceptual framework for restoration of threatened plants: the effective model of American chestnut (*Castanea dentata*) reintroduction. *New Phytologist* 197(2):378-393
- Jactel H, Bauhus J, Boberg J et al.** (2017) Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Current Forestry Reports* 3:223-243
- Jactel H, Koricheva J, Castagneyrol B** (2019) Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science* 35:103-108
- Jactel H, Petit J, Desprez-Loustau ML et al.** (2012) Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biol* 18:267-276
- Jandl R, Spathelf P, Bolte A, Prescott CE** (2019) Forest adaptation to climate change—is non-management an option? *Annals of Forest Science* 76(2)
- Janeczko E, Bielinis E, Wójcik R et al.** (2020) When urban environment is restorative: The effect of walking in suburbs and forests on psychological and physiological relaxation of young polish adults. *Forests*, 11(5)
- Janßen A, Šeho M, Schirmer R et al.** (2019) Praxisanbauversuche: Bewertung alternativer Baumarten in Bayern. *AFZ-DerWald* 5: 24 – 27
- Jay M, Schraml U** (2009) Understanding the role of urban forests for migrants – uses, perception and integrative potential, *Urban Forestry & Urban Greening* 8(4)
- Jensen J** (2020) Modellgestützte Untersuchungen im Kreis Siegen-Wittgenstein zur Nutzung von Waldflächen als Element der aktiven Starkregenvorsorge in urbanen Gebieten. PP-Präsentation zur Auftaktveranstaltung des Forschungsprojekts WaldAktiv der Universität Siegen. Verfügbar unter <https://uni-siegen.sciebo.de>. Aufgerufen 15 Okt 2020
- Jentsch A, Seidl R, Wohlgemuth T** (2019) Störungen und Störungsregime. In: Wohlemuth T, Jentsch, A, Seidl R (ed) *Störungsökologie*. Bern, Haupt Verlag, S. 21-42
- Job H, Fließbach-Schendzielorz M, Bittlingmaier S, Herling A, Woltering M** (2019) Akzeptanz der bayerischen Nationalparks. Ein Beitrag zum sozioökonomischen Monitoring in den Nationalparks Bayerischer Wald und Berchtesgaden. *Würzburger Geographische Arbeiten* 122. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Verfügbar unter <https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/index/index/docId/17124>. Aufgerufen am 24 Feb 2020
- Jochem D, Weimar H, Bösch M et al.** (2015) Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *Eur J Forest Res* 134(5):869-888
- Jonard M, Fürst A, Verstraeten A et al.** (2014) Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Glob Chang Biol* 21:418-430
- Joshi R, Wani SH, Singh B et al.** (2016) Transcription Factors and Plants Response to Drought Stress: Current Understanding and Future Directions. *Frontiers in Plant Science* 7:1029
- Jump A, Hunt JM & Penuelas J** (2006) Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12(11):2163-2174
- Kahl T, Bauhus J** (2014) An index of forest management intensity based on assessment of harvested tree volume, tree species composition and dead wood origin. *Nature Conservation* 7:15-27
- Kajanus M et al.** (2019) What can we learn from business models in the European forest sector: Exploring the key elements of new business model designs. *Forest Policy and Economics* 99:145-156
- Kalbe L** (1997) *Limnische Ökologie*. Teubner Verlagsgesellschaft. Stuttgart, Leipzig, 296 S.
- Kalcher J, Praxmarer G, Teischinger A** (2016) Quantification of future availabilities of recovered wood from Austrian residential buildings. *Resour Conserv Recycl*.
- Kaplan R, Kaplan S.** (1989) *The experience of nature: A psychological perspective*. Cambridge University Press
- Kalinkat G, Rall BC, Bjorkman C, Niemelä P** (2015) Effects of climate change on the interactions between insect pests and their natural enemies. In: Bjorkman C, Niemela P (eds) *Climate Change and Insect Pests*. CABI, 74 S.
- Kalt G** (2015) Biomass streams in Austria: Drawing a complete picture of biogenic material flows within the national economy. *Resources Conservation and Recycling*. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.12.006



- Karjalainen E, Sarjala T, Raitio H (2010) Promoting human health through forests: overview and major challenges. *Environ Health Prev Med* 15:1-8
- Kaspar F, Friedrich K (2020) Rückblick auf die Temperatur in Deutschland im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung. Verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle\\_meldungen](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen). Aufgerufen 9 Juni 2020
- Kätzel R (2008) Klimawandel - Zur genetischen und physiologischen Anpassungsfähigkeit der Waldbaumarten. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 42:8-15
- Kätzel R (2010) Conservation of Forest Genetic Resources: The Basis of Adaptability in Managed Forests. In: Spathelf, P. (ed) *Sustainable Forest Management in a Changing World: a European Perspective*. Springer Verlag: 93-114
- Kauhala K, Kowalczyk R (2011) Invasion of the raccoon dog *Nyctereutes procyonoides* in Europe: history of colonization, features behind its success, and threats to native fauna. *Current Zoology* 57(5):584-598
- Keller RP, Geist J, Jeschke JM, Kühn I (2011) Invasive species in Europe: ecology, status, and policy. *Environmental Sciences Europe* 23(1):1-17
- Kemmerer J, Labelle ER (2021) Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research* 140:1-17.
- Kerr JT, Pindar A, Gelpert P et al. (2015) Climate change impacts on bumblebees converge across continents. *Science* 349:177-180
- Kienast F, Bolliger J, Potschin M et al. (2009) Assessing landscape functions with broad-scale environmental data: insights gained from a prototype development for Europe. *Environmental Management* 44(6):1099-1120
- Kirig A, Schick I (2008) *Neo-Nature. Der große Sehnsuchtsmarkt Natur*. Kelkheim: Zukunftsinstitut.
- Kjær ED, McKinney LV, Nielsen LR, Hansen LN, Hansen JK (2012) Adaptive potential of ash (*Fraxinus excelsior*) populations against the novel emerging pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus*. *Evol Appl* 5:219-228
- Klädtke J (2016) Zum Wachstum eingeführter Baumarten in Baden-Württemberg. *Allg. Forst u. Jagdztg.* 187(5/6): 81-93.
- Klein T (2015) Drought-induced tree mortality: from discrete observations to comprehensive research. *Tree Physiology* 35(3):225-228
- Kleinbauer I, Dullinger S, Klingenstein F et al. (2010) Das Ausbreitungspotenzial von Neophyten unter Klimawandel - viele Gewinner, wenige Verlierer? In: Rabitsch W, Essl F (eds.) *Aliens. Neobiota und Klimawandel - eine verhängnisvolle Affäre?* Bibliothek der Provinz, Weitra: 27-43
- Kleinhüchelkotten S, Calmbach M, Glahe J et al. 2009 *Kommunikation für eine nachhaltige Waldwirtschaft. Forschungsverbund Mensch & Wald, M&W-Bericht 09/01, Hannover*
- Kling MM, Auer SL, Comer PJ et al. (2020) Multiple axes of ecological vulnerability to climate change. *Global Change Biology* 26: 2798-2813
- KLIWA - *Klimaveränderungen und Wasserwirtschaft* (2019) *Starkniederschläge. Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft. Kurzbericht Stand: 07/2019, 35 S. Verfügbar via KLIWA: <https://www.kliwa.de>. Aufgerufen am 14 Aug 2020*
- Knauf M, Frühwald A (2020) Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), 40 S. [https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch\\_LaubholzProduktmaerkte\\_WEB.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch_LaubholzProduktmaerkte_WEB.pdf)
- Knoke T, Kindu M, Jarisch I et al. (2020) How considering multiple criteria, uncertainty scenarios and biological interactions may influence the optimal silvicultural strategy for a mixed forest. *Forest Policy and Economics* 118:102239
- Köhler F (2010) Die klimabedingte Veränderung der Totholzkäferfauna (Coleoptera) des nördlichen Rheinlandes - Analysen zur Gesamtf fauna und am Beispiel von Wiederholungsuntersuchungen in ausgewählten Naturwaldzellen. Landesbetrieb Wald und Holz NRW, Arnberg. 12 S.
- Kohnle U, Albrecht A, Yue C (2014) Zuwachstrends im Spiegel langfristiger Versuchsflächen in Südwestdeutschland. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 185(5/6):97-117
- Kohnle U, Klädtke J (2018) Waldbauliche Mythen, Dichtung und Wahrheit. *AFZ-der Wald* 19:18-20
- Kolb TE, Fettig CJ, Bentz BJ et al. (2016) Forest insect and fungal pathogen responses to drought. In: Vose JM, Clark JS, Luce CH, Patel-Weyand T (eds) *Effects of Drought on Forests and Rangelands in the United States: A Comprehensive Science Synthesis*. USDA Forest Service, Gen. Tech. Report WO-93b: 113-128
- Kölling C, Knoke T, Schall P, Ammer C (2009) Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels [Cultivation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Germany: Considerations on risk against the background of climate change]. *Forstarchiv* 80:42-54
- Kölling C, Mette T, Knoke T (2016) Waldertrag und Anbauisiko in einer unsicheren Klimazukunft. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 167:29-38
- Kölling C, Borchert H (2013) Nachhaltige Nutzung des Produktionsfaktors Boden - Herausforderung Kronenbiomassenutzung. *LWF Wissen* 72: 47-53
- Kolström M, Lindner M, Vilén T et al. (2011) Reviewing the science and implementation of climate change adaptation measures in European forestry. *Forests* 2:961-982
- Kornhuber K, Osprey S, Coumou D, Petri S et al. (2019) Extreme weather events in early summer 2018 connected by a recurrent hemispheric wave-7 pattern. *Environmental Research Letters* 14(5):054002
- Kovacs KF, Haight RG, McCullough DG et al. (2010) Cost of potential emerald ash borer damage in US communities, 2009-2019. *Ecological Economics* 69:569-578
- Kovács B, Tinya F, Ódor P (2017) Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 234:11-21.
- Krackler V, Niemz, P (2011) Schwierigkeiten und Chancen in der Laubholzverarbeitung. Teil 1: Bestandssituation, Eigenschaften und Verarbeitung von Laubholz am Beispiel der Schweiz. *Holztechnologie* 52(2):5-11
- Kraus D, Wohlgemuth T, Conedera M (2019) Störungen durch Feuer in Waldökosystemen: Prozesse und Managementstrategien. In: Wohlemuth T, Jentsch A, Seidl R (eds) *Störungsökologie*. Bern, Haupt Verlag: 129-155
- Krejza J, Cienciala E, Světlík J et al. (2021) Evidence of climate-induced stress of Norway spruce along elevation gradient preceding the current dieback in Central Europe. *Trees* 35:103-119

- Krengel S, Seidel P** (2016) Über die Zunahme thermophiler Schadorganismen in Wäldern am Beispiel der Borkenkäfer. In: Lozán JL, Breckle SW, Müller R, Rachor E (eds) Warnsignal Klima: Die Biodiversität: 184-189
- Kreyling J, Thiel D, Nagy L et al.** (2011) Late frost sensitivity of juvenile *Fagus sylvatica* L. differs between southern Germany and Bulgaria and depends on preceding air temperature. *European Journal of Forest Research* 131:717-725
- Kroth W** (1968) Der forstliche Produktionszeitraum in: Möglichkeiten der optimalen Betriebsgestaltung in der Forstwirtschaft, Bayerischer Landwirtschaftsverlag München, Basel, Wien 332 S.
- Krüger I, Sanders T, Holzhausen M et al.** (2020) Am Puls des Waldes - Umweltwandel und seine Folgen, ausgewählte Ergebnisse des intensiven forstlichen Umweltmonitorings. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (ed) Bonn, 52 S.
- Krumm F, Vítková L** (2016) Introduced tree species in European forests: opportunities and challenges. *European Forest Institute*, 423 S.
- Kühne O** (2014) Die intergenerationell differenzierte Konstruktion von Landschaft, *NuL* 46(10):297-302
- Kuittinen M, Zernicke C, Slabik S, Hafner A** (2021) How can carbon be stored in the built environment? A review of potential options. *Architectural Science Review*
- Kunic R** (2016) Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes. In Kutnar A, Muthu SS (eds) *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts*. Springer, Berlin: 173-204
- Kunz J, Löffler G, Bauhus J** (2018) Minor European broadleaved tree species are more drought-tolerant than *Fagus sylvatica* but not more tolerant than *Quercus petraea*. *Forest Ecology and Management* 414:15-27
- Kuussaari M et al.** (2015) Successful translocation of the threatened Clouded Apollo butterfly (*Parnassius mnemosyne*) and metapopulation establishment in southern Finland. *Biological Conservation* 190:51-59
- Lake IR, Jones NR, Agnew M et al.** (2017) Climate Change and Future Pollen Allergy in Europe. *Environmental Health Perspectives* 125:3
- Landesforst Mecklenburg-Vorpommern** (2014) Verbundvorhaben: Eschentriebsterben – Forst- und holzwirtschaftliche Strategien zum Umgang mit dem neuartigen Eschentriebsterben; Teilvorhaben 1: Nachhaltige Eschenholzproduktion sowie Erprobung effizienter und bodenschonender Holzernteverfahren auf sensiblen Nassstandorten. <https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22007410.pdf>
- Lang F, Bauhus J, Frossard E et al.** (2016) Phosphorus in forest ecosystems: New insights from an ecosystem nutrition perspective, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179:129-135
- Lange H, Økland B, Krokene P** (2006) Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. *InterJournal* 1648:1-10
- Langer GJ** (2019) Komplexe Erkrankungen bei älteren Rotbuchen. *AFZ-Der Wald* 74(24):30-33
- Larson-Nash S, Robichaud P, Pierson F et al.** (2018) Recovery of small-scale infiltration and erosion after wildfires *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 66(3):261-27
- Larson LR, Cooper CB, Stedman D et al.** (2018) Place-Based Pathways to Proenvironmental Behavior: Empirical Evidence for a Conservation-Recreation Model, *Society & Natural Resources*, 31(8):871-891
- Laube N, Panitz HJ, Schädler G** (2017) Auswertung regionaler COSMO-CLM-Klimasimulationen mit 2.8 km Auflösung für das KLIWA-Gebiet und die Klimazeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100. *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*
- Latimer C E, Zuckerberg B** (2017) Forest fragmentation alters winter microclimates and microrefugia in human-modified landscapes. *Ecography* 40:158-170
- LAWA - Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser** (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. LAWA, Erfurt, 86 S. Verfügbar via LAWA: <https://www.lawa.de>. Aufgerufen am 28 Okt 2020
- Lehmann M** (2010) Reaktion lästiger und humanhygienisch bedenklicher Organismen an Pflanzen des urbanen Raumes auf Klimaerwärmung. In: UBA – Umweltbundesamt. *Klimawandel und Gesundheit. Welche Probleme verursachen Wärme liebende Schadorganismen? Abschlussbericht.* Internationales UBA/BMU-Fachgespräch 9-10 Nov, Dessau-Roßlau: 19-22
- Leibfried M, Schraml U** (2019): Grundeigentum und Mountainbiken: Betrachtung eines schwierigen Verhältnisses. *FVA-einblick* 1, 9-12
- Leitgeb E, Schad P, Englisch M et al.** (2013) Waldböden: Ein Bildatlas der Wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz. *Wiley-VCH*, 412 S.
- Lemme H, Sikora C, Petercord R, Hahn A** (2020) Nordischer Fichtenborkenkäfer auch in Bayern weitverbreitet. Verfügbar unter <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/schadensmanagement/insekten/duplicatus-auch-in-bayern>. Aufgerufen am 27 Juli 2021
- Leroy BML, Lemme H, Braumiller P et al.** (2021) Relative impacts of gypsy moth outbreaks and insecticide treatments on forest resources and ecosystems – an experimental approach. *Ecological Solutions and Evidence* 2:e12045
- Leuschner C** (2020) Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) - A review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 47:125576
- Leuschner C** (2008) Die Trockenheitsempfindlichkeit der Rotbuche vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels. *Jahrbuch der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen*, S. 281-296
- Liang Y, Duveneck MJ, Gustafson EJ et al.** (2018) How disturbance, competition, and dispersal interact to prevent tree range boundaries from keeping pace with climate change. *Global Change Biology* 24:e335-e351
- Lichtenthaler HK** (1998) The stress concept in plants: an introduction. *Ann New York Acad Sci* 851(1):187-198
- Liebhold AM, Brockerhoff EG, Garrett LJ et al.** (2012) Live plant imports: the major pathway for forest insect and pathogen invasions of the US. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10:135-143
- Liebhold AM, MacDonald WL, Bergdahl D, Mastro VC** (1995) Invasion by exotic forest pests: a threat to forest ecosystems. *For Sci Monogr* 30:1-49
- Liesebach M, Wolf H, Beez J et al.** (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
- Liki - Länderinitiative Kernindikatoren** (2020) Verfügbar unter <https://www.lanuv.nrw.de/liki/index.php?indikator=35&aufzu=1&mode=indi>. Aufgerufen am 4 Mai 2020

