

Adaptive Waldbewirtschaftung zur Minderung von Störungen

Dominik Thom^{1,2,*}, Peter Spathelf³

¹ School of Life Sciences, Technische Universität München, Freising (DE)

² Gund Institute for Environment, University of Vermont (USA)

³ Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde (DE)

Abstract

Die Zunahme von Störungen ist eine grosse Herausforderung für die Forstwirtschaft. Im Extremfall können Kippunkte erreicht werden, die das Ökosystem grundlegend verändern und einen Verlust von Ökosystemleistungen und Biodiversität mit sich bringen. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie die Anfälligkeit von Wäldern gesenkt, deren Anpassungsfähigkeit erhöht und damit zukünftige Störungen und deren Konsequenzen abgeschwächt werden können. Es gibt zwar keine «Musterlösung», dennoch steht der Forstwirtschaft eine grosse Anzahl möglicher Massnahmen für den Umgang mit zunehmenden Störungen zur Verfügung. Diese können in proaktive und reaktive Massnahmen für dominante Störungsagenten auf Bestands- und Landschaftsebene gegliedert werden. Während erstere langfristig effektiver sind, wirken letztere ohne grosse Verzögerungen. Bewirtschaftungskonzepte auf Landschaftsebene wie die integrative Waldbewirtschaftung, funktionale Netzwerke oder der störungsbasierte Waldbau bündeln verschiedene Anpassungsmassnahmen und erhöhen sowohl die Risikostreuung als auch die Entwicklungsmöglichkeiten von Waldlandschaften in der Reorganisationsphase nach Störungen. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die mildernden Effekte von Anpassungsmassnahmen auf Störungen zu quantifizieren, damit Biodiversität und Ökosystemleistungen im Klimawandel bestmöglich erhalten bleiben.

Keywords: adaptive management, bark beetles, climate change, drought, fire, wind

doi: 10.3188/szf.2023.0070

* Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising, E-Mail dominik.thom@tum.de

Die Veränderung mitteleuropäischer Störungsregimes stellt zunehmend eine Herausforderung für die Waldbewirtschaftung dar (Senf et al 2018). Der Klimawandel und die Einschleppung invasiver Organismen sorgen für einen Störungsanstieg mit bis dato beispiellosen Effekten auf Waldökosystemleistungen. Bisher nie dagewesene Dürren (Abbildung 1), fallweise in Kombination mit Borkenkäferausbrüchen (Abbildung 2), und andere «Mega-Störungen» wie extreme Waldbrände destabilisieren Wälder und beeinträchtigen ihre Ökosystemleistungen (Vitasse et al 2019). Im Extremfall erreichen Wälder einen Kippunkt, bei dem Störungen zu einer grundlegenden Veränderung des Ökosystems (state-shift) führen (Nolan et al 2021). Der Effekt von Störungen auf europäische Wälder hängt von diversen Faktoren ab, u.a. von der Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur sowie von der Intensität des Klimawandels, den Störungsagenten (Störungsverursachern) und ihren Interaktionen. Zum Beispiel können sich nadelbaumdominierte Wälder aufgrund ihrer geringen Ausschlagfähigkeit

schlechter von einem starken Waldbrand erholen und sind damit anfälliger für state-shifts als Laubwälder (Hart et al 2019). Dürre und Feuer verursachen zudem Mortalität in jungen Wäldern und in der Verjüngung. Borkenkäfer und Sturm beeinflussen hingegen vorwiegend ältere Wälder, welche häufig bereits zur Verjüngung bzw. zur Samenbank beigetragen haben. Der vorliegende Beitrag soll der Forstwirtschaft helfen, sich auf zukünftige Störungszunahmen vorzubereiten. Gestützt auf eine Literaturstudie werden Handlungsoptionen aufgezeigt, um die Anfälligkeit von Wäldern zu senken sowie die Anpassungsfähigkeit zu erhöhen und damit die Folgen zukünftiger Störungen abzuschwächen.

