Die vorliegende Stellungnahme gibt nicht die Auffassung des Ausschusses wieder, sondern liegt in der fachlichen Verantwortung des/der Sachverständigen. Die Sachverständigen für Anhörungen/Fachgespräche des Ausschusses werden von den Fraktionen entsprechend dem Stärkeverhältnis benannt.

Schriftliche Stellungnahme

Einzelsachverständiger
Prof. Dr. Pierre L. Ibisch
Centre for Econics and Ecosystem Management
Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde
Pierre.ibisch@hnee.de
22. November 2020

Deutscher Bundestag
Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Ausschussdrucksache
19(16)503-C
öFG am 25.11.20
23.11.2020

„Ökologischer Zustand und Umbau der Wälder zur Förderung von Klimaresilienz und Biodiversität“

anlässlich der 89. Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit am Mittwoch, dem 25. November 2020 des Deutschen Bundestages

Inhalt

Zusammenfassung 2

Ökologischer Zustand der Wälder und klimawandelbedingte Risiken: komplexere Betrachtungen erforderlich 4

Waldökosysteme sind mehr als Bäume – Biodiversität ist nicht allein Artenvielfalt 4

Zur Frage der Klimaresilienz: Zurück in eine völlig unvorhersehbare Zukunft? 5

Klimawandel-*Anpassung* als „Spiel“, in dem sich sowohl die Mitspieler als auch die Spielregeln fortlaufend verändern 8

Kompetenter Umgang mit Nichtwissen benötigt: Faustregeln statt Patentrezepte 8

Klimawandel-*Resilienz ist* ‚Überraschungs‘-Toleranz und beruht vor allem auf Puffern 9

Mutmaßlich illegale Waldverschlechterung und Vermehrung von Risiken durch aktuelles forstliches Handeln 10

Wie viel Kühlung können und wollen wir der klimawandelgetriebenen Erhitzung entgegensetzen? 14

Waldbewirtschaftung als Teil eines ganzheitlichen Landschaftsökosystemmanagements 17

Waldumbau, Waldentwicklung und adaptives Management 18

Ökonomie der Waldbewirtschaftung: Förderinstrumente zur Unterstützung der Entwicklung resilienter Wälder und Möglichkeiten für die Entwicklung von Einkommensmöglichkeiten für Waldbesitzer*innen . 20

Kühlungswirkung von Wäldern fördern: Hitzesteuer und Kühlungsprämie 21

Anhang 1 23

Ökologisch-fachliche Beurteilung des 13-Punkte Plans des BMEL „Deutschlands Wald im Klimawandel – Eckpunkte und Maßnahmen“ vom 25.09.2019 23

Zusammenfassung

Die offenkundigen Schädigungen der von den Extremwitterungen der vergangenen Jahre betroffenen Wälder geben Anlass zu einer Diskussion, die über die Wahl ökonomisch relevanter Baumarten für zukünftige Pflanzungen weit hinausgehen muss. Es bedarf einer **ökosystemaren Perspektive** und der Einsicht, dass die Vulnerabilität der Wälder gegenüber dem Klimawandel wesentlich durch den Zustand des Gesamtsystems einschließlich aller Organismen wie etwa Pilze und Mikroorganismen sowie den Zustand der ökologischen Prozesse geprägt werden.

Klimasystem und Ökosysteme sind überaus komplex und entziehen sich durch dynamisch neu auftretende Wechselwirkungen sowie Rückkopplungen einer verlässlichen Modellierung. Tatsächlich wurden diverse im Rahmen der globalen Erwärmung auftretenden Phänomene erheblich unterschätzt. Es ist kontraproduktiv und gefährlich, sich ein vermeintlich genaues Bild von der Zukunft zu machen und aus ihm Strategien abzuleiten. Sicher scheint nur, dass die globale Erwärmung noch für längere Zeit voranschreiten wird und zwar in einem Ausmaß, mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit und in solche Temperaturbereiche hinein, dass die bevorstehende Situation für die heutigen Ökosysteme als völlig neuartig gelten muss.

In jedem Falle ist es in den Wäldern besonders **relevant, die auftretenden Störungen bestmöglich abpuffern zu können und damit mehr Zeit für Anpassung bzw. Wandlung zu gewinnen**. In Ökosystemen bilden sich durch **Diversität und Redundanz** ‚Sicherheitsnetze'; zum anderen werden **Puffer und Selbstregulation** ausgebildet, die die potenzielle Verwundbarkeit reduzieren. Reife und ungestörte agierende Ökosysteme kennzeichnen sich durch eine ausgeprägte **Regulation von Standortbedingungen wie Mikroklima und Wasserspeicherung** sowie den fortgesetzten Aufbau des eigenen Substrats – Fähigkeiten, die es zu fördern gilt.

Aktuell geschieht in Deutschland großflächig das Gegenteil. Forstliche Akteure agieren– auch im Rahmen von staatlich geförderten Maßnahmen - mit **Kahlschlägen, der Befahrung und Räumung großer Flächen**. Dies geschieht, ohne dass eine angemessene Abschätzung der Folgen und Risiken für Waldökosysteme, die Biodiversität in Deutschland und die gesamte Umwelt durchgeführt worden wäre. Es besteht Anlass zur Befürchtung, dass die Maßnahmen ganze **Landschaftsökosysteme, die Biodiversität und den Naturhaushalt nachhaltig beeinträchtigen und damit nicht mit Biodiversitäts-, Wasser- und Bodenschutzgesetzgebung vereinbar sind**.

Hitze in der Landschaft ist ein zentrales Problem, dem noch zu wenig Beachtung geschenkt wird. Höhere Temperaturen wirken mehrfach schädlich auf Pflanzen. Neben Hitzestress und der Verringerung der Wasserverfügbarkeit durch Austrocknung des Bodens kommt die austrocknende Wirkung heißer Luft hinzu, wobei der Effekt mit steigender Temperatur nichtlinear zunimmt. Wälder und Forsten, landwirtschaftliche Flächen, Wasser, Siedlungen und industriell genutzte Flächen sind nicht voneinander isoliert zu betrachten, zu beplanen sowie so zu nutzen sind, als wären sie voneinander unabhängig. Eine ökosystembasierte Klimawandelanpassungsstrategie müsste eine entsprechende Integration leisten.

Es erscheint dringend geboten, **Wald und umgebende Landschaft so zu steuern, dass Kühlung und Wasserrückhaltung zur verbesserten Regeneration und Entwicklung von Wäldern**

beitragen. Es existieren nach wie vor Freiheitsgrade für die Waldentwicklung mit den in naturnahen Ökosystemen vorhandenen Arten.

Die aktuellen Nutzungsformen gehören auf den Prüfstand. **In naturnahen und vor allem älteren Laubmischwäldern muss ab sofort ein Einschlagsmoratorium verhängt werden**. Dies muss gelten, bis klarer wird, wie die Wälder auf die aktuelle Periode von Extremwitterungen reagieren und wie v.a. unterschiedliche Bewirtschaftungsweisen die Waldvulnerabilität erhöhen. Mittelfristig ist ein Maßnahmenpaket zur Förderung der Waldfunktionalität umzusetzen. **In den Nadelbaumforsten muss kurzfristig ein totales Verbot des Kahlschlags jeglicher Größe gelten**. Für den Umgang mit Flächen, auf denen Kalamitäten aufgetreten sind, sich verstärken oder auftreten werden, müssen dringend für alle Besitzarten verbindliche Behandlungsrichtlinien verabschiedet werden.

Die **gesamtökonomische Bilanzierung der Waldbewirtschaftung** ist auf ein gänzlich neues Fundament zu stellen. Vor allem muss die Verquickung betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Aspekte offengelegt werden. Versteckte oder mutmaßliche Kosten sowie Subventionen sind genauso zu identifizieren und darzustellen wie alle Quellen von Schad- und Wertschöpfung – einschließlich aller Ökosystemleistungen, die von Wäldern bereitgestellt werden. Benötigt wird eine ganzheitliche Gemeinwohlbilanzierung des Waldes.

Eine Art **Flächenprämie für die pauschale Förderung von Waldflächen unabhängig von ihrer Beschaffenheit ist kontraproduktiv**. Es darf durch Förderung v.a. keine perversen Anreize zur Ökosystemdegradation wie etwa Kahlschläge und Totholzräumung geben. Aktivitäten zur Waldmehrung sowie biodiversitätsfreundliche Entwicklung von Kalamitätsflächen tragen kurzfristig zur Vermeidung von CO_2-Emissionen und zur Bewahrung bzw. Entwicklung weiterer regulierender Ökosystemleistungen bei. Es gibt bereits privatwirtschaftliche Initiativen, die sich zum Ziel gesetzt haben, Besitzer*innen entsprechender Flächen den Zugang zu den entsprechenden Märkten zu ermöglichen und transparente Zertifikate auszustellen.

Eine **‚Hitzesteuer' für Flächen, die überdurchschnittlich stark zur Erwärmung der Landschaft beitragen, könnte einen Anreiz für Maßnahmen bieten, die den Temperatureffekt eindämmen**, sowie Einnahmen für die Förderung von Kühlung generieren. Zu besteuernde Flächen beträfen etwa großflächige Gebäude/Dächer, versiegelte Verkehrsflächen oder Tagebaue. **Landnutzende** könnte von einer entsprechenden Besteuerung ausgenommen werden, aber **als Empfänger der Förderung kühlender Maßnahmen in Frage kommen**. Vitale Waldökosysteme könnten so Einkommen generieren, und auf Kalamitätsflächen ergäben sich Anreize dafür, auf radikale Flächenbehandlungen zu verzichten.