- Lindenmayer DB, Laurance WF, Franklin JF (2012) Global Decline in Large Old Trees. *Science* 338:1305-1306
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S et al. (2010) Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259: 698-709
- Lindner M, Fitzgerald JB, Zimmermann NE et al. (2014) Climate Change and European Forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146:69-83
- Lindner M, Rummukainen M (2013) Climate Change and storm damage risk in European forests. In: Gardiner B, Schuck A, Schelhaas M-J, Orazio C, Blennow K, Nicoll B (eds) *Living with Storm Damage to Forests: What Science Can Tell Us 3*. European Forest Institute, Joensuu: 111-117
- Liu Q, Piao S, Janssens IA et al. (2018) Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nat Commun* 9:426
- LJV - Landesjagdverband Baden-Württemberg (2021) Aktuelle Zahlen zum Wildbret-Verzehr. Verfügbar unter <https://www.landesjagdverband.de/de/aktuelles/detail/artikel/aktuelle-zahlen-zum-wildbret-verzehr/a/show>. Aufgerufen am 8 Juli 2021
- Lloret F, Keeling EG, Sala A (2011) Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120:1909-1920
- Lobinger G (2010) Schadwirkung, Monitoring und Bekämpfung des Eichenprozessionsspinners in Bayerns Wäldern. In: Umweltbundesamt (ed) *Klimawandel und Gesundheit: Welche Probleme verursachen Wärme liebende Schadorganismen? Abschlussbericht Internationales UBA/BMU-Fachgespräch: 09. und 10. November 2009* Umweltbundesamt, Berlin-Dahlem: 23-24
- Löf M, Ammer C, Coll L, Drössler L, Huth F, Madsen P, Wagner S (2018) Regeneration Patterns in Mixed-Species Stands. In: Bravo-Oviedo A, Pretsch H, del Río M (eds) *Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests*. *Managing Forest Ecosystems* 31:103-130
- Löffler H (2005) Der Markt für größere Waldgrundstücke. Eine empirische Studie für Deutschland und Österreich. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. 298 S.
- Logan JA, Regniere J, Powell JA (2003) Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1:130-137
- Lorenz M, Elsasser P (2018) Ansichten und Einstellungen zu Wald und Forstwirtschaft in Deutschland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 189 (1/2):1-15
- Lovrić M, Da Re R, Vidale E et al. (2020) Non-wood forest products in Europe – A quantitative overview. *Forest Policy and Economics* 116:102175
- Lovrić M, Da Re R, Vidale E et al. (2021) Collection and consumption of non-wood forest products in Europe. *Forestry*, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab018>
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt Baden- Württemberg (2021) Vektoren und Infektionskrankheiten nehmen zu. Online-dokument, Zugriff am <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/vektoren-und-infektionskrankheiten>
- Lupp G, Förster B, Kantelberg V, Markmann T et al. (2016). Assessing the recreation value of urban woodland using the ecosystem service approach in two forests in the munich metropolitan region. *Sustainability*, 8(11), 1156.
- Lutze M (2014). Nach der Kalamität ist vor der Kalamität. Konzepte zur langfristigen Rundholzlagerung sind wichtige Bausteine einer erfolgreichen Katastrophenvorsorge. *LWF aktuell* 99:45-49
- Luysaert S, Ciais P, Piao SL et al. (2010) The European carbon balance. Part 3: forests. *Glob Change Biol* 16:1429-1450
- Mann ME, Rahmstorf S, Kornhuber K et al. (2018) Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification. *Sci Adv* 4:eaat3272
- Mantau U, Döring P, Weimar H, Glasenapp S (2018) Rohstoffmonitoring Holz – Mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland. Fachagentur Nachhaltigkeitsforschung, Schriftenreihe Nachhaltigkeitsforschung 38
- Mantau U, Mertens B, Welcker B (1999) RES – niche markets for recreational and environmental goods and services. Grundlagen und Materialien, Department Wald- und Holzforschung ETH, Zürich, 99(3)
- Mantau U, Merlo M, Sekot W, Welcker B (eds) (2001b) Recreational and environmental markets for forest enterprises: a new approach towards marketability of public goods. CABI Pub, Wallingford, 541 S.
- Mantau U, Mertens B, Welcker B, Malzburg B (2001a) Risks and chances to market recreational and environmental goods and services – experience from 100 case studies. *Forest Policy and Economics* 3(1-2):45-53
- Mantel K (1990) Wald und Forst in der Geschichte: Ein Lehr- und Handbuch. Alfeld-Hannover: M&H Schaper, 518 S.
- Marion S, Davies A, Demšar U et al. (2020) A systematic review of methods for studying the impacts of outdoor recreation on terrestrial wildlife. *Global Ecology and Conservation*, Volume 22, e00917
- Marselle MR, Hartig T, Cox DT et al. (2021) Pathways linking biodiversity to human health: A conceptual framework. *Environment International* 150: 106420.
- Marselle MR, Stadler J, Korn H, Irvine KN, Bonn A (eds) (2019) *Biodiversity and Health in the Face of Climate Change: Challenges, Opportunities and Evidence Gaps*. Springer, Leipzig
- Martens D, Bauer N (2010): Gepflegte Wälder für gepflegte Seelen? *LWF aktuell* 75:60-61
- Mason B, Valinger E (2013) Managing forests to reduce storm damage. In: Gardiner B, Schuck ART, Schelhaas MJ, Orazio C, Blennow K, Nicoll B (eds) *Living with storm damage to forests*. Joensuu, European Forest Institute: 87-96
- Mayer M, Prescott CE, Abakerd WEA et al. (2020) Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management* 466:118-127
- McCarthy J (2001) Gap dynamics of forest trees: a review with particular attention to boreal forests. *Environmental Reviews* 9:1-59
- McDowell NG et al. (2020) Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science* 368: eaaz9463
- McDowell NG, Allen CD (2015) Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change* 5(7):669-672
- McMahon SM, Harrison SP, Armbruster WS et al. (2011) Improving assessment and modelling of climate change impacts on global terrestrial biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution* 26:249-259

- McMullan M, Rafiqi M, Kaithakottil G (2018) The ash dieback invasion of Europe was founded by two genetically divergent individuals. *Nature Ecology & Evolution* 2
- MEA - Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being: synthesis. Island, Washington, D.C., USA, 33 S.
- Mehri A, Salmanmahiny A, Dehaghi IM (2017) Incorporating zoning and socioeconomic costs in planning for bird conservation. *Journal for Nature Conservation* 40:77-84
- Meier F, Scherer D (2012) Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. *Theoretical and Applied Climatology* 110:373-384.
- Meinardus C, Bräuning A (2011) Zur Trockenstresstoleranz von Eichen und Buchen: Erholungsreaktionen der Rotbuche und der Traubeneiche nach Dürrejahre. *Forschungsverbund Forcast; LWF aktuell* 85:9-11
- Meiwe KJ (2013) Ökologische Grenzen der Energieholznutzung. Vortrag gehalten bei der Jahrestagung des Nordwestdeutschen Forstvereins am 27.06.2012 in Borsum. In: Nordwestdeutscher Forstverein (ed) *Jahrestagung 2012, Jahresbericht 2012 und Vorschau auf 2013*. Eigenverlag, Springer: 38-50
- Melis C, Szafrńska PA, Jędrzejewska B, Bartoń K (2006) Biogeographical variation in the population density of wild boar (*Sus scrofa*) in western Eurasia. *Journal of Biogeography* 33:803-811.
- Melis C, Jędrzejewska B, Apollonio M et al. (2009) Predation has a greater impact in less productive environments: variation in roe deer, *Capreolus capreolus*, population density across Europe. *Global Ecology and Biogeography* 18:724-734.
- Menzel A, Fabian P (1999) Growing season extended in Europe. *Nature* 397(6721):659-659.
- Merz K, Niemann A, Thorno S. et al. (2020). Bauen mit Laubholz. Detail Verlag, 112 S. ISBN: 978-3-95553-504-9
- Mette T, Falk W (2020) Extreme Trockenheit – wie sie auf Vitalität und Anbaurisiko von Waldbäumen wirkt. Was passiert, wenn Witterungsextreme den Toleranzbereich von Waldbäumen überschreiten. *LWF Aktuell*. 03/2020.
- Miina J, Kurttila M, Calama R et al. (2020) Modelling Non-timber Forest Products for Forest Management Planning in Europe. *Curr Forestry Rep* 6:309–322
- Milad M, Schaich H, Bürgi M, Konold W (2011) Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *Forest Ecology and Management* 261:829-843
- Miletzky F, Wagenführ A, Zscheile M (2020) Holzbasierte Bioökonomie. In: Thrän D, Moesenfechtel U (eds) *Das System Bioökonomie*. Springer Verlag, Berlin: 51-68
- Millar CI, Stephenson NL, Stephens SL (2007) Climate change and forests of the future: Managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications* 17:2145–2151
- Millar CI, Stephenson NL (2015) Temperate forest health in an era of emerging mega-disturbance. *Science* 349:823-826
- Milian-Garcia Y, Young R, Madden M et al. (2021) Optimization and validation of a cost-effective protocol for biosurveillance of invasive alien species. *Ecology and Evolution* 11:1999-2014
- MULNV NRW - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2019) Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen - Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/waldbaukonzept\\_nrw.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/waldbaukonzept_nrw.pdf). Letzter Zugriff am 6 Sept 2021
- Mitchell RJ, Beaton JK, Bellamy PE et al. (2014) Ash dieback in the UK: a review of the ecological and conservation implications and potential management options. *Biological Conservation* 175:95-109
- Mitchell RJ, Pakeman RJ, Broome A et al. (2016) How to replicate the functions and biodiversity of a threatened tree species? The case of *Fraxinus excelsior* in Britain. *Ecosystems* 19(4):573-586
- Mitrus C, Sparks T, Tryjanowski P (2005) First evidence of phenological change in a transcontinental migrant overwintering in the Indian sub-continent: the Red-breasted Flycatcher *Ficedula parva*. *Ornis Fennica* 82(1):13–19
- Mitscherlich G (1981) *Waldklima und Wasserhaushalt*. Sauerländer, Frankfurt am Main.
- Mitze H (2020) Brennpunkt Harz. *Land & Forst* 28:12-13
- Möhring B (2009) Risikobewertung und Folgerungen für das betriebliche Risikomanagement. *Risikomanagement in der Forstwirtschaft, Gartower Gespäche*, Eigenverlag Andreas Graf v. Bernstorff 9:7-15
- Möhring B, Bitter A, Bub G et al. (2021) Schadenssumme insgesamt 12,7 Mrd. Euro : Abschätzung der ökonomischen Schäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft. *Holz Zentralbl* 147(9):155-158
- Möhring B, Dög M (2020) Die Bedeutung von Betriebsvergleichsdaten, *AFZ-DerWald* 74(17):12-15
- Möhring B, Rüping U (2008) A concept for calculation of financial losses when changing the forest management strategy. *For Policy Econ* 10:98–107
- Montgomery D (2007) *Dirt. The erosion of civilizations*. University of California Press, , 296 p. 978-0-520-95211-9 (ISBN)
- Mosbrugger V, Brasseur G, Schaller M, Stribrny B (eds) (2014) *Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. ISBN: 978-3-534-26386-8
- Moser R (2011) Halber Steuersatz ab dem ersten Festmeter!, *TopAgrar* 12:48-52. Verfügbar unter [https://www.mosercollegen.de/wp-content/uploads/2015/12/Halber\\_Steuersatz\\_ab\\_dem\\_ersten\\_Festmeter.pdf](https://www.mosercollegen.de/wp-content/uploads/2015/12/Halber_Steuersatz_ab_dem_ersten_Festmeter.pdf). Letzter Zugriff am 30 Juli 2021
- Müller F, Augustynczyk ALD, Hanewinkel M (2019) Quantifying the risk mitigation efficiency of changing silvicultural systems under storm risk throughout history. *Annals of Forest Science* 76(4):116
- Mueller F, Jaeger D, Hanewinkel M. (2019) Digitization in wood supply - A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture*
- Müller J (2016) Methods for measuring water and solute balances in forest ecosystems. In: Mueller L, Sheudshen AK, Eulenstein F (eds) *Novel methods for monitoring and managing land and water resources in Siberia*. Cham: Springer International Publishing: 365-385
- Müller J, Bauhus J, Dieter M, Spellmann H et al. (2020) Wege zu einem effizienten Waldnaturschutz in Deutschland. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft. Sonderheft 228*. Verfügbar unter <https://buel.bmel.de/index.php/buel/issue/view/44>. Letzter Aufruf am 30 Juli 2021
- Müller J, Brustel H, Brin A et al. (2015) Increasing temperature may compensate for lower amounts of dead wood in driving richness of saproxylic beetles. *Ecography* 38:499-509

