

# Was kosten zunehmende Risiken im Wald?

Konzept zur Quantifizierung von klimawandelbedingten Risikokosten bei der forstlichen Bewirtschaftung

Von Bernhard Möhring<sup>1</sup>, Richard Rosenberger<sup>2</sup>, Matthias Dieter<sup>3</sup>, Christoph Hartebrödt<sup>4</sup>, Nicolaus Graf von Hatzfeldt<sup>5</sup>, Martin Hillmann<sup>6</sup>, Felix Moczia<sup>7</sup>, Godehard Ontrup<sup>8</sup> und Artur Petkau<sup>9</sup>

**Der Klimawandel führt über vermehrte Mortalität zu Mehrkosten und Mindererträgen in den Forstbetrieben, die in ihrer Summe als Risikokosten des Klimawandels interpretiert werden können. Über das Vorgehen zur Erfassung/Bewertung, aber auch über die möglichen Größenordnungen herrscht vielfach Unklarheit. Sicher erscheint nur, dass eine weitere Zunahme der Risiken zu erwarten ist. Somit stellt sich die Frage, wie die Betroffenheit von Forstbetrieben erfasst und bewertet werden kann. Ein konzeptionelles Vorgehen für die Quantifizierung klimawandelbedingter Risikokosten wurde auf Initiative des Ausschusses für Betriebswirtschaft des Deutschen Forstwirtschaftsrates durch eine Arbeitsgruppe erarbeitet, welches im Folgenden vorgestellt wird.**

Einschlagsstatistiken zeigen deutliche Häufungen von Kalamitätsnutzungen auf nationaler (Weller et al. 2022; Spathelf et al. 2022) sowie europäischer Ebene (Gardiner et al. 2013). Eine weitere Zunahme der Risiken wird mit voranschreitendem Klimawandel erwartet (Seidl et al. 2014; Brandl et al. 2020). Für die großflächigen Kalamitäten als Folge der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 wurden die naturalen und auch monetären Auswirkungen für die Forstwirtschaft in Deutschland bewertet. Nach den Berechnungen einer Arbeitsgruppe des Ausschusses für Betriebswirtschaft des Deutschen Forstwirtschaftsrates (DFWR) betragen die durch Extremwetterereignisse verursachten Schäden in der deutschen Forstwirtschaft 12,7 Mrd. Euro (Möhring et al. 2021). Eine Fortschreibung der Kalkulation unter Einbezug der Daten aus dem Jahr 2021 erhöht die Summe auf rund 15 Mrd. Euro (Möhring und Waldthausen 2022).

Der Klimawandel führt bei Forstbetrieben sowohl bei der laufenden Waldbewirtschaftung aufgrund erhöhter Mortalität als auch bei der Anpassung an den Klimawandel zu erwartbaren Mehrkosten und Mindererträgen im Bereich der Holzproduktion. Diese Mehrkosten und Mindererträge können als forstbetriebliche Risikokosten des Klimawandels interpretiert werden. Neben der ökonomischen Bewertung der konkreten, bereits eingetretenen Schadergebnisse der Vergangenheit ist auch eine Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Mehrkosten und Mindererträge für die Forstwirtschaft von Interesse, denn der zu erwartende Erfolg (oder Misserfolg) ist Treiber für aktuelle waldbauliche Entscheidungen.

Ziel dieses Beitrags ist es demnach, ein Konzept vorzustellen, mit dessen Hilfe relevante, sowohl kurz- als auch langfristig zu erwartende, klimawandelbedingte Mehrkosten und Mindererträge (Risikokosten) der forstbetrieblichen Rohholzproduktion abgeschätzt werden können.

Eine derartige Quantifizierung der klimawandelbedingten Risikokosten erscheint auch im Kontext der forstpolitischen Diskussion um eine Honorierung von Ökosystemleistungen<sup>10</sup> sinnvoll, da die Risikokosten die wirtschaftliche Betroffenheit von Forstbetrieben in Zeiten des Klimawandels zeigen, die bei der Waldbewirtschaftung zu erwarten sind. Vor dem Hintergrund einer Zunahme

der Risikokosten kann, anders als in der Vergangenheit, nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Holzerlöse aus der Rohholzproduktion auf großer Fläche ausreichen werden, um eine den Risiken des Klimawandels ausgesetzte Waldbewirtschaftung auf Dauer aufrecht zu erhalten oder gar die zur Klimaanpassung erforderlichen zusätzlichen waldbaulichen sowie weiteren betrieblichen Maßnahmen zu finanzieren.

Klimawandelbedingte Mehrkosten und Mindererlöse der Rohholzproduktion dürften vielmehr die Bereitschaft der Forstbetriebe zur Waldpflege, zum Waldschutz und zur Walderhaltung mindern und dadurch auch die langfristige Bereitstellung wichtiger Ökosystemleistungen gefährden, von denen die Gesellschaft insgesamt profitiert. So ermöglichen beispielsweise im Rahmen der Waldbewirtschaftung unterhaltene Waldwege Waldbesucherinnen und Waldbesuchern einen angenehmen Aufenthalt im Wald und fördern damit Erholung und Gesundheit. Wuchskräftige stabile Bestände tragen mehr zum Klimaschutz bei als lückenhafte Sukzessionen. Und schnell wieder in Bestockung gebrachte Freiflächen verhindern Bodenerosion sowie oberflächlichen Wasserabfluss und tragen damit positiv zur Wasserspende bei. Ebenfalls fördert die Waldpflege die Waldbrandprävention.

Für die nachhaltige Sicherung der Ökosystemleistungen gibt es in Mitteleuropa noch erheblichen Bedarf zur Weiterentwicklung der Finanzierungsinstrumente (Kissling-Näf et al. 2012; Ring 2013; Elsasser et al. 2020). Für deren Ausgestaltung muss jedoch der Bedarf bekannt sein, wozu dieses Konzept einen Beitrag leisten soll.

## Konzeptionelles Vorgehen

Aufgrund der extremen Langfristigkeit der forstlichen Produktion erscheint es sinnvoll, die Abschätzung der Mehrkosten und Mindererträge getrennt nach kurzfristigen und langfristigen Auswirkungen vorzunehmen.

## Abschätzung der kurzfristigen Mehrkosten bei der Bestandesbegründung

Als zentrale Anpassungsstrategie an den Klimawandel wird der Waldbau angesehen, der insbesondere auch nach den bereits großflächig eingetretenen Kalamitäten vorangetrieben wird. Der Klimawandel verschiebt die Eignung

**Tabelle 1** Verwendete Kulturkostensätze für die Hauptbaumarten und für verschiedene Formen der Bestandsbegründung

		Fichte	Douglasie	Kiefer	Eiche	Buche	Birke
Naturverjüngung (NV)	Euro/ha	1 300	1 400	1 900	2 600	1 800	0
Pflanzung (Pf), mittlere Verhältnisse	Euro/ha	3 600	3 700	5 800	16 500	8 800	0
Anteil Naturverjüngung nach BWI 3		87 %	23 %	84 %	54 %	87 %	95 %
<b>Reguläre Kulturkosten (nach Anteilen NV/Pfl.)</b>	<b>Euro/ha</b>	<b>1 605</b>	<b>3 182</b>	<b>2 527</b>	<b>8 930</b>	<b>2 715</b>	<b>0</b>
Pflanzung, schwierige Verhältnisse	Euro/ha	4 400	5 100	7 500	18 900	11 000	0
<b>Erhalt einer Baumart nach Kalamität (20 % NV)</b>	<b>Euro/ha</b>	<b>3 780</b>	<b>4 360</b>	<b>6 380</b>	<b>15 640</b>	<b>9 160</b>	<b>0</b>

Die fett gedruckten Größen werden für die nachfolgenden Berechnungen genutzt, die normal gedruckten dienen der Herleitung.

**Tabelle 2** Mehrkosten (bzw. Minderkosten mit negativem Vorzeichen) bei dem Wechsel der Baumart nach Kalamität in Euro/ha, ohne öffentliche Förderung. Die Mittelwerte geben die mittlere Abweichung gegenüber den anderen Baumarten an.

	Fichte	Douglasie	Kiefer	Eiche	Buche	Birke
Fichte	–	1 320	3 720	15 120	7 220	–3 780
Douglasie	40	–	3 140	14 540	6 640	–4 360
Kiefer	–1 980	–1 280	–	12 520	4 620	–6 380
Eiche	–11 240	–10 540	–8 140	–	–4 640	–15 640
Buche	–4 760	–4 060	–1 660	9 740	–	–9 160
Birke	4 400	5 100	7 500	18 900	11 000	–
Mittelwert	–2 708	–1 892	912	14 164	4 968	–7 864

**Tabelle 3** Eingabegrößen für die Simulation

		Fichte	Douglasie	Kiefer	Eiche	Buche	Birke
planmäßiger Produktionszeitraum	Jahre	80	60	120	180	140	60
Mindererlöse bei Kalamität		45 %	20 %	20 %	10 %	20 %	20 %
Mehraufwand bei Kalamität		15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %
Läuterung im Alter 10	Euro/ha	600	600	600	600	600	600

der Baumarten an den jeweiligen Standorten und erfordert auf großer Fläche einen Baumartenwechsel. Bolte et al. (2021) gehen für die nächsten 30 Jahre von einem möglichen Umbaubedarf auf etwa 2,85 Mio. ha aus, was rund 25 % der gesamten Waldfläche Deutschlands entspricht. Kurzfristig entstehen durch Baumartenwechsel i. d. R. Mehrkosten, die bei der Fortführung der Bewirtschaftung mit der vorhandenen Baumart (z. B. aufgrund der dann möglichen Naturverjüngung) nicht entstehen würden.