Ökologischer Zustand der Wälder und klimawandelbedingte Risiken: komplexere Betrachtungen erforderlich

1. Seit der Verkettung von Extremwitterungen und Klimarekorden in den letzten Jahren ist die Dynamik des Absterbens von Bäumen unverkennbar. Die offenkundigen Schädigungen in den Waldökosystemen geben Anlass zu vielerlei Analysen und Interpretationen. Dabei sind grob zwei unterschiedliche Sichtweisen zu unterscheiden. Eine geht davon aus, dass die heimischen Baumarten und Ökosysteme nunmehr vom Klimawandel überfordert werden, während die andere Seite feststellt, dass die Schäden ein Ergebnis des komplexen Zusammenwirkens vieler Faktoren ist, zu denen auch die forstliche Nutzung gehört. Die beiden Perspektiven unterscheiden sich auch bezüglich des Waldverständnisses. Während die eher ‚konventionelle' und forstnutzungsgeprägte Seite besonders auf die ökonomisch relevanten Baumarten fokussiert und auch das Thema der Klimawandelanpassung in der Forstwirtschaft als eine Frage der Baumartenwahl diskutiert, geht die ‚ökosystemare' Seite davon aus, dass die Vulnerabilität der Wälder gegenüber dem Klimawandel wesentlich auch durch den Zustand des Gesamtsystems einschließlich aller Organismen wie etwa Pilze und Mikroorganismen sowie den Zustand der ökologischen Prozesse geprägt werden. Einzelne Arten stehen weniger im Fokus als vielmehr Funktionstüchtigkeit und Wandelungsfähigkeit des Gesamtsystems.
2. Für eine solche ökosystemare Perspektive, die auch konventionellen, eher statischen oder vergangenheitsorientierten Naturschutzansätzen gegenübersteht, soll im Folgenden geworben werden. Die vorliegende Stellungnahme verweist ausdrücklich auf diejenige zur 41. Sitzung des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft des Deutschen Bundestages im Jahr 2019[1]. Die im entsprechenden Dokument geäußerten Positionen werden bestätigt bzw. nunmehr unter Einbeziehung zusätzlicher Befunde erweitert. Es werden in diesem Dokument nicht sämtliche Fakten einzeln durch wissenschaftliche Studien nachgewiesen; stattdessen erfolgt hier der Verweis auch auf weitere Schriften zum Nach- und Weiterlesen[2], die auch weitere Literaturquellen umfassen. Zudem umfasst der (→) Anhang dieses Dokuments[3] eine umfangreiche Darstellung von internationaler Literatur zur Problematik von Kahlschlägen.

Waldökosysteme sind mehr als Bäume – Biodiversität ist nicht allein Artenvielfalt

3. (Wald-)Ökosysteme sind sich stetig wandelnde Gefüge von interagierenden Lebewesen. Ihre Existenz und Funktion hängen davon ab, dass sie Energie wandeln, die dem System

[1] IBISCH, P.L. (2019): Umgang mit der aktuellen extremwetterbedingten Waldkrise (Deutscher Bundestag Ausschussdrucksache 19(10)280-A) für die 41. Sitzung des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft (DOI 10.13140/RG.2.2.21368.60163).

[2] IBISCH, P.L. (2019): Umgang mit der aktuellen extremwetterbedingten Waldkrise (Deutscher Bundestag Ausschussdrucksache 19(10)280-A) für die 41. Sitzung des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft (DOI 10.13140/RG.2.2.21368.60163).
IBISCH, P.L. & J.S. BLUMRÖDER (2019): Wälder im Klimawandel. Was zu tun und was zu lassen ist. Naturmagazin Berlin-Brandenburg 33 (1): 10-12 (online: Schattenblick, WALD/163: http://www.schattenblick.de/infopool/umwelt/fakten/ufaw0163.html).
IBISCH, P.L. & J.S. BLUMRÖDER (2020): Für einen ökosystembasierten Umgang mit der Waldkrise. Ländlicher Raum (Agrarsoziale Gesellschaft e.V.) 71. Jg (2/20): 28-30.
IBISCH, P.L. & J.S. BLUMRÖDER (2020): Waldkrise als Wissenskrise als Risiko. Universitas 888: 20-42.
IBISCH, P.L., J.S. BLUMROEDER, P.R. HOBSON, M. HAUCK (2019): Ecosystemic solutions needed in forest management under global change. eLetter responding to Preventing European forest diebacks by Thorn et al. 2019 (*Science* 27 Sep 2019: Vol. 365, Issue 6460, pp. 1388, DOI: 10.1126/science.aaz3476), 23 October 2019 (https://science.sciencemag.org/content/365/6460/1388.2/tab-e-letters).

[3] Anhang 1: Ökologisch-fachliche Beurteilung des 13-Punkte Plans des BMEL „Deutschlands Wald im Klimawandel – Eckpunkte und Maßnahmen" vom 25.09.2019

regelmäßig zugeführt werden muss. Indem die Organismen Energie, Biomasse und Information austauschen, entstehen immer komplexere ökologische Prozesse, die Selbstorganisation und Selbstregulation bedingen. Sämtliche ökologische Prozesse und die sie vermittelnden Organismen unterliegen der biologischen und ökologischen Evolution. Dabei führen Mutation bzw. Innovation, Selektion und Anpassung zu steigender Effizienz, aber auch Widerstands- und Erholungsfähigkeit (Resistenz und Resilienz). Die Ökosysteme verbessern durch Energiewandlung und physikalische Arbeit ihre eigenen Standortbedingungen – dies gilt in ganz besonderem Maße für Wälder als ausgeprägt dreidimensionale Gefüge mit vergleichsweise hohem Energie- und Stoffumsatz, relativ großer Artenvielfalt und die Dominanz von sehr langlebigen Organismen, den Bäumen, welche eine gewisse Stabilität in Zeit und Raum benötigen, sie aber auch selber unterstützen.

4. Die Kenntnisse über Waldökosysteme haben sich in den letzten Jahrzehnten und Jahren stark erweitert. Sie werden inzwischen nicht nur als energetisch-thermodynamisch haushaltende Systeme besser verstanden, sondern der Fortschritt vieler Wissenschaften wie etwa der Ökologie, der Molekularbiologie oder der Mikrobiologie suggerieren in verstärktem Maße, dass ältere Ideen von ökologischen Gefügen als eine Art Überorganismen keineswegs ins Reich der Esoterik zu verweisen sind. Moderne wissenschaftliche Befunde zeigen, dass praktisch jegliche Mehrzeller ein kleines Teilökosystem für sich darstellen; es wird u.a. von Pflanzen oder Tieren als Holobionten gesprochen, die wesentlich auch durch ihr Mikrobiom funktionieren.
5. Diese Gesamtheit der Mikroorganismen auf, an und in Vielzellern greift stärker in die Physiologie ein, als man sich dies bis vor kurzem überhaupt vorstellen konnte. Es zeigt sich, dass damit auch das Ausmaß der Integriertheit in Ökosystemen und damit die Zahl, Komplexität und Relevanz der Wechselwirkungen eklatant unterschätzt wurden. Im Sinne der evolutiv begünstigten Effizienz vermitteln Kommunikation, Symbiosen und Kooperation emergente Eigenschaften des Gesamtsystems, die dasselbe rückkoppelnd unterstützen. Im Kontext der aktuellen physikalisch-energetischen und systemökologischen Kenntnisse kommt auch der Biodiversität eine überragende Bedeutung zu. Die Vielfalt des Lebens ist eben keine luxuriös ausschweifende Variation der Organismen, sondern eine wesentliche Grundlage der Funktionstüchtigkeit von Ökosystemen.
6. Bis heute wird Biodiversität von vielen im Wesentlichen als Artenvielfalt verstanden. Dies kann leicht zu irrigen Annahmen und Zielvorstellungen führen, wenn es scheinbar darum geht, die Zahl von Arten an einem Ort zu maximieren.
7. Vielmehr ist die wohl wichtigste – und gleichzeitig am wenigsten verstandene - Dimension der Biodiversität die (weniger gut beobachtbare) Vielfalt der Interaktionen und ökologischen Prozesse. Diese beruhen weniger auf der Zahl der Arten in einem System als vielmehr darauf, dass diese Arten funktional in Beziehung miteinander treten können.

Zur Frage der Klimaresilienz: Zurück in eine völlig unvorhersehbare Zukunft?

8. Die popularisierte Beschäftigung mit dem Klimawandel und seiner Wirkungen auf Organismen bzw. Ökosysteme führt zuweilen zu einem Mangel an sprachlicher und konzeptioneller Präzision. Wenn etwa von klimatoleranten Baumarten gesprochen wird, ist

dies naturwissenschaftlich problematisch, da ja alle Arten ‚ein Klima vertragen', nämlich einen mehr oder weniger langfristigen Durchschnitt von Witterungen bzw. Wetter. Vielmehr haben sich alle Organismen ja an ein gewisses Klima angepasst, was dann Klimawandel potenziell problematisch macht – v.a., wenn er sehr schnell abläuft. Daraus ergibt sich allerdings nicht allein semantisches bzw. sprachliches Problem, sondern es wird auch allzu leicht ein falsches Verständnis von ökologischen Systemen bzw. auch vom Klimawandel entwickelt.