- Müller M, Mayer M, Job H (2008) Totholz und Borkenkäfer im Nationalpark Bayerischer Wald aus touristischer Perspektive. In Job, H (ed) Die Destination Nationalpark Bayerischer Wald als regionaler Wirtschaftsfaktor. Nationalpark Bayerischer Wald. Verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/281755761\\_Tot-holz\\_und\\_Borkenkäfer\\_im\\_Nationalpark\\_Bayerischer\\_Wald\\_aus\\_touristischer\\_Perspektive](https://www.researchgate.net/publication/281755761_Tot-holz_und_Borkenkäfer_im_Nationalpark_Bayerischer_Wald_aus_touristischer_Perspektive). Aufgerufen am 24 Feb 2020
- Mußhoff O, Hirschauer N (2016) Modernes Agrarmanagement, 4. Auflage, Verlag Franz Vahlen München, 610 S.
- NABU (Naturschutzbund Deutschland) (2019) Wald und Forstwirtschaft im Klimawandel - Natur für sich arbeiten lassen: Stabilisieren – Wiederherstellen. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/wald/190829-nabu-wald-12-punkte-diskussionspapier.pdf>, letzter Zugriff am 30.08.2021.
- Nabuurs G-J, Lindner M, Verkerk PJ et al. (2013) First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3:792–796.
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2016) Ökosystemleistungen in ländlichen Räumen – Grundlage für menschliches Wohlergehen und nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung. In: von Haaren C, Albert C (eds) Leibniz Universität Hannover, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Hannover, Leipzig.
- Naudts K, Chen Y, McGrath MJ et al. (2016) Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science* 351(6273):597–600
- Nechyporchuk O, Belgacem MN, Bras J (2016) Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial crops and products*
- Neff F, Brändle M, Ambarli D et al. (2021) Changes in plant-herbivore network structure and robustness along land-use intensity gradients in grasslands and forests. *Science Advances* 7(20):eabf3985
- Nehring S, Kowarik I, Rabitsch W, Essl F (2013) Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen. BfN-Skripten 352, Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- Netherer S, Matthews B, Katzensteiner K et al. (2015) Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytol* 205:1128–1141
- Niekisch M (2005) Biodiversität als Entwicklungspotenzial: Paradigmenwechsel im Naturschutz. In: Fritz B, Hujo K (eds) Ökonomie unter den Bedingungen Lateinamerikas. Erkundungen zu Geld und Kredit, Sozialpolitik und Umwelt: 81-92
- Nielsen LR, McKinney LV, Hietala AM, Kjaer ED (2017) The susceptibility of Asian, European and North American *Fraxinus* species to the ash dieback pathogen *Hymenoscyphus fraxineus* reflects their phylogenetic history. *European Journal of Forest Research* 136:59-73
- Nikinmaa L, Lindner M, Cantarello E et al. (2020) Reviewing the Use of Resilience Concepts in Forest Sciences. *Current Forestry Reports* 6:61-80
- Nitsch H, Schramek J (2020) Grundlagen für eine Moorschutzstrategie der Bundesregierung. Synopse der Ergebnisse aus F+E-Vorhaben (FKZ: 3519 800 300) für das BfN. Institut für Ländliche Strukturforchung (IfLS) Frankfurt, 36 S
- Noss RF (1990) Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology* 4(4):355-364
- Nothdurft A, Wolf T, Ringeler A et al. (2012) Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest Ecology and Management* 279:97–111
- Nyland RD (2016) *Silviculture: concepts and applications*. Dritte Ausgabe. Waveland Press, Long Grove, IL, 679 S.
- O'Brien L, Schuck A, Fraccaroli C et al. (2021) Protecting old-growth forests in Europe - a review of scientific evidence to inform policy implementation. Final report. European Forest Institute, 104 S
- Odenhal-Kahabka J (2005) Handreichung Sturmschadensbewältigung. In: Landesforstverwaltung Baden-Württemberg und Landesforsten Rheinland-Pfalz (ed) Kompetenz-Netzwerk Klimawandel, Krisenmanagement und Transformation in Waldökosystemen (KoNeKKTiW). Verfügbar unter: <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/schadensmanagement/wind-schnee-und-eis/strategien-zur-sturmschadensbewaeltigung>. Letzter Zugriff am 27 Juli 2021
- OSTLUFT (2013) Ozonsymptome an Laubbäumen an ausgewählten Standorten in der Ostschweiz 2008 / 2009/ 2011. Überarbeitete Fassung, 37 S. Verfügbar unter <https://www.ostluft.ch>. Aufgerufen am 12 Sept 2020
- Pardee GL, Inouye DW, Irwin RE (2017) Direct and indirect effects of episodic frost on plant growth and reproduction in subalpine wildflowers. *Global Change Biology* 2:848-857
- Parmesan C et al. (1999) Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399:579–583
- Parmesan C, Yohe G (2003) A global coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37–42
- Paul C, Brandl S, Friedrich S et al. (2019) Climate change and mixed forests: how do altered survival probabilities impact economically desirable species proportions of Norway spruce and European beech? *Annals of Forest Science* 76(1):14
- Paul M, Hinrichs T, Janssen A, Schmitt HP et al. (2000) Konzept zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung forstlicher Genressourcen in der Bundesrepublik Deutschland. Sächsische Landesanstalt für Forsten [LAF] Pirna-Graupa (Hrsg), ISBN 3-932967-25-9, 66 S.
- Pautasso M, Dehnen-Schmutz K, Holdenrieder O et al. (2010) Plant health and global change - some implications for landscape management. *Biological Reviews* 85:729-755
- Pearce F (2016) Die neuen Wilden: Wie es mit fremden Tieren und Pflanzen gelingt, die Natur zu retten. Oekom, München ISBN 978-3-86581-768-6
- Pecchi M, Marchi M, Burton V et al. (2019) Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling* 411:108817
- Pellerin M, Said S, Richard E et al. (2010) Impact of deer on temperate forest vegetation and woody debris as protection of forest regeneration against browsing. *Forest Ecology and Management* 260:429-437
- Peñuelas J, Filella I (2001) Responses to a warming world. *Science* 294:793–795
- Pereira H et al. (2013) Essential Biodiversity Variables. *Science* 339:277-278
- Petercord R., Veit H, Delb H, Schröter H (2008) Forstinsekten im Klimawandel – alte Bekannte mit neuem Potenzial? *FVA-Einblick* 1:36-39
- Petersen R (2014) Waldbauliche Behandlung der Spätblühenden Traubenkirsche (*Prunus serotina* Ehrh.). *Forstarchiv* 86(4):116-117

- Petney TN, Pfäffle M, Skuballa J, Taraschewski H (2011) Literaturrecherche zum Thema Zecken und zeckenübertragene Krankheiten in Baden-Württemberg - Stand des Wissens. Karlsruher Institut für Technologie. 99 S.
- Petri AC, Wilson B, Koeser A (2019) Planning the urban forest: Adding microclimate simulation to the planner's toolkit. *Land Use Policy* 88:104117.
- Pettenella D, Vidale E, Da Re R, Lovrić M (2014) Multipurpose trees and non-wood forest products: challenges and opportunities for policy makers. *StarTree Deliverable 3.1*. [https://www.star-tree.eu/images/deliverables/WP3/D3%201-Int\\_trade\\_final.pdf](https://www.star-tree.eu/images/deliverables/WP3/D3%201-Int_trade_final.pdf) Letzter Zugriff am 6 Sept 2021
- Pfenninger M, Reuss F, Kiebler A et al. (2021) Genomic basis for drought resistance in European beech forests threatened by climate change. *eLife* 10: e65532
- Pfleiderer P, Menke I, Schlessner CF (2019) Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. *Climatic Change* volume 157:515–525
- Pfullmann A (2016) Das Forstschäden-Ausgleichsgesetz: Entstehung, Anwendung und Novellierung. Abschlussarbeit, TU Dresden, Institut für Forstökonomie und Forsteinrichtung, 46 S.
- Phillips JD, Marion DA (2004) Pedological memory in forest soil development. *Forest Ecology and Management* 188:363–380
- Pickett STA, White P (1985) *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Orlando, FL
- Pimm SL (1984) The complexity and stability of ecosystems. *Nature* 307:321-326
- Pinto JG, Reyers M (2017) Winde und Zyklogen. In: Brasseur G, Jacob D, Schuck-Zöller S (2017) *Klimawandel in Deutschland*. Springer Spektrum: 67-75
- Plieninger T, Bieling C, Fagerholm N et al. (2015) The role of cultural ecosystem services in landscape management and planning. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:28-33
- Plotkin M, Famolare L (eds) (1992) *Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products*. Washington, D.C.
- Pluskota B, Jöst A, Augsten X et al. (2016) Successful overwintering of *Aedes albopictus* in Germany. *Parasitol Res* 115:3245–3247
- Poeplau C, Don A, Vesterdal L et al. (2011) Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. *Glob Chang Biol* 17:2415–2427
- Pompe S et al. (2008) Climate and land use change impacts on plant distributions in Germany. *Biology Letters* 4(5):564-567
- Pompe S, Berger S, Bergmann J et al. (2011) Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. *BfN-Skripten* 304
- Potter C, Harwood T, Knight J, Tomlinson I (2011) Learning from history, predicting the future: the UK Dutch elm disease outbreak in relation to contemporary tree disease threats. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366(1573): 1966-1974.
- Pretzsch H et al. (2014) Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat Commun* 5:4967
- Pretzsch H et al. (2018) Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. *Forest Ecology and Management* 429:589-616
- Prietzl J, Bachmann S (2011) Verändern Douglasien Wasser und Boden? In: *LWF aktuell* (84)
- Prietzl J, Falk W, Renger B et al. (2020) Half a century of Scots pine forest ecosystem monitoring reveals long-term effects of atmospheric deposition and climate change. *Global Change Biology* 26:5796–5815
- Pröbstl-Haider U, Lund-Durlacher D, Olefs M, Prettentaler F (2021) *Tourismus und Klimawandel*. Springer Spektrum, Berlin
- Projektgruppe *Waldfunktionenkartierung der AG Forsteinrichtung* (2015) Leitfaden zur Kartierung der Schutz- und Erholungsfunktionen des Waldes. *Waldfunktionenkartierung (WFK)*. 73S.
- Puettmann KJ, Wilson S McG, Baker S et al. (2015) Silvicultural alternatives to conventional even-aged forest management - what limits global adoption? *Forest Ecosystems* 2:8
- Puhlmann H, Schmidt-Walter P, Hartmann P et al. (2019) Soil Water Budget and Drought Stress. In: Wellbrock N, Bolte A (eds) *Status and Dynamics of Forests in Germany*. *Ecological Studies (Analysis and Synthesis)* 237: 55-91
- Puhlmann H, Schmidt-Walter P, Hartmann P et al. (2017) Bodenwasserhaushalt und Trockenstress Bodenzustandserhebung (BZE) II. *AFZ-Der Wald* 2:40-42
- Purahong W, Wubet T, Krüger D, Buscot F (2018) Molecular evidence strongly supports deadwood inhabiting fungi exhibiting unexpected tree species preferences in temperate forests. *ISME Journal* 12(1):289-295
- Purkus A et al. (2020) Entwicklung der Rahmenbedingungen für das Bauen mit Holz in Deutschland: Eine Innovationssystemanalyse im Kontext der Evaluation der Charta für Holz 2.0. *Thüner Report* 78, Braunschweig
- Quadt V, Oitzinger G, Zsak K (2016) Management invasiver Baumarten im Nationalpark Donau-Auen, Österreich. In: Krumm F, Vitkova L (eds) *Eingeführte Baumarten in europäischen Wäldern: Chancen und Herausforderungen*. *European Forest Institute*: 434-440
- Rademacher J, Bayer S, Frieß H et al. (2018) 6. Erfahrungsbericht 2018 zu umweltbezogenen Nachhaltigkeitsindikatoren der BLAG KliNa an die Umweltministerkonferenz (UMK). *Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft BLAG KliNa* S. 74. Verfügbar unter <https://www.lanuv.nrw.de/liki>. Aufgerufen am 29 Juli 2021
- Ramsfield TD, Bentz BJ, Faccoli M et al. (2016) Forest health in a changing world: effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry* 89:245-252
- Randolph SE (2000) Ticks and Tick-borne Disease Systems in Space and from Space. *Advances in parasitology* 47:217-43
- Randolph SE, Asokliene L, Avsic-Zupanc T et al. (2008) Variable spikes in tick-borne encephalitis incidence in 2006 independent of variable tick abundance but related to weather. *Parasites & vectors*, 1(1):44
- Ratcliffe S, Wirth C, Jucker T et al. (2017) Biodiversity and ecosystem functioning relations in European forests depend on environmental context. *Ecology Letters* 20:1414-1426
- Rathmann J, Beck C, Flutura S et al. (2020) Towards quantifying forest recreation: Exploring outdoor thermal physiology and human well-being along exemplary pathways in a central European urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49: 126622
- Rau, H, Bachinger M (2020) *Waldbasierter Gesundheitstourismus. Touristische Angebote auf Basis gesunder Walderlebnisse entwickeln*, in: Rhodius, R., Bachinger, M., Koch, B. (Hrsg.): *Wildnis, Wald, Mensch. Forschungsbeiträge zur Entwicklung einer Nationalparkregion am Beispiel des Schwarzwalds*, Ökom Verlag, München: 35-56

- Rauthe M, Kunz M, Kottmeier C (2010) Changes in wind gust extremes over Central Europe derived from a small ensemble of high resolution regional climate models. *Meteorologische Zeitschrift* 19:299–312
- Rajoo KS, Karam DS, Abdullah MZ (2020) The physiological and psychosocial effects of forest therapy: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening* 54:126744
- Reading CJ (2007) Linking global warming to amphibian declines through its effects on female body condition and survivorship. *Oecol* 151:125–131
- Redick CH, Jacobs DF (2020) Mitigation of Deer Herbivory in Temperate Hardwood Forest Regeneration: A Meta-Analysis of Research Literature. *Forests* 11(11)
- Reed TE, Waples RS, Schindler DE et al. (2010) Phenotypic plasticity and population viability: the importance of environmental predictability. *Proc R Soc B* 277: 3391–3400
- Rehfuess K (1990) Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. *Pareys Studentexte* 29
- Reif A, Brucker U, Kratzer R, Schmiedinger A, Bauhus J (2010) Waldbewirtschaftung in Zeiten des Klimawandels - Synergien und Konfliktpotenziale zwischen Forstwirtschaft und Naturschutz. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 42(9):261–264
- Reise J, Urrutia C, Böttcher H, und Hennenberg K (2020) Literaturstudie zum Thema Wasserhaushalt und Forstwirtschaft. Studie für den Naturschutzbund Deutschland. Oeko-Institut e.V.
- Reitz J, Schluse M, Roßmann J, (2019) Industry 4.0 beyond the Factory: An Application to Forestry. Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg:107–116.
- Rennenberg H, Seiler W, Matyssek R et al. (2004) Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *Allg. Forst- u J-ztg* 175:210–224
- Riedel T, Stümer W, Hennig P et al. (2019) Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke. *AFZ-DerWald* 14:14–18
- Riek W, Talkner U, Dammann I et al. (2016) Waldernährung. In: Wellbrock N, Bolte A, Flessa H (eds) *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 43, Braunschweig
- Rigling A, Bigler C, Eilmann B et al. (2013) Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biology* 19:229–240
- Rigling A (2021) Natürliche Prozesse – ungewisse Zukunft? Vortrag VFS-Webinar Verein für Standortkunde am 15 April 2021 <https://www.vfs-freiburg.de/aktuelles/vfs-webinar-2021/>. Letzter Zugriff 29 Jul 2021
- Ringgaard R; Herbst M, Friborg T (2012) Partitioning of forest evapotranspiration. The impact of edge effects and canopy structure. *Agricultural and Forest Meteorology* 166–167:86–97
- Risse M, Weber-Blaschke G, Richter K, (2017b) Resource efficiency of multifunctional wood cascade chains using LCA and exergy analysis, exemplified by a case study for Germany. *Resources, Conservation and Recycling* 126:141–152
- RKI - Robert-Koch Institut (2020) Infektionsepidemiologisches Jahrbuch meldepflichtiger Krankheiten für 2019. Berlin. Verfügbar unter [https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/Jahrbuch/Jahrbuch\\_2019.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/Jahrbuch/Jahrbuch_2019.pdf?__blob=publicationFile). Letzter Zugriff 29 Jul 2021
- Robert S, Pröbstl-Haider U, Prettenthaler F et al. (2021) Outdooraktivitäten und damit zusammenhängende Einrichtungen im Winter. In: Pröbstl-Haider U, Lund-Durlacher D, Olefs M, Prettentaler F (eds) *Tourismus und Klimawandel*. Springer Spektrum: 109–122
- Robson TM, Rodríguez-Calcerrada J, Sánchez-Gómez D, Aranda I (2009) Summer drought impedes beech seedling performance more in a sub-Mediterranean forest understory than in small gaps. *Tree Physiology* 29: 249–259.
- Rödder D, Schulte U (2010) Amphibien und Reptilien im anthropogenen Klimawandel. Was wissen wir und was erwarten wir? *Zeitschrift für Feldherpetologie* 17(1):1–22
- Roeder A (1991) Zum Risikomanagement in Forstbetrieben. *Forst u Holz* 46:533–535
- Rohde M, Langer G, Hurling R, Plašil P (2019) Waldschutzsituation 2018 in Nordwestdeutschland. *AFZ-Der Wald* 74(7):38–41
- Roloff A, Grundmann B (2009) Bewertung von Waldbaumarten anhand der KlimaArtenMatrix. *AFZ/Der Wald* 63(20):1086–1088
- Roques A, Rabitsch W, Rasplus JY et al. (2009) Alien terrestrial invertebrates of Europe. In: Drake, J (ed) *Handbook of Alien Species in Europe*. Springer: 63–79
- Rosenkranz L (2019) Wirtschaftsbereich Forstwirtschaft weiter rückläufig: Ergebnisse der forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung 2017: Produktionswert und Nettounternehmensgewinn geringer. *Holz Zentralbl* 145(25):528
- Rosenzweig C et al. (2007) Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: Parry ML et al. (eds) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge: 79–131
- Rösner S, Mussard-Forster E, Lorenc T, Müller J (2014) Recreation shapes a “landscape of fear” for a threatened forest bird species in Central Europe. *Landscape Ecology* 29:55–66
- Royer-Tardif S, Bauhus J, Doyon F et al. (2021) Revisiting the Functional Zoning Concept Under Climate Change to Expand the Portfolio of Adaptation Options. *Forests* 12:273
- Rulle M, Hoffmann W, Kraft K (2010) Erfolgsstrategien im Gesundheitstourismus. Analyse der Erwartungen und Zufriedenheit von Gästen, Berlin.
- Rupp J, Knoefel J (2015) Waldbewirtschaftung und Klimawandel - Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung – IÖW
- Rüter S (2017) The Contribution of the Material Wood Use to Climate Protection - the WoodCarbonMonitor Model, TU München, Dissertation, 270 S.
- Rüter S, Werner F, Forsell N et al. (2016) Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products. *Thünen Report* 42. Perspective, 2030 Braunschweig, 147 S.
- Ryan MG, Yoder BJ (1997) Hydraulic limits to tree height and tree growth. *Bioscience* 47(4):235–242
- Sacande M, Parfondry M (2018) Non-timber forest products: from restoration to income generation. *FAO: Rom*, 44 S.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU (2012) *Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt*. Berlin. Verfügbar unter: [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2012\\_06\\_04\\_Umweltgutachten\\_HD.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile). Aufgerufen am 30 Juli 2020