Zur Abschätzung der Mehrkosten bei der Bestandesbegründung werden hier Mittelwerte von Daten aus Waldbewertungsrichtlinien (MELV 2015; MULE 2019; Hessen-Forst 2019), welche für gesicherte und gelungene Kulturen gelten, verwendet (vgl. Tabelle 1). Dabei werden für die regulären Kosten des Erhalts einer Baumart die Kosten der Naturverjüngung und der Pflanzung bei mittleren Verhältnissen mit den jeweiligen Anteilen aus der BWI3 (Thünen-Institut 2021) gewichtet. Bei der Kunstverjüngung der Eiche werden 80 % Zäunung mit Kosten in Höhe von 7 200 Euro/ha inklusive Kontrolle und Abbau angenommen. Wird nach einer Kalamität ein Baumartenwechsel angestrebt, so werden die Kosten einer Pflanzung unter schwierigen Verhältnissen angenommen, weil vereinfachend unterstellt wird, dass ein Baumartenwechsel i. d. R. nur ohne Beteiligung von Naturverjüngung vollzogen werden kann. Wird nach einer Kalamität die ausgefallene Baumart erhalten, werden pauschal 20 % Naturverjüngung angenommen. Die Birke wird hier vereinfachend ohne

Kulturkosten gerechnet, sie steht stellvertretend für die „omnipräsenten“ Sukzessionsbaumarten.

Ausgehend von den regulären Kulturkosten, welche einen nennenswerten Anteil Naturverjüngung unterstellen, wird in Tabelle 1 erkennbar, dass bereits die Wiederbestockung mit der gleichen Baumart im Kalamitätsfall mit erheblichen Mehrkosten verbunden ist. In Tabelle 2 werden exemplarisch die beim Baumartenwechsel nach Kalamität entstehenden investiven Mehrkosten<sup>11</sup> erkennbar. Sie ergeben sich aus der Differenz der Kulturkosten der bisherigen Baumart nach Kalamität mit 20 % Naturverjüngung und den Kulturkosten der neuen Baumart ohne Naturverjüngung, wobei hier öffentliche Förderungen nicht berücksichtigt werden.

Durch einen klimawandelbedingten Baumartenwechsel wird die ohnehin schon kostenintensive Phase der Wiederbewaldung in den meisten Fällen zu einer noch deutlich größeren unmittelbaren Belastung für die Forstbetriebe. Um diese Belastungen kurzfristig zu senken, wird die Versuchung groß sein, die Freiflächen Sukzessionsbaumarten zu überlassen, welche hier von der Birke (für die kein Anfall von Kulturkosten unterstellt wurde) repräsentiert werden.

Die letzte Spalte der Tabelle 1 zeigt die hierdurch kurzfristig einsparbaren Kulturkosten, die zwischen etwa 3 700 und 15 000 Euro/ha und im Mittel bei 7 864 Euro/ha liegen.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass im Körperschafts- und Privatwald die Mehrkosten der Bestandesbegründung teilweise durch Förderungen kompensiert werden können. Wichtig ist hier auch der Hinweis, dass in der Praxis gegenüber den hier exemplarisch genannten Beträgen z. B. durch die Beteiligung von Naturverjüngung, Knappheit des Pflanzgutes, durch Wildschutzmaßnahmen oder auch hohe Mortalitätsraten der Pflanzen erhebliche Unterschiede in der tatsächlichen Höhe der

Kulturkosten auftreten können. Die hier mitgeteilten Werte sind daher als beispielhafte Größenordnungen anzusehen. Diese Quantifizierung der kurzfristig aus dem Baumartenwechsel resultierenden Mehrkosten nach einer Kalamität berücksichtigt jedoch noch nicht die langfristigen Auswirkungen der klimawandelbedingten erhöhten Risiken auf die Ertragslage.

## Abschätzung der langfristigen Mindererträge

Ziel des zweiten Schrittes ist die Herleitung der langfristig durch den Klimawandel zu erwartenden Mindererträge. Zentrale Zielgröße dabei ist die Quantifizierung der durch Kalamitätsanfänge entstehenden Erwartungswerte der Mehrkosten und Mindererlöse, die sich unter Berücksichtigung klimawandelbedingter Ausfallwahrscheinlichkeiten aus langfristigen Produktionsmodellen für verschiedene Baumarten herleiten lassen.

Es sei darauf hingewiesen, dass hier nur die kalamitätsbedingten Ausfälle berücksichtigt werden. Mindererträge aufgrund von klimawandelbedingten Zuwachsverlusten werden hier nicht eingeschätzt. Sie können stark vereinfachend als Minderung der Bonität interpretiert und auf entsprechend erweiterter Datenbasis kalkulatorisch hergeleitet werden. Für die Abschätzung von Zuwachsverlusten fehlt derzeit jedoch die Datenbasis. Selbiges gilt für Erschwernisse beispielsweise im Bereich des Waldschutzes und der Forstorganisation.

## Methodisches Vorgehen

Das Bewertungskonzept basiert auf naturalen und ökonomischen Produktionsmodellen, welche unter Berücksichtigung von Überlebensfunktionen die Folgen unterschiedlicher Risikostärken abbilden. Mit Hilfe von Betriebsklassensimulationen, die den gesamten Produktionsprozess (von der Bestandesbegründung bis zur Ernte) umfassen, werden so betriebliche Erwartungswerte der forstlichen Erfolgskennziffern abgeleitet, wobei bei der Berechnung vom aktuellen Niveau der Kosten und Erlöse ausgegangen wird. Die Betriebsklassen-

<sup>1)</sup> Prof. Dr. Bernhard Möhring leitet die Abteilung für Forstökonomie der Universität Göttingen und ist Vorsitzender des Betriebswirtschaftlichen Ausschusses (AfB) des DFWR.

<sup>2)</sup> Richard Rosenberger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung für Forstökonomie der Universität Göttingen.

<sup>3)</sup> Dir. und Prof. Prof. Dr. Matthias Dieter ist Leiter des Thünen-Instituts für Waldwirtschaft in Hamburg und Mitglied im AfB.

<sup>4)</sup> Dr. Christoph Hartebrödt ist Leiter der Abteilung Forstökonomie und Management der FVA in Freiburg und Mitglied im AfB.

<sup>5)</sup> Nicolaus Graf von Hatzfeldt leitet die Hatzfeldt-Wildenburg'sche Verwaltung, Wissen, und ist stellvertretender Vorsitzender des AfB.

<sup>6)</sup> Martin Hillmann ist Leiter des Fachbereichs Forsteinrichtung, Bewertung, Waldinventur, Raumordnung, Naturschutz der Landwirtschaftskammer Niedersachsen und Mitglied im AfB.

<sup>7)</sup> Felix Moczia ist Fachreferent des DFWR und Mitglied im AfB.

<sup>8)</sup> Godehard Ontrup ist Mitarbeiter der Kaufmännischen Geschäftsführung des Landesbetriebs Landesforsten Rheinland-Pfalz Mainz und Mitglied im AfB.

<sup>9)</sup> Prof. Dr. Artur Petkau ist Professor für Forstökonomie und Forstbetriebsmanagement an der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg und Mitglied im AfB.

<sup>10)</sup> Der wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik beim BMEL spricht sich in seinem Gutachten „Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel“ vom Oktober 2021 in Anbetracht der wirtschaftlichen Probleme des Klimawandels ausdrücklich für die Honorierung von Ökosystemleistungen aus; siehe WBW 2021, S. 144 ff.

<sup>11)</sup> Ggf. können durch den Baumartenwechsel auch Minderkosten entstehen, z. B. bei dem Wechsel von Eiche zu Douglasie. Das dürfte in der Praxis aber kaum Relevanz haben, weil meist der Erhalt bzw. die Steigerung des Laubholzanteils als Maßnahme der Klimaanpassung gilt.

### Was kosten zunehmende Risiken im Wald?

Fortsetzung von Seite 842

simulationen werden sowohl für die Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte, Douglasie, Kiefer als auch für die Birke als Sukzessionsbaumart gerechnet.