Waldanpassung durch Störungsmanagement

Das Ausmass von Störungen in Waldökosystemen hängt stark von Klima- und Witterungsfaktoren ab, wie Beobachtungen und Modellberechnun-

Abb 1 Mortalität in fränkischen Buchenwäldern aufgrund der Dürreperiode 2018–2020, aufgenommen im Frühjahr 2021. Foto: Thomas Mathes/TU München



gen zeigen (Stadelmann et al 2013; Temperli et al 2013). Eine bedeutende Rolle spielen jedoch auch Bewirtschaftungsstrategien, die Waldökosysteme an veränderte Umweltbedingungen anpassen (Millar et al 2007). In den letzten Jahrzehnten ist das Interesse an adaptiven Bewirtschaftungsmassnahmen stark gestiegen. Diese sind darauf ausgerichtet, die Resistenz (die Fähigkeit von Ökosystemen, Störungen unbeschadet zu überstehen) und/oder die ökologische Resilienz (die Fähigkeit von Ökosystemen, ihre Prozesse und Funktionen nach Störungen zu erhalten und wiederherzustellen) zu fördern (Seidl et al 2016). Anpassungsmassnahmen (adaptive measures) wurden u.a. entworfen, um die Ökosystemintegrität zu verbessern (Spathelf et al 2018). Sie verändern die «Attraktorenlandschaft» eines Waldökosystems (Seidl et al 2019), das heisst: die Fähigkeit des Waldes, in einem stabilen Systemzustand zu bleiben, dahin zurückzukehren oder einen neuen gewünschten Zustand zu erreichen. Die Effekte von Anpassungsmassnahmen unterscheiden sich räumlich und zeitlich. Im Umgang mit zunehmenden Störungen muss eventuell abgewogen werden, welche Wälder mit welcher Dringlichkeit zu behandeln sind (Millar et al 2007).

Anpassungsmassnahmen zur Minderung des Störungsausmasses und zur Vermeidung von Kippunkten sind entweder proaktiv (d.h. sie finden vor der Störung statt) oder reaktiv (d.h. sie finden während oder nach der Störung statt) (Tabelle 1). Die proaktive Bewirtschaftung hat seit vielen Jahrzehnten in Form von Pflegemassnahmen, insbesondere auf Bestandesebene, Eingang in die Bewirtschaftungspraxis in Mitteleuropa gefunden. Sie zielt darauf ab, die Resistenz und die Resilienz von Wäldern zu verbessern (Röhrig et al 2006). Dazu zählen z.B. die Begünstigung von Bäumen mit hoher Vitalität und

Qualität (Konkurrenzreduktion), die Erhöhung der Artenvielfalt und der strukturellen Diversität sowie die Förderung der genetischen Vielfalt und des genetischen Austauschs in und zwischen Beständen (Thom, akzeptiert). Reaktives Management hingegen dient der direkten Bewältigung von Störungen – dazu zählen beispielsweise die Entfernung von borkenkäferbefallenem Holz oder von sturmgeschädigten Bäumen (salvage logging) sowie die Unterdrückung von Waldbränden und das Legen von Gegenfeuern. Die Zahl der reaktiven Bewirtschaftungsmöglichkeiten ist deutlich geringer als die der proaktiven Massnahmen (Thom, akzeptiert). Tabelle 1 zeigt einige Aktivitäten, die dazu beitragen können, das Risiko von Störungen zu verringern.

Die adaptive Waldbewirtschaftung ist auf verschiedenen räumlichen Ebenen wirksam (Tabelle 1). Auf Bestandesebene kann beispielsweise die Erhöhung der Baumartenvielfalt und der strukturellen Komplexität die Resistenz gegenüber Trockenheit, Wind oder Insektenbefall erhöhen, die Resilienz stärken und somit die Wahrscheinlichkeit gravierender Störungseffekte, z.B. state-shifts, verringern (Sousa-Silva et al 2018). Auf Landschaftsebene kann die autonome Verbreitung von Saatgut überlebender und damit eventuell besser angepasster Arten und Individuen auf Störungsflächen die Anpassungsfähigkeit von Waldökosystemen verbessern (Aquilué et al 2021). Während proaktive Massnahmen teilweise sehr lange Vorlaufzeiten (Jahre bis Jahrzehnte) erfordern, werden reaktive Massnahmen rasch (unmittelbar und z.T. mit zunehmendem Effekt innerhalb einiger Monate) wirksam. Daher sollten Bewirtschaftungskonzepte zur Abschwächung von Störungen mehrere räumliche und zeitliche Skalen berücksichtigen.