- Saha S, Kohnle U, Brang P et al. (2012) Growth and quality of young oaks (*Quercus robur* and *Q. petraea*) grown in cluster plantings in Central Europe: a weighted meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 283:106–118
- Salinger MJ (2005) Climate Variability and Change: Past, Present and Future - An Overview. *Climatic Change* 70:9-29
- Santini A, Ghelardini L, De Pace C et al. (2013) Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe. *New Phytologist* 197:238-250
- Sato CF, Wood JT, Lindenmayer DB (2013) The effects of winter recreation on alpine and subalpine fauna: a systematic review and meta-analysis, *PLoS One*, 8 Article e64282
- Sauter PA, Möllmann TB, Anastasiadis F et al. (2016) To insure or not to insure? Analysis of foresters' willingness-to-pay for fire and storm insurance. *Forest Policy and Economics* 73:78-89
- Schaber-Schoor G (2007) Die Wasserrahmenrichtlinie der EU: Ziele und Stand der Umsetzung in Baden-Württemberg. FVA-einblick 1. Verfügbar unter <https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/naturschutz/gewasser/eu-wasserrahmenrichtlinie-ziele-und-stand-der-umsetzung>. Letzter Zugriff am 27 Juli 2021
- Schall et al. (2018) The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests. *Journal of Applied Ecology* 55:267-278
- Schär C, Vidale P, Lüthi D et al. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427:332–336
- Scheifinger H, Menzel A, Koch E, Peter C (2003) Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theor Appl Climatol* 74:41–51
- Scharnweber T, Smiljanic M, Cruz-García R et al. (2020) Tree growth at the end of the 21st century - the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. *Environmental Research Letters* 15:074022
- Schleuning M et al. (2016) Ecological networks are more sensitive to plant than to animal extinction under climate change. *Nature Communications*. doi: 10.1038/ncomms13965
- Schmithüsen F, Kazemy Y, Seeland K (1997) Perceptions et attitudes de la population envers la forêt et ses prestations sociales. Analyse des enquêtes sélectionnées et des articles dans les principales revues forestières de l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse entre 1960 et 1995. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 148(1):1–36
- Schraml U (2009) Erholung und Tourismus als Themen einer Zukunftsstrategie für die Waldnutzung in Deutschland. In: Seintsch B., Dieter M (eds) (2009) *Gesamtwaldstrategie 2020: Tagungsband des BMELV-Symposiums, 10.-11.Dez. 2008*, Berlin. *Landbauforschung - vTI agriculture and forestry research, Sonderheft* 327
- Schraml U (2019) Ein Forschungsschwerpunkt mit Zukunft: Erholung, Sport und Gesundheit im Wald. FVA-einblick 1:4-5
- Schubert R (1991) *Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Schueler S, George JP, Karanitsch-Ackerl S et al. (2021) Evolvability of Drought Response in Four Native and Non-native Conifers: Opportunities for Forest and Genetic Resource Management in Europe. *Frontiers in Plant Science* 12, 648312
- Schuh A, Immich G (2013) *Kriterienkatalog für Kur- Heilwälder*. Im Auftrag des Bäderverbandes von Mecklenburg-Vorpommern. Ludwig-Maximilians-Universität, München
- Schuh A, Immich G (2019) *Waldtherapie – das Potenzial des Waldes für Ihre Gesundheit*. Springer, Berlin
- Schuldt B, Buras A, Arend M et al. (2020) A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology* 45:86-103.
- Schulze ED, Hartmann H, Lambert S, Weber U (2020) Folge von Spätfrostschäden von Buchen in montanen Lagen. *AFZ – Der Wald* 18:46-48
- Schütz JP, Götz M, Schmid W, Mandallaz D (2006) Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research* 125(3):291-302.
- Schwarz J, Skiadaresis G, Kohler M et al. (2020) Quantifying growth responses of trees to drought - a critique of commonly used resilience indices and recommendations for future studies. *Current Forestry Reports* 6:185–200
- Schweiger O, Settele J, Kudrna O et al. (2008) Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology* 89:3472-3479
- Scott WA, Pitthart D, Adamson JK (2008) Long-Term United Kingdom Trends in the breeding phenology of the common frog, *Rana temporaria*. *Journal for Herpetology* 42:89-96
- Seibold S, Bässler C, Brandl R et al. (2016) Microclimate and habitat heterogeneity as the major drivers of beetle diversity in dead wood. *Journal of Applied Ecology* 53:934-943
- Seibold S, Gossner MM, Simons NK et al. (2019) Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574:671-674
- Seidl R, Klonner G, Rammer W et al. (2018) Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe's forests. *Nature Communications* 9(1):1-10
- Seidl R, Schelhaas M-J, Lexer MJ (2011) Unraveling the drivers of in- tensifying forest disturbance regimes in Europe. *Glob Change Biol* 17: 2842–2852
- Seidl R, Schelhaas MJ, Rammer W, Verkerk PJ (2014) Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat Clim Change* 4:806–810
- Seidl R, Müller J, Hothorn T, Bässler C et al. (2016) Small beetle, large-scale drivers: How regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle. *Journal of Applied Ecology* 53:530–540
- Seidl R, Thom D, Kautz M et al. (2017) Forest disturbances under climate change. *Nature climate change* 7(6):395-402
- Seidl R, Klonner G, Rammer W et al. (2018) Invasive alien pests threaten the carbon stored in Europe's forests. *Nature Communications* 9(1):1–10
- Seidl R, Albrich K, Thom D, Rammer W (2018) Harnessing landscape heterogeneity for managing future disturbance risks in forest ecosystems. *Journal of Environmental Management* 209: 46–56
- Seidl R, Jentsch A, Wohlgemuth T, (2019a) Resilienz gegenüber Störungen. In: Wohlgemuth T, Jentsch A, Seidl R (eds) *Störungsökologie*. Haupt Verlag: 91-107
- Seidl R, Netherer S, Thaler T (2019b) Risikomanagement im Kontext von Störungen. In: Wohlgemuth T, Jentsch A, Seidl R (eds) *Störungsökologie*. Haupt Verlag: 337-354
- Seintsch B, Englert H, Dieter M (2020) Kalamitäten führen zu forstlichem „Rekordergebnis“. Ergebnisse der Forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung 2018: Großer Produktionswert und hoher Unternehmensgewinn. *Holz-Zentralblatt* 146(27):506-507



- Seintsch B, Englert H, Neitzel C (2017) Vergleich einer Hochrechnung des TBN-Forst auf ASE- und BWI-Basis. *AFZ Wald* 72(23):11-13
- Senf C, Seidl R (2018) Natural disturbances are temporally synchronized but spatially diverse in the temperate forests of Europe. *Global Climate Change* 24:1201-1211
- Seymour RS, Hunter ML Jr. (1992) *New Forestry in Eastern Spruce-Fir Forests: Principles and Applications to Maine*. Maine Agricultural and Forest Experimental Station 716, Orono, Maine
- Sheppard S, Picard P (2006) Visual-quality impacts of forest pest activity at the landscape level: a synthesis of published knowledge and research needs. *Landsc Urban Plan* 77(4):321-342
- Shimadzu H, Dornelas M, Henderson PA, Magurran AE (2013) Diversity maintained by seasonal variation in species abundance. *BMC Biology* 11:98
- Simons NK, Felipe-Lucia MRF, Schall P et al. (2020) National Forest Inventories capture the multifunctionality of managed forests in Germany. *Forest Ecosystems* 8(5)
- SINUS Markt- und Sozialforschung Institut, YouGov (2021) Die Deutschen sind sehr besorgt um den Zustand der Wälder – aber engagieren sich bisher kaum im Waldschutz - SINUS-Studie zum Internationalen Tag des Waldes (21.März) in Kooperation mit YouGov (in Presse) Verfügbar unter [https://www.sinus-institut.de/fileadmin/user\\_data/sinus-institut/Bilder/news/Tag\\_des\\_Waldes/Presstext\\_und\\_Grafiken\\_Internationaler\\_Tag\\_des\\_Waldes\\_SINUS-Institut\\_YouGov.pdf](https://www.sinus-institut.de/fileadmin/user_data/sinus-institut/Bilder/news/Tag_des_Waldes/Presstext_und_Grafiken_Internationaler_Tag_des_Waldes_SINUS-Institut_YouGov.pdf). . Letzter Zugriff 29 Jul 2021
- Skiaadesis G, Schwarz J A, Stahl K, Bauhus J (2021) Groundwater extraction reduces tree vitality, growth and xylem hydraulic capacity in *Quercus robur* during and after drought events. *Scientific Reports* 11:5149
- Smidt S, Bolhär-Nordenkamp H, Herman F (2007) Das Ozonrisiko für österreichische Fichtenwälder. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 1:3–35
- Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D et al. (eds) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, UKCambridge University Press, Cambridge: 709-754
- Sohn JA, Kohler M, Geßler A, Bauhus J (2012) Interactions of thinning and stem height on the drought response of radial stem growth and isotopic composition of Norway spruce (*Picea abies*). *Tree Physiology* 32(10):1199-1213
- Sohn JA, Saha S, Bauhus J (2016) Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 380:261–273
- Sohoulande Djebou DC, Singh VP (2016) Impact of climate change on the hydrologic cycle and implications for society. *Environment and Social Psychology* 1(1):36–49
- Soliman T, Mourits MC, van der Werf W et al. (2012) Framework for modelling economic impacts of invasive species, applied to pine wood nematode in Europe. *PLoS One* 7(9):e45505
- Sollars ES, Harper AL, Kelly LJ et al. (2017) Genome sequence and genetic diversity of European ash trees. *Nature*, 541(7636):212-216
- Sommerfeld A, Senf C, Buma B et al. (2018) Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome. *Nature Communications* 9:4355
- Sousa-Silva R, Ponette Q, Verheyen K et al. (2016) Adaptation of forest management to climate change as perceived by forest owners and managers in Belgium. *Forest Ecosystems* 3(1): 1-11
- Sparks TH, Jaroszewicz B, Krawczyk M, Tryjanowski P (2009) Advancing phenology in Europe's last lowland primeval forest: non-linear temperature response. *Climate Research* 39:221–226
- Speidel G (1984): *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*, 2. Auflage Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin 226 S.
- Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007) Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarien B1, A1B und A2. Projektbericht im Rahmen des F+E Vorhabens 204 41 138 "Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland". Mitteilungen des Umweltbundesamtes. Dessau
- Staatsbetrieb Sachsenforst (2013) Verkehrssicherungspflicht im und am Wald. *Waldpost*: 14-19
- StBA (Statistisches Bundesamt) (2021) Außenhandel nach Waren und Ländern. Fachserie 7, Reihe 2, Wiesbaden
- Stearns SC, Koella JC (1986) The Evolution of Phenotypic Plasticity. In: *Life-History Traits: Predictions of Reaction Norms for Age and Size at Maturity*. *Evolution* 40(5):893–913
- Steinparzer M (2020) Catching pollen and washing leaves. <https://www.dr-forest.eu/field-work/catching-pollen-and-washing-leaves/>.. Letzter Zugriff 25 Jul 2021
- Stenlid J, Oliva J, Boberg JB, Hopkins AJ (2011) Emerging diseases in European forest ecosystems and responses in society. *Forests* 2(2):486-504
- Steven R, Pickering C, Castley JG (2011) A review of the impacts of nature based recreation on birds. *J. Environ. Manag.*, 92:2287-2294
- Stiller J, Ohlhoff M (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“. Thünen Working Paper 177. Verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/infotehk/publikationen/thuenen-working-paper>. Letzter Zugriff am 27 Juli 2021
- Stölb, W (2005) *Forest aesthetics—Over forestry, nature protection and the people soul*. Remagen: Publishing house boiler
- Storkey J, Stratonovitch P, Chapman DS, Vidotto F, Semenov MA (2014). A process-based approach to predicting the effect of climate change on the distribution of an invasive allergenic plant in Europe. *PLOS One* 9(2): e88156
- Strasdas W (2006) The global market for nature-based tourism. *Münchner Studien zur Sozial- und Wirtschaftsgeographie*, 45:55–63
- Sturrock RN, Frankel SJ, Brown AV et al. (2011) Climate change and forest diseases. *Plant Pathol* 60:133–149
- Stutz KP, Kaiser K, Wambsgans J et al. (2019) Lignin from white-rotted European beech deadwood and soil functions. *Biogeochemistry* 145:81–105
- Sumilo D, Asokliene, L, Bormane A et al. (2007) Climate change cannot explain the upsurge of tick-borne encephalitis in the Baltics. *PLoS ONE*, 2(6), e500