Die naturalen Modelle basieren, ausgenommen das der Birke<sup>12</sup>, auf den neuen Ertragsstufen der NW-FVA. Diese spiegeln das aktuelle Zuwachsniveau nordwestdeutscher Waldbestände wieder und unterstellen eine gestaffelte Hochdurchforstung, um aktuell empfohlene Behandlungskonzepte abzubilden (Albert et al. 2021).

Die hier gezeigten Ergebnisse beziehen sich bei allen Baumarten jeweils auf die I. Ertragsklasse und unterstellen übliche planmäßige Produktionszeiträume (vgl. Tabelle 3). Das ökonomische Modell basiert auf dg-abhängigen<sup>13</sup> Kosten und Erlösen der Holzernte nach Bodelschwingh (2018), welche auf Einschlags- und Verkaufstatistiken von Hessen-Forst aus den Jahren 2010 bis 2015 basieren. Dabei wird einheitlich die Holzerntekostenstufe 1 (Kombination aus Kosten für motormanuelle und maschinelle Holzernte ohne Traktionshilfswinde und Seilkran) und bei den Erlösen die Wertklasse 2 (Kombination motormanuelle und maschinelle Holzernte nach Fuchs, unveröffentlicht) angenommen. Im Kalamitätsfall werden prozentuale Auf- bzw. Abschläge zur Abbildung von Mehrkosten und Mindererlösen der Holzernte, die von einer Arbeitsgruppe des Ausschusses für Betriebswirtschaft des DFWR eingeschätzt wurden (Möhring et al. 2021), vorgenommen.

Als Kulturkosten werden die zuvor vorgestellten Beträge verwendet. Die durchschnittlichen Kulturkosten einer Betriebsklasse ergeben sich in Abhängigkeit der Überlebensfunktionen aus dem Modell durch die Gewichtung der jeweiligen Kostensätze mit den Anteilen der regulären bzw. der kalamitätsbedingten Endnutzungsflächen. Die Betriebsklassensimulation der Birke wird ohne Kulturkosten durchgeführt, um eine natürliche Sukzession zu simulieren. Pauschal werden für alle Baumarten 600 Euro/ha einmalige Läuterungskosten angenommen. Auch bei der Birke wird ein pflegender Eingriff unterstellt, da die verwendeten Ertragsstufen sowie Kosten- und Erlösfunktionen der Holzernte eine gewisse Mindestqualität erfordern.

Für Kosten, die nicht mit dem Waldbau (Holzernte, Bestandesbegründung,

Bestandespflege) in Verbindung stehen, werden flächengewichtete Fixkosten aller Waldbesitzarten aus dem Testbetriebsnetz- (TBN-)Forst in Höhe von 160 Euro/ha/a angesetzt (Tabelle 4).

Die Implementierung des Ausfallrisikos erfolgt über eine Überlebensfunktion, welche durch eine modifizierte Weibullfunktion modelliert wird. Deren Funktionsverlauf wird durch die zwei Parameter Risikostärke (S100) und Risikoverlauf (Formparameter  $\alpha$ ) bestimmt (Staupendahl und Möhring 2011). Mit Hilfe der daraus ermittelten Überlebenswahrscheinlichkeiten lassen sich Erwartungswerte der Zielgrößen ableiten (Möhlmann und Möhring 2017). Zur Abbildung unterschiedlicher Risiken wird hier die Risikostärke bei den Kalkulationen variiert, während die Formparameter der verschiedenen Baumarten von Staupendahl und Zucchini (2011) übernommen werden.

Die Auswirkung einer Veränderung der Risikostärke auf die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Bestandes bis zum Alter t wird in Abbildung 1 exemplarisch für verschiedene Risikoniveaus dargestellt, die mit empirischen Daten der Baumart Fichte korrespondieren (Bräunig und Dieter 1999; König 1999).

Die Überlebenswahrscheinlichkeit im Alter t kann auch als mittlerer Flächenanteil eines Bestandes interpretiert werden, der dieses Alter erreicht. Die Kalamitätsnutzungen werden hier als Verminderungen der Bestandesfläche interpretiert, während mögliche Bestockungsgradabsenkungen innerhalb der Bestände und damit einhergehende Wachstumsreaktionen sowie weitere Effekte zur Vereinfachung des Modells nicht explizit berücksichtigt werden.

Abbildung 1 zeigt demnach den Flächenanteil eines Bestandes, der das jeweilige Alter bei unterschiedlichen Risikostärken erreicht. In der risikofreien Situation würden z. B. alle Bestände das Alter von 100 Jahren erreichen, bei stabilen Verhältnissen etwa 86 %, bei labilen Verhältnissen etwa 47 % und bei extrem labilen Verhältnissen 5 %. Das Alter 80, welches hier bei der Fichte als Ende des planmäßigen Produktionszeitraumes angesehen wird, wird mit entsprechend höheren Wahrscheinlichkeiten bzw. Flächenanteilen erreicht.

Mit Hilfe der Überlebensfunktion lassen sich in der Betriebsklassensimulation Erwartungswerte der planmäßigen und der kalamitätsbedingten Nutzungsmengen herleiten. Dabei werden alle potenziell möglichen Nutzungsmengen (von planmäßiger Endnutzung mit Ablauf des geplanten Produktionszeitraumes bis zum Ausfall in der frühen Jugend durch Kalamität zuzüglich der je-

<sup>12</sup> Ertragsstufen Birke: Schwappach 1903  
<sup>13</sup> dg: Brusthöhendurchmesser des Grundflächenmittelstammes; dieser wird aus der durchschnittlichen Grundfläche eines Bestandes abgeleitet.

**Tabelle 4 Mittlere jährliche Fixkosten im Produktbereich 1 (ohne Jagd, Nebennutzungen und Liegenschaften) aus Daten des TBN-Forst, FWJ 2019 (BMEL 2020)**

	Einheit	Staatswald	Körperschaftswald	Privatwald	gewichtetes Mittel
Flächenanteil	%	32,5	19,4	48,0	
Waldschutz	Euro/ha/a	21	11	9	13
Walderschließung	Euro/ha/a	18	12	10	13
Umlage Verwaltungsaufwand P1	Euro/ha/a	186	123	102	133
Summe	Euro/ha/a	225	145	121	160

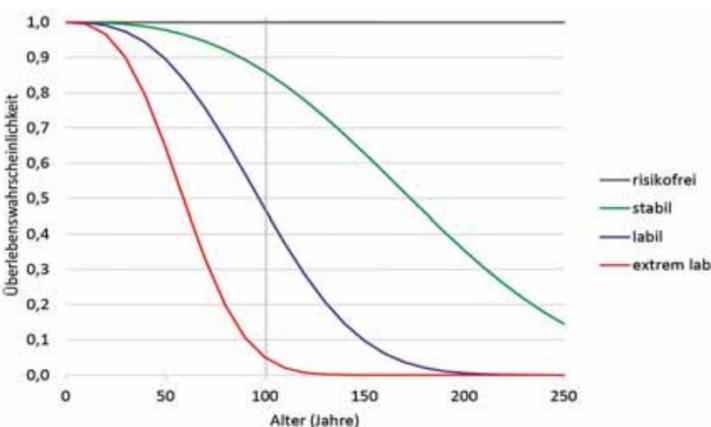


Abbildung 1 Überlebenswahrscheinlichkeiten von Fichtenbeständen unterschiedlicher Risikoniveaus. Die senkrechte Linie markiert das Bezugsalter 100.

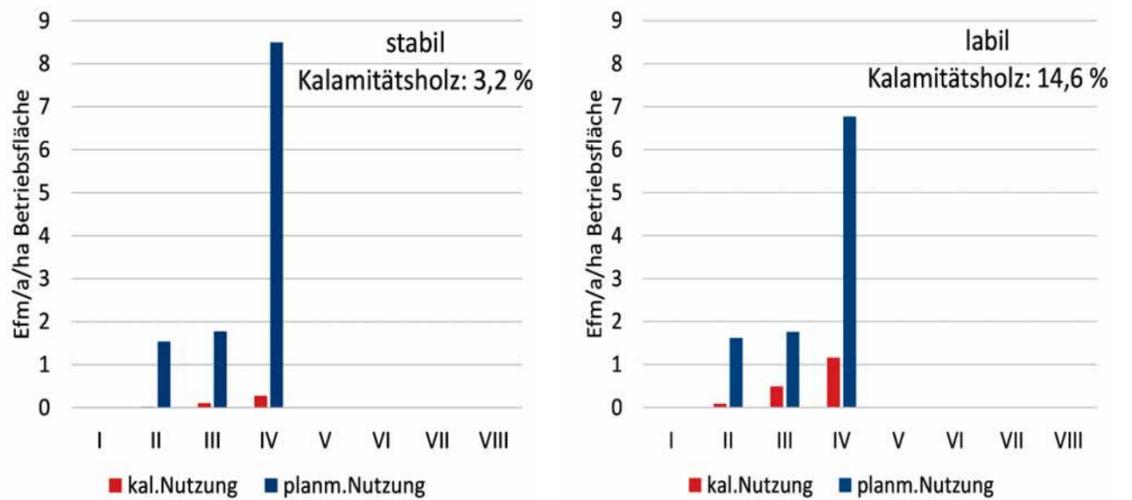


Abbildung 2 Planmäßige Vor- und Endnutzung (blau) und kalamitätsbedingte Endnutzung (rot) in stabilen (links) und labilen (rechts) Fichtenbetriebsklassen (U=80)