9. Selbst das Wort ‚klimawandeltolerant' ist nichtssagend, wenn nicht klar ist, auf welchen Zeitraum und welche Form und Geschwindigkeit von Klimawandel es sich bezieht. Selbst wenn der Zeitraum eingegrenzt würde und z.B. nach Baumarten gesucht würde, die bis zum Ende des Jahrhunderts den Klimawandel tolerieren sollen (ein angesichts typischer Lebensalter von Baumarten im Grunde eher recht kurzer Zeitraum), bleibt völlig unklar, welche Eigenschaften diese Bäume haben müssten. Denn es ist aktuell unmöglich vorherzusagen, welche Klimabedingungen in wenigen Jahrzehnten vorherrschen werden – und noch unmöglicher, was diese klimatischen Verhältnisse für Organismen bedeuten.
10. Dies ist eine unbefriedigende und vor allem gefährliche Situation, die aber genau die Herausforderung beschreibt, der die Menschheit aktuell nicht hinreichend ins Auge sieht. Viele Akteure konnten sich vor 10-15 Jahren nicht vorstellen, dass Szenarien, die damals durchaus beschrieben und diskutiert wurden (z.B. massives Absterben von Bäumen bestimmter Arten) überhaupt eintreten könnten. Selbst vor 3 Jahren – im Hitzesommer 2018 - lagen diverse Waldbesitzer*innen und Entscheidungsträger*innen bezüglich der kurzfristig möglichen Auswirkungen von Hitze und Dürre auf den Wald noch völlig falsch.
11. Tatsächlich ist auch der Begriff der ‚Klimaresilienz' überaus unscharf bzw. sogar unzutreffend. Viele Ideen zur Klimawandelanpassung implizieren, dass sich das Klima von einem Zustand in einen anderen wandelt. In der forstlichen Klimawandelforschung wird seit langem viel mit Karten der projizierten zukünftigen Verbreitung von Baumarten gearbeitet. Wenngleich sie auf vielerlei zu stark vereinfachenden Annahmen beruhen, entfalten sie eine starke Suggestionskraft, die zu falschen Vorstellungen führen kann. Zudem beziehen sich die Karten immer auf einen bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft, so dass vermeintlich ein ‚Ziel- bzw. Endklima' abgebildet wird, auf das man sich (und den Wald) einstellen solle. Entsprechend bedeutet für manche Akteure Klimawandelanpassung zumindest implizit, dass ein vermeintliches zukünftiges Klima antizipiert werden soll, für das dann passende Organismen gesucht werden, die die ‚neuen Ökosysteme' bilden sollen. Leider spricht derzeitig keinerlei Evidenz für die Stichhaltigkeit solcher Ideen.
12. Längst ist klar, dass sich zwar die (gedachten) Linien gleicher Temperatur (Isothermen) auf der Landkarte polwärts verschieben, aber dass keinesfalls die Klimazonen wandern. Nicht allein in den Tropen, sondern auch in unseren gemäßigten Breiten ist davon auszugehen, dass ein völlig neuartiges Klima entsteht – welches ja nicht nur von Durchschnittstemperaturen geprägt ist, sondern auch von veränderter und ggf. stärker variierender Saisonalität, veränderten Extremereignissen wie Starkregen, besonders seltenen, aber späten Frösten oder außergewöhnlichen Kaltluft- und Heißlufteinbrüchen.
13. Das Klimasystem ist komplex und entzieht sich durch dynamisch neu auftretende Wechselwirkungen und Rückkopplungen einer verlässlichen Modellierung. Tatsächlich wurden diverse im Rahmen der globalen Erwärmung auftretenden Phänomene erheblich unterschätzt. Interessante Beispiele für neu auftretende Treiber sind etwa Einflüsse der

Erwärmung des arktischen Meeres auf den Jetstream, dessen Veränderung neue Wetterlagen generiert, oder die Rückkopplungen, die sich aus Vegetationsreaktionen wie Baumsterben und Waldbrände ergeben. Auch die besten Klimamodelle scheitern weiterhin daran, auch nur kurzfristig zukünftige Niederschlagsverhältnisse einigermaßen verlässlich zu projizieren. Es wird vermutet, dass dies u.a. an Wechselwirkungen des Klimas mit der Vegetation liegen.

14. Allerdings ist das Klimasystem an sich im Vergleich viel weniger komplex als die Ökosysteme, in denen eine um Größenordnungen höhere Zahl von Komponenten aufeinander und die sich dynamisch verändernden Rahmenbedingungen reagieren. Der anthropogene Klimawandel ist ein aktuell sehr rasch anschwellender Stressor, der nicht allein auf einzelne Arten wirkt – schon gar nicht nur auf Bäume. Er wirkt simultan auf grundlegende Rahmenbedingungen und Ressourcen wie etwa die Wasserverfügbarkeit, aber gleichzeitig auch auf physiologisch relevante Extremtemperaturen oder die Veränderung von komplexen ‚raumzeitlichen' Gefügen zwischen Organismen.
15. Dies bedeutet die für exakt arbeitende Wissenschaftler verstörende Folgewirkung, dass Ökosysteme inhärent unbestimmt sind – ihre Zukunft kann nicht vorhergesagt werden. Entsprechend unzuverlässig sind etwa Modellierungen zur zukünftigen Verbreitung von Baumarten. Zwar kann man eine Vielzahl von klimatischen Parametern in Modelle einspeisen und mit der aktuellen Verbreitung von Arten abgleichen – doch das Ergebnis wird nur widerspiegeln, wie Arten unter Berücksichtigung von vielerlei Annahmen reagieren könnten. Wenn aber nur ein Parameter fehlt - wie etwa ein Jahrtausendhitzeereignis - , und sich der Verlauf der biologischen und ökologischen Evolution schlagartig ändert, sind die Modellierungsergebnisse wertlos.
16. Definitiv kann nicht modelliert werden, wie sich konkrete ökologische Prozesse mit dem Klimawandel an konkreten Orten verändern werden – z.B., wie Mykorrhizapilze oder Trockenheitsresistenz vermittelnde Wurzelbakterien auf einzelne Wetterextreme reagieren werden, oder unter welchen Bedingungen zwei Krankheitserreger auftreten werden, welche Baumartenpopulationen kollabieren lassen. Ebensowenig ist modellierbar, wann sich welche Konsequenzen aus der Kombination von mehreren Witterungsextremen (u.a. warme Winter, langjährige Niederschlagsdefizite und Rekordextremtemperaturen) mit biologischen Phänomenen ergeben (u.a. starke Schwächung von Bäumen, während gleichzeitig die Massenvermehrung von ‚Schädlingen' wie Borkenkäfern und Krankheitserregern wie z.B. *Phytophthora*-Pilzen erfolgt).
17. Einzelne Extremereignisse (oder –perioden) können innerhalb weniger Jahre jahrhundertealte Wald-Ökosysteme dramatisch verändern. Dieser theoretisch und aus der Paläoökologie bekannte Sachverhalt bestätigt sich aktuell auf verschiedenen Kontinenten, wo Kalamitäten wie Dürreperioden, und Feuer zum Kollabieren von alten Baumpopulationen oder gar zum Biomwechsel führen – wenn Wald etwa wie in den südwestlichen USA nach Feuer nicht nachwächst.
18. Ein anderes Bild, das zuweilen bemüht wird, ist dasjenige von Förstern als Reisebegleitern. Bäume würden aus anderen Regionen sozusagen als Gäste oder Passagiere auf der Durchreise nach Deutschland kommen. Diese würde eine Weile bei uns bleiben, dann weiterziehen und Platz machen für wiederum neue. Dabei wird verkannt, dass sich eben nicht von Zeit zu Zeit ein neues Klima einstellt, das es jeweils Bäumen erlauben würde, für einige Jahrzehnte oder gar länger zu wachsen, ehe dann wiederum die nächste noch

hitzetolerantere Baumart an die Reihe kommt. Vielmehr ist eben neben einer fortlaufenden Erwärmung mit einer zunehmenden Klimavolatilität und entsprechenden Extremen zu rechnen.

Klimawandel-*Anpassung* als „Spiel", in dem sich sowohl die Mitspieler als auch die Spielregeln fortlaufend verändern

19. Die vorstehenden Betrachtungen sind nicht allein von theoretischer oder rein akademischer Bedeutung. Vielmehr werfen sie große Fragen auf, die u.a. die Definition, Ziele und Strategien von *Anpassung an den Klimawandel* betreffen. Wie sollen Mensch und Natur sich an den Klimawandel effektiv anpassen, wenn nicht hinreichend verstanden ist, welche Herausforderungen drohen bzw. sich diese Herausforderungen im Laufe der Zeit ständig wandeln? Vermutlich ist sogar der Begriff der Klimawandelanpassung völlig ungeeignet, da er impliziert, dass sich Mensch und Natur auf einen neuen Klimazustand einstellen könnten, der allerdings mittelfristig gar nicht eintreten wird.
20. Im Grunde ist die Situation vergleichbar mit einer Art taktisch-strategischem Spiel, in dem sich nicht nur Zahl und Art der Mitspieler ständig und unvorhersehbar verändern, sondern neue Mitspieler jeweils auch neue Spielregeln in das Spiel einbringen. Zudem können in dem Spiel gewisse Überraschungsmomente dafür sorgen, dass einzelne Spieler abrupt ausscheiden, wenn sie gewisse Puffer und Versicherungen aufgebraucht haben. Deterministisch agierende Spieler, die nach festen, in der Vergangenheit gelernten Spielregeln vorgehen (Algorithmen: „wenn …, dann …") bzw. aus der Vergangenheit auf die Zukunft schließen, müssen dabei scheitern.
21. Es ist unter derartigen ‚Spiel'-Bedingungen regelrecht kontraproduktiv und gefährlich, sich ein vermeintlich genaues Bild von der Zukunft zu machen und aus ihm Strategien abzuleiten.
22. Derartiges passiert gerade in Teilen der Forstwirtschaft und der Forstwissenschaften, wenn sich Akteure der unauflösbaren Unsicherheit und dem entsprechenden Nichtwissen verschließen und selbstsicher Maßnahmen ergreifen, die auf konkreten Szenarien beruhen – wenn also z.B. ein konkretes zukünftiges Klima vorausgesetzt wird, zu dem dann bestimmte eingeführte Baumarten aus anderen Regionen passen sollen. So wird aktuell in ganz Deutschland in Größenordnungen die nordamerikanische Douglasie gepflanzt, die vermeintlich das zukünftige Klima besser ‚ertragen' soll als die nun massiv absterbenden Fichten. Hierbei werden nicht allein die Unsicherheit und das Nichtwissen bzgl. zukünftiger Klimaverhältnisse und der Reaktionen der Douglasie ausgeblendet, sondern gleichzeitig auch erste Befunde, dass Douglasien auch in Europa bereits unter Trockenheit und Schädlingsbefall leiden. Genauso wird neues Wissen um die Integration von Organismen in Ökosystemen ignoriert (siehe oben).

Kompetenter Umgang mit Nichtwissen benötigt: Faustregeln statt Patentrezepte

23. Da das Eingestehen der aktuellen übergroßen Unsicherheit von Forstakteuren als Kapitulationserklärung gedeutet wird, kommt es zu vermeintlich proaktivem Handeln – welches aber in diesem Falle sogar neues Nichtwissen, neue Unsicherheiten und schlimmstenfalls sogar neue Vulnerabilität generieren kann.

