Die Resilienz von Wäldern gegenüber klimabedingten Störungen und die politischen Antworten im globalen Kontext

Florian Dolci, Stella Harper, Paulina Körner, Rachel Linley, Salomé Stauffer, Ladina Steinegger

# Zusammenfassung

In Waldökosystemen steigt aufgrund des menschgemachten Klimawandels die Häufigkeit und Intensität von natürlichen Störungen wie Dürreperioden1, Stürmen2 und Bränden3. Daraus resultiert eine erhöhte Vulnerabilität und eine verminderte Erholungszeit der Bäume4. Neben dem Klimawandel haben auch Landnutzungsänderungen, das Einschleppen invasiver Arten oder die Entwaldung einen solchen Effekt5.

Obwohl Störungen eine wichtige Funktion in einem Waldökosystem übernehmen, können diese abhängig vom Zerstörungsgrad verheerende Auswirkungen haben6. Ein Wald, der unabhängig des Klimawandels einer hohen Störungsrate ausgesetzt ist, erholt sich schneller als nur selten gestörte Ökosysteme, deren Regeneration zum ursprünglichen Zustand Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauert 7.

Resilienz bezeichnet die Fähigkeit eines Waldes, nach einer Störung seinen Ursprungszustand wiederherzustellen, und wird durch Faktoren wie Artenkomposition, Grösse des Waldökosystems, Verjüngungsgrad und Nutzungsintensität beeinflusst8,9. Beispielsweise wird Trockenheitsresilienz durch eine hohe Artendiversität, die unter anderem vielfältige Wassertransportsysteme sicher stellt, begünstigt10. Nach einem Feuer hängt die Widerstandsfähigkeit des Waldes von der Art des Feuers selbst und von der Zusammensetzung des Ökosystems ab3,11. Wie stark eine Waldfläche von einem Sturm betroffen ist, hängt unter anderem von der Windgeschwindigkeit, den Wetterkonditionen vor der Störung, den Bodeneigenschaften oder der Topographie ab2. Grundsätzlich kann sich eine Waldfläche nach einem Sturm gut erholen, da dieser eine verjüngende Wirkung hat12. Sind die Störungen zu stark oder die Wälder nicht resilient genug, können sie bestimmte Tipping Points überschreiten. Dann kann der ursprüngliche Zustand des Waldes nicht wieder erreicht werden oder das Ökosystem wechselt sogar in einen baumlosen Zustand13. Wälder mit grossen und alten Bäume sind dabei besonders gefährdet1, weshalb Primärwälder durch Policies geschützt werden müssen14. Sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene existieren Policies und Gesetze, die den Waldschutz gewährleisten sollen14–16. Es fehlt jedoch an genereller Durchsetzung und Implementierung dieser16. Da der von Menschen verursachte Klimawandel diese intensiver werdenden und häufiger auftretenden Störungen vorantreibt, muss diese Problematik in die bestehenden Policies integriert werden15.

Rechercheaspekt A: Fakten, die die Resilienz von Wäldern beeinflussen

Paulina Körner

## Kurzzusammenfassung

Angesichts des zunehmenden Drucks auf Wälder wird die Resilienz und Anpassungsfähigkeit von Wäldern immer wichtiger17. Unter Resilienz eines Waldes versteht man die Fähigkeit, nach einer Störung die vorherige taxonomische Zusammensetzung, Struktur sowie die vorherigen ökologische Funktionen und Prozesse wiederherzustellen8. Die Resilienz eines Waldes wird durch die zu Verfügung stehenden Ressourcen, Artenvielfalt, Größe des Waldökosystems, umgebenden Landschaften, vorherige Waldnutzung und die genetische Vielfalt innerhalb einer Art bestimmt8,18,19. Wälder werden hingegen anfälliger für Störungen durch den Klimawandel, Landnutzungsänderungen, invasive Arten oder Entwaldung5.