- Sutmöller J, Hentschel S, Hansen J, Meeseburg H (2011) Coupled forest growth-hydrology modelling as an instrument for the assessment of effects of forest management on hydrology in forested catchments. *Adv Geosci* 27:149–154
- Szczygieł R, Kwiatkowski M, Kofakowski B (2016) Zagrożenie pożarowe Puszczy Białowieskiej [Forest Fire Risk at Białowieża Primeval Forest]. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 43:143-160
- Tainio A et al. (2016) Conservation of grassland butterflies in Finland under a changing climate. *Regional Environmental Change* 16:71-74
- Talkner U, Meiwes KJ, Potočić N et al. (2015) Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science* 72:919–928
- Tang B, Zhao X, Zhao W (2018) Local Effects of Forests on Temperatures across Europe. *Remote Sensing* 10(4):529
- Taverna R, Hofer P, Werner F, Kaufmann E und Thürig E (2007) CO<sub>2</sub>-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft - Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelt-Wissen Nr. 0739, Report No: Umweltwissen Nr. 0739
- Tedersoo, L, Drenkhan R, Anslan S et al. (2019) High-throughput identification and diagnostics of pathogens and pests: Overview and practical recommendations. *Molecular Ecology Resources* 19:47-76
- Thackeray SJ, Henrys PA, Hemming D et al. (2016) Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. *Nature* 535:241–245
- Thaler S, Eitzinger J, Trnka M, Dubrovsky M (2012) Impacts of climate change and alternative adaptation options on winter wheat yield and water productivity in a dry climate in Central Europe. *The Journal of Agricultural Science* 150(5):537
- Thom D, Seidl R (2016) Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews* 91:760-781
- Thomas CD (2011) Translocation of species, climate change, and the end of trying to recreate past ecological communities. *Trends in Ecology & Evolution* 26:216-221
- Thomas CD, Cameron A, Green RE et al. (2004) Extinction risk from climate change. *Nature* 427(6970):145-148
- Thomas F (2018) Verbreitung von Pflanzen und Pflanzengemeinschaften, Grundzüge der Pflanzenökologie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 197-258
- Thommen JP, Achleitner AK (2009) Allgemeine Betriebswirtschaftslehre – Umfassende Einführung aus management-orientierter Sicht, 6. Aufl., Gabler Wiesbaden, 1102 S.
- Thompson I, Mackey B, McNulty S, Mosseler A (2009) Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series 43.
- Thuiller W, Lavergne S, Roquet C et al. (2011) Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* 470(7335):531-534
- Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB et al. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102(23):8245-8250
- Thünen-Institut (2018) Gesamtholzbilanz. <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/holzbilanzen/gesamtholzbilanz/>. . Letzter Zugriff 31 Jul 2021
- Thünen-Institut (2020a) Holzeinschlag und Rohholzverwendung. <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>. Aufgerufen am 3 Sept 2020
- Thünen-Institut (2020b) Clusterstatistik Forst & Holz. <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/clusterstatistik-forst-holz>. Aufgerufen am 3 Sept 2020
- Thünen-Institut (2020c) Gesamtholzbilanz. <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/holzbilanzen/gesamtholzbilanz/>. . Letzter Zugriff 31 Jul 2021
- Thurm EA, Brandl S, Fischer H et al. (2019) Trockenheits- und Hitzeresistenz der wichtigsten mitteleuropäischen Nadelbaumarten. In: Klädtke J, Kohnle U (eds) Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 03.–05. 06. 2019, Zwiesel/ Bayern: 73-85
- Thurm EA, Hernandez L, Baltensweiler A et al. (2018) Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology and Management*, 430:485-497
- Tobin PC, Parry D, Aukema BH (2014) The Influence of Climate Change on Insect Invasions in Temperate Forest Ecosystems. In: Fenning T (eds) Challenges and Opportunities for the World's Forests in the 21st Century. *Forestry Sciences* 81:267-293
- Tomczyk AM, Ewertowski M (2013) Planning of recreational trails in protected areas: Application of regression tree analysis and geographic information systems. *Applied Geography* 40:129-139
- Trotsiuk V, Hartig F, Cailleret M et al. (2020). Assessing the response of forest productivity to climate extremes in Switzerland using model-data fusion. *Global Change Biology* 26(4):2463-2476
- Trujillo-Moya C, George JP, Fluch S et al. (2018) Drought Sensitivity of Norway Spruce at the Species' Warmest Fringe: Quantitative and Molecular Analysis Reveals High Genetic Variation Among and Within Provenances. *G3: Genes|Genomes|Genetics* 8, 1225-1245
- Trumbore S, Brando P, Hartmann H (2015) Forest health and global change. *Science* 349:814-818
- Tyrväinen L, Väänänen H (1998) The economic value of urban forest amenities: an application of the contingent valuation method, *Landscape and Urban Planning*, 43(1–3):105-118
- UBA - Umweltbundesamt (2010) Klimawandel und Gesundheit. Welche Probleme verursachen Wärme liebende Schadorganismen? Abschlussbericht. Internationales UBA/BMU-Fachgespräch: 09. und 10. November 2009. Dessau-Roßlau
- UBA - Umweltbundesamt (2014) Nationaler Inventarbericht Deutschland. Umweltbundesamt
- UBA - Umweltbundesamt (2015) Monitoringbericht 2015 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Umwelt Bundesamt, Dessau, Eigenverlag, 256 S.
- UBA - Umweltbundesamt (2015) Die Asiatische Tigermücke *Aedes albopictus*. Fachinformation. Verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/flyer\\_die\\_asiatische\\_tigermuecke.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/flyer_die_asiatische_tigermuecke.pdf). . Letzter Zugriff 29 Jul 2021
- UBA - Umweltbundesamt (2016) Eichenprozessionsspinner. Antworten auf häufig gestellte Fragen. Hintergrund 75. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/dokumente/faq\\_eichenprozessionsspinner\\_08\\_16.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/dokumente/faq_eichenprozessionsspinner_08_16.pdf). . Letzter Zugriff 29 Jul 2021

- 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](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf). . Letzter Zugriff 27 Jul 2021
- UBA - Umweltbundesamt** (2019) Projektionsbericht 2019 für Deutschland – Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politik-szenarien IX“), ISSN 1862-4359
- UBA - Umweltbundesamt** (2020a) Waldbrände. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende>. . Letzter Zugriff 4 Jul 2021
- UBA - Umweltbundesamt** (2020b) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt (ed) Climate Change 22, Dessau-Roßlau
- UBA - Umweltbundesamt** (2021) Erneuerbare Energien – Vermiedene Treibhausgase. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-energien-vermiedene-treibhausgase#undefined>. Letzter Zugriff 6. Jul 2021
- UN - United Nations** (2015) Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. United Nations. Verfügbar unter [https://www.preventionweb.net/files/43291\\_sendaiframeworkfordrren.pdf](https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf). Aufgerufen am 28 Juli 2021
- Usbeck T, Wohlgemuth T, Pfister C, Bürgi A et al.** (2010a) Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007 *Agr Forest Meteorol* 150:47–55
- Vacik H, Hale M, Spiecker H et al.** (eds) (2020) Non-wood forest products in Europe. Ecology and management of mushrooms, tree products, understory plants and animal products. Outcomes of the COST Action FP1203 on European NWFPs. Books on Demand GmbH, Norderstedt
- Valladares F, Zaragoza-Castells J, Sánchez-Gómez D et al.** (2008). Is shade beneficial for Mediterranean shrubs experiencing periods of extreme drought and late-winter frosts? *Annals of Botany* 102: 923–933
- van Meerbeek K, Jucker T, Svenning JC** (2021) Unifying the concepts of stability and resilience in ecology. *Journal of Ecology*
- Van Miegroet H** (2019): To lead or to follow? How should wildland soil scientists prepare for future challenges? In: Soil Science Society of America International Soils Meeting. SSSA. Verfügbar unter <https://scisoc.confex.com/scisoc/2019sssa/meetingapp.cgi/Paper/1032110904>
- Vanhanen H, Veteli TO, Paivinen S et al.** (2007) Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth—a model study. *Silva Fennica* 41(4):621
- Vautard R, van Aalst M, Boucher O et al.** (2020) Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environ Res Lett* 15:094077. doi: 10.1088/1748-9326/aba3d4
- Visser ME** (2016) Interactions of climate change and species. *Nature* 535:236-237
- Vitt P, Havens K, Kramer AT et al.** (2010) Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation* 143:18-27
- Volz HA, Immich G, Schuh A** (2018) Kur-/Heiwälder: eine Chance für Waldeigentümer. *Allg Forstzeitschrift Waldwirtschaft Umweltvorsorge* 16:10–13
- von Arnim G** (2020) Finanzierung in privaten Forstbetrieben bei Kalamität, Masterarbeit Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Universität Göttingen
- von Arx G, Graf Pannatier E, Thimonier A, Rebetez M** (2013) Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *Journal of Ecology* 101:1201–1213
- von dem Bussche J, Spaar R, Schmid H, Schröder B** (2008) Modelling the recent and potential future spatial distribution of the Ring Ouzel (*Turdus torquatus*) and Blackbird (*T. merula*) in Switzerland. *J Ornithol* 149:529-544
- von Teuffel K, Sauter UH, Delb H et al.** (2014): Rindenschäden durch Holzernte: ein Forschungspaket der FVA. *AFZ-DerWald* 24/2014: 10-11
- Vor T, Spellmann H, Bolte A, Ammer C** (Hrsg.) (2015) Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten. Baumartenportraits und naturschutzfachliche Bewertung. Göttinger Forstwissenschaften, Band 7
- Wagner S, Herrmann I, Dempe S** (2010) Spatial optimization for dispersion of remnant trees in seed-tree cuttings and retention-tree stands of Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25:432-445
- Walker B, Holling CS, Carpenter SR, Kinzig AP** (2004) Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society* 9(2):5
- Walther GR, Burga CA, Edwards PJ** (eds) (2001) Finger-prints of Climate change. Kluwer Academic/Plenum Publ, New York, 329 S.
- Walther GR, Gritti ES, Berger S et al.** (2007) Palms tracking climate change. *Global Ecology and Biogeography* 16:801-809
- Wang, D, Park, S, Fesenmaier, DR** (2012) The Role of Smart-phones in Mediating the Touristic Experience. *Journal of Travel Research* 51(4): 371–387
- Waring RH, Landsberg JJ, Williams M** (1998) Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiology*, 18(2):129-134
- Warscher M, Wagner S, Marke T et al.** (2019) A 5 km Resolution Regional Climate Simulation for Central Europe: Performance in High Mountain Areas and Seasonal, Regional and Elevation-dependent Variations. *Atmosphere* 10(11):682
- WaSEG - Bundesplattform Wald- Sport, Erholung, Gesundheit** (2019) Vereinfachung der Rechtslage zum Betretensrecht des Waldes und Leistungen der Waldwirtschaft für Sport, Erholung und Gesundheit und deren Finanzierungsmöglichkeiten. Impulse und Empfehlungen. Verfügbar unter [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Wald/Impulse%20und%20Empfehlungen%20WaSEG.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Wald/Impulse%20und%20Empfehlungen%20WaSEG.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Aufgerufen 20 Jul 2021
- WBAE - Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz, WBW - Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik** (2016) Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz und des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Verfügbar unter [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten\\_2016.html](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten_2016.html). Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- WBGR - Wissenschaftlicher Beirat für Biodiversität und genetische Ressourcen, WBW - Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik** (2020) Wege zu einem effizienten Waldnaturschutz in Deutschland. Stellungnahme Januar 2020.

- WBW - Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik** (2018) Betreuung und Förderung im kleinstrukturierten Privat- und Körperschaftswald, Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Verfügbar unter [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/StellungnahmeWBW-KleinstrukturierterWald.html](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/StellungnahmeWBW-KleinstrukturierterWald.html). Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- WBW – Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik** (2019) Risikoversorgung und der Umgang mit Extremereignissen in der Forstwirtschaft, Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik (WBW) beim BMEL, Berlin, 9 S.
- WBW - Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik, Wissenschaftlicher Beirat Biodiversität und Genetische Ressourcen** (2020): Wege zu einem effizienten Waldnaturschutz in Deutschland. Stellungnahme. BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin
- WBW - Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik** (2020) Eckpunkte der Waldstrategie. Verfügbar unter [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/stellungnahme-waldstrategie-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/stellungnahme-waldstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1). Letzter Zugriff 27 Jul 2021
- WBW - Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik** (2021) Geplante Änderung des Klimaschutzgesetzes riskiert Reduktion der potenziellen Klimaschutzbeiträge von Wald und Holz. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik vom 22. Juni 2021. Verfügbar unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/klimaschutzgesetz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/klimaschutzgesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Letzter Zugriff 30 Jul 2021
- Webber BL, Scott JK, Didham RK** (2011) Translocation or bust! A new acclimatization agenda for the 21st century? *Trends in Ecology & Evolution* 26(10):495-496
- Weber-Blaschke G** (2019) Nachhaltige Forst- und Holzwirtschaft als Basis der Bioökonomie. In: Bayerische Akademie der Wissenschaften (ed) Ökologie und Bioökonomie. Neue Konzepte zur umweltverträglichen Nutzung natürlicher Ressourcen. Rundgespräche Forum Ökologie 48:31-46. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München
- Weber-Blaschke G, Muys B** (2019) Bioeconomy – potentials for innovation and sustainability regarding wood utilisation and forest management. In: Krumm F, Schuck A, Rigling A (eds) How to balance forestry and biodiversity conservation – A view across Europe. European Forest Institute (EFI), Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmendorf: 88-107
- Weed AS, Ayres MP, Hicke JA** (2013) Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests. *Ecol Monogr* 83:441–470
- Weimar H** (2018) Holzbilanzen 2015 bis 2017 für die Bundesrepublik Deutschland und Neuberechnung der Zeitreihe der Gesamtholzbilanz ab 1995. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper 101, Braunschweig
- Weingarten P, Bauhus J, Arens-Azevedo U et al.** (2016) Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 222
- Weinbrenner H, Breithut J, Hebermehl W et al.** (2021) "The Forest Has Become Our New Living Room" – The Critical Importance of Urban Forests During the COVID-19 Pandemic, *Frontiers in Forests and Global Change*, 4:68
- Weingarten P, Bauhus J, Arens-Azevedo U et al.** (2016) Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 222
- Wellbrock N, Bolte A** (eds) (2020) Status and Dynamics of Forests in Germany. Results of the National Forest Monitoring. Springer Ecological Studies 237
- Wellbrock N, Erik G, Stürmer W et al.** (2014): Wälder in Deutschland speichern Kohlenstoff. *AFZ-Der Wald* 18:38-39
- Wermelinger B** (2004) Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* - a review of recent research. *Forest Ecology and Management* 202:67-82
- Wermelinger B, Epper C, Kenis M et al.** (2012) Emergence patterns of univoltine and bivoltine *Ips typographus* (L.) populations and associated natural enemies. *Journal of Applied Entomology* 136(3):212-224
- Wermelinger B** (2004) Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* - a review of recent research. *Forest Ecology and Management* 202(1-3):67–82
- Werner F, Richter K** (2007) Wooden Building Products in Comparative LCA. A Literature Review. *Int J LCA* 12:470-479
- WHO – World Health Organisation** (2003) Phenology and Human Health: Allergic Disorders. Report EUR/03/5036791. Health and global environmental change
- WHO - World Health Organization** (2017) Global vector control response 2017–2030. Verfügbar unter <https://www.who.int/vector-control/publications/global-control-response/en>. Letzter Zugriff 29 Jul 2021
- WHO und CBD - World Health Organization and Secretariat of the Convention on Biological Diversity** (2015) Connecting Global Priorities: Biodiversity and Human Health A State of Knowledge Review. Verfügbar unter <https://www.who.int/publications/i/item/connecting-global-priorities-biodiversity-and-human-health>. Letzter Zugriff 6 Sept 2021
- Wick M, Richter E, Waldow F et al.** (2018) On the state of implementation of the provisions in the National Action Plan for the Sustainable Use of Plant Protection Products in the field of minor uses. *Journal für Kulturpflanzen* 70(7):218-225
- Wilkes-Allemann J, Pütz M** (2017) Governance von Freizeit und Erholung im Wald am Beispiel von Mountainbike-Trails. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 168 (6): 321–328
- Willis KJ, Birks HJB** (2006) What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. *Science*, 314(5803):1261-1265.ge.
- Willis SG et al.** (2009) Assisted colonization in a changing climate: a test-study using two UK butterflies. *Conservation Letters* 2:45-51
- Winter S, Lechner M, Köhler C et al.** (2019) Bauen mit Weitblick – Systembaukasten für den industrialisierten sozialen Wohnungsbau, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Wistoft K** (2013) The desire to learn as a kind of love: gardening, cooking, and passion in outdoor education, *Journal of Adventure Education and Outdoor Learning* 13(2):125-141
- Wördehoff R, Fischer C, Spellmann H** (2017) II. Cluster- und Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Eigenverlag, Göttingen
- Wördehoff R, Spellmann H, Evers J, Nagel J** (2011) Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 6, Universitätsverlag Göttingen
- Wohlgemuth T, Jentsch A, Seidl R** (2019) Störungsökologie. Haupt Verlag, Bern
- Wolff M** (2005) Tourismus. In: KLARA – Klimawandel-Auswirkungen, Risiken, Anpassung. PIK Report, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 99:107-131