24. Aktuell sieht es so aus, dass die globale Erwärmung noch für längere Zeit voranschreiten wird und zwar in einem Ausmaß, mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit und in solche Temperaturbereiche hinein, dass die bevorstehende Situation für die heutigen Ökosysteme als völlig neuartig gelten muss. Die Produktivität ist rückläufig, und die Bedingungen, die derzeit als extrem empfunden werden, könnten in naher Zukunft das neue "Normal" darstellen[4].
25. Klar ist: Nicht allein Forstleute haben keine Erfahrung mit den konkret drohenden Verhältnissen, sondern auch die Ökosysteme haben sie nicht. Mensch und Ökosysteme gehen nur jeweils unterschiedlich mit der entsprechenden Herausforderung um. Während dem menschlichen Ingenieurwesen innewohnt, gewisse Situationen antizipierend nach Bauplänen, mehr oder weniger einfachen Lösungen oder Patentrezepten – also Algorithmen – zu streben, ‚wurstelt' sich die unbewusst agierende Natur ‚durch'. Dabei wird allerdings nicht nach völliger Beliebigkeit probiert, sondern es gelten evolutionsbedingte Regeln – also Heuristiken – die die jeweiligen Systeme bezüglich Effizienz, Resistenz und Resilienz optimieren.
26. Der mit der Natur wirtschaftende Mensch ist gut beraten, von diesen Prinzipien zu lernen, nach denen sich die Ökosysteme entwickeln. Entsprechende Faustregeln oder Heuristiken können strategisches Vorgehen orientieren.

Klimawandel-*Resilienz ist* ‚Überraschungs'-Toleranz und beruht vor allem auf Puffern

27. Die inhärente Unvorhersagbarkeit und der stete Wandel in komplexen Systemen sind schon immer große Herausforderungen für lebende Systeme gewesen. Was Ökosysteme deshalb benötigen, ist keineswegs die Fähigkeit, immer wieder in einen früheren Zustand zurückzukehren oder direkt einen neuartigen, wie auch immer gearteten Zustand einzunehmen, sondern vielmehr eine bestmögliche ‚Überraschungstoleranz' und eine ausgeprägte Schockresistenz.
28. Es geht also um Resilienz in dem Sinne, dass nach abrupten und überraschenden Störungen wieder möglichst schnell eine bestmögliche Funktionstüchtigkeit erlangt wird. Idealerweise bedingt die Auseinandersetzung mit den Störungen und die Notwendigkeit, Funktionen zu reparieren gleichzeitig eine Anpassung an sich verändernde Rahmenbedingungen. Denn auch nach gemeisterten Störungen und Krisen wird die Situation nie wieder so sein wie in der Vergangenheit. In jedem Falle ist besonders relevant, auftretende Störungen bestmöglich abpuffern zu können und mehrere Optionen vorzuhalten. Tatsächlich folgen Ökosystemen entsprechenden Strategien, indem zum einen Diversität und Redundanz ‚Sicherheitsnetze' bilden, zum anderen Puffer und Selbstregulation ausgebildet werden, was die potenzielle Verwundbarkeit reduziert.
29. Reife und ungestörte agierende Ökosysteme kennzeichnen sich durch eine ausgeprägte Regulation von Standortbedingungen wie Mikroklima und Wasserspeicherung sowie den fortgesetzten Aufbau des eigenen Substrats.

[4] Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., & Kumar, R. (2020). Increased future occurrences of the exceptional 2018 – 2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports*, *10*(12207).
Scharnweber, T., Smiljanic, M., Cruz-García, R., Manthey, M., & Wilmking, M. (2020). Tree growth at the end of the 21st century - the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. *Environmental Research Letters*, *15*.

30. Wesentlich ist eine steigende thermodynamische Effizienz in dem Sinne, dass immer mehr Energie vom System aufgenommen und für längere Zeit im System verbleiben und für intensivere physikalische Arbeit genutzt werden kann. Zentrale Zielfunktion und Ergebnis der Ökosystemaktivität sind dabei die effektive Kühlung, weil der Energieverlust durch Wärmeproduktion im System reduziert wird. Dies ist theoretisch untermauert und empirisch nachgewiesen. Alte Wälder haben eine größere mikroklimatische Kühlungs- und Pufferungskapazität[5].

Mutmaßlich illegale Waldverschlechterung und Vermehrung von Risiken durch aktuelles forstliches Handeln

31. Im Rahmen der aktuellen Waldkrise kommt es auf etlichen Hunderttausenden Hektar zum massiven Absterben von Bäumen; bei überdurchschnittlich warmer und trockener Witterung dürfte sich das Problem weiterhin verschärfen. Die im Rahmen des Maßnahmenprogramms der Bundesregierung vorgesehenen und auch in diversen Bundesländern bereits umgesetzten Strategien im Umgang mit den geschädigten Flächen bedeuten eine umfassende und zum guten Teil irreversible ökologische Veränderung sehr großer Waldflächen in Deutschland.
32. Die aktuellen Aktivitäten in den Wäldern, die auch im Zuge staatlicher Förderprogramme eine erhebliche Unterstützung erfahren, gehen in erheblichem Maße über die bislang übliche und gesetzlich geregelte Waldbewirtschaftung hinaus, ohne dass eine irgendwie geartete und angemessen dokumentierte Abschätzung der Folgen und Risiken für Waldökosysteme, die Biodiversität in Deutschland und die gesamte Umwelt durchgeführt worden wäre. Es besteht Anlass zur Befürchtung, dass die forstlichen Maßnahmen auf den geschädigten Flächen ganze Landschaftsökosysteme, die Biodiversität und der Naturhaushalt nachhaltig beeinträchtigen. Ihre Umsetzung erfolgt ohne angemessene Berücksichtigung von wissenschaftlicher Evidenz und trotz deutlich vorgebrachter und fachlich begründeter Kritik v.a. an den großflächigen Räumungskahlhieben und Pflanzungen. Zu den vielfältigen und komplexen Schäden, die sich aus Befahrung von Waldböden, Kahlschlägen bzw. Räumungshieben ergeben, liegt eine Vielzahl von internationalen Studien vor, die offensichtlich ignoriert werden. (vgl. Abb. 1; Anhang 1).
33. In verschiedenen Fällen sind bereits Juristen und politische Entscheidungsträger*innen mit der aktuellen Waldbehandlung befasst. In Nordrhein-Westfalen war kürzlich ein Kahlschlag in einem Buchenwald Gegenstand einer parlamentarischen Anfrage[6].
34. In einem Positionspapier der AG Botanik und Biodiversitätsforschung der Universität Koblenz-Landau wird festgestellt, dass im Rahmen jüngster Kahlschläge in Rheinland-Pfalz

[5] Vgl. u.a.: Frey, S. J. K., Hadley, A. S., Johnson, S. L., Schulze, M., Jones, J. A., & Betts, M. G. (2016). Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances*, *2*(4), e1501392.
Norris, C., Hobson, P., & Ibisch, P. L. (2012). Microclimate and vegetation function as indicators of forest thermodynamic efficiency. *Journal of Applied Ecology*, *49*(3), 562–570.
Thom, D., Sommerfeld, A., Sebald, J., Hagge, J., Müller, J., & Seidl, R. (2020). Effects of disturbance patterns and deadwood on the microclimate in European beech forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, *291*(108066).
Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Vangansbeke, P., Bernhardt-Römermann, M., Baeten, L., … Coomes, D. (2020). Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, *368*, 772–775.
[6] Vgl. Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 4295 vom 8. September 2020 der Abgeordneten Norwich Rüße und Johannes Remmel BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Drucksache 17/10920, LANDTAG NORDRHEIN-WESTFALEN 17. Wahlperiode Drucksache 17/11270 05.10.2020

und Nordrhein-Westfalen empfindliche Lebensräume und bedrohte Arten gestört oder gar lokal ausgelöscht wurden; dabei sind auch FFH-Gebiete betroffen, in denen offenbar keine entsprechenden Umweltverträglichkleitsprüfungen bzw. Risikoabschätzungen umgesetzt wurden[7].

Abb. 1: Aktuell führen Kahlschläge im gesamten Bundesgebiet zu erheblichen ökologischen Schäden.

35. Wälder können regelrecht ‚heißgeschlagen' werden (vgl. Abb. 4). Im Falle einer starken forstlichen Nutzung in einem europäischen Schutzgebiet zum Schutz von Buchenwäldern (gemäß FFH-Richtlinie/ Natura 2000), die anscheinend zum Absterben von freigestellten Buchen und zur Aufheizung der Landschaft um die Heiligen Hallen (der älteste Buchenwald Deutschlands im Naturpark Feldberger Seenlandschaft, Mecklenburg-Vorpommern) beigetragen hat, kommt ein Rechtsgutachten[8] zum Ergebnis, dass der Tatbestand der Verschlechterung plausibel erscheint.
36. Es handelt sich um ein mittlerweile weithin beobachtbares Phänomen, dass Bäume in stark aufgelichteten Wäldern besonders stark unter Hitze und Dürre leiden. Die entsprechenden Behandlungen erfolgen auch auf Grundlage von waldbaulichen Empfehlungen, da freigestellte Bäume vermeintlich der Konkurrenz entbunden einen verbesserten Zugang zu Wasser haben sollen. Leider wird hierbei außer Acht gelassen, dass diese Praxis in extrem heißen und trockenen nicht genauso zu beurteilen ist wie in kühleren und regenreicheren

[7] Fischer, E., B. Leh & D. Killmann (2020): Waldentwicklung und Waldökologie in Rheinland-Pfalz und dem südlichen Nordrhein-Westfalen Positionspapier der AG Botanik und Biodiversitätsforschung vom 17.11.2020; Schlussfolgerung im Dokument: "Im Hinblick auf den Klimawandel ist es jetzt dringend notwendig, die Forstwirtschaft in Deutschland grundlegend zu reformieren. Nur mit einem Umdenken in Richtung auf Erhaltung und naturnahe Bewirtschaftung von Wäldern lässt sich der negative Effekt der Klimaerwärmung aufhalten. Dies wird sich positiv sowohl auf die CO2-Bilanz als auch auf die Erhaltung der reichhaltigen, teilweise noch unbekannten Biodiversität dieser Lebensräume auswirken." (https://www.researchgate.net/publication/345983247_Waldentwicklung_und_Waldokologie_in_Rheinland-Pfalz_und_dem_sudlichen_Nordrhein-Westfalen)

[8] Ziehm, C. (2020): FFH-Gebiet „Wälder bei Feldberg mit Breitem Luzin und Dolgener See" mit Naturschutzgebieten „Heilige Hallen" und „Feldberger Hütte" – Zum Erfordernis einer FFH-Verträglichkeitsprüfung und zur (Un)Zulässigkeit weiterer Einschläge in Buchenbestände. 3.11.2020, 26 S. (Aktenzeichen VR38/2020/cz).