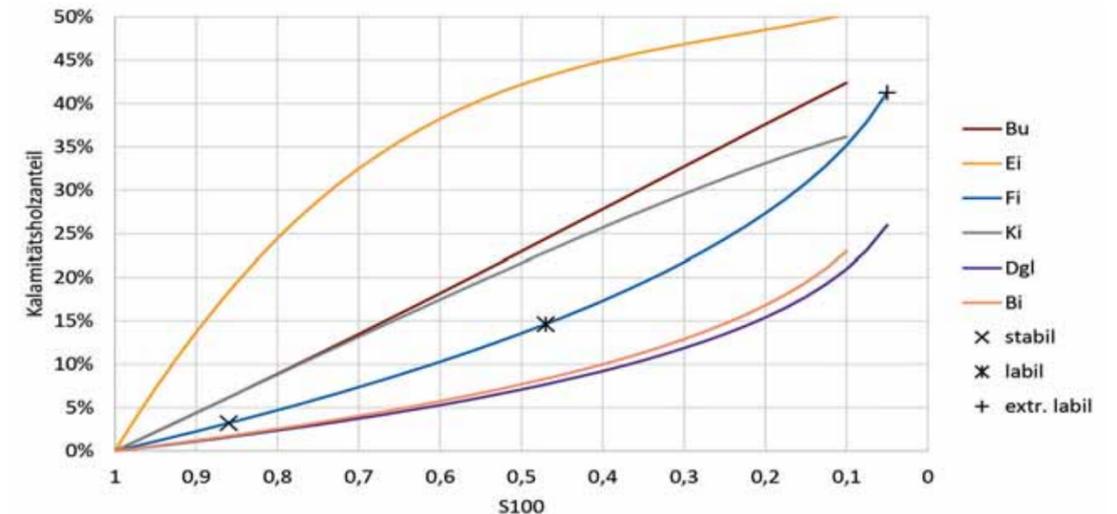


Abbildung 3 Kalamitätsholzanteil in gesamtener Nutzung in Abhängigkeit von dem Risikoparameter S100

**Tabelle 5 Berechnung der Betriebsklassen ohne Überlebensrisiken (jeweils I. Ekl.)<sup>13</sup>**

	Einheit	Fichte	Douglasie	Kiefer	Eiche	Buche	Birke
planmäßiger Produktionszeitraum	Jahre	80	60	120	180	140	60
Holzvorrat insgesamt	Vfm/ha	230	234	207	265	258	74
Holzzuwachs	Vfm/ha/a	12,3	17,3	8,8	6,9	10,3	4,9
Vornutzungen	Efm/ha/a	4,2	6,2	4,4	3,5	4,9	1,4
kalamitätsbedingte Endnutzungen	Efm/ha/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
planmäßige Endnutzungen	Efm/ha/a	5,7	7,7	2,7	2,0	3,3	2,5
gesamte Nutzung	Efm/ha/a	9,8	13,8	7,0	5,5	8,2	3,9
erntekostenfreier Holzerlöse	Euro/ha/a	57	59	37	94	35	21
Kulturkosten	Euro/ha	1605	3182	2527	8930	2715	0
Läuterungskosten	Euro/ha	600	600	600	600	600	600
erntekostenfreie Holzerlöse	Euro/ha/a	561	818	257	516	284	83
jährliche Kulturkosten	Euro/ha/a	20	53	21	50	19	0
jährliche Läuterungskosten	Euro/ha/a	8	10	5	3	4	10
Deckungsbeitrag	Euro/ha/a	534	755	231	463	261	73
fixe Gemeinkosten	Euro/ha/a	160	160	160	160	160	160
Reinertrag der Holzproduktion	Euro/ha/a	374	595	71	303	101	-87

<sup>13</sup> Die mittleren Vorräte erscheinen hier recht gering, da die hier verwandten Ertragsstufen erstens vergleichsweise starke Durchforstungen in der Jugend unterstellen und zweitens die Vorräte bis zu dem Alter, in dem die Ertragsstufenwerte beginnen (bspw. Alter 25 bei Fichte und Alter 35 bei Buche), nicht mit eingerechnet werden.

weils zuvor anfallenden Vornutzungen) mit den aus der Überlebensfunktion berechneten Ausfallwahrscheinlichkeiten gewichtet. Daraus werden die erwarteten Kalamitätsholzanteile an der gesamten Nutzungsmenge abgeleitet. Diese können als langfristig durchschnittliche, betriebliche Kalamitätsholzanteile interpretiert werden, welche in Abbildung 2 exemplarisch in Efm/ha Betriebsfläche für stabile und labile Fichtenbetriebsklassen bei einem planmäßigen Produktionszeitraum von 80 Jahren dargestellt sind.

Statt des abstrakten S100 als Maß der Risikostärke soll im Folgenden der daraus abgeleitete langfristig anfallende Kalamitätsholzanteil als Indikator für das forstbetriebliche Schadensausmaß genutzt werden. In Abbildung 3 sind die langfristigen Kalamitätsholzanteile in Abhängigkeit von dem Risikoparameter S100 für die hier betrachteten sechs Baumarten abgebildet. Erkennbar ist, dass mit sinkender Überlebenswahrscheinlichkeit (also einer Verminderung der Wahrscheinlichkeit, dass der Bestand das Alter 100 erreicht) der Kalamitätsholzanteil ansteigt. Bei gleichem S100 ergeben sich für die verschiedenen Baumarten Unterschiede in den Kalamitätsholzanteilen. Das beruht einerseits auf naturalen Unterschieden zwischen den Baumarten und anderer-

seits auf den unterschiedlich langen planmäßigen Produktionszeiträumen. Je länger der Produktionszeitraum ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit von Kalamitätsnutzungen und somit auch der Kalamitätsholzanteil, was z. B. bei der Eiche und Buche zu erkennen ist.

In Abhängigkeit der Kalamitätsholzanteile werden nachfolgend die Erwartungswerte der Reinerträge und der korrespondierenden Risikokosten abgebildet.

#### Ergebnisse

Zunächst werden in Tabelle 5 die Ergebnisse der Betriebsklassensimulationen ohne Überlebensrisiken anhand wichtiger betrieblicher Kennzahlen als „risikofreie Referenz“ dargestellt.

Bei kalamitätsbedingten Abweichungen von den planmäßigen Produktionszeiträumen fallen die Reinerträge der Holzproduktion deutlich geringer aus als in der risikofreien Variante. Beispielsweise sind die Reinerträge für verschiedene Produktionszeiträume bei kalamitäts- bzw. planmäßiger Endnutzung in Abbildung 4 am Beispiel der Fichte dargestellt.

Erkennbar wird, dass auch kalamitätsbedingte Endnutzungen in Altbeständen die Reinerträge deutlich sen-

ken. Fallen hingegen 50-jährige oder jüngere Beständen aus, so errechnen sich dafür keine positiven, sondern nur noch negative Reinerträge.

Für die Berechnung der Erwartungswerte der Reinerträge werden alle potenziell möglichen Reinerträge mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten der Überlebensfunktionen gewichtet (analog zu der Herleitung der Erwartungswerte der Nutzungsmengen). Die Erwartungswerte der Reinerträge können dann in Abhängigkeit der langfristigen Kalamitätsholzanteile dargestellt werden.

Der in Abbildung 5 erkennbare Verlauf der Erwartungswerte der Reinerträge in Euro/ha/a erscheint grundsätzlich plausibel. Bei Zunahme des Kalamitätsholzanteils sinken die erwarteten Reinerträge der Baumarten. Ab bestimmten Grenzen des Kalamitätsholzanteils sind keine positiven Reinerträge mehr erreichbar, sondern es entstehen langfristig anhaltende Verluste. Der Saldo der Reinerträge zwischen der risikofreien Variante und dem jeweiligen Kalamitätsholzanteil kann als Erwartungswert der jährlichen Risikokosten in Euro/ha interpretiert werden (Abbildung 6).

Es wird erkennbar, dass die Risikokosten je Hektar mit zunehmendem Kalamitätsholzanteil deutlich steigen, wo-

## Was kosten zunehmende Risiken im Wald?

Fortsetzung von Seite 843

bei die Risikokosten bei der ertragsstarken Fichte und Douglasie besonders hoch und bei der ertragsschwachen Kiefer und insbesondere der Birke besonders gering sind.