- Wolfslehner B, Prokofieva I, Mavsar R** (eds) (2019) Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees. What Science Can Tell Us 10. European Forest Institute
- Wong JLG, Wiersum F** (2019) A spotlight on NWFP in Europe. In: Wolfslehner B, Prokofieva I, Mavsar R (eds) Non-wood forest products in Europe: seeing the forest around the trees. J What Science Can Tell Us 10. European Forest Institute: 11-30
- Wong D, Huntley S, Lehmann B, Zeeuwen P** (2013) Sawmill wood dust sampling, analysis and explosibility. Final Report: 301007168. FPInnovations
- Yanai R** (1998) The effect of whole-tree harvest on phosphorus cycling in a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management* 104:281-295
- Yang ZQ, Wang XY, Zhang YN** (2014) Recent advances in biological control of important native and invasive forest pests in China. *Biological Control* 68:117-128
- Zacharias S, Koppe C** (2016) Einfluss des Klimawandels auf die Biotropie des Wetters und die Gesundheit bzw. die Leistungsfähigkeit der Bevölkerung in Deutschland. *Umwelt & Gesundheit* 6
- Zandersen M, Tol RSJ** (2009) A meta-analysis of forest recreation values in Europe, *Journal of Forest Economics* 15 (1-2):109-130
- Zang C, Hartl-Meier C, Dittmar C et al.** (2014) Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. *Global Change Biology* 20: 3767-3779
- Zang C, Rothe A, Weis W, Pretzsch H** (2011) Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182(5/6):98-112
- Zelenski JM, Dopko RL, Capaldi CA** (2015) Cooperation is in our nature: nature exposure may promote cooperative and environmentally sustainable behavior. *J Environ Psychol* 42:24-31
- Zellweger F, De Frenne P, Lenoir J et al.** (2020) Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science* 368, 772-775.
- Zeuss D, Brandl R, Brandle M et al.** (2014) Global warming favours light-coloured insects in Europe. *Nature Communications* 5:3874
- Ziesche TM** (2015) Was steuert die Populationsdynamiken der Kieferngrößschädlinge im südlichen Brandenburg? In: Wissenstransfer in die Praxis, Beiträge zum 10. Winterkolloquium. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 53:79-87
- Zohner CM, Mo L, Renner SS et al.** (2020) Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* PNAS

# Glossar

## **Akkumulationsindikatoren**

Anreicherungsindikator, der sowohl für die Anreicherung in Organismen als Bioindikator verwendet wird, als auch der Rekonstruktion rezenter oder vorzeitlicher Vorgänge dient. Letzteres erfolgt anhand der erhöhten Konzentration ausgewählter Stoffe in bestimmten Kompartimenten eines Ökosystems.

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/akkumulationsindikator/402>

## **Anpassungsfähigkeit**

Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und andere Lebewesen, sich auf potentielle Schädigungen einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren.

IPCC (2013/14)

## **Assisted Migration**

Die vom Menschen unterstützte Wanderung von Arten als Reaktion auf den Klimawandel. Dies umfasst eine Vielzahl von Maßnahmen umfasst, die sich in Bezug auf Risiken, ökologische Auswirkungen und politische Erwägungen erheblich unterscheiden. Dabei kann es sich um folgende Ansätze handeln: a) Unterstützte Populationsmigration - Verlagerung von Samenquellen oder Populationen an neue Standorte innerhalb des historischen Verbreitungsgebiets der Art, b) Unterstützte Ausweitung des Verbreitungsgebiets - Verlagerung von Samenquellen oder Populationen aus ihrem derzeitigen Verbreitungsgebiet in geeignete Gebiete knapp jenseits des historischen Verbreitungsgebiets der Art, wobei die natürliche Ausbreitung erleichtert oder nachgeahmt wird, c) Unterstützte Artenwanderung (auch Artenrettung, gesteuerte Umsiedlung oder unterstützte Fernwanderung) - Umsiedlung von Samenquellen oder Populationen an einen Ort weit außerhalb des historischen Verbreitungsgebiets der Art, jenseits von Orten, die durch natürliche Ausbreitung erreichbar sind.

<https://www.fs.usda.gov/ccrc/topics/assisted-migration>

## **Attributionsstudie**

Mit Attributionsstudien lässt sich mittels statistischer Analysen abschätzen, inwieweit der vom Menschen verursachte Klimawandel für das Auftreten individueller Wetter- oder Klimaextreme verantwortlich ist. Dafür werden sehr lange Datenreihen benötigt, um eine robuste statistische Basis für die Abschätzung sich ändernder Wahrscheinlichkeiten seltener Ereignisse zu erhalten. Um die notwendigen Zeitreihen zu generieren, werden Klimamodellsimulationen verwendet. Zur Abschätzung der Bandbreite der natürlichen Variabilität von Extremereignissen wird eine Vielzahl von Simulationen mit gleichen klimatischen Rahmenbedingungen benötigt. Die Simulationen des vergangenen Klimas werden einmal unter Verwendung aller bekannten Klimaantriebe und ein zweites Mal ausschließlich mit den natürlichen Klimaantrieben und ohne Berücksichtigung der vom Menschen veränderte Antriebe durchgeführt. Durch den Vergleich der statistischen Analysen beider Klimata lassen sich etwaige Unterschiede bezüglich der Häufigkeit des Auftretens von Wetter- oder Witterungsexremen dem menschlichen Handeln zuschreiben.

DWD, [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez\\_themen/attributionen/node\\_attribs.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez_themen/attributionen/node_attribs.html)

## **Bestandesbegründung**

Die Verjüngung von Waldbeständen auf natürliche oder künstliche Weise.

## **Bestandesebene**

Die räumliche Betrachtungsebene, die den einzelnen Waldbestand im Fokus hat. Dabei ist ein Bestand ein Ausschnitt der Waldlandschaft, der sich durch ähnliche Struktur, Baumartenzusammensetzung, Altersaufbau und Behandlungsgeschichte auszeichnet. Somit kann dieser räumliche Ausschnitt aus der Waldlandschaft auch in Zukunft in ähnlicher Weise waldbaulich behandelt werden. Bestände sind somit Grundeinheiten der waldbaulichen Planung und Behandlung.

## **Bestandesentwicklungsphasen**

Werden auch natürliche Altersstufen genannt. Sie umfassen in chronologischer Abfolge den Jungwuchs, Jungbestand, Stangenholz, schwaches, mittleres und starkes Baumholz sowie die Alters- und Zerfallsphase.

### Bestandesmatrix

Die (Wald)landschaft, in die einzelne Bestände eingebettet sind. Die Eigenschaften und ökologischen Prozesse eines Bestandes sind durch die Beschaffenheit der benachbarten Bestände in dieser Matrix beeinflusst.

### Bestandespflege

Die Bestandespflege umfasst alle waldbaulichen Maßnahmen nach der erfolgreichen Etablierung der Verjüngung und vor dem Beginn der Ernte der hiebsreifen, zielstarken Bäume. Zu diesen Maßnahmen gehören im Wesentlichen Durchforstungen, die Mischwuchsregulierung, Ästung oder die Förderung einer Unter- und Zwischensandes.

### Bestandesstruktur

Beschreibt die horizontale und vertikale Verteilung der Bestandteile eines Bestands, einschließlich der Höhe, des Durchmessers, der Kronenschichten und der Baumstämme, Sträuchern, krautigem Unterwuchs, Baumstümpfen, Totholz und Lücken.

*Helms JA (1998) Dictionary of forestry. Society of American Foresters.*

### Biodiversität

Die Vielfalt des Lebens auf unserer Erde (oder kurz: Biodiversität) ist die Variabilität lebender Organismen und der von ihnen gebildeten ökologischen Komplexe. Sie umfasst die folgenden drei Ebenen: 1) die Vielfalt an Ökosystemen beziehungsweise Lebensgemeinschaften, Lebensräumen und Landschaften, 2) die Artenvielfalt und 3) die genetische Vielfalt innerhalb der verschiedenen Arten.

<https://www.ufz.de/teebde/index.php?de=43784>

### Bioökonomie

Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.

<https://www.bmbf.de>

### Bodenschutzkalkung

Kalkung von Waldböden mit dem Ziel der Kompensation anthropogen bedingter Bodenversauerung und der Regeneration von natürlichen Bodenfunktionen v. *Wilpert et al. (2013)*

### Bodenzustandserhebung

Im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung werden der Zustand und die Veränderung von Waldböden, Vegetation, Kronenzustand und der Waldernährung untersucht. Die Erhebung der ersten bundesweiten BZE fand von 1987 bis 1992 statt. In den Jahren 2006–2008 fand eine Folgeinventur (BZE II) statt. Eine Unterstichprobe im 16 km\*16 km Raster ist identisch mit der WZE.

<https://www.thuenen.de/de/wo/projekte/bodenschutz-und-waldzustand/projekte-bodenzustandserhebung/bundesweite-bodenzustandserhebung-im-wald/>

### Brückentechnologie Holzbau

Mit Brückentechnologie ist hier gemeint, dass der Holzbau aktuell die einzige anwendungsreife Technologie (negative emission technology) ist, die es ermöglicht, Kohlenstoff in nennenswertem Umfang außerhalb von Ökosystemen zu speichern. „Brücke“ bedeutet hierbei, dass diese Technologie deshalb ab sofort eingesetzt werden sollte, um diese Kohlenstoffspeicherung umzusetzen bis in der Zukunft möglicherweise andere Technologien wie beispielsweise carbon capture and storage oder carbon capture and usage Technologien in eine Anwendungsreife (TRL 9) kommen. Dies bedeutet nicht, dass danach der Holzbau keine Bedeutung mehr hat, aber der Begriff unterstreicht die Dringlichkeit, diese Möglichkeit der Kohlenstoffspeicherung sofort einzusetzen.

### Bundeswaldinventur

Die Bundeswaldinventur ist eine forstliche Großrauminventur, die durch das Bundeswaldgesetz (BWaldG § 41a) vorgeschrieben ist und als terrestrische Stichprobeninventur deutschlandweit durchgeführt wird. Sie erfasst die großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten und liefert eine unentbehrliche Grundlage für forst-, handels- und umweltpolitische Planungen und Entscheidungen. Die BWI I wurde 1987, II 2002, III 2012 abgeschlossen, für die BWI IV starteten die Aufnahmen im Frühjahr 2021. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bundeswaldinventur>

### DNA-Barcoding

Das DNA-Barcoding ist eine Methode zur Identifizierung von Arten anhand eines kurzen DNA-Abschnitts eines bestimmten Gens oder bestimmter Gene. Die Prämisse des DNA-Barcoding besteht darin, dass eine einzelne Sequenz durch den Vergleich mit einer Referenzbibliothek solcher DNA-Abschnitte (auch „Sequenzen“ genannt) zur eindeutigen Identifizierung eines Organismus bis hin zur Art verwendet werden kann.

[https://en.wikipedia.org/wiki/DNA\\_barcoding](https://en.wikipedia.org/wiki/DNA_barcoding)

### **Erntefestmeter Efm**

Maß für das Volumen geschlagenen Holzes ohne Rinde.

### **FFH Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie**

Naturschutz-Richtlinie der Europäischen Union (Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992). Ziel der Richtlinie ist die Erhaltung wildlebender Tier- und Pflanzenarten, die Erhaltung ihrer Lebensräume sowie der Aufbau eines zusammenhängenden Systems von Schutzgebieten (Vernetzung, Natura 2000-Gebiete).

<https://www.ufz.de/teebde/index.php?de=43784>

### **Forstbetriebsgemeinschaft**

Privatrechtlicher Zusammenschluss von Waldbesitzern, der den Zweck verfolgt, die Bewirtschaftung der angeschlossenen Waldflächen und der zur Aufforstung bestimmten Grundstücke zu verbessern, insbesondere die Nachteile geringer Flächengröße, ungünstiger Flächengestalt, der Besitzersplitterung, der Gemengelage, des unzureichenden Waldaufschlusses oder anderer Strukturängel zu überwinden (§ 16 Bundeswaldgesetz – BWaldG).

<https://de.wikipedia.org/wiki/Forstbetriebsgemeinschaft>

### **GAK**

Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes.

<https://www.bmel.de/>

### **Genotyp**

Gesamtheit der Gene eines Organismus. Er repräsentiert dessen exakte genetische Ausstattung, die sämtliche in diesem Individuum vorhandenen Erbanlagen umfasst.

### **Gestaffelte Durchforstung**

Zunächst starke, dann mäßige Eingriffe in der ersten Hälfte des Bestandeslebens, Übergang zur Niederdurchforstung in der zweiten Hälfte des Produktionszeitraumes.

### **Gruppendurchforstung**

Durchforstungsverfahren, das davon ausgeht, dass sich Bäume in häufig vorkommenden Biogruppen aus ca. 2 bis 10 eng zusammenstehenden Individuen (nicht zu verwechseln mit „Gruppe“ im o.g. Sinne!) in ihrem Wachstumsverhalten gegenseitig positiv beeinflussen. Bei der Gruppendurchforstung werden diese Biogruppen bewusst erhalten und gefördert. Sie führt damit zu einer horizontalen Strukturierung der Bestände, da sich in der Folge dichtere und lichtere Bestandespartien entwickeln.

<https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de>

### **Habitatbaum**

Bäume, die besondere Lebensräume (Biotope, Habitate) für andere Lebewesen anbieten. Hierbei handelt es sich oft um sehr alte, zum Teil auch bereits absterbende oder tote Bäume. Insbesondere Bäume mit Spechthöhlen oder mit Horsten baumbrütender Vogelarten, sogenannte Horstbäume, zählen dazu. Aber auch Bäume mit besonderen Wuchsformen, mit größeren Stamm- oder Rindenverletzungen oder mit hohem Totholzanteil („Mikrohabitaten“) bieten vielen Tieren, Pflanzen oder Mikroorganismen einen Lebensraum.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Biotopbaum>

### **Halbwaren**

Die Warengruppe der Halbwaren umfasst in der Holzwirtschaft Furniere, Sperr- und Schnittholz, Span, -Faserplatten, Zellstoff, Holzschliff und den Handel mit Schnittholz und sonstigem Holz.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Holzwirtschaft>

### **Herbivoren**

Pflanzenfresser. Bei Kleinlebewesen eher die Bezeichnung Phytophage.