Perioden. Bislang wird nicht hinreichend beachtet, dass höhere Temperaturen mehrfach schädlich auf Pflanzen einwirken. Neben Hitzestress und der Verringerung der Wasserverfügbarkeit durch Austrocknung des Bodens kommt die austrocknende Wirkung heißer Luft hinzu, wobei der Effekt mit steigender Temperatur nichtlinear zunimmt (vgl. Abb. 2).

37. Studien weisen auf diesen Zusammenhang hin: "Ein oft übersehener Aspekt von hohen Temperaturextremen ist die Auswirkung von Extremereignissen auf den atmosphärischen Wasserdampfbedarf. (...) Die Auswirkungen von Temperaturextremen auf die Pflanze könnten sich aus der kombinierten Wirkung der warmen Lufttemperaturen und des steigenden atmosphärischen Bedarfs ergeben"[9] (…). Das Problem eines sich verstärkenden Dampfdruckdefizits könnte zu einem bedeutenden Treiber von Vegetationsdynamik werden; das Dampfdruckdefizit - welches die austrocknende Wirkung von Luft beschreibt – wurde bereits mit erhöhter Mortalität von großen Bäumen in Waldökosystemen in Verbindung gebracht (Breshears et al., 2013; Williams et al., 2013). Erstaunlicherweise galt dem Phänomen lange Zeit eine geringere Aufmerksamkeit als den direkten Temperaturwirkungen oder dem Rückgang von Niederschlägen (Grossiord et al., 2020)"[10] (vgl. Abb. 3).

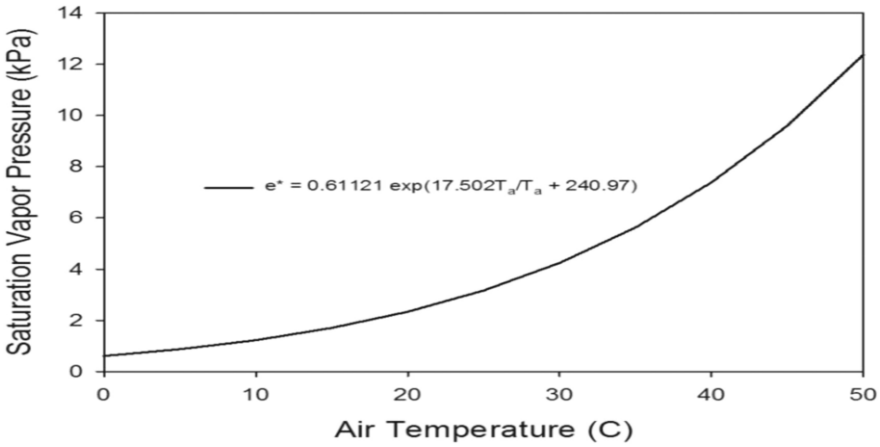

Abb. 2: Exponentieller Anstieg des Sättigungsdampfdrucks mit der Temperatur. Die Verdunstung und auch die austrocknende Wirkung von Luft steigen nichtlinear mit der Temperatur an[11].

[9] Hatfield, J.L., Prueger, J.H. (2015): Temperature extremes: Effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes, USDA Research and Programs on Extreme Events 10, 4–10.

[10] Absatz leicht verändert aus Gohr, C., J.S. Blumröder & P.L. Ibisch (2020): Thermische Wirkungen von Waldökosystemen und Autobahnen unter den Bedingungen des Klimawandels Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Effekte des geplanten Baus des Autobahnabschnittes der A49 auf den Dannenröder Forst, Hessen. Greenpeace, Hamburg.

Im Absatz zitierte Literatur:

Breshears, D.D., Adams, H.D., Eamus, D., McDowell, N., Law, D.J., Will, R.E., Williams, A.P., Zou, C.B. (2013): The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. Front. Plant Sci. 4. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00266

Grossiord, C., Buckley, T.N., Cernusak, L.A., Novick, K.A., Poulter, B., Siegwolf, R.T.W., Sperry, J.S., McDowell, N.G. (2020): Plant responses to rising vapor pressure deficit. New Phytologist 226, 1550–1566.

Williams, A.P., Allen, C.D., Macalady, A.K., Griffin, D., Woodhouse, C.A., Meko, D.M., Swetnam, T.W., Rauscher, S.A., Seager, R., Grissino-Mayer, H.D., Dean, J.S., Cook, E.R., Gangodagamage, C., Cai, M., McDowell, N.G. (2013): Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. Nature Clim Change 3, 292–297.

[11] Aus Hatfield, J.L., Prueger, J.H. (2015): Temperature extremes: Effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes, USDA Research and Programs on Extreme Events 10, 4–10.

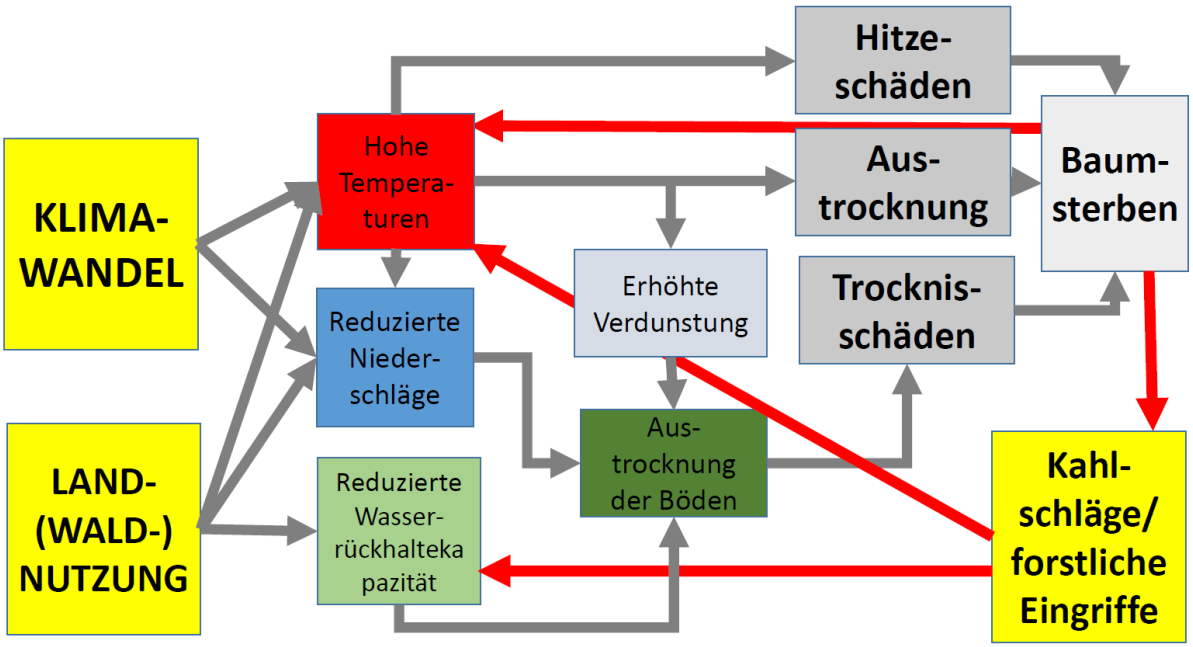

Abb. 3: Vereinfachtes konzeptionelles Modell von Klimawandelwirkungen im Wald. Hitze, trockene Luft und ausgetrocknete Böden schwächen Bäume als exponierte Organismen in mehrfacher Hinsicht. Die Wirkungen fallen je nach Baumarten, Standortbedingungen und Ökosystemzustand differenziert aus. Stärkere Eingriffe in das (geschädigte) Ökosystem verstärken Hitze und Dürre (eigene Darstellung).

Abb. 4: Ausgewählte Buchenwälder, in denen die durch starke Auflichtung in Extremjahren verursachte Erwärmung und Austrocknung die verbliebenen Bäume schwächen bzw. absterben lassen (links: Brandenburg, Anfang September 2020; rechts: Rheinland-Pfalz, August 2020) (Fotos: P. Ibisch).

Wie viel Kühlung können und wollen wir der klimawandelgetriebenen Erhitzung entgegensetzen?

38. Mithilfe von Satellitenbilddaten [vgl. Abb. 5-7] kann die kühlende Wirkung von Waldflächen (…) quantifiziert werden. Die Temperaturunterschiede sind vor allem an den heißesten Tagen des Jahres besonders ausgeprägt: Der Temperaturunterschied der durchschnittlichen Oberflächentemperaturen zwischen den kühlsten und bewaldeten Bereichen sowie den wärmsten urbanen Gebieten [in einem Gebiet in Nordhessen] beträgt an diesen heißesten Tagen über 10 °C. Eine dichte und geschlossene bzw. vitale Vegetation vor allem von größeren Waldflächen wirkt sich deutlich kühlend auf die Oberflächentemperaturen aus. Vitalität und Kühlung von Vegetation beeinflussen sich wechselseitig. In Zeiträumen, in denen die Landschaft durch eine Vegetation mit geringer Vitalität geprägt ist (…), fallen die Oberflächentemperaturen höher aus als in Jahren mit vergleichsweise hohen Vitalitätswerten der Vegetation.[12]
39. Die mit Hilfe von Satellitendaten quantifizierbaren 'Hitzeinsel'-Effekte von Städten und die kühlenden Effekte von Vegetation sind schon eine geraume Weile bekannt. Im Zusammenhang der Bemühungen zur Anpassung an den Klimawandel wird v.a. von Städteplanern diskutiert, wie sich durch Bepflanzung Hitze und Trockenheit mäßigen lassen. Bislang wird allerdings noch nicht genügend diskutiert, was die entsprechenden Phänomene für das Ökosystemmanagement und die Waldbewirtschaftung bedeuten. Die Daten zur Landschaftstemperatur verdeutlichen, dass die Förderung von Wald ein erhebliches Potenzial bieten könnten, Extremtemperaturen zu dämpfen.
40. Die vergleichweise heißen Flächen mit entsprechenden sich erwärmenden und aufsteigenden Luftmassen mit großer Kapazität, Feuchtigkeit aufzunehmen (Advektionseffekte), tragen erheblich zur Landschaftsaustrocknung bei. Zudem wird überdeutlich, dass die Oberflächentemperaturen (an heißen Tagen) einen sehr guten Indikator für weitere Aspekte der Ökosystemqualität darstellen: Heiße Flächen sind in der Regel sehr naturfern und häufig versiegelt. Entsprechend sind es meist Flächen, auf denen kein Wasser aufgefangen und zurückgehalten werden kann. Gleichzeitig handelt es sich um vegetationsarme und meist biologisch weniger vielfältige Gebiete.
41. Waldgebiete verdunsten zwar auch große Mengen Wasser, aber dafür gibt es eine Reihe von Mechanismen, die der Austrocknung entgegenwirken. Dazu zählt der hydraulischen Auftrieb ('es gibt vielfältige, jedoch übereinstimmende Belege dafür, dass tiefe Wurzeln auf verschiedenen Ebenen von der Rhizosphäre bis zu ganzen Einzugsgebieten eine wichtige Rolle bei der Wasseraufnahme der Pflanzen, der Verfügbarkeit von Bodenwasser und dem Wasserkreislauf spielen'[13]). Zudem scheinen Waldgebiete Bewölkung und Niederschläge günstig zu beeinflussen. Die Beschaffenheit des Waldes beeinflusst neben der Kühlung auch den Landschaftswasserhaushalt. Laubwälder sind für die Versickerung und Speicherung von Wasser günstiger.