### Adaptation to climate change in forest managment20

* Die Resilienz von Wäldern gegenüber dem Klimawandel kann gefördert werden, indem die Anpassung des Waldes an neue Gegebenheiten gezielt beeinflusst wird
* Mögliche Massnahmen: Andere Genotypen bzw. andere Arten, Ausdünnung, Rotationslänge anpassen, Landschaftsplanung um Ausbreitung von Insekten und Krankheiten zu minimieren, alternative Erntepraktiken

### Forest resilience, biodiversity, and climate change: a synthesis of the biodiversity, resilience, stability relationship in forest ecosystems8

* Definition Resilienz: Fähigkeit äußeren Belastungen standzuhalten, in Zustand vor Störung zurückzukehren
* Faktoren Widerstandsfähigkeit: Artenvielfalt, genetische Variabilität, regionale Arten- und Ökosystempool, Größe der Waldökosysteme, Zustand der umgebenden Landschaft

### Restoration of forest resilience: An achievable goal?19

* Definition „ökologische“ Resilienz (Ausmaß der Störung, das ein System absorbieren kann, bevor es in anderen stabilen Zustand wechselt) und „technische“ Resilienz (benötigte Zeit um nach Störung zu Gleichgewichtspunkt zurückzukehren)

### Anthropogenic alterations of genetic diversity within tree populations: Implications for forest ecosystem resilience18

* Die genetische Vielfalt innerhalb der Arten, möglicherweise insbesondere das Vorhandensein seltener Allele, ist ein Bestandteil der Resilienz des Waldökosystems
* Seltene Allele bieten eine Grundlage für die Anpassung einer Population und das Überleben nach Umweltveränderungen

### Forest resilience and tipping points at different spatio-temporal scales: approaches and challenges5

* Tipping-Points können durch Prozesse wie Klimawandel, Landnutzungsänderungen, invasive Arten oder Entwaldung entstehen, welche die Anfälligkeit für extreme Ereignisse erhöhen

Salomé Stauffer

## Kurzzusammenfassung

Wälder sind komplexe, dynamische Systeme und Störungen können Wälder via sogenannte Tipping Points in einen neuen Zustand überführen, wenn sie nicht resilient genug sind.13 Verjüngung und Baumsterblichkeit, Artenkomposition, Grösse des Waldökosystems, Managementintensität und Waldnutzung, Dauer der Wachstumssaison und Stärke und Häufigkeit von Störungen sind wichtige Faktoren, die die Resilienz beeinflussen9,5. Die Wiederherstellung von Wäldern in ihren früheren Zustand dauert sehr lange und ist schwer vorhersehbar, doch prinzipiell erholen sich Wälder mit einer höheren Störungsrate schneller, als wenn sie nur selten gestört werden7. Nach wenig starken Störungen erholen sich Wälder durch Neuausbreitung der Pflanzen, starke Störungen erfordern neue Setzlinge. In den Tropen ist natürliche Regeneration oft schneller als aktive Restoration21.

### If the trees burn, is the forest lost? Past dynamics in temperate forests help inform management strategies13

Wälder als komplexe, dynamische Systeme; Resiliente Ökosysteme bleiben im Gleichgewicht, fallen nicht in neuen Zustand nach Störung; Resilienz variiert mit der Waldkomposition; Aktueller Wandel und Störungen sind stärker als je zuvor, Reaktion der Wälder schwer vorhersehbar mit alten Daten

### Resistance, Resilience or Change: Post-disturbance Dynamics of Boreal Forests After Insect Outbreaks9

Boreale Nadelwälder zerstört durch Insekten; Messen der Resilienz und Resistenz anhand Waldstruktur und -komposition vor Störung, im zerstörten und im finalen Zustand; Boreale Nadelwälder kollabieren schnell in baumlosen Zustand bei starker, häufiger Störung und sich ändernden Bedingungen; Schlüsselarten bieten Stabilität

### Forest resilience, tipping points and global change processes22

Lange Zeitskalen sind nötig, um Resilienz der Wälder zu verstehen; Verjüngung und Baumsterblichkeit sind wichtige Resilienzfaktoren; Hohe Managementintensität verlangsamt Erholung, schnell Wachsende Arten können Resilienz erhalten; Alternative Zustände der Wälder sind ebenso wichtig zu verstehen

### Recovery and resilience of tropical forests after disturbance7

Wiederherstellung der Wälder nach Störungen zu früherem Zustand dauert min. 20, oft über 200 Jahre; Sekundäre Wälder sind frühes Sukzessionsstadium und nicht weniger wertvoll als Primäre Wälder; Je grösser die Störungsrate, desto schneller die Erholung; Erholung schneller nach natürlichen als menschlichen Störungen

Restoration ecology in the Anthropocene: learning from responses of tropical forests to extreme disturbance events21

Erholung der Vegetation durch neue Setzlinge nach starken Störungen; Nach weniger starker Störung Regeneration durch Neuausbreitung der beschädigten Pflanzen; Natürliche Restoration effektiver in Tropen als aktive Restoration; Alternative Sukzessionsstadien erhöhen Diversität von Ökosystem-Dienstleistungen