### **Holzschliff**

Zusammenfassende Bezeichnung für Faserstoffe, die durch mechanische Zerfaserung aus Holz gewonnen und für die Herstellung bestimmter Sorten von Papier, Karton und Pappe verwendet werden.

### **Holzsortiment**

Einteilungskategorie für Rohholz, das entsprechend Qualität und/oder Abmessung für einen bestimmten Verwendungszweck geeignet ist.

### **Holzwerkstoff**

Holzwerkstoffe sind Werkstoffe, die durch Zerkleinern von Holz und anschließendes Zusammenfügen der Strukturelemente erzeugt werden. Größe und Form der Holzpartikel entscheiden über die Art des Holzwerkstoffes und seine Eigenschaften. Die Holzpartikel können ohne oder mit Bindemitteln oder mechanischen Verbindungen miteinander verbunden sein.

<https://dewiki.de/Lexikon/Holzwerkstoff>



### Humusauflage

Die Humusauflage beschreibt abgestorbene Pflanzenkompartimente in unterschiedlichen Zersetzungs- und Transformationsstadien, die dem Mineralboden aufliegen. Die Humusauflage ist aus morphologisch unterscheidbaren Lagen oder Horizonten zusammengesetzt. Je nach Mächtigkeit und Morphologie dieser Lagen unterscheidet man die Humusformen Mull, Moder und Rohhumus und ihre Übergangsformen. Die Mächtigkeit und ökologische Funktion der Humusauflagen hängt von abiotischen (Temperatur, Niederschlag, Ausgangsgestein, Azidität) aber auch biotischen Steuergrößen (Baumarten, Bodenorganismen) ab.

### Industrie 4.0

Marketingbegriff, der für ein „Zukunftsprojekt“ der deutschen Bundesregierung steht. Wesentliche Bestandteile sind eingebettete Systeme sowie (teil-)autonome Maschinen, die sich ohne menschliche Steuerung in und durch Umgebungen bewegen und selbstständig Entscheidungen treffen.

<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/industrie-40-54032>

### Interzeption

Vorgang, bei dem Niederschlag durch den Benetzungseffekt von der Vegetation (Kronendach, Streuschicht) aufgefangen und vorübergehend gespeichert wird. Dieser Niederschlagsanteil gelangt zum größten Teil durch Verdunstung (Interzeptionsverdunstung) in die Atmosphäre zurück, ohne den Erdboden zu erreichen.

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/interzeption/7668>

### Invasive Arten

Pflanzen- und Tierarten, die sich in einem Gebiet außerhalb ihres bisherigen Areals und von diesem durch Barrieren getrennt spontan ausbreiten und natürliche Ökosysteme beeinträchtigen. Die Überwindung der Ausbreitungsbarrieren gelingt vor allem mithilfe von Transportmitteln des Menschen auf Verkehrs- und Handelswegen. Haben sich invasive Arten in einem neuen Gebiet etabliert, werden sie als Neophyten bzw. Neozoen bezeichnet.

<https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/invasive-arten/3864>

### Jungbestandspflege

Pflegemaßnahmen in jungen Waldbeständen bis ca. 12 m Baumhöhe z. B. für einen gleichmäßigen Aufwuchs, dem Schutz vor Schäden, der Mischungsregulierung, der Stammzahlreduzierung oder Zurückdrängung bzw. Entfernung qualitativ schlechter Bäume. Diese Waldentwicklungsphase endet mit dem Beginn der Durchforstungen.

### Jungwuchs

Verjüngungsflächen mit jungen Bäumen in einer Höhe von 1,5 - 3 m. Diese Waldentwicklungsphase endet mit dem Eintritt des Kronenschlusses.

### Kalamitätsholz

Das im Rahmen von zufälligen bzw. ungeplanten Nutzungen in Folge von Störungen (z. B. Windwurf, Borkenkäfer, Feuer) geerntete Holz. Dabei handelt es sich größtenteils um Holz abgestorbener oder absterbender Bäume. Das Holz kann je nach Art der Störung Beeinträchtigungen der möglichen Verwendungen im Vergleich zu Frischholz aufweisen bis hin zur Unbrauchbarkeit für bestimmte Verwendungsbereiche (z. B. gebrochenes Holz für Konstruktionsvollholz).

### Kalamitätsnutzung

Holznutzungen, die infolge höherer Gewalt (Sturm, Insekten, Eis-/Schneebruch, Trockenheit...) entstanden sind.

### Kaskadennutzung

Nutzung eines Rohstoffs über mehrere Stufen. Auf diese Weise soll eine besonders nachhaltige und effiziente Ressourcennutzung sowie eine Einsparung beim Einsatz von Rohstoffen erreicht werden. Rohstoffe oder daraus hergestellte Produkte werden so lange wie möglich im Wirtschaftssystem genutzt.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kaskadennutzung>

### Klimaanpassung

Anpassung von natürlichen oder anthropogen gesteuerten Systemen an den Klimawandel mit dem Ziel die Resistenz und Resilienz dieser Systeme gegenüber den Folgen des Klimawandels sowie deren zur Resilienz beitragenden dynamische Reaktionsfähigkeit auf den Klimawandel zu erhöhen.

### Klimaprojektion

Berechnung des zukünftigen Klimas anhand von Klimamodellen und Szenarien, die auf unterschiedlichen Annahmen zur zukünftigen Konzentration der Treibhausgase beruhen. Die Ergebnisse sind daher keine Prognosen.

[https://www.dwd.de/DE/forschung/klima\\_umwelt/klimaprojektionen/klimaprojektionen\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/klimaprojektionen_node.html)

### Künstliche Verjüngung

Ausbringen von Samen oder Pflanzen durch den Menschen zur Begründung eines Waldbestandes.

### **Kurzumtriebsplantage**

Anpflanzung schnell wachsender Bäume auf landwirtschaftlichen Flächen mit dem Ziel, innerhalb eines kurzen Produktionszeitraums (ca. 3 - 10 Jahre) holzige Biomasse zu erzeugen. Die Verjüngung erfolgt über Stockausschlag. Sie ist kein Wald im Sinne des Bundeswaldgesetzes.

### **Leakage-Effekt**

Ein Begriff aus dem Klimaschutz, der sich auch die Verlagerung von Emissionen bezieht. Carbon Leakage liegt vor, wenn die Treibhausgasemissionen in einem Land ansteigen, weil ein anderes Land mit einer strengen Klimapolitik die Emissionen reduziert. Dies hat zum Ergebnis, dass netto keine Emissionen reduziert werden oder die Emissionen sogar ansteigen.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_leakage](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_leakage)

### **Logistikkette**

Die Logistikkette bezeichnet die Gesamtheit aller nötigen Geschäftsaktivitäten, damit ein Produkt seinen Weg vom Hersteller bis zum Endkunden findet. Dazu zählen sämtliche logistische sowie produktionstechnische Prozesse der einzelnen Glieder (beteiligte Unternehmen) einer Wertschöpfungskette.

<https://logistikknowhow.com>

### **LULUCF**

„Land Use, Land Use Change and Forestry“ = „Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ wird vom Klimasekretariat der Vereinten Nationen definiert als ein „Sektor des Treibhausgasinventars, der die Emissionen und den Abbau von Treibhausgasen erfasst, die sich aus der direkten, vom Menschen verursachten Landnutzung ergeben, z. B. durch Siedlungen und gewerbliche Nutzung, Landnutzungsänderungen und forstwirtschaftliche Aktivitäten (UN 2021, *Glossary of climate change acronyms and terms*, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/glossary-of-climate-change-acronyms-and-terms#l>, letzter Zugriff am 14.08.2021).

### **Meta-Analyse**

Eine Meta-Analyse ist eine Form von systematischem Review. Sie bezieht sich auf die statistische Analyse der Daten aus unabhängigen Primärstudien, die sich mit derselben Frage befassen, um eine quantitative Schätzung des untersuchten Phänomens, z. B. der Wirksamkeit der Intervention, zu erhalten.

Gopalakrishnan, S., & Ganeshkumar, P. (2013).

*Systematic reviews and meta-analysis: understanding the best evidence in primary healthcare. Journal of Family Medicine and Primary Care*, 2(1), 9.

### **Multifunktionalität der Wälder**

Sie basiert auf der Mehrzwecknutzung der vorhandenen Waldressourcen und ihrer ökologischen Funktionen. Das Prinzip der Multifunktionalität ist auf eine nachhaltige Waldbewirtschaftung ausgerichtet, die ökologische, wirtschaftliche und soziale Faktoren berücksichtigt.

### **Nährstoffnachhaltigkeit**

Nachhaltige Nutzung von Wäldern im Hinblick auf das Nährstoffangebot des Bodens. Meist wird darunter verstanden, dass die Menge der anthropogen entfernten Nährstoffe nicht größer ist als die Nachlieferung mit dem Niederschlag und durch die Gesteinsverwitterung. Neuere Untersuchungen deuten jedoch darauf hin, dass die Betrachtung nicht nur die Mengenbilanz der Nährstoffe sondern auch die an der Waldernährung beteiligten natürlichen Prozesse der Nährstoffmobilisierung und Immobilisierung einschließen muss.

### **Nasslagerung**

Methode zur Zwischenlagerung von eingeschlagenem Holz, bei dem die Baumstämme zur Konservierung und Erhalt wichtiger Holzeigenschaften künstlich befeuchtet werden. Nasslagerung wird in der Regel verwendet um ungünstige Marktsituationen für die Verkäufer von Rohholz zeitlich zu überbrücken.

### **Ökologische Stabilität**

Fähigkeit von Ökosystemen, exogene Belastungen und Störungen zu tolerieren.

### **Ökosystemfunktion**

Das Funktionieren eines Ökosystems spiegelt die kollektiven Lebensaktivitäten von Pflanzen, Tieren und Mikroben und die Auswirkungen dieser Aktivitäten (z. B. Ernährung, Wachstum, Fortbewegung, Ausscheidung von Abfallstoffen) auf die physikalischen und chemischen Bedingungen ihrer Umwelt wider. Ökosystemfunktionen (manchmal auch als Ökosystemprozesse oder ökologische Prozesse bezeichnet) sind ein integraler Bestandteil der biologischen Vielfalt und können daher im weitesten Sinne als die biologischen, geochemischen und physikalischen Prozesse definiert werden, die in einem Ökosystem ablaufen oder auftreten.

<https://geobon.org/ebvs/working-groups/ecosystem-function/>

### Ökosystemleistung

Abgekürzt ÖSL, engl. ecosystem service, Ökosystemdienstleistung bezeichnet direkte und indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen, das heißt Leistungen und Güter, die dem Menschen einen direkten oder indirekten wirtschaftlichen, materiellen, gesundheitlichen oder psychischen Nutzen bringen. In Abgrenzung zum Begriff Ökosystemfunktion entsteht der Begriff Ökosystemleistung aus einer anthropozentrischen Perspektive und ist an einen Nutzen des Ökosystems für den Menschen gebunden.

<https://www.ufz.de/teebde/index.php?de=43784>

### Perzentilwert

Lagemaß aus der Statistik. Durch die Perzentile wird ein der Größe nach geordneter Datensatz in 100 umfangsgleiche Teile zerlegt. Für das 20% Perzentil bedeutet das zum Beispiel, dass 20% der Werte unterhalb oder gleich dieses Perzentils liegen.

<https://www.dwd.de>

### Phänologie

Die Phänologie befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Entwicklungserscheinungen in der Natur. Für einen phänologischen Kalender werden charakteristischen Entwicklungsstadien wie Blüte oder Blattaustrieb typischer phänologischer Zeigerpflanzen verwendet.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Ph%C3%A4nologie>

### Phänotyp

Phänotyp oder Erscheinungsbild ist in der Genetik die Menge aller Merkmale eines Organismus. Er bezieht sich nicht nur auf morphologische, sondern auch auf physiologische Eigenschaften und ggfs. auf Verhaltensmerkmale. Der Phänotyp wird durch das Zusammenwirken von Erbanlagen und Umweltfaktoren (Modifikation) bestimmt.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Ph%C3%A4notyp>

### Phytophage Insekten

Allgemein Insekten, die sich von lebendem Pflanzengewebe (zum Teil auch von abgestorbenen Pflanzenteilen) ernähren.

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/phytophagen/51682>

### Polterspritzung

Einsatz von Borkenkäfer-Insektiziden zur Verhinderung eines Befalls lagernden Holzes

### Prestoration

Restauration, die darauf abzielt, die zukünftige Funktionsfähigkeit der Ökosysteme unter den Bedingungen des Klimawandels durch geeignete Baumarten (Kombinationen) und Strukturen zu gewährleisten

### Produktionszeit

Die Lebensdauer von Bäumen in Wirtschaftswäldern von der Verjüngung bis zum Erreichen der gewünschten Dimensionen (Zielstärke).

### PSM

Pflanzenschutzmittel, die zum Schutz von Nutzpflanzen und deren Produkte eingesetzt werden. Dazu zählen Insektizide, Fungizide, Rodentizide und Herbizide.

### Quarantäneschadorganismus

Schadorganismus von potentiell wirtschaftlicher Bedeutung für das durch ihn gefährdete Gebiet, der in diesem Gebiet noch nicht vorkommt oder zwar schon vorkommt, aber nicht weit verbreitet ist und amtlichen Überwachungs- und Bekämpfungsmaßnahmen unterliegt.

*Bundesgesetzblatt zur Novelle des Pflanzenschutzgesetzes 2004: Jahrgang 2004 Teil II Nr. 26, Seite 1159*

### Renaturierung

Wiederherstellung von naturnahen Lebensräumen aus kultivierten, genutzten Bodenoberflächen.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Renaturierung>

### Resilienz

Fähigkeit von sozialen, Wirtschafts- oder Umweltsystemen, ein gefährliches Ereignis bzw. einen solchen Trend oder eine Störung zu bewältigen und dabei derart zu reagieren bzw. sich zu reorganisieren, dass ihre Grundfunktion, Identität und Struktur erhalten bleiben und sie sich gleichzeitig die Fähigkeit zur Anpassung, zum Lernen und zur Transformation bewahren. IPCC (2013/14)

### Resistenz

Die Widerstandsfähigkeit von Organismen, Ökosystemen gegenüber Stress und Störungen.

### Risikomanagement

Management von Unternehmensrisiken durch deren Identifikation, Analyse, Quantifizierung, Aggregation, Beurteilung, Kommunikation und abschließende Risikobewältigung.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Risikomanagement>

### **Rohholz**

Zusammenfassender Begriff für gefällte Bäume und die daraus gefertigten Verwertungssorten vor dem industriellen Einsatz.

<https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de>

### **Rundholz**

Geschlagene Stämme nach Entfernung der Äste; meist nach handelsüblichen Gebräuchen in bestimmte Längen abgeschnitten und so zu Sortimenten gemacht.

<https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de>

### **Sägeholz**

Spezielles, höherwertiges Holzsortiment mit stärkeren Durchmessern; oft Produktionsziel in der Waldbewirtschaftung.