Die vom Kalamitätsholzanteil abhängigen Risikokosten erscheinen insgesamt geeignet, die langfristigen betriebswirtschaftlichen Belastungen der Forstbetriebe durch Kalamitäten zum Ausdruck zu bringen. Die Quantifizierung der „klimawandelbedingten Risikokosten“ setzt allerdings voraus, dass zwischen den bisher schon üblichen „normalen Risikokosten“ und dem Betrag

der erhöhten Risikokosten saldiert wird. Nur so lassen sich die Risikokosten durch die klimawandelbedingte Veränderung des Risikos ableiten.

In Abbildung 7 werden die Risikokosten je Efm in Abhängigkeit von den Kalamitätsholzanteilen dargestellt. Erkennbar ist ein nahezu linearer Verlauf bei Baumarten mit relativ geringen Verjüngungskosten (wie Birke, Fichte und Douglasie) und ein leicht progressiver Verlauf bei Baumarten mit höheren Verjüngungskosten (wie Eiche, Buche und Kiefer). Die progressive Steigung kommt insbesondere durch die Kultur-

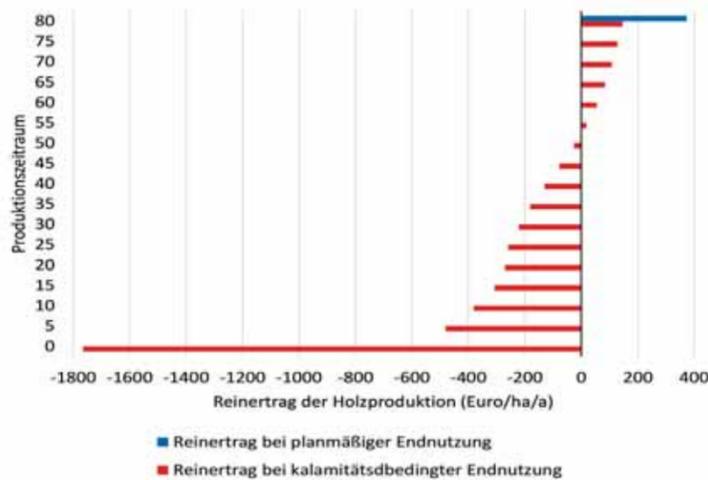


Abbildung 4 Reinerträge der Holzproduktion für verschiedene Produktionszeiträume bei planmäßiger bzw. kalamitätsbedingter Endnutzung (U=80)

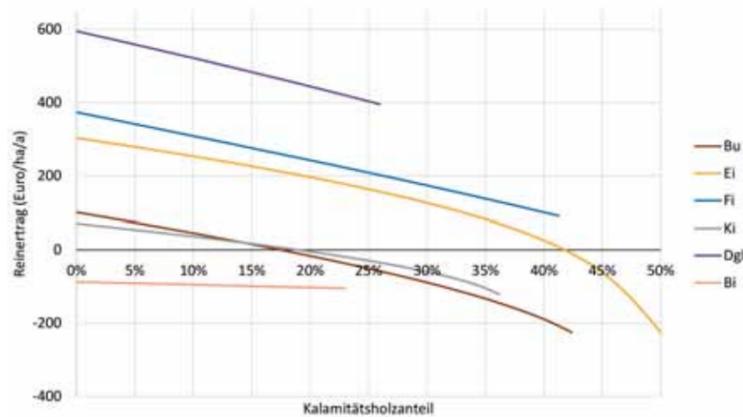


Abbildung 5 Erwartungswerte der Reinerträge der Holzproduktion in Abhängigkeit vom Kalamitätsholzanteil an gesamtter Nutzung

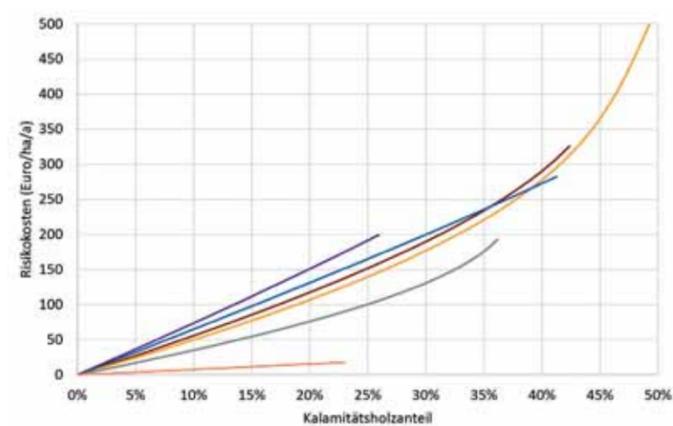


Abbildung 6 Durchschnittliche Risikokosten unterschiedlich risikobehafteter Betriebsklassen

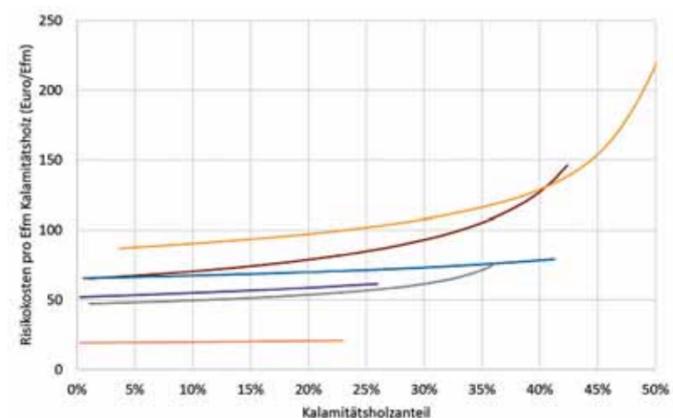


Abbildung 7 Risikokosten pro Efm Kalamitätsholz in Abhängigkeit des Kalamitätsholzanteils

**Tabelle 6 Risikokosten pro Efm Kalamitätsholz bei einem Kalamitätsholzanteil von 20 % und risikofreie erntekostenfreie Holzerlöse**

	Einheit	Fichte	Douglasie	Kiefer	Eiche	Buche	Birke
Risikokosten pro Efm Kalamitätsholz	Euro/Efm	70	59	53	97	79	20
risikofreier erntekostenfreier Holzerlös	Euro/Efm	57	59	37	94	35	21

kosten zustande, die mit zunehmendem Kalamitätsholzanteil aufgrund des zunehmenden Anteils der Bestandesbegründung unter schwierigen Verhältnissen steigen. Auch wenn die Risikokosten je Festmeter bei hohen Kalamitätsholzanteilen steigen, so ermöglicht der Bezug auf den Festmeter Kalamitätsholzanteil doch eine wichtige Interpretation.

In Tabelle 6 sind die Risikokosten je Efm Kalamitätsholz bei einem einheitlichen Kalamitätsholzanteil von 20 % dargestellt. An den Zahlen wird erkennbar, dass die Risikokosten je Festmeter Kalamitätsholz bei der Douglasie, Eiche und Birke in etwa dem durchschnittlichen erntekostenfreien Holzerlös bei risikofreier Produktion entsprechen. Mithin trägt ein Kalamitätsholzanteil bei diesen Baumarten nicht zur Deckung der Fixkosten oder zum Erfolg bei. Bei Fichte, Buche und Kiefer sind die Verhältnisse noch ungünstiger, denn hier sind die Risikokosten je Festmeter deutlich höher als die durchschnittlichen erntekostenfreien Holzerlöse bei risikofreier Produktion. Mithin leistet der Kalamitätsanfall bei diesen Baumarten nicht nur keinen Beitrag zur Deckung der betrieblichen Fixkosten oder zum betrieblichen Erfolg, sondern vermindert diesen zusätzlich.

### Mindererträge bei einem Baumartenwechsel

Neben der Quantifizierung der Risikokosten im Klimawandel für gegebene forstliche Betriebsmodelle können die zuvor analysierten Ergebnisse auch dazu dienen, den Baumartenwechsel in Richtung naturnahe Laubholzbestockung, der vielfach als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel empfohlen wird, ökonomisch zu analysieren.

Anfangs wurden die kurzfristigen Mehrkosten bei einem Baumartenwechsel erläutert. In Anlehnung an die zuvor dargestellten langfristigen Ertragsverluste können aus den Erwartungswerten der Reinerträge zusätzlich die langfristigen ökonomischen Folgen eines an den Klimawandel angepassten Baumartenwechsels unter Berücksichtigung des Risikos abgebildet werden.

So wird z. B. aus Abbildung 5 erkennbar, dass ein Wechsel von der Fichte in Richtung Buche oder gar Birke mit erheblichen langfristigen Ertragsminderungen verbunden ist, selbst wenn diese Baumarten geringere Risiken aufweisen. Auch diese Differenzen können als Mindererträge infolge des Klimawandels interpretiert werden.

Dabei ist aber zu beachten, dass die relativen ökonomischen Vorteilhaftigkeiten zwischen den Baumarten bisher nur innerhalb derselben, hier der I. Ertragsklasse, dargestellt wurden. Aufgrund des von der Baumart abhängigen Standort-Leistungsbezugs sind die Wachstumsrelationen zweier Baumarten i. d. R. aber nicht gleich, so dass bei einem Wechsel weitere baumartenwechselbedingte Mindererträge zu erwarten sind. Eine Ertragsklassenrelation zwischen Buche und Fichte ist exemplarisch anhand von Forsteinrichtungsdaten aus dem Hessischen Forstamt Hessisch Lichtenau abgeleitet (Abbildung 8).