Rechercheaspekt B: Politische Massnahmen: Reaktion & Prävention

Stella Harper

## Kurzzusammenfassung

Die politische Lage muss auf lokaler sowie internationaler Ebene differenziert werden. Das Kyoto Protokoll ist ein Beispiel eines internationalen Abkommens, welches durch Anreize zur Wiederaufforstung von Wäldern führen kann14. Auf lokaler Ebene ist die Selbstverwaltung, also mit Einbezug der Bevölkerung, der Wälder eine Lösung23. Die Integration von Klimawandel, als eine Art der menschlichen Zerstörung, ist zurzeit in den Policies wenig integriert15. Der politische Rahmen ist oftmals in der Theorie gegeben, jedoch scheitert es an der Praxis. Anreize und Instrumente wurden geschaffen, sowie Ideen wie die Policies in die Praxis erweitert (Partnerschaften oder Integration von Mitigation und Adaption) werden können16,24.

### Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change14

* Internationales Abkommen
* Anreiz: Länder kriegen "Credits" bei Reduzierung von Emissionen
* Emissionen reduzieren: aufforsten oder wiederaufforsten
* Nachteil: Anreiz um Bäume auf natürliche Grasflächen zu Pflanzen 🡪 Credits
* Unabhängig vom Protokoll: bestehende primär Wälder schützen

### Assessing forest governance from a ‚triple G’ perspective: Government, governance, governmentality\*23

* Staatliche Regulierung wichtig trotz neuer Instrumente wie REDD+ (**R**educing **E**missions from **D**eforestation and Forest **D**egradation)
* Three G´s Analyse: government, governance and governmentality
* Selbstverwaltung (Self-governance) um Probleme auf lokaler Ebene zu lösen

### Matching national forest policies and management practices for climate change adaptation in Burkina Faso and Ghana15

* Policies existieren aber es fehlt an Durchsetzung
* Klimawandel wird eine zusätzliche Belastung, und muss in die bestehenden Policies integriert werden
* Geht darauf ein wie und ob Policies zu den Adaptionsmöglichkeiten von: Waldschutz, Waldregeneration, Waldbaumanagement usw. existieren

### Partnerships in forest governance16

* Staatliche Regulation und Policies existieren, nur ihre Umsetzung ist das Problem
* Staatliche monozentrische Struktur im Umschwung zu multizentrischer Struktur durch gewisse Partnerschaften 🡪 Beispiel MTCC
* Der Staat kann Policies übernehmen, welche durch Partnerschaften entstanden sind

### Forests and climate change in latin America: Linking adaptation and mitigation24

* Mitigation und Adaption zum Schutz des Waldes durch den Klimawandel
* Bis heute Policies meistens auf Mitigation fokussiert
* Es werden Internationale Abmachungen und Investierungen gebraucht um Mitigation voranzutreiben
* Mitigation: internationale Politik, Adaption: lokale Politik

Rechercheaspekt C: Zerstörung durch Feuer

Florian Dolci

## Kurzzusammenfassung

Feuer ist und war schon immer ein wichtiger Faktor bei der Gestaltung der Ökosysteme der Wälder. Abhängig von seiner Intensität kann es mehr oder weniger wichtige Auswirkungen auf einen solchen Wald haben. Zunächst werden wir anhand eines Übersichtsartikels sehen, wie sich der Boden nach einem Brand verändert25. Wir werden auch versuchen zu verstehen, wie sich das Feuer auf die Bäume auswirkt und wie sie sich erholen, indem wir zwei Artikel untersuchen, in denen zwei sehr unterschiedliche Ökosystemtypen untersucht werden11,26. Danach werden wir einen anderen Ansatz verfolgen und untersuchen, wie Nagetiere in Australien ihr Verhalten nach einem Brand anpassen und ändern27. Am Ende werden wir all das relativieren und die Auswirkungen des Klimawandels auf die Widerstandsfähigkeit der Wälder nach einem Lauffeuer betrachten3.

### Effects of fire on properties of forest soils: A review25

* Kleine / mittlere Brände: Erneuerung der dominanten Vegetation.
* Schwere Brände: mehrere negative Auswirkungen auf den Boden.
* Vorbrandniveau der meisten Grundstücke kann wiederhergestellt und sogar verbessert werden, wenn es Pflanzen gelingt, den verbrannten Bereich unverzüglich neu zu besiedeln.

### Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazon forest11

* Untersuchung der Waldstruktur und -zusammensetzung nach Bränden. Bewertung der Erholung und der Folgen wiederkehrender Brände.
* Waldbrände können zu wichtigen Veränderungen in der Waldstruktur und -zusammensetzung führen.
* Savannisierungsparadigma

### Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: A review26

* Brände waren ein starker ökologischer Faktor in der unberührten Taiga und waren maßgeblich für die Struktur und die spontane Dynamik der Waldgemeinschaften verantwortlich.
* Brände begünstigten die Regeneration und Erholung der Kiefernwälder.
* Review-Artikel

### Mechanisms of recovery after fire by rodents in the Australian environment: A review27

* Komplexes Muster einzelner Arten, die auf verschiedene Weise auf Feuer reagieren.
* Auswirkungen: verringerte Bevölkerungszahl, verringerte Ressourcenverfügbarkeit, verstärkter Konkurrenz, erhöhte Prädation, usw.
* Massnahmen: Einwanderung, Ernährungsumstellung, usw.

### Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change3

* Wechselwirkungen zwischen Waldbränden und Dürre nach dem Brand und ihre Auswirkungen auf die Waldregeneration.
* Resultate: signifikanten Rückgang der Baumregeneration im 21. Jahrhundert.
* Günstigere Bedingungen für die Regeneration an Standorten, die im Durchschnitt kühler / feuchter sind.

Rechercheaspekt D: Zerstörung durch Trockenheit/Dürre/Wassermangel

Rachel Linley

## Kurzzusammenfassung

Publikationen aus allen Teilen der Welt zum Baumsterben durch klimawandelbedingte Dürre und Hitze haben in den letzten Jahren zugenommen1. Nicht nur die Häufigkeit und Intensität der Dürreperioden steigen an, auch die Erholungszeit und Vulnerabilität der Bäume hat sich erhöht4. Die Resistenz gegenüber Dürre und die Erholungsfähigkeit nach einer Dürreperiode eines Baumes ist vor allem abhängig von der Funktionsfähigkeit seines Wasser-Transportsystems10. Dieses wiederum steht im Zusammenhang mit seiner Klasse28, seiner Art10, seiner Höhe28, seinem Alter1, der Qualität des Bodens28, der Baumdichte1 in seinem Bestand und dem Eintrittszeitpunkt der Dürre1. In einem Wald mit hoher Pflanzendiversität ist auch die Vielfalt an Wasser-Transportsystemen gross und somit auch die Resilienz gegenüber Dürre10. Ebenfalls die Bewirtschaftungsform, den Wald in Fragmente zu teilen, kann die Resilienz gegenüber Dürre stärken29.

### [A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests](https://www.mendeley.com/catalogue/393776dd-6b8c-3371-b4ea-5789c83314a1/)1

* Globaler Überblick zu aktuell steigender Baummortalität aufgrund klimatischem Wasserstress und warmen Temp. in Wäldern, Wissenslücken aufzeigen
* Literaturrecherche (ab 1970-2009)
* Literaturherausgabe nimmt zu, nicht nur in H2O-limitierten Regionen, abh. v. Baumdichte, Zeit, Grösse & Alter

### Global patterns of drought recovery4

* Erholungszeit nach Dürre div. Ökosysteme anhand GPP
* Statistische Auswertung
* (Längere und intensivere Dürreperioden) = Erholungszeit nimmt zu = Vulnerabilität bezgl. Dürre nimmt zu, besonders lang an Polen und Äquator, land carbon sink!

### Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought10

* Einfluss v. div. (hydr.) Pflanzeneigenschaften auf Reaktion v. Ökosystemen auf Dürre
* Statistische Auswertung
* Hohe Pflanzendiv. im Wald = Stabilität & div. Eigenschaften (v.a. H2O-Transport-Syst., (oft hoch in mittel bis boreale Wälder)) = schnellere Erholung

### [Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees](https://www.mendeley.com/catalogue/a801dcda-3102-3039-9c68-76eda27c930a/)28

* Aufrechterhaltenes Dickenwachstum bei Dürre-Perioden in Zusammenhang mit hoher Überlebensrate bei zukünft. Dürre
* Jahrringanalyse (toter und überlebender Bäume)
* Angiosp. tiefere Resistenz, Gymnosp. reduzierte Erholung, Bodenfruchtbarkeit, Baumreaktion auf Dürre, Baumgrösse