Abb 2 Aussergewöhnliche Borkenkäferstörung im Nationalpark Harz, Deutschland, aufgenommen im Sommer 2022.

Foto: Nico Putzier



Die Wirksamkeit des adaptiven Managements zur Minderung von Störungseffekten und folglich zur Verringerung des Risikos von Kippunkten variiert je nach Störungsagent, Ökosystem und regionalem Kontext. Proaktives Management ist möglicherweise kostengünstiger, effektiver und weniger arbeitsintensiv als reaktives Management; es hat zudem das Potenzial, die Auswirkungen von Störungen über einen längeren Zeitraum zu reduzieren (Keenan 2015). Die Effektivität des Störungsmanagements ist ausserdem abhängig von der Kombination der Massnahmen, da eine einzige Massnahme nur eine limitierte Wirkung hat. Adaptive Bewirtschaftungskonzepte, die verschiedene Massnahmen zum Umgang mit Störungen und dem Klimawandel bündeln, sind z.B. integrative Waldbewirtschaftung (Krumm et al 2020), funktionale Netzwerke (Aquilué et al. 2021) und störungsbasierter Waldbau (Aszalós et al 2022). Im Folgenden erläutern wir diese Beispiele adaptiver Bewirtschaftungskonzepte und deren Umgang mit Störungen.

Integrative Waldbewirtschaftung

In Mitteleuropa wird auf der überwiegenden Waldfläche nach ökonomischen Gesichtspunkten gewirtschaftet und Holz genutzt, bei gleichzeitiger Sicherung von Mindestanforderungen an den Waldnaturschutz – ein Ansatz, der als «Integrative Forest Management» (IFM) oder integrative Waldbewirtschaftung bezeichnet wird (Krumm et al 2020). Bei einer segregierten Forstwirtschaft hingegen besteht ein Nebeneinander von strikt geschützten Gebieten und an ökonomische Erfordernisse ausgerichteten, intensiv bewirtschafteten Wäldern (z.B. Kiefernplantagen in Chile oder im Südosten der USA). Bei der integrativen Waldbewirtschaftung können in den für die Nutzung vorgesehenen Flächen spezifische

Waldleistungen wie Erholung, Schutz vor Naturgefahren oder Bereitstellung von Nichtholz-Waldprodukten auf Teilflächen priorisiert werden. IFM berücksichtigt zum überwiegenden Teil die Erfordernisse zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel, wie eine aktuelle Literaturstudie des European Forest Institute zeigt (de Koning et al 2020). Auf Bestandesebene setzt sich bei der integrativen Waldbewirtschaftung immer mehr der Dauerwald (Continuous-Cover-Forest) als Leitbild durch. Im Vergleich zu konventionell bewirtschafteten Altersklassenwäldern sind Dauerwälder, z.B. in Form von Plenterwäldern, in vielen Fällen resistenter (Mohr et al, in Bearbeitung) und resilienter (Diaci et al 2017) gegenüber Störungen. Somit können dauerwaldartige Strukturen klimawandelbedingte Störungsintensivierungen wahrscheinlich teilweise abpuffern. IFM wird jedoch auch kritisiert. Es gibt Forderungen nach mehr segregativen Elementen, um den sich ändernden Anforderungen der Gesellschaft an den Wald (z.B. Naturschutz) gerecht zu werden (Borchers 2010).