Es wird erkennbar, dass z. B. bei der I. Ertragsklasse der Baumart Fichte die Baumart Buche nur eine mittlere Ertragsklasse von etwa 1,6 aufweist. Bei einer Quantifizierung der Kosten der klimawandelbedingten Anpassung müsste zusätzlich auch der Faktor der Wachstumsrelationen angemessen berücksichtigt werden.

### Diskussion

Die hier vorgestellten Kalkulationen basieren auf vereinfachenden Modellen und Annahmen, die eine vergleichsweise einfache Abschätzung der klimawandelbedingten Mehrkosten und Mindererträge ermöglichen sollen. Zusätzlich zu den viel diskutierten kurzfristigen

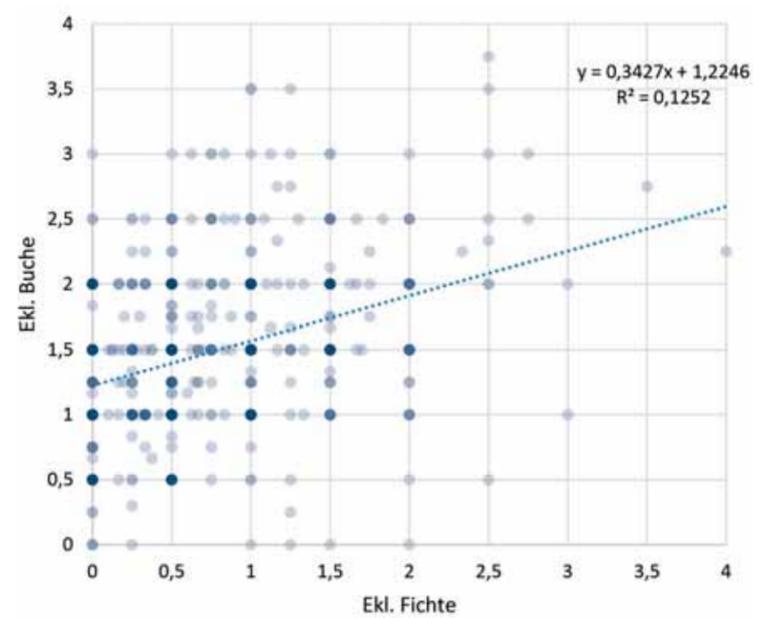


Abbildung 8 Verschiebung der relativen Ertragsklassen von Fichte zu Buche als Streudiagramm. Die Farbintensität der Punkte deutet auf die Häufung von Datenpaaren hin.

(Datenherkunft: Forsteinrichtung Forstamt Hessisch Lichtenau, Stichjahr 2018, Hessen-Forst, Forstbetriebsplanung. Berücksichtigt wurden alle Unterabteilungen, in denen die jeweiligen Baumarten gleichzeitig innerhalb einer Altersspanne von 30 bis 100 Jahren vorkamen.)

Mehrkosten von Kalamitäten, die aus der Wiederbewaldung und der Anpassung der Wälder an den Klimawandel resultieren, sind diese Kalkulationen darauf ausgelegt, langfristige Ertragsverluste abzubilden. Die verwendeten komparativ-statischen Modelle ermöglichen die Abbildung nachhaltiger Betriebszustände unter Berücksichtigung von Überlebensrisiken und somit die Ermittlung langfristig zu erwartender, durchschnittlicher Risikokosten.

Zur Erleichterung der Interpretation des Überlebensrisikos wurde hier vorgeschlagen, den Kalamitätsholzanteil am Holzeinschlag zu verwenden. Bei der Anwendung des Konzeptes ist darauf zu achten, dass hier die langfristigen Anteile des betrieblichen Kalamitätsholzanteils abgeschätzt werden müssen, um Rückschlüsse ziehen zu können, und nicht einzelne Extremjahre isoliert betrachtet werden dürfen.

Auch ist das hier vorgestellte Konzept explizit nicht dazu gedacht, dynamische Prozesse wie z. B. die Entwicklung der Ertragslage einer Betriebsklasse im Zeitverlauf nach flächiger Kalamität darzustellen. So kann das „Liquiditätsproblem“, welches aus der Langfristigkeit der forstlichen Produktion resultiert, Forstbetriebe gerade in Zeiten des Klimawandels vor erhebliche Probleme stellen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn – wie in den letzten Jahren – großflächig Waldbestände zu „Schleuderpreisen“ veräußert werden mussten und aus deren außerplanmäßigen Ernte keine Rücklagen gebildet werden konnten. Der Liquiditätseffekt kann in Forstbetrieben durch den erhöhten Kalamitätsholzeinschlag aber kurzfristig auch zu erhöhten Überschüssen führen. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass die damit verbundenen Substanzverluste nicht angemessen berücksichtigt werden.

Die hier ermittelten Risikokosten gehen auf verschiedene Komponenten zurück, welche hier simultan berücksichtigt wurden. Enthalten in der Modellierung sind z. B. Mehrkosten bei der Bestandesbegründung, Volumenzuwachstverluste durch außerplanmäßig (vorzeitig) eingeschlagenes Holz, Qualitätsverschiebungen durch Schädigung des zu verwertenden Holzes und Markteffekte. Die letzten beiden Aspekte wurden jüngst von Fuchs et al. (2022) untersucht. Die Autoren unterschieden dabei nach Kalamitätsereignissen auf bestands-, regionaler und überregionaler Ebene. Der Effekt der Qualitätsverschiebung wird bei der Fichte als eher gering angesehen, wohingegen hohe

Mindererlöse dann auftreten, wenn regionale oder überregionale Kalamitätsereignisse den Markt beeinflussen. Bei der Buche hingegen wird der Markteffekt als relativ gering angesehen, während die Qualitätsverschiebung stärker ausgeprägt ist. In diesem Zusammenhang sollte beachtet werden, dass die hier unterstellten Mindererlöse der Fichte aus den stark marktbeeinflussenden Jahren 2018 bis 2021 resultieren, die nicht bei jedem Kalamitätsereignis in dieser Höhe auftreten müssen. Auch andere situative Abweichungen, wie z. B. das tatsächliche Auftreten von Kalamitäten oder regionale Unterschiede, können erheblichen Einfluss auf die Kalkulationsergebnisse haben, weshalb die hier vorgestellten Modellkalkulationen nur als exemplarisch angesehen werden sollten.

Im Rahmen der hier vorgestellten Modellrechnungen werden einige Eingangsgrößen als konstant angenommen, auch wenn zu erwarten ist, dass sie sich im Rahmen des Klimawandels verändern. So werden, wie bereits beschrieben, z. B. aufgrund fehlender Daten veränderte Zuwachsverhältnisse sowie mögliche Veränderungen der Risikoart „Alters- oder Jugendrisiko“ nicht berücksichtigt. Auch werden mögliche Anpassungsreaktionen bei der Waldbehandlung (Verkürzung der Produktionsdauer und Verstärkung der Durchforstungsintensität usw.) nicht berücksichtigt. Sicher ist beispielsweise auch, dass die erhöhten Risiken einen Mehraufwand im Bereich Waldschutz, Walderschließung und Verwaltung erfordern, während eine extensive Bewirtschaftung von Sukzessionsbaumarten mit geringeren betrieblichen Fixkosten verbunden sein dürfte. Diese Größen wurden hier jedoch als konstant angesetzt, da diesbezüglich keine empirischen Daten vorliegen.