[12] Absatz aus Gohr, C., J.S. Blumröder & P.L. Ibisch (2020): Thermische Wirkungen von Waldökosystemen und Autobahnen unter den Bedingungen des Klimawandels Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Effekte des geplanten Baus des Autobahnabschnittes der A49 auf den Dannenröder Forst, Hessen. Greenpeace, Hamburg.

[13] Zitat Zapater, M., Hossann, C., Bréda, N., Bréchet, C., Bonal, D., and Granier, A. (2011): Evidence of hydraulic lift in a young beech and oak mixed forest using 18O soil water labelling. *Trees* 25, 885–894. (übersetzt aus dem Englischen). Vgl. Bengough, A. G. (2012). Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology. *Vadose Zone J*. 11. doi: 10.2136/vzj2011.0111

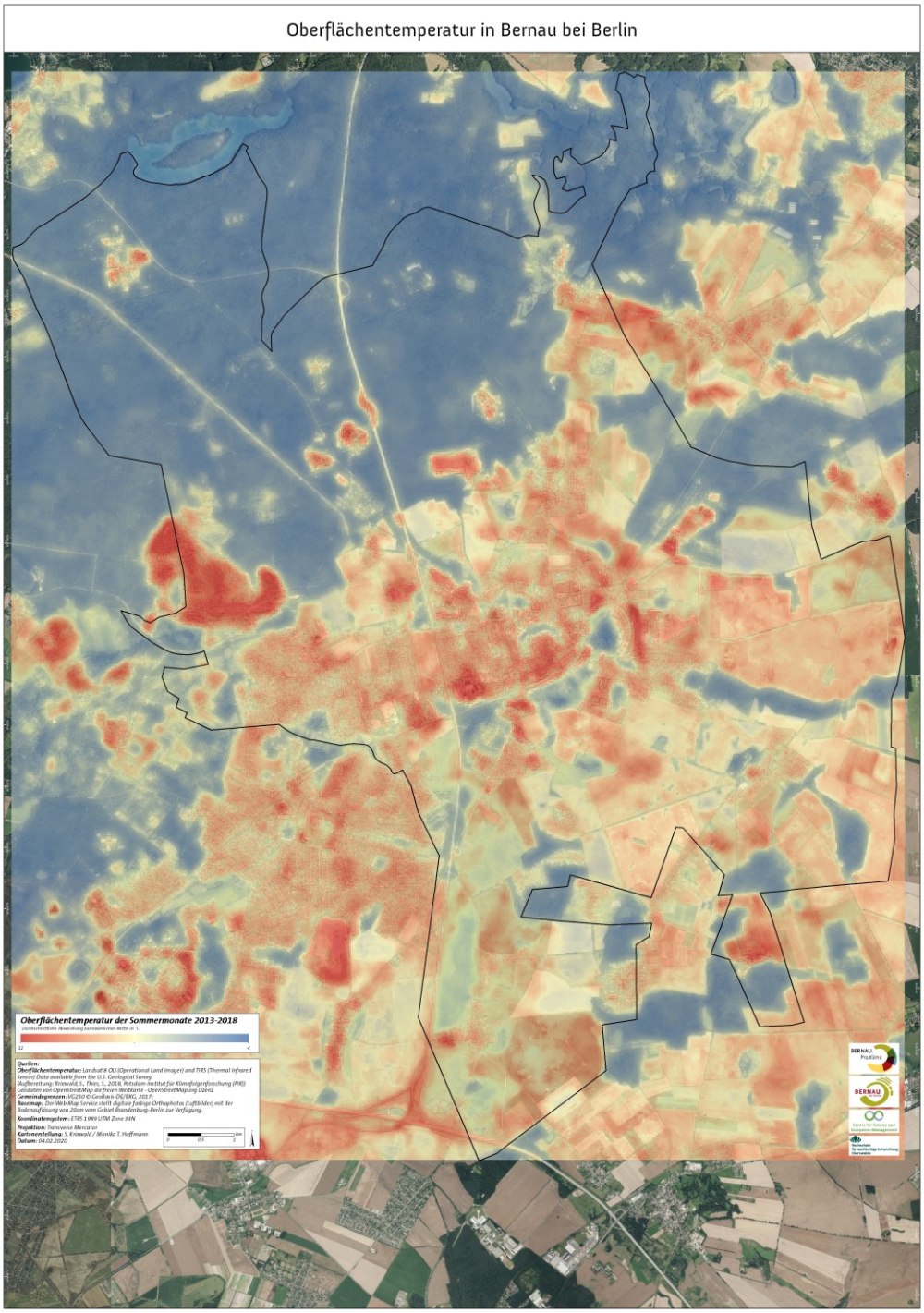

Abb. 5: Satellitenbildbasierte Karte der durchschnittlichen Sommer-Oberflächentemperatur (mittags) der Landschaft um Bernau bei Berlin. Temperaturunterschiede als Abweichung von der mittleren Temperatur des Untersuchungsgebiets dargestellt (maximale Differenz bis 16°C). Die überdurchschnittlich kühlen Räume sind neben Gewässern sämtlich Wälder, Gehölze und Park- bzw. Grünflächen. Größere und biomassereichere Wälder weisen kühlere Temperaturen auf. Zu den heißesten Flächen gehören z.B. Autobahnen (siehe am unteren Bildrand: Berliner Ring/ Barnimer Kreuz, großflächig versiegelte und bebaute Flächen, ausgedehnte Dachflächen, vegetationsloses Offenland oder eine Kiesgrube).[14]

[14] Aus: Geyer, J., M. Michaelsen, A. Diel, M. Hoffmann, P.L. Ibisch (2020): Strategie zur ökosystembasierten Anpassung an den Klimawandel in Bernau bei Berlin. Anpassung an den Klimawandel in Bernau mittels ökosystembasierter und partizipativer räumlicher Planung. Projektabschlussbericht und Dokument zur Verabschiedung durch die Stadtverordnetenversammlung. Projekt Bernau.Pro.Klima (Die

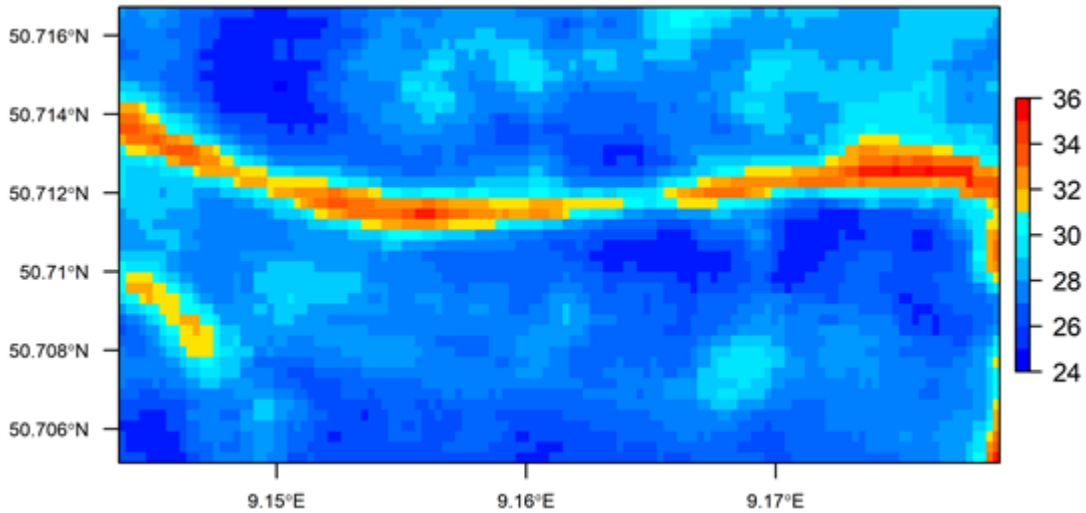

Abb. 6: Oberflächentemperaturen der heißesten Tage (≥ 25 °C) von 2002-2020 in einer von einer Autobahn zerschnittenen Landschaft: Waldbereich zwischen Zell und Ehringshausen, durch den die Autobahn A5 verläuft. Mittelwert: 26,4 °C; Mittelwert der reinen Autobahnpixel: 28,7 °C. Datengrundlage: Landsat 5,7, 8; LST - Ermida et al. 2020. Projektion: WGS 84. Auflösung: 30 m.[15]

Abb. 7: Waldbereich zwischen Zell und Ehringshausen, durch den die Autobahn A5 verläuft. Situation am 25. Juli 2019, Google Earth. Der Vergleich mit dem Bild in Abb. 6 zeigt, dass unterschiedliche ausgestattete Waldflächen differenzierte Oberflächentemperaturen aufweisen. (Bei der Interpretation ist relevant, dass Abb. 6 einen langjährigen Durchschnitt zeigt).