Funktionale Netzwerke

Funktionale Netzwerke sind über die funktionale Diversität von Beständen und deren Verbindungen mit anderen Beständen (Konnektivität) definiert (Aquilué et al 2021). Die Länge der Verbindungen ergibt sich aus der möglichen Reichweite der Samenverbreitung, und die Stärke der Verbindungen ist der Anteil an funktionaler Diversität (Diversität von Arteneigenschaften, die Prozesse im Ökosystem beeinflussen und damit Wachstum, Überleben und Verjüngung steuern), der potenziell weitergegeben werden kann. Zum Beispiel variiert die optimale Temperatur für Fotosynthese zwischen Arten, sodass sich Konkurrenzverhältnisse bei Temperaturänderungen verschieben. Nach einer Störung sorgt die

Weitergabe funktionaler Diversität durch das Netzwerk für eine hohe ökologische Resilienz und bietet ein grosses Potenzial für die Anpassung an den Klimawandel. Zur Etablierung funktionaler Netzwerke müssen folglich Bestände mit hoher funktionaler Diversität geschaffen werden, die über Samenverbreitung miteinander in Verbindung stehen. Einschränkungen für die praktische Anwendung funktionaler Netzwerke ergeben sich aus dem Unwissen und der schwierigen Definition funktionaler Diversität. Generell lässt sich festhalten, dass eine gute Durchmischung von früh- und spätsukzessionalen Arten sowie von Koniferen und Laubbäumen für eine hohe funktionale Diversität sorgt (Thom et al. 2021). Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass die Etablierung funktionaler Netzwerke und deren autonome Anpassung durch Samenverbreitung viel Zeit in Anspruch nimmt und somit zu keinem schnellen Erfolg führt.

Störungsbasierter Waldbau

Der störungsbasierte Waldbau verfolgt das primäre Ziel einer naturnahen Bewirtschaftung auf Landschaftsebene durch die Nachahmung des regional vorherrschenden Störungsregimes (Aszalós et al. 2022). Das Konzept ist nicht direkt darauf ausgerichtet, Störungen zu vermeiden, sondern versucht, diese gezielt in die Bewirtschaftung einfließen zu lassen respektive vorwegzunehmen. Die sich dadurch entwickelnden Artenzusammensetzungen und Waldstrukturen sorgen für eine hohe Beta-Diversität. Dadurch ergibt sich ein breites Spektrum an Möglichkeiten zur autonomen Anpassung des Waldes nach Störungen. Um einen störungsbasierten Waldbau durchzuführen, bedarf es an Informationen über das Störungsregime inklusive der Bandbreite an Störungsintervallen, Störungsintensitäten und räumlicher Störungsausdehnung. Innerhalb dieser Bandbreite begünstigt der störungsbasierte Waldbau sehr variable Bewirtschaftungsformen, wobei ein Teil der Landschaft auch sehr intensiv genutzt werden kann und somit die stärksten Störungen imitiert, wohingegen andere Teile nur sehr behutsam bewirtschaftet werden und somit schwache Störungen nachahmen. Kritisch zu sehen ist die Herleitung des natürlichen Störungsregimes, da es nur wenige Naturwälder gibt, die als Referenzflächen in Mitteleuropa infrage kommen. Ausserdem ändern sich Störungsregimes durch den Klimawandel, und somit muss die «natürliche» Referenz permanent an neue Gegebenheiten angepasst werden (Aszalós et al 2022).

Schlussfolgerungen

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten zur Anpassung von Wäldern an Störungszunahmen, wobei die jeweiligen Massnahmen situativ an Waldgesellschaften und -strukturen sowie an die jeweiligen

Störungsregime anzupassen sind, um effektiv zu wirken. Grossskalige Bewirtschaftungskonzepte auf Landschaftsebene wie die integrative Waldbewirtschaftung, funktionale Netzwerke oder der störungsbasierte Waldbau sorgen für eine erhöhte Risikostreuung und verbessern die Anpassungsfähigkeit von Wäldern. Dadurch können gravierende Störungseffekte, z.B. ökosystemgefährdende Kippunkte, vermieden werden (Thom, akzeptiert). Insbesondere erhöhen solche Konzepte die vielfältigen Entwicklungsmöglichkeiten von Waldlandschaften in der Reorganisationsphase nach Störungen. Die Integration multipler proaktiver Anpassungsmassnahmen ist dabei vorteilhaft, wobei jedoch Vorlaufzeiten beachtet werden müssen, um vulnerable Ökosysteme zu stabilisieren.