In diesem Zusammenhang ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass diesen Berechnungen zugrunde liegende komparativ-statische Modell nur zinsfreie Reinerträge kalkuliert. Bei Annahme eines positiven Kalkulationszinses ist damit zu rechnen, dass die Erwartungswerte der jährlichen Erfolgsgrößen (Annuitäten) in ihren absoluten Beträgen insgesamt geringer ausfallen, wobei die beim Laubholz üblichen längeren Produktionsdauern *ceteris paribus* ungünstigere Ergebnisse liefern als bei einem Vergleich der Reinerträge. Je höher der Zinssatz sowie die anfänglichen Investitionskosten und je länger der mitt-

# Klimaneutrale Kreislaufwirtschaft auf Basis von Holz

Forscher wollen Verwertung regionaler Althölzer mit regenerativer Herstellung von Wasserstoff verbinden

**Eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft auf der Basis von Holz ist das Ziel des Verbundprojekts »H2 Wood – Black Forest«, das vom BMBF mit 12 Mio. Euro gefördert wird. Hierfür entwickelt das Fraunhofer IGB ein biotechnologisches Verfahren, um aus Holzabfällen Wasserstoff und biobasierte Koppelprodukte herzustellen. Beim Projektpartner Campus Schwarzwald in Freudenstadt wird das Verfahren in einer eigens dafür ausgelegten Anlage demonstriert. Um aufzuzeigen, wie der regenerative Energieträger durch lokale Betriebe und Energieversorger genutzt werden kann, erstellen Fraunhofer IPA und die Universität Stuttgart im Projekt eine Wasserstoff-Roadmap für die Schwarzwaldregion.**

Holz ist ein wichtiges Wirtschaftsgut des Schwarzwalds. Bei der Verarbeitung zu Möbeln und Baustoffen, aber auch beim Abbruch von Gebäuden fallen regional beachtliche Mengen an Holzresten an. Diese werden derzeit zum Teil kostenintensiv entsorgt oder in Holzverbrennungsanlagen energetisch genutzt. Auf der anderen Seite gilt „grüner“ Wasserstoff (H<sub>2</sub>), der mittels Elektrolyse von Wasser mit erneuerbaren Energien hergestellt wird, als Schlüsselement der Energiewende. Der Bedarf an regenerativ erzeugtem Wasserstoff für eine klimafreundliche Wirtschaft in Industrie, Verkehr und Wärmeversorgung ist enorm. Deutschland und Europa setzen daher vor allem auf Wasserstoffimporte aus südlichen Ländern mit ganzjährig ausreichender Sonneneinstrahlung.

Bis Mitte 2024 will eine Forschungsgruppe in der Region Schwarzwald einen Weg finden, um die Nutzung regionaler Holzreste und von Altholz mit der Herstellung von regenerativem Wasserstoff zu verbinden. „Nach dem Ansatz der Bioökonomie wollen wir mithilfe biotechnologischer Prozesse klimaneutralen Biowasserstoff sowie zusätzlich verwertbare Stoffe wie Carotinoide oder Proteine aus Altholz und Holzabfällen herstellen“, erläutert Dr. Ursula Schließmann vom Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, die das Verbundvorhaben „H2 Wood – Black Forest“ koordiniert. Partner im Forschungsverbund sind neben dem Fraunhofer IGB auch das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, das Institut für industrielle Fertigung und

technik IGB, die das Verbundvorhaben „H2 Wood – Black Forest“ koordiniert. Partner im Forschungsverbund sind neben dem Fraunhofer IGB auch das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, das Institut für industrielle Fertigung und



Ein Fraunhofer-Forscherteam arbeitet daran, im Schwarzwald aus Rest- und Althölzern „grünen“ Wasserstoff zu erzeugen. Fotos: Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik/Leins Aktenvernichtungs GmbH/J. Weiblen

Fabrikbetrieb IFF der Universität Stuttgart sowie das Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit Schwarzwald gGmbH (Campus Schwarzwald). Ziel der Initiative sei es, mithilfe eines umfassenden Konzepts für eine nachhaltige und innovative Versorgung des Schwarzwalds mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen und die Region bei der Erreichung ihrer Klimaziele zu unterstützen, führt Stefan Bogenrieder, Geschäftsführer von Campus Schwarzwald, aus. Kohlenstoffdioxid-Emissionen werden dabei auf zweierlei Wegen eingespart: Zum einen ersetzt der regenerativ erzeugte Wasserstoff bisherige fossile Energieträger, zum anderen werden Rest- und Altholz nicht nur Wasserstoff liefern. Durch den neuen biotechnologischen Ansatz wird die energetische Verwertung der Holzabfälle zu Wasserstoff mit einer stofflichen

Nutzung verknüpft. „Das aus dem Holz freigesetzte CO<sub>2</sub> wird in Form von kohlenstoffbasierten Koppelprodukten gebunden und damit zurück in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf geführt“, erläutert Umweltpertin Schließmann.

Welche Mengen an Rest- und Altholz fallen im Holzverarbeitenden Gewerbe und den Kommunen überhaupt an, wieviel Wasserstoff ließe sich daraus erzeugen und wie groß wäre das Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Emissionen? Diesen Fragen geht das Projektteam in Potenzialanalysen auf den Grund. Zugleich untersuchen die Partner, wie der erzeugte Wasserstoff am besten gespeichert, transportiert und genutzt werden kann. Denn Wasserstoff ist nicht nur flexibler Energiespeicher, sondern auch als Kraftstoff für Fahrzeuge, Brennstoff für Hochöfen und Brennstoffzellen sowie als Grundstoff für zahlreiche industrielle Prozesse und chemische Folge-

produkte einsetzbar. „Hierzu analysieren und bewerten wir den Energieverbrauch der Industrie, der Haushalte sowie des Nah- und Fernverkehrs und leiten daraus Potenziale einer dezentralen Wasserstoffherzeugung und -nutzung innerhalb der Region Schwarzwald ab“, sagt Dr. Erwin Groß vom Fraunhofer IPA. „Die Ergebnisse aller Erhebungen und Berechnungen fassen wir in einer Wasserstoff-Roadmap für die Region Schwarzwald zusammen“, so Groß.

Am Fraunhofer IGB werden zudem die notwendigen Prozesse entwickelt und experimentell untersucht, bevor sie in einer integrierten Anlage am Campus Schwarzwald in Freudenstadt umgesetzt werden können. Der erste Schritt und Voraussetzung für die biotechnologische Umwandlung ist die Vorbehandlung des Alt- und Restholzes. „Wir stehen hier vor einer ziemlichen Herausforderung, denn Holzabfälle aus Hausabbruch, Möbelbau und Baustoffproduktion, darunter Span- oder MDF-Platten, enthalten Klebstoffe wie Harze und Phenole oder auch Lacke. Diese chemischen Bestandteile müssen wir zunächst entfernen, damit die Bakterien und Mikroorganismen, also die Akteure der biotechnologischen Wasserstoffproduktion, ihre Arbeit erledigen können“, erläutert Schließmann. Zudem muss das Holz in seine Bausteine zerlegt und die gewonnene Cellulose in einzelne Zuckermoleküle gespalten werden, welche den wasserstoffproduzierenden Mikroorganismen als Futter dienen.

Für die biotechnologische Umwandlung der Holzzucker werden am Fraunhofer IGB zwei Fermentationsverfahren etabliert und miteinander verknüpft. Das eine setzt auf wasserstoffproduzierende Bakterien, welche die Zuckerarten zu CO<sub>2</sub>, organischen Säuren und Ethanol verstoffwechseln. Die Stoffwechselprodukte der Bakterien stellen die Nahrung für die Mikroorganismen dar. Diese synthetisieren daraus Carotinoide oder Proteine als Koppelprodukte und setzen dabei ebenfalls Wasserstoff frei.

## Was kosten zunehmende Risiken im Wald?

Fortsetzung von Seite 844

lere Produktionszeitraum ist, desto stärker wird dieser Effekt auftreten (Möhring 2010). Die hier vergleichsweise vorteilhaft erscheinende Baumart Eiche wäre von dem Zinseffekt besonders beeinflusst. Auch die ökonomischen Ergebnisse der Buche dürften aufgrund der vergleichsweise hohen Begründungskosten und der langen Produktionszeiträume negativ beeinflusst werden, wenn auch nicht so stark wie bei der Eiche.

### Schlussfolgerungen

Der vorgestellte Modellansatz verdeutlicht anhand der hier gezeigten kurz- und langfristigen Komponenten zwei durch den Klimawandel verursachte, forstbetrieblich relevante, ökonomische Problemlagen.

Zum einen müssen Forstbetriebe, um eine an das zukünftige Klima angepasste Baumartenwahl umzusetzen, i. d. R. kurzfristig erhebliche Mehrkosten bei der Bestandesbegründung tragen. Hier können die bestehenden öffentlichen Förderungen ggf. Entlastung bringen und motivieren, den Wald aktiv wieder zu bewalden und umzubauen. Die Förderung ist jedoch an bestimmte Baumarten gekoppelt und enthält für Forstbetriebe auch Risiken der Rückforderung bei Nichterreichen des ursprünglichen Verjüngungsziels. Liquiditäts- sowie Kapazitätsengpässe nach Kalamitäten oder aber die aktive Entscheidung zur Risikominderung durch Extensivierung der Bewirtschaftung können jedoch auch die Übernahme von Sukzession zur Folge haben, was kurzfristig erhebliche Kosten spart.

Zusätzlich zu den kurzfristigen, mit den Kosten der künstlichen Bestandesbegründung verbundenen Aspekten, werden langfristige Mindererträge auf-

treten, da die klimawandelbedingte Zunahme der Risiken (Minderung der Überlebenswahrscheinlichkeiten) die erzielbaren Erträge deutlich schmälern wird. Schon bei moderaten Kalamitätsanfällen können sich langfristig negative Reinerträge ergeben, die eine nachhaltig wirtschaftlich erfolgreiche Forstwirtschaft auf Dauer in Frage stellen.