### **Schadholz**

Bei Störungen anfallendes Holz, das im Vergleich zu Frischholz entweder bereits durch den Störungseinfluss hinsichtlich seiner Verwendung an Qualität eingebüßt hat (z. B. Bruchholz oder Sturmholz), oder rasch entwertet werden kann (z. B. Käferholz).

### **Schadorganismus**

Lebewesen (z. B. Insekt, Nagetier, Unkraut, Pilz oder Virus), das eine schädliche Wirkung auf Pflanzen und/oder deren Produkte ausübt (EFSA 2021, <https://www.efsa.europa.eu/de/glossary/pest>). Im Kontext dieses Gutachtens kann der Begriff erweitert werden auf solche Lebewesen, die die Bereitstellung von Ökosystemleistungen beeinträchtigen.

### **Schwachholz**

Stämme von geringem Durchmesser, die in der Regel nicht mehr von der Sägeindustrie verwendet werden können. Die Durchmessergrenze ist je nach Baumart unterschiedlich. Zum Schwachholz im weitesten Sinn zählen auch starke Äste von Laubbäumen oder das Kronenholz von Nadelbäumen.

### **Senkenleistung**

Die Leistung (der Waldökosysteme) CO<sub>2</sub> zumindest mittelfristig zu speichern, beispielsweise in mehrjährigen Biomassekompartimenten oder in der organischen Bodensubstanz.

### **Stammholz**

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

### **Standortangepasst**

Beschreibt die Eigenschaft von Pflanzen, an die abiotischen Umweltbedingungen des Standortes (Klima, Boden, Ausgangsgestein) aber auch die biologischen Bedingungen, die von den Umweltbedingungen beeinflusst werden (Schadorganismen, Bodenorganismen) durch evolutive Prozesse angepasst zu sein.

### **Standortheimische Baumart**

Baumart, deren jeweiliger Wuchsstandort sich im natürlichen Verbreitungsgebiet der betreffenden Art befindet oder in der Nacheiszeit befand.

### **Standortaufnahme**

Die forstliche Standortaufnahme umfasst die Erfassung, Bewertung und Darstellung aller für die Existenz von Waldökosystemen relevanten physikalischen und chemischen Eigenschaften ihrer Umwelt. Für die Erfassung ist es zunächst unerheblich, ob diese Umweltmerkmale von Natur gegeben sind oder von der Tätigkeit des Menschen beeinflusst oder bestimmt werden. Die Kenntnis der Umweltbedingungen, denen die Waldökosysteme unterliegen, ist Voraussetzung für ein zielorientiert ressourcenschonendes, nachhaltiges und rationelles Management der Wälder.

*Michiels (2015)*

### **Standortseignung**

Die Fähigkeit von Baumarten, unter den jeweiligen Standortseigenschaften zu wachsen. In den Konzepten zur Baumarteneignung wird zusätzliche die Standortspfleglichkeit berücksichtigt, die den Einfluss der Baumarten auf die Bodeneigenschaften beschreibt.

### **Starkholz**

Baumstämme mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) ab ca. 50 cm .

### **Stoffliche Holznutzung**

Nutzung von Holz für die Herstellung von Halbwaren. Zu den stofflichen Nutzern zählen vor allem die Sägeindustrie, die Holzwerkstoffindustrie und die Holzstoff- und Zellstoffindustrie.

*forst.fnr.de*

### **Störung großflächig**

Ereignis auf großer Fläche, das eine Änderung der Biomasse oder anderer messbarer Parameter eines Ökosystems zur Folge hat. Im Wald wird es vorwiegend durch Sturmwurf oder Kahlschlag hervorgerufen.

### **Substitution**

Ersatz eines Grundstoffes durch andere Stoffe.

**Synergien**

Beschreibt das Zusammenwirken verschiedener Kräfte zu einer Gesamtleistung. Häufig wird erwartet, dass diese Gesamtleistung höher liegt als die Summe der Einzelleistungen.

**Testbetriebsnetz Forst**

Zentrale Datenquelle zur Beurteilung der wirtschaftlichen Lage der deutschen Forstwirtschaft. Es nehmen Forstbetriebe des Privat-, Körperschafts- und Staatswaldes ab 200 ha Waldfläche auf freiwilliger Basis teil. <https://www.bmel-statistik.de>

**Toleranz**

Fähigkeit eines Systems, Störungen zu tolerieren.

**Triade**

Gruppe aus drei Einheiten

**Trupppflanzung**

Bei dieser Art von gruppenweiser Pflanzung werden ca. 15 – 20 Bäume in sogenannten Trupps in engen Verbänden mit ca. 1 m Abstand gepflanzt. Die Anzahl der Trupps auf einer Fläche entspricht meistens der Anzahl der Bäume im Endbestand. Dazwischen befinden sich temporär Zwischenfelder mit spontaner Verjüngung oder einigen gepflanzten, dienenden Baumarten.

**Umweltindikator**

Methodisches Konstrukt, das auf messbare Ersatzgrößen zurückgreift, um einen ansonsten schwer greifbaren Umwelt-Sachverhalt zu beschreiben.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Umweltindikator>

**Urproduktion**

Primärer Sektor in einer sektoralen Wirtschaftsstruktur neben dem sekundären Sektor (Industrie, Handwerk und Baugewerbe) und dem tertiären Sektor (Dienstleistungen und Staates). Befasst sich mit der Gewinnung von rohen Naturprodukten (Grundstoffen, Rohstoffen) aus Land- und Forstwirtschaft, Jagd, Fischerei und auch dem Bergbau.

**Verbreitungsgrenze**

Grenze des Verbreitungsgebietes, oft auch Areal genannt, in dem eine bestimmte Pflanzen- oder Tierart lebt und durch Beobachtungen festgestellt wurde.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Verbreitungsgebiet>

**Verjüngungszeitraum**

Geplanter oder effektiver Zeitraum in Jahren von der Einleitung bis zur erfolgreichen Etablierung einer Verjüngung oder bis zur vollständigen Räumung des Altbestandes.

**Vermehrungsgut**

hier forstliches Vermehrungsgut: Saatgut (aus Zapfen, Früchte und Samen), Pflanzenteile (Stecklinge, Explantate und Embryonen) sowie Pflanzgut aus Saatgut oder Pflanzenteilen angezogene oder aus Naturverjüngung gewonnene Bäume und Sträucher.

**Vertragsnaturschutz**

Strategie der Naturschutzbehörden, die Kulturlandschaft oder bestimmte Lebensräume für Tiere und Pflanzen im freiwilligen Zusammenwirken mit den Grundstücksbesitzern zu erhalten. Sie stellen für den Vertragszeitraum eine angepasste Nutzung einer Fläche im Sinne des Naturschutzes sicher und ergänzen naturschutzrechtliche Verbote, Anzeige- und Bewilligungspflichten.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Vertragsnaturschutz>

**Vitalität von Bäumen**

Ein maßgebliches Kriterium bei Waldschadensinventuren. Zur Beurteilung der Vitalität wird häufig der Kronenzustand (Belaubungsdichte und Blatt- oder Nadelverfärbungen) der Bäume herangezogen. Das Wachstum oder physiologische Prozesse können als weitere Indikatoren verwendet werden.

**Vorverjüngung**

Die natürliche oder künstliche (Pflanzung oder Saat) Verjüngung von Bäumen in Waldbeständen vor Beginn der Erntephase. Für eine erfolgreiche Vorverjüngung unter dem Schirm des Hauptbestandes sind in der Regel nur solche Baumarten geeignet die wenigstens ebenso schattentolerant sind als die Baumarten des Hauptbestandes.

**Vorwald**

Begründung oder Verwendung bereits vorhandener Pionierbaumarten auf freigelegten Waldflächen zur besseren Etablierung der Verjüngung mit schattentoleranten Baumarten späterer Sukzessionsphasen („Zielbaumarten“). Letztere sind in der Regel weniger stresstolerant (z. B. Spätfrost, Hitze) und ihre Etablierung wird daher durch den lockeren Schirm eines Vorwaldes begünstigt.

**Vulnerabilität**

Neigung oder Prädisposition eines Systems, nachteilig betroffen zu sein. Vulnerabilität umfasst eine Vielzahl von Konzepten und Elementen, wie unter anderem Empfindlichkeit oder Anfälligkeit gegenüber Schädigung und die mangelnde Fähigkeit zur Bewältigung und Anpassung.

IPCC (2013/14)

### **Waldentwicklungstyp**

Waldentwicklungstypen umfassen Waldbestände mit vergleichbarem waldbaulichen Ausgangszustand und vergleichbarer Zielsetzung. Sie beschreiben die zweckmäßigsten Verfahren zur Erreichung dieser Zielsetzung unter Beachtung der Funktionenvielfalt des Waldes.

*Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg (2014)  
Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen.  
Stuttgart.*

### **Waldkrankheit**

Jede schädliche Abweichung, die durch einen dauerhaften Erreger verursacht wird und die normalen Funktionen von Bäumen beeinträchtigt. Typische Pathogene, die Waldkrankheiten verursachen sind Pilze, Bakterien, Phytoplasmen und Viren.

### **Waldschutz**

Waldschutz (auch Forstschutz) umfasst alle Maßnahmen der Waldbewirtschaftung zum Schutz von Beständen und Wäldern vor Schäden, die zu Beeinträchtigungen der Bereitstellung von Ökosystemleistungen des Waldes führen.

### **Waldumbau**

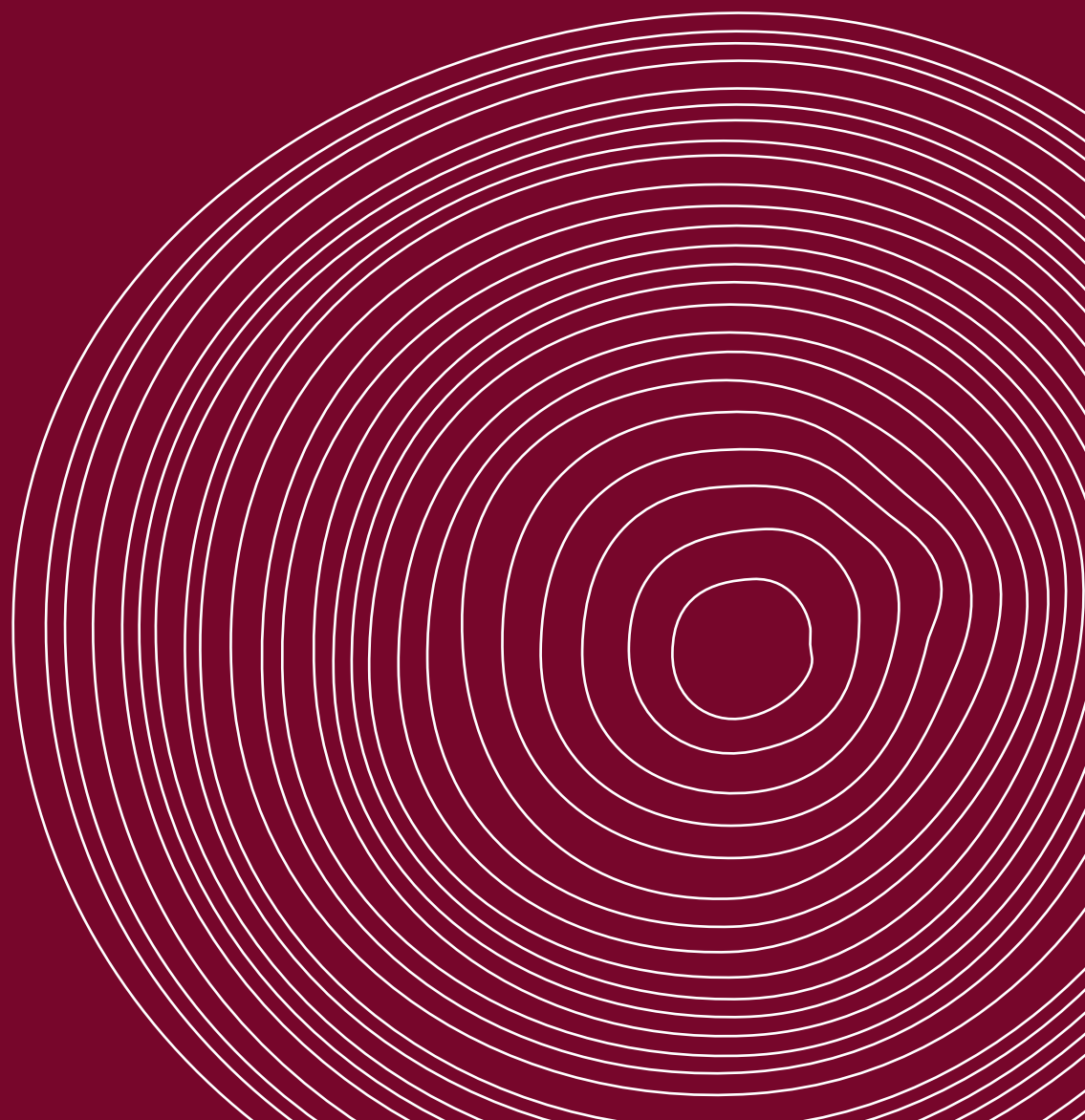
Die waldbauliche Umgestaltung der Wälder, um die Erreichung der Bewirtschaftungsziele zu verbessern. In der Regel ist der Waldumbau mit einer Veränderung der Baumartenzusammensetzung und häufig auch mit einer Umgestaltung der Waldstruktur verbunden. Der ökologische Waldumbau zielt in der Regel auf die Umwandlung von Nadelholzreinbeständen und Entwicklung von ungleichaltrigen Mischbeständen ab. Angesichts der Herausforderung der Anpassung der Wälder an den Klimawandel kommt in Zukunft insbesondere dem Baumartenwechsel und der Entwicklung von gemischten Wäldern eine große Bedeutung zu, nicht nur dort wo Nadelholzreinbestände die Ausgangslage sind.

### **Waldzustandserfassung**

Teil des Forstlichen Umweltmonitorings. Jährliche Erhebung des Kronenzustandes und der Blatt- oder Nadelverfärbung zur Beurteilung der Vitalität fest markierter Probestämme.

### **Wertschöpfungskette**

Stellt die Stufen der Produktion als eine geordnete Reihung von Tätigkeiten dar. Diese Tätigkeiten schaffen Werte, verbrauchen Ressourcen und sind in Prozessen miteinander verbunden.



# Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik

Der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik (WBW) berät und unterstützt die Bundesregierung bei der Gestaltung der Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wälder. Er ist mit Vertreterinnen und Vertretern verschiedener wissenschaftlicher Fachdisziplinen besetzt, die die gesellschaftlichen Anforderungen an den Wald widerspiegeln.

Aufgabe des Beirats ist es, die Ziele und Grundsätze der nationalen und internationalen Waldpolitik zu prüfen. Er unterbreitet Vorschläge für die Weiterentwicklung der waldpolitischen Rahmenbedingungen. Darüber hinaus bemüht er sich um einen Ausgleich zwischen den verschiedenen gesellschaftlichen Ansprüchen an den Wald und fördert den wissenschaftlichen Diskurs über eine nachhaltige, multifunktionale Bewirtschaftung der Wälder. Auch werden von ihm Zustände diskutiert und bewertet, Impulse bei Veränderungsbedarf gegeben und Initiativen aus unterschiedlichen Wissenschafts- und Gesellschaftsbereichen aufgegriffen. Die Politik berät er hauptsächlich durch Gutachten und Stellungnahmen.