Die Effektivität adaptiver Bewirtschaftungskonzepte und -massnahmen ist nicht abschliessend geklärt. Insbesondere besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Quantifizierung des Anpassungspotenzials bei multiplen, interagierenden Störungsagenten und der Wirksamkeit proaktiver vs. reaktiver Massnahmen. Die Erforschung dieser komplexen Zusammenhänge ist von zentraler Bedeutung, um Biodiversität und Ökosystemleistungen im Klimawandel zu erhalten.

Eingereicht: 30. November 2022, akzeptiert (mit Review): 3. Januar 2023

Literatur

- AQUILUÉ N, MESSIER C, MARTINS KT, VÉRONIQUE DUMAIS-LALONDE V, MINA M (2021) A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *For Ecol Manage* 481: 118692. doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118692
- ASZALÓS R, THOM D, AAKALA T, ANGELSTAM P, BRÜMELIS G ET AL (2022) Natural disturbance regimes as a guide for sustainable forest management in Europe. *Ecol Appl* 32 (5): e2596. doi.org/10.1002/eap.2596
- BORCHERS J (2010) Segregation versus Multifunktionalität in der Forstwirtschaft. *Forst und Holz* 65: 44–49.
- DE KONING J, LINDNER M, SPATHELF P ET AL (2020). Integrated forest management and climate change adaptation in European forestry – A policy and practice review. INFORMAR Deliverable D2.3. European Forest Institute. 63 p.
- DIACI J, ROZENBERGAR D, FIDEJ G, NAGEL TA (2017) Challenges for unevenaged silviculture in restoration of post-disturbance forests in central Europe: A synthesis. *Forests* 8 (10): 378. doi.org/10.3390/f8100378
- HART SJ, HENKELMAN J, MCLOUGHLIN PD, NIELSEN SE, TRUCHON-SAVARD A, JOHNSTONE JF (2019) Examining forest resilience to changing fire frequency in a fire-prone region of boreal forest. *Glob Chang Biol* 25 (3): 869–884. doi.org/10.1111/gcb.14550
- KEENAN RJ (2015) Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Ann For Sci* 72: 145–167. doi.org/10.1007/s13595-014-0446-5
- KRUMM F, BOLLMANN K, BRANG P, SCHULZ-MARTY T, KÜCHLI C ET AL (2020) Context and solutions for integrating nature conservation into forest management: an overview. In: Krumm F, Rigling A, Schuck A, editors. *How to balance forestry and biodiversity conservation – A view across Europe*. pp. 10–26.