### Fragmentation reduces severe drought impacts on tree functioning in holm oak forests29

* Positiver Einfluss v. Fragmentierung v. Wäldern auf Wirkung v. Dürre
* Feldversuch/Monitoring
* Bäume in kl. Waldfragmenten bessere Aufrechterhaltung v. ökophysiologischen Parametern währ. Dürre, aber auch viele negative Folgen

Rechercheaspekt E: Zerstörung durch Stürme

Ladina Steinegger

## Kurzzusammenfassung

Wind formt die Walddynamik, indem er Bäume beschädigt oder entwurzelt. Winterstürme richten in der Schweiz am meisten Schaden an2. Der Sturm betrifft nur einzelne Waldflächen, sein Effekt wirkt kumulativ6. Totholz und umgewühlte Erde dienen vielen Organismen als Lebensgrundlage - Stürme stellen eine lokale Verjüngung des Waldes dar12. Extremereignisse wie wärmere Temperaturen oder stärkere Stürme nehmen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu30. Extremereignisse schwächen den Wald zunehmend, sodass eine längere Regenerationszeit erwartet wird31. Durch Veränderungen der Wetterkonditionen und der Windstärke seit 1858 haben die Schäden an Schweizer Wäldern zugenommen2.

### Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007 (2010)2

Hat Wintersturm Schaden in CH seit 1858 zugenommen, Indikatoren die Schaden beeinflussen, Veränderungen? Mittels historischen Daten. Stürme stärker, Wetter wärmer, schlechtere Bodenstabilität -> mehr Schaden am Wald. Relevant weil beobachtet über längere Zeit -> Klimawandel.

### The Long-Term Effects of Wind Disturbance on a Sitka Spruce-Western Hemlock Forest6

Entwicklung Wald Oregon über 78J. post Stürmen. Historische Daten, Beobachtung vor Ort. Effekt Sturm = kumulativ. Windind. Mortalität 5-6x zugenommen. Biomasse runter, Bäume pro ha hoch. NPP nur beeinflusst, wenn Mortalität >50%. Relevant weil Langzeitbeobachtung Stürme/Walddynamik.

### Vielfältige Strukturen nach Windwurf in Naturwäldern (2000)12

Regeneration Urwälder Europas nach Sturm? Zusammenf. verschiedener Erkenntnisse. Nach Sturm Baumartenspektrum hoch -> Samenangebot für Besiedelung gross. Windwurf = Waldverjüngung. Totholz wichtige Lebensgrundlage. Relevant weil Wichtigkeit Sturm und dass sich Wald nicht anpasst.

### KLIMAÄNDERUNG 2013 Naturwissenschaftliche Grundlagen-Zusammenfassung für politische Entscheidungsträge30

Untersucht, welche Extrem(wetter)ereignisse mit welcher Wahrscheinlichkeit wo zunehmen. Fakt ist, dass eine generelle Zunahme dieser seit ca. 1950 beobachtet wird.

### Effects of Tropical Cyclones Ofa and Val on the Structure of a Samoan Lowland Rain Forest (1994)31

Effekt 2 starker Zyklone nacheinander, Regenwald Samoa? Feldbegehungen. Mortalität 53%. Überschirmungsdach von 100% auf 27%. Bäume Stelzwurzeln/Strebewerk eher nicht entwurzelt. Grosse Löcher im Wald -> lange Reg.zeit erwartet. Weniger samenverbr. Arten. Relevant weil Extremereignis.

# Literaturliste

1. Allen, C. D. *et al.* A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* **259**, 660–684 (2010).

2. Usbeck, T. *et al.* Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agric. For. Meteorol.* **150**, 47–55 (2010).

3. Stevens-Rumann, C. S. *et al.* Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change. *Ecology Letters* vol. 21 243–252 (2019).

4. Schwalm, C. R. *et al.* Global patterns of drought recovery. *Nature* **548**, 202–205 (2017).

5. Reyer, C. P. O. *et al.* Forest resilience and tipping points at different spatio-temporal scales: Approaches and challenges. *J. Ecol.* **103**, 5–15 (2015).

6. Attiwill, P. M. The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management. *For. Ecol. Manage.* **63**, 247–300 (1994).

7. Cole, L. E. S., Bhagwat, S. A. & Willis, K. J. ARTICLE Recovery and resilience of tropical forests after disturbance. *Nat. Commun.* (2014) doi:10.1038/ncomms4906.

8. Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., Mosseler, A. & Secretariat of the convention on the biological diversity. *Forest resilience, biodiversity, and climate change : a synthesis of the biodiversity, resilience, stabiblity relationship in forest ecosystems*.

9. Sánchez-Pinillos, M. *et al.* Resistance, Resilience or Change: Post-disturbance Dynamics of Boreal Forests After Insect Outbreaks. *Ecosystems* **22**, 1886–1901 (2019).

10. Anderegg, W. R. L. *et al.* Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. *Nature* vol. 561 538–541 (2018).

11. Barlow, J. & Peres, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. in *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* vol. 363 1787–1794 (Royal Society, 2008).

12. Lässig, R. & Motschalow, S. A. Vielfältige Strukturen nach Windwurf in Naturwäldern. *Wald und Holz* **12**, 39–43 (2000).

13. Iglesias, V. & Whitlock, C. If the trees burn, is the forest lost? Past dynamics in temperate forests help inform management strategies. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **375**, (2020).

14. Noss, R. F. Beyond kyoto: Forest management in a time of rapid climate change. *Conservation Biology* (2001) doi:10.1046/j.1523-1739.2001.015003578.x.

15. Kalame, F. B., Nkem, J., Idinoba, M. & Kanninen, M. Matching national forest policies and management practices for climate change adaptation in Burkina Faso and Ghana. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* (2009) doi:10.1007/s11027-008-9155-4.

16. Visseren-Hamakers, I. J. & Glasbergen, P. Partnerships in forest governance. *Glob. Environ. Chang.* (2007) doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.11.003.

17. Seidl, R., Rammer, W. & Spies, T. A. Disturbance legacies increase the resilience of forest ecosystem structure, composition, and functioning. *Ecol. Appl.* **24**, 2063–2077 (2014).

18. Schaberg, P. G., DeHayes, D. H., Hawley, G. J. & Nijensohn, S. E. Anthropogenic alterations of genetic diversity within tree populations: Implications for forest ecosystem resilience. *Forest Ecology and Management* (2008) doi:10.1016/j.foreco.2008.06.038.

19. Newton, A. C. & Cantarello, E. Restoration of forest resilience: An achievable goal? *New For.* **46**, 645–668 (2015).

20. Spittlehouse, D. L. & Stewart, R. B. Adaptation to climate change in forest management. *BC J. Ecosyst. Manag.* **18**, 49–62 (2018).

21. Álvarez-Yépiz, J. C. Restoration ecology in the Anthropocene: learning from responses of tropical forests to extreme disturbance events. *Restor. Ecol.* **28**, 271–276 (2020).

22. Reyer, C. P. O., Rammig, A., Brouwers, N. & Langerwisch, F. Forest resilience, tipping points and global change processes. *J. Ecol.* **103**, 1–4 (2015).

23. Arts, B. Assessing forest governance from a ‘Triple G’ perspective: Government, governance, governmentality\*. *For. Policy Econ.* (2014) doi:10.1016/j.forpol.2014.05.008.

24. Locatelli, B., Evans, V., Wardell, A., Andrade, A. & Vignola, R. Forests and climate change in latin America: Linking adaptation and mitigation. *Forests* (2011) doi:10.3390/f2010431.

25. Certini, G. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia* vol. 143 1–10 (2005).

26. Gromtsev, A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: A review. in *Silva Fennica* vol. 36 41–55 (2002).

27. Sutherland, E. F. & Dickman, C. R. Mechanisms of recovery after fire by rodents in the Australian environment: A review. *Wildl. Res.* **26**, 405–419 (1999).

28. DeSoto, L. *et al.* Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. *Nat. Commun.* **11**, (2020).

29. Forner, A., Morán-López, T., Flores-Rentería, D., Aranda, I. & Valladares, F. Fragmentation reduces severe drought impacts on tree functioning in holm oak forests. *Environ. Exp. Bot.* (2020) doi:10.1016/j.envexpbot.2020.104001.

30. IPCC. Klimaänderung 2013/2014 - Naturwissenschaftliche Grundlagen. *Zs.fass. für Polit. Entscheidungsträger. Beiträge der drei Arbeitsgruppen zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Dtsch. Übersetzungen durch Dtsch. IPCC-Koordinierungsstelle, Österreic* 28 (2013).

31. Elmqvist, T., Rainey, W. E., Pierson, E. D. & Cox, P. A. *Effects of Tropical Cyclones Ofa and Val on the Structure of a Samoan Lowland Rain*. vol. 26 (1994).