Das Modell zeigt auch, dass der vielfach zur Klimaanpassung empfohlene Baumartenwechsel, insbesondere wenn Buchenbestände angestrebt werden, langfristig zu Ertragseinbußen führen wird, selbst wenn deren naturale Stabilität höher als z. B. jene der Fichte ist.

Die Kalkulationen verdeutlichen insofern auch, dass im Rahmen der allgemein empfohlenen Begründung von Mischbeständen ein angemessener Anteil ertragsstarker Baumarten mit etabliert werden sollte, um die Ertragsminderungen zumindest teilweise auszugleichen. Dabei steht die Douglasie hier nur exemplarisch für eine ertragsstarke Baumart; gleiches dürfte für Lärche, Küstentanne, Roteiche usw. gelten.

Wird zum Zwecke der kurzfristigen Kostenersparnis auf Pflanzung verzichtet und nur Sukzession übernommen, werden die langfristigen Erträge (hier exemplarisch für die Birke kalkuliert) selbst ohne Risiko nicht einmal die angenommenen laufenden Fixkosten decken können, sofern diese durch Extensivierung nicht erheblich gesenkt werden können.

Die ökonomischen Folgen des Klimawandels sind für die Forstbetriebe also doppelt nachteilig. Einerseits besteht ein erheblicher Anpassungsbedarf, der mit erhöhten Kosten bei der Bestandesbegründung verbunden ist, insbesondere wenn der Vorbestand kalamitätsbedingt ausgefallen ist. Andererseits vermindern sich für Forstbetriebe in Zeiten

des Klimawandels langfristig die Ertragsperspektiven, welche unter ungünstigen Bedingungen sogar in langfristige Verluste umschlagen können.

Unter den Bedingungen des Klimawandels werden Forstbetrieben aus der Rohholzproduktion somit insgesamt weniger finanzielle Mittel zur Verfügung stehen, welche für die Aufrechterhaltung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung und somit für die langfristige Bereitstellung wichtiger Ökosystemleistungen eingesetzt werden können.

Die Kalkulationsergebnisse unterstreichen insofern die forstpolitische Grundsatzfrage, ob Forstbetriebe zukünftig in der Lage sein werden, aus der Rohholzproduktion eine nachhaltige Waldbewirtschaftung aufrecht zu erhalten – oder ob dies nur durch zusätzlichen finanziellen Input, z. B. durch die Honorierung von Ökosystemleistungen, möglich sein wird.

### Literaturverzeichnis

Albert, M.; Nagel, J.; Schmidt, M.; Nagel, R.-V.; Spellmann, H. (2021): Neue Ertragstafeln. Hg. v. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). Online verfügbar unter <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/waldpflege-und-nutzung/neue-ertragstafeln>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

BMEL (2020): BMEL-Statistik: Testbetriebsnetz Forst (Buchführungsergebnisse). Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/testbetriebsnetz/testbetriebsnetz-forst-buchfuhrungsergebnisse>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Bodelschwing, H. von (2018): Ökonomische Potentiale von Waldbeständen: Konzeption und Abschätzung im Rahmen einer Fallstudie in hessischen Staatswaldflächen. 47. Aufl. Bad Orb: JD Sauerländer's Verlag (Schriften zur Forst- und Umweltökonomie).

Bolte, A.; Höhl, M.; Hennig, P.; Schad, T.; Kroher, F.; Seintsch, B. et al. (2021): Zukunftsaufgabe Waldanpassung. In: AFZ-Der Wald (76), S. 12-16.

Brandl, S.; Paul, C.; Knoke, T.; Falk, W. (2020): The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. In: Forest Ecology and Management 458.

Bräuning, R.; Dieter, M. (1999): Waldumbau, Kalamitätsrisiken und finanzielle Erfolgskenn-

zahlen. Frankfurt a. M.: J.D. Sauerländer's (Schriften zur Forst- und Umweltökonomie, 18).

Elsasser, P.; Rock, J.; Rüter, S. (2020): Ein Vergleich unterschiedlicher Vorschläge zur Honorierung der Klimaschutzleistung der Wälder. Thünen Working Paper, No. 151. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.

Fuchs, J. M.; Bodelschwing, H. von; Lange, A.; Paul, C.; Husmann, K. (2022): Quantifying the consequences of disturbances on wood revenues with Impulse Response Functions. In: Forest Policy and Economics 140, S. 102738. DOI: 10.1016/j.forpol.2022.102738.

Gardiner, B.; Schuck, A. R. T.; Schelhaas, M. J.; Orazio, C.; Blennow, K.; Nicoll, B. (2015): Living with storm damage to forests: European Forest Institute Joensuu.

Hessen Forst (2019): Standardkulturkosten für die Waldbewertung der Servicestelle Waldbewertung Hessen-Forst. Stand 2019.

Kissling-Näf, I.; Bernath, K.; Felten, N. von; Meyer, A. (2012): Finanzierung von Ökosystemleistungen im Wald. Hg. v. Ernst Basler + Partner AG i. A. des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Wald.

König, A. (1999): Risikoorientierter Waldbau: Ein methodischer Ansatz zum Umgang mit Naturgefahren im Waldbau. In: Fischer, A., Mössner M. (Hrsg.) Forschung in Sturmwind-Ökosystemen Mitteleuropas. München: Forstl. Forsch. (176).

MELV (2015): Tabelle 1.13 Kulturkosten, vgl. WBR 2014 Nr. 11. Online verfügbar unter [https://www.landesforsten.de/wp-content/uploads/2018/05/tab\\_13\\_kulturkosten\\_d7-15.pdf](https://www.landesforsten.de/wp-content/uploads/2018/05/tab_13_kulturkosten_d7-15.pdf), zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Möhring, B. (2010): Optimierung forstlicher Produktion unter Beachtung von finanziellen Restriktionen (Optimisation of forest production under financial restrictions). In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 161 (9), S. 346-354. DOI: 10.3188/szf.2010.0346.

Möhring, B.; Bitter, A.; Bub, G.; Dieter, M.; Dög, M.; Hanewinkel, M. et al. (2021): Schadenssumme insgesamt 12,7 Mrd. Euro: Abschätzung der ökonomischen Schäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft. In: Holz-Zentralblatt 147 (9), S. 155-158.

Möhring, B.; Waldhausen, C. von (2022): Ökonomische Bewertung und Wege aus der Krise. Deutscher Forstverein, Forstvereinstagung Braunschweig, 19.05.2022.

Möllmann, T. B.; Möhring, B. (2017): A practical way to integrate risk in forest management decisions. In: Annals of Forest Science 74 (4), S. 1-12.

MULE (2019): Anlage 10 zu Nummer 2.6.7.2. der WBR LSA 2014. Online verfügbar unter [https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/MLU/Landeszentrum\\_Wald/LZW-PDF/Anlage\\_10\\_-\\_Kulturkostenstufen\\_2019.pdf](https://landeszentrumwald.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/Landeszentrum_Wald/LZW-PDF/Anlage_10_-_Kulturkostenstufen_2019.pdf), zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Ring, I. (2015): Der Nutzen von Ökonomie und Ökosystemleistungen für die Naturschutzpraxis. Workshop III: Wälder. BfN-Skripten 334. Bonn.

Schwappach, A. (1903): Beiträge zur Kenntnis der Wuchsleistung von Birkenbeständen. In: Zeitschr. f. Forst- u. Jagdwesen, S. 479-484.

Seidl, R.; Schelhaas, M.-J.; Rammer, W.; Verkerk, P. J. (2014): Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. In: Nature Climate Change 4 (9), S. 806-810.

Spathelf, P.; Ammer, C.; Bolte, A.; Seifert, T.; Weimar, H. (2022): Fakten zum Thema: Wälder und Holznutzung. In: AFZ-Der Wald 77 (7), S. 39-44.

Staupendahl, K.; Möhring, B. (2011): Integrating natural risks into silvicultural decision models: A survival function approach. In: Forest Policy and Economics 13 (6), S. 496-502.

Staupendahl, K.; Zucchini, W. (2011): Estimating survival functions for the main tree species based on time series data from the forest condition survey in Rheinland-Pfalz, Germany. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung 182 (7), S. 129-145.

Thünen-Institut (2021): Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank. Auftragskürzel: 69Z1J1\_L349of\_2012\_L350. Archivierungsdatum: 2014-8-28 13:44:23.047. Überschrift: Waldfläche [ha] nach Bestockungstyp der Jungbestockung und Verjüngungsart, Filter: Bestockungsschicht der Jungbestockung= Jungbestockung mit oder ohne Schirm; Jahr=2012. Online verfügbar unter <https://bwi.info/>, zuletzt geprüft am 30.09.2022.

WBW (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel – Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik Oktober 2021. Online verfügbar unter [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 30.09.2022.

Weller, A.; Böckmann, T.; Noltensmeier, A. (2022): Betriebssicherheit der Hauptbaumarten. Eine Untersuchung im niedersächsischen Landeswald zu abiotischen und biotischen Schadereignissen. In: Holz-Zentralblatt 148 (5), S. 79-81.