Störungs-agent	Kategorie	Bewirtschaftungseinheit	
		Bestand	Landschaft
Multiple	Proaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Förderung verschiedener Ebenen der Bestandsdiversität (inter- und intraspezifische Variation, funktionale Diversität und Redundanz, strukturelle Komplexität) ● Unterstützte Migration (assisted migration) von besser angepassten heimischen und exotischen Baumarten ● Förderung von Arten/Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften: hohe Holzdichte, Stockausschlagfähigkeit, rasches Jugendwachstum 	<ul style="list-style-type: none"> ● Förderung hoher Diversität zwischen Beständen (Beta-Diversität) ● Verbesserung des genetischen Austauschs zwischen Beständen durch Samenverbreitung ● Nachahmung natürlicher Störungen ● Zonierungspläne für die Dringlichkeit von Massnahmen
	Reaktiv	–	–
Dürre	Proaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Reduktion der Bestandsdichte ● Reduktion der Bestandshöhe (kürzere Rotationszeiten) ● Förderung von Arten/Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften: hohe Embolieresistenz, geringe stomatale Leitfähigkeit, Pfahl- oder Herzwurzelsystem, hohes Wurzel-Spross-Verhältnis, hohe Speicherkapazität von nicht strukturellem Kohlenstoff, hohe Xylem-Erholungskapazität 	<ul style="list-style-type: none"> ● Entwicklung von Dämmen und Kanalnetzwerken
	Reaktiv	–	–
Feuer	Proaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Reduktion der Bestandsdichte ● Reduktion von Bodenmaterial, Totholz und Füllholz (mechanisch, kontrollierte Bodenfeuer) ● Förderung von Arten/Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften: feuerangepasste Samenverbreitung (serotiny), dicke Borke, schnell zersetzbare Streu 	<ul style="list-style-type: none"> ● Förderung natürlicher feuerangepasster Landschaftsstrukturen, wie geringe Kontinuität von brennbarem Material ● Etablierung von Netzwerken von Waldbrandriegeln, Schutz- und Wundstreifen sowie von Waldbrandbarrieren ● Streunutzung und Waldweide ● Verbesserung der Infrastruktur für die Feuerwehr, angepasste Bekämpfungsmethoden
	Reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Unterdrückung von Feuern durch Wasser und Chemikalien (Kaliumcitrat, Kaliumkarbonate, Kaliumacetat) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Löschen ● Gegenfeuer legen ● Anlegen von Brandschneisen während des Feuers
Wind	Proaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Reduktion der Bestandsdichte zur Verbesserung des Höhe-Durchmesser-Verhältnisses ● Erhalten einer ausreichend hohen Bestandsdichte und Vermeidung von Lücken für die Bestandsstabilität ● Reduktion der Bestandshöhe durch kürzere Rotationszeiten ● Astung zur Verringerung der Aufprallfläche ● Entnahmen gegen die Hauptwindrichtung (räumliche Ordnung) ● Förderung von Arten/Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften: winterkahle Kronen, Pfahl- oder Herzwurzelsystem, hohe Holzelastizität, schräge Äste zur Reduktion von Schneelasten 	<ul style="list-style-type: none"> ● Vermeidung von heterogenen Kronen, Lücken und Kanten zwischen Beständen
	Reaktiv	–	–
Borkenkäfer	Proaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Erhöhung der Arten- und Strukturdiversität und Verringerung des Anteils der Wirtspopulation ● Reduktion der Bestandsdichte zur Steigerung der Einzelbaumvitalität ● Reduktion der Baumdurchmesser durch kürzere Rotationszeiten ● Überwachung der Borkenkäferpopulation ● Förderung von Arten/Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften: hohe Harzproduktion, grosse Harzkanäle 	<ul style="list-style-type: none"> ● Steigerung der Diversität zwischen Beständen (Beta-Diversität) zur Reduktion der Konnektivität von Wirtsbäumen
	Reaktiv	<ul style="list-style-type: none"> ● Sanitärhiebe ● Entrindung von Totholz ● Aufstellen von Käferfallen ● Verbreitung von Antagonisten 	<ul style="list-style-type: none"> ● Anwendung von Pestiziden

Tab 1 Bewirtschaftungsmassnahmen zur Minderung des Ausmasses und der Effekte von Störungen (verändert nach Thom, akzeptiert). Die Tabelle differenziert zwischen proaktiven (d.h. vor einer Störung) und reaktiven (d.h. während oder nach einer Störung vorgenommenen) Massnahmen auf Bestands- und Landschaftsebene für die in Europa häufigsten Störungsagenten. Diese Massnahmen können potenziell auch Störungsinteraktionen dämpfen. Siehe Thom (akzeptiert) für weitere Informationen.