Anpassungsstrategie entstand im Rahmen des Projektes „Kommune im Dialog – Anpassung an den Klimawandel in Bernau mittels ökosystembasierter und partizipativer räumlicher Planung“ (Bernau.Pro.Klima) gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Förderprogramms „Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel". Förderkennzeichen 67DAS125).

[15] Aus Gohr, C., J.S. Blumröder & P.L. Ibisch (2020): Thermische Wirkungen von Waldökosystemen und Autobahnen unter den Bedingungen des Klimawandels Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Effekte des geplanten Baus des Autobahnabschnittes der A49 auf den Dannenröder Forst, Hessen. Greenpeace, Hamburg.

Waldbewirtschaftung als Teil eines ganzheitlichen Landschaftsökosystemmanagements

42. [16]Der Klimawandel verdeutlicht, dass unterschiedliche Elemente der Landschaftsökosysteme – Wälder und Forsten, landwirtschaftliche Flächen, Wasser, Siedlungen und industriell genutzte Flächen – nicht voneinander isoliert betrachtet werden bzw. so beplant und genutzt werden dürfen, als wären sie voneinander unabhängig. Vielmehr muss die Landschaft in dem Sinne begriffen werden, welche ihrer Elemente für Input, Speicherung und Output von Energie, Wasser und Nährstoffen verantwortlich sind. Dabei geht es auch darum, welche Nutzungsformen in welchen Teilsystemen ungünstig für andere sind, wie die Anteile der Ökosysteme und ihrer Ökosystemleistungen in der Landschaft ausgewogen erhalten bzw. gefördert werden können. Eine ökosystembasierte Klimawandelanpassungsstrategie müsste eine entsprechende Integration leisten.
43. Eine nationale ***Klimawandel-Wald-Land-Strategie*** muss u.a. Maßnahmen entwerfen, die Wälder als öko-thermohydrologische Schlüsselsysteme fördern.
    a. Im **Offenland** sind etwa eine ökologische Intensivierung und der Rückbau von Entwässerungssystemen selbstverständlich auch aus der Perspektive des Waldes überaus dringlich. Mehr Biomasse und entsprechende ökologische Strukturen können und müssen den Wald unterstützen; hier geht es um Hecken, Gehölzkorridore und gestufte Waldränder. Eine strategische Waldmehrung ist in gehölzarmen Regionen zu betreiben.
    b. In **naturnahen und vor allem älteren Laubmischwäldern** muss ab sofort ein Einschlagsmoratorium verhängt werden. Dies muss gelten, bis klarer wird, wie die Wälder auf die aktuelle Periode von Extremwitterungen reagieren und wie v.a. unterschiedliche Bewirtschaftungsweisen die Waldvulnerabilität erhöhen. Mittelfristig ist ein Maßnahmenpaket zur Förderung der Waldfunktionalität umzusetzen. Hierzu gehört die erhebliche Ausweitung von Flächen ohne Holznutzung, der Rückbau von Drainagen, die Arrondierung von empfindlichen Wäldern, der Rückbau von Wegen und das Aufgeben von Rückegassen, die aktive Waldrandgestaltung, das totale Verbot von Kahl- und Schirmschlägen jeglicher Größe und die Anpassung der waldbaulichen Konzepte mit dem Ziel, den Vorratsaufbau und die Kühlungs- und Pufferungskapazität zu stärken.
    c. In den **Nadelbaumforsten** muss kurzfristig ein totales Verbot des Kahlschlags jeglicher Größe gelten. Ein angemessenes und professionelles Wildtiermanagement ist umzusetzen. Grundsätzlich sind Naturverjüngung und Selbstorganisation mehr Zeit und Raum zu geben. Dies bedeutet allerdings nicht, dass man die Bestände lässt wie sie sind. Es geht um ein behutsames Öffnen des Kronendachs und gleichzeitig auch das Erproben kreativer und innovativer Ansätze zur Förderung der Waldentwicklung. Saat muss vor Pflanzung priorisiert werden. Künstliche Totholzanreicherung kann als Investition in regulierende Ökosystemleistungen, Bodenbildung und Strukturreichtum betrieben werden. Erfahrungen mit Feuer unterschiedlicher Intensität in Kiefernforsten sowie internationale Erkenntnisse legen zudem nahe, dass kontrolliertes lokales Brennen die

[16] Abschnitte 42.-43. Verändert aus Ibisch, P.L. & J.S. Blumröder (2020): Waldentwicklung und Ökosystemleistungen im Klimawandel: aktuelle waldökologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Brandenburg. Empfehlungen für einen strategischen und ökosystembasierten Umgang mit der Waldkrise. Vorgelegt anlässlich der Brandenburger Waldkonferenz 2020, Götz/ Groß Kreutz, 26. Oktober 2020.

Förderung der Naturverjüngung mit Pionierlaubbaumarten fördern und entscheidende Impulse für die Waldentwicklung geben kann. Auch in Nadelholzforsten muss der Boden viel intensiver geschützt werden. Hier geht es dringend um die Vergrößerung der Rückegassenabstände sowie das Unterlassen großflächiger Bodenmanipulationen.

d. Für den **Umgang mit Flächen, auf denen Kalamitäten aufgetreten sind, sich verstärken oder auftreten werden**, müssen dringend für alle Besitzarten verbindliche Behandlungsrichtlinien verabschiedet werden. Kurzfristig ist ein Verbot des Kahlschlags und der flächigen Befahrung sowie der Bodenbehandlung zu erlassen. Angemessene Mengen von Totholz sind auf den Flächen zu belassen und als Investition in regulierende Ökosystemleistungen zu begreifen. Zudem muss die Unterdrückung der Naturverjüngung mit Pionierbaumarten verboten werden. Grundsätzlich sind Prozessen der Selbstheilung und Naturverjüngung Zeit und Raum zu geben. Auch hier muss zudem Saat vor Pflanzung priorisiert werden, um die Entwicklung von angepassten und strukturreichen Waldökosystemen zu fördern. Die Anlage neuer Monokulturen jedweder Art ist zu verbieten.

Waldumbau, Waldentwicklung und adaptives Management

44. Anstelle eines übermäßigen Fokus der aktuellen Forst-Klimwandel-Diskussion auf den Austausch von Baumarten erscheint es angesichts der vorstehend erläuterten Befunde dringend geboten, Wald und Landschaft so zu steuern, dass Kühlung und Wasserrückhaltung zur verbesserten Regeneration und Entwicklung von Wäldern beitragen. Es existieren nach wie vor Freiheitsgrade für die Waldentwicklung mit den in naturnahen Ökosystemen vorhandenen Arten.
45. Vor allem in homogenen Nadelforsten ist wiederholt gezeigt worden, das ein effektives Schalenwildmanagement kurzfristig einen Beitrag zur naturnahen Waldentwicklung leisten kann. Außerdem erhöhen Struktur- und v.a. Totholzreichtum die Überlebenschancen für die Naturverjüngung.
46. Auf unterschiedlichsten Kalamitätsflächen in Deutschland zeigt sich nach wie vor ein gutes natürliches Regenerationspotenzial. Dabei wird regelmäßig deutlich, wie sehr die jungen Bäume von schützenden Totholzstrukturen (stehende und liegende abgestorbene Bäume) profitieren.
47. Die mikroklimatische Regulation – u.a. Kühlung, Pufferung, Hemmung der Verdunstung – trug auf einer ehemaligen Waldbrandfläche in Brandenburg (Treuenbrietzen) zu einer überaus erfolgreichen Regeneration bei. Auf von verbrannten Bäumen geschützten Untersuchungsflächen hatten sich bereits nach einer Vegetationsperiode deutlich mehr als 50.000 neue Individuen pro Hektar von 7 Baumarten spontan eingestellt. V.a. die flächigen Bestände der Zitterpappeln haben innerhalb kürzester Zeit den Boden vor Besonnung und Erosion geschützt, freigewordene Nährstoffe wieder festgelegt, mit der Kohlenstoffspeicherung begonnen und Biomasse für Konsumenten bereitgestellt. Nach zwei Vegetationsperioden sind viele Bäume bis über 2 Meter hoch gewachsen; unter ihnen entsteht eine zarte Laubstreu, und es keimen weitere Bäume verschiedener Arten. Eine

kostenlose Ökosystemleistung: Die Sanierung von bewirtschaftungsbedingten Schäden und der effektive Neustart von Bodenbildung und Waldentwicklung.[17]

Natürliche Erholung von Waldbrandflächen in Treuenbrietzen, Brandenburg. Bereits nach zwei Vegetationsperioden stellt sich eine große Zahl von jungen Bäumen von bis zu einem halben Dutzend Arten ein. Die Laubpionierbäume senken das erneute Feuerrisiko; das Belassen von verbrannten bzw. abgestorbenen Kiefern trug führte zur Senkung der Höchsttemperaturen auf den Flächen und begünstigt die nachwachsenden Bäume (Foto: P. Ibisch).

48. [18] Statt in einem Strategieprozess präskriptiv erwartete Ergebnisse genau festzulegen, ist eine neue Offenheit dafür erforderlich, was die Wälder werden leisten können. Adaptives Management bedeutet eine regelmäßige Überprüfung aller Strategien und Taktiken, ohne dass deshalb das Handeln einer Beliebigkeit anheimfallen darf. Jenseits der Holzproduktion müssen auch die ökologischen Prozesse und Leistungen wie etwa Kühlung und Wasserrückhaltung sowie die Resistenz und Resilienz von Wäldern quantifiziert werden. Auf Grundlage eines wirkungsorientierten Monitoring- und Evaluierungssystems (M&E) darf und muss experimentiert werden, aber Fehler müssen erkannt, analysiert und beseitigt werden.