- MILLAR CI, STEPHENSON NL, STEPHENS SL (2007) Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol Appl* 17: 2145–2151. doi.org/10.1890/06-1715.1
- MOHR J, SEIDL R, HASENAUER H, THOM, D (IN BEARBEITUNG) High resistance of Plenter forests to natural disturbance.
- NOLAN RH, COLLINS L, LEIGH A, OOI MKJ, CURRAN TJ ET AL (2021) Limits to post-fire vegetation recovery under climate change. *Plant Cell Environ* 44: 3471–3489. doi.org/10.1111/pce.14176
- RÖHRIG E, BARTSCH N, VON LÜPKE B (2006) *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. 7. Auflage. Stuttgart: Ulmer. 479 p.
- SEIDL R, JENTSCH A, WOHLGEMUTH T (2019) Resilienz gegenüber Störungen. In: Wohlgemuth T, Jentsch A, Seidl R, editors. *Störungsökologie*. Bern: Haupt Verlag. 396 p.
- SEIDL R, SPIES TA., PETERSON DL, STEPHENS SL, HICKE JA (2016) Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. *J Appl Ecol* 53: 120–129. doi.org/10.1111/1365-2664.12511
- SENF C, PFLUGMACHER D, ZHIQIANG Y, SEBALD J, KNORN J, ET AL (2018) Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. *Nat Commun* 9: 1–8. doi.org/10.1038/s41467-018-07539-6
- SOUSA-SILVA R, VERHEYEN K, PONETTE Q, BAY E, SIOEN G ET AL (2018) Tree diversity mitigates defoliation after a drought-induced tipping point. *Glob Chang Biol* 24: 4304–4315. doi.org/10.1111/gcb.14326
- SPATHELF P, STANTURF J, KLEINE M, JANDL R, CHIATANTE D, BOLTE A (2018) Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration. *Ann For Sci* 75: 55. doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4
- STADELMANN G, BUGMANN H, WERMELINGER B, MEIER F, BIGLER C (2013) A predictive framework to assess spatio-temporal variability of infestations by the European spruce bark beetle. *Ecography* 36: 1208–1217. doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00177.x
- TEMPERLI C, BUGMANN H, ELKIN C (2013) Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: A landscape modeling approach. *Ecol Monogr* 83: 383–402. doi.org/10.1890/12-1503.1
- THOM D (AKZEPTIERT) Natural disturbances as tipping points of forest ecosystems under climate change – Implications for adaptive management. *Forestry: Int J Forest Res*.
- THOM D, TAYLOR AR, SEIDL R, THUILLER W, WANG J ET AL (2021) Forest structure, not climate, is the primary driver of functional diversity in northeastern North America. *Sci Total Environ* 762: 143070. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143070
- VITASSE Y, BOTTERO A, CAILLERET M ET AL (2019) Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Glob Chang Biol* 25: 3781–3792. doi.org/10.1111/gcb.14803

Gestion forestière adaptative pour réduire les perturbations

Les perturbations constituent de plus en plus un défi pour la gestion des écosystèmes forestiers. Dans des cas extrêmes, des points de basculement peuvent être atteints, entraînant un changement fondamental dans les écosystèmes et provoquant de nettes diminutions de la fourniture de services écosystémiques et de la biodiversité. Dans cette étude, nous présentons un ensemble d'outils visant à augmenter la résistance et la résilience des écosystèmes forestiers afin d'atténuer les perturbations croissantes et leurs conséquences. Bien qu'il n'existe pas de solution unique, les gestionnaires forestiers peuvent adopter un grand nombre de mesures pour faire face aux perturbations. Ces mesures peuvent être divisées en mesures proactives et réactives au niveau du peuplement et du paysage pour les agents de perturbation dominants. Alors que les mesures proactives sont plus efficaces à long terme, les mesures réactives agissent sans décalage dans le temps. Les concepts de gestion au niveau du paysage tels que la «gestion intégrée des forêts», les «réseaux fonctionnels» ou la «gestion des forêts basée sur les perturbations» englobent diverses mesures d'adaptation. En outre, ils améliorent la diversification des risques et offrent un large éventail de voies de développement potentielles dans la phase de réorganisation après les perturbations du paysage. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour quantifier les effets des mesures d'adaptation sur les perturbations afin de préserver la biodiversité et les services écosystémiques dans le cadre du futur changement climatique.

Adaptive forest management for disturbance mitigation

Disturbances are increasingly becoming a challenge for the management of forest ecosystems. In extreme cases, tipping points can be reached leading to a fundamental change in ecosystems and causing distinct decreases in ecosystem services' supply and biodiversity. In this study, we are presenting a toolset aiming to increase the resistance and resilience of forest ecosystems in order to mitigate increasing disturbances and their consequences. While there is no one-size-fits-all solution, forest managers can adopt a large number of measures to deal with disturbances. These can be divided into proactive and reactive measures at stand and landscape level for dominant disturbance agents. While proactive measures are more effective in the long term, reactive measures operate without long time lags. Management concepts at the landscape level such as integrated forest management, functional networks or disturbance-based forest management embrace various adaptation measures. Furthermore, they enhance risk diversification and provide a broad spectrum of potential development pathways in the reorganization phase after disturbances on the landscape. More research is needed to quantify the effects of adaptation measures on disturbances in order to conserve biodiversity and ecosystem services under future climate change.