[17] Erste Ergebnisse aus Projekten CleverForst bzw. Pyrophob; Absatz leicht verändert aus Ibisch, P.L. & J.S. Blumröder (2020): Waldentwicklung und Ökosystemleistungen im Klimawandel: aktuelle waldökologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Brandenburg. Empfehlungen für einen strategischen und ökosystembasierten Umgang mit der Waldkrise. Vorgelegt anlässlich der Brandenburger Waldkonferenz 2020, Götz/ Groß Kreutz, 26. Oktober 2020 (https://www.researchgate.net/publication/344891893_Waldentwicklung_und_Okosystemleistungen_im_Klimawandel_aktuelle_waldokologische_Ergebnisse_und_Schlussfolgerungen_aus_Brandenburg_Empfehlungen_fur_einen_strategischen_und_okosystembasierten_Umgang_mit)

[18] Abschnitte 47.-48. Aus Ibisch, P.L. & J.S. Blumröder (2020): Waldentwicklung und Ökosystemleistungen im Klimawandel: aktuelle waldökologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Brandenburg. Empfehlungen für einen strategischen und ökosystembasierten Umgang mit der Waldkrise. Vorgelegt anlässlich der Brandenburger Waldkonferenz 2020, Götz/ Groß Kreutz, 26. Oktober 2020.

Maßnahmen müssen kleinräumiger ausprobiert werden; aber ohne eine angemessene Dokumentation kann aus Experimenten nicht gelernt werden.

49. Von Inventurdaten und von Beobachtungsflächen muss noch mehr profitiert werden als bislang. Auch die Waldzustandsberichte müssen zusätzliche Parameter berücksichtigen, um etwa die Vitalität von Bäumen nicht nur mit der Baumart in Verbindung zu bringen, sondern auch mit der Größe von Beständen, mit Randeffekten und v.a. auch mit der waldbaulichen Behandlung. Die Berichterstattung muss im öffentlichen Interesse explizit machen, wie sich Waldschäden etwa auf Flächen unterschiedlicher Besitzarten darstellen.

Ökonomie der Waldbewirtschaftung: Förderinstrumente zur Unterstützung der Entwicklung resilienter Wälder und Möglichkeiten für die Entwicklung von Einkommensmöglichkeiten für Waldbesitzer*innen

50. [19]Die Entwicklung und Nutzung von Wäldern in Zeiten des beschleunigten Klimawandels ist sehr viel mehr als *Forst-Wirtschaft* im Sinne einer Fokussierung auf betriebswirtschaftliche Ziele. Es geht um das behutsame Fördern des Naturpotenzials, damit Wald erhalten bleibt und möglichst viele Menschen von möglichst denjenigen Ökosystemleistungen profitieren können, die besonders benötigt werden – und zwar auch solchen, die (aktuell) nicht monetär bewertet werden können, ohne Zweifel aber von Schlüsselbedeutung sind.
51. Die gesamtökonomische Bilanzierung der Waldbewirtschaftung ist auf ein gänzlich neues Fundament zu stellen. Vor allem muss die Verquickung betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Aspekte offengelegt werden. Versteckte oder mutmaßliche Kosten sowie Subventionen sind genauso zu identifizieren und darzustellen wie alle Quellen von Schad- und Wertschöpfung – einschließlich aller Ökosystemleistungen, die von Wäldern bereitgestellt werden.
52. Benötigt wird eine ganzheitliche Gemeinwohlbilanzierung des Waldes. Damit einher geht eine angemessene Kommunikation mit den Bürger*innen über die Waldökosysteme und die Schaffung von effektiven Möglichkeiten der Bürger*innenbeteiligung.
53. Eine Art Flächenprämie für die pauschale Förderung von Waldflächen unabhängig von ihrer Beschaffenheit ist kontraproduktiv. Es darf durch Förderung v.a. keine perversen Anreize zur Ökosystemdegradation wie etwa Kahlschläge und Totholzräumung geben (vgl. Auch Anhang 1).
54. Die aktuelle Regelung der Bundesregierung, dass die Bewilligung der Bundeswaldprämie[20] von Fördergeldern an die Zertifizierung mit ausgewählten Standards (z.B. FSC, PEFC) geknüpft wird, verzerrt den Wettbewerb und entbehrt einer fachlichen Grundlage, da diese Siegel keine angemessenen Behandlungsrichtlinien für Kalamitätsflächen umfassen. Auf zertifizierten Flächen kommt es im Rahmen der Räumung von Kalamitätsflächen aktuell in Deutschland zu (Groß-)Kahlschlägen. Das erscheint nicht hinnehmbar.
55. Es ist dringend erforderlich, die Quantifizierung und Belohnung von Ökosystemleistungen zu betreiben, die v.a. Bodenschutz und –entwicklung sowie thermohydrologische Leistungen betreffen. Eine einseitige Konzentration auf Kohlenstoffspeicherung im Holz kann zu einer

[19] Abschnitte 49.-52; 54. Verändert aus Ibisch, P.L. & J.S. Blumröder (2020): Waldentwicklung und Ökosystemleistungen im Klimawandel: aktuelle waldökologische Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Brandenburg. Empfehlungen für einen strategischen und ökosystembasierten Umgang mit der Waldkrise. Vorgelegt anlässlich der Brandenburger Waldkonferenz 2020, Götz/ Groß Kreutz, 26. Oktober 2020.

[20] https://www.bundeswaldpraemie.de/fileadmin/waldpraemie/dateien/BMEL_Nachhaltigkeitspraemie_Wald_web.pdf

erheblich verzerrten Betrachtung des Waldes und seiner landschaftsökologischen Bedeutung führen.

56. Aktivitäten zur Waldmehrung sowie die biodiversitätsfreundliche Entwicklung von Kalamitätsflächen mit Retention von Totholz tragen kurzfristig zur Vermeidung von CO_2-Emissionen und zur Bewahrung bzw. Entwicklung weiterer regulierender Ökosystemleistungen bei. Es gibt bereits privatwirtschaftliche Initiativen, die sich zum Ziel gesetzt haben, Besitzer*innen entsprechender Flächen den Zugang zu den entsprechenden Märkten zu ermöglichen und transparente Zertifikate auszustellen.

Kühlungswirkung von Wäldern fördern: Hitzesteuer und Kühlungsprämie

57. Angesichts der rasch fortschreitenden, vom globalen Klimawandel getriebenen Erwärmung der Landschaft und der damit einhergehenden katastrophalen Folgen für den Landschaftswasserhaushalt, den Zustand von Ökosystemen, die landwirtschaftliche Produktion und die wachsenden Gefahren für die Gesundheit der Bevölkerung bedarf es dringend der Förderung von Strukturen, die Kühlung und Pufferung vermitteln. Gleichzeitig müssen landschaftserhitzende und verdunstungsfördernde Strukturen bzw. Praktiken möglichst reduziert oder so verändert werden, dass der erhitzende Effekt geringer ausfällt.
58. Grundsätzlich ist die Reduktion der Erhitzung mit zusätzlichen sozialen und ökologischen Vorteilen verbunden – so begünstigen etwa Entsiegelung von Flächen, Begrünung von Siedlungsflächen, Dachbegrünung, Pflanzung von Hecken und Gehölzen u.a. auch die Versickerung bzw. Rückhaltung von Niederschlägen, die Erhaltung von Frischluftentstehungsgebieten sowie die Entstehung und Stabilisierung von Kohlenstoffsenken. In der Regel kommt es – im Falle der Kühlung durch naturnahe Wälder – auch zu einer Förderung der ökosystemtypischen biologischen Vielfalt.
59. Vitaler und produktiver Wald trägt effektiv zur eigenen mikroklimatischen Regulation und der Kühlung der Landschaft bei. Nicht nachhaltige Nutzung von Waldflächen etwa durch Kahlschläge führt wiederum zur Flächenerwärmung.
60. Satellitentechnologie erlaubt eine räumlich und zeitlich gut aufgelöste, kostengünstige Quantifizierung der Erwärmungs- oder Kühlungswirkung konkreter Flächen (z.B. Abweichung der Landsat-Oberflächentemperaturen an den heißesten Tagen vom Durchschnitt einer zu betrachtenden Region; vgl. Abb. 5-6).
61. Eine ‚Hitzesteuer' für Flächen, die überdurchschnittlich stark zur Erwärmung der Landschaft beitragen, könnte einen Anreiz für Maßnahmen bieten, die den Temperatureffekt eindämmen, sowie Einnahmen für die Förderung von Kühlung generieren. Zu besteuernde Flächen beträfen etwa großflächige Gebäude/Dächer, versiegelte Verkehrsflächen oder Tagebaue. Die Steuer ließe sich in Kombination mit objektbezogenen Steuern erheben (Grundsteuer, KFZ-Steuer).
62. Landnutzung könnte von einer entsprechenden Besteuerung ausgenommen werden, aber als Empfänger der Förderung kühlender Maßnahmen in Frage kommen. Vitale Waldökosysteme könnten so Einkommen generieren, und auf Kalamitätsflächen ergäben sich Anreize dafür, auf radikale Flächenbehandlungen zu verzichten.
63. Die Förderung kühlender Wälder könnte mit bestimmten ökologischen Kriterien der Naturnähe verbunden werden, welche ökologische Zusatzeffekte sicherstellen würden (z.B.

Totholzmengen, durchschnittliches Baumalter, Schichtung, Baumarten, Rückegassenabstand). Zusätzliche Satellitendaten etwa zur Biomasse oder zur Vegetationsvitalität (NDVI) und der Kronendachstruktur könnten als Proxy-Indikatoren hinzugezogen werden und damit ggf. mit großem Aufwand verbundenen Erhebungen im Wald überflüssig machen.

Anhang 1

Extrakt aus einer für ClientEarth erarbeiteten Fachdokumentation:

Ökologisch-fachliche Beurteilung des 13-Punkte Plans des BMEL „Deutschlands Wald im Klimawandel – Eckpunkte und Maßnahmen“ vom 25.09.2019

Pierre L. Ibisch, Jeanette S. Blumröder, Léa Muller, Stefan Kreft

Centre for Econics and Ecosystem Management an der
Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde

Eberswalde/Berlin 06.04.2020

(…)

Hintergrund

> *“Nach 2018 hat sich die Situation durch das trocken-heiße Jahr 2019 noch einmal deutlich verschärft. Mindestens 180.000 Hektar Wald sind abgestorben und mehr als 100 Mio. Kubikmeter Schadholz angefallen. Nimmt man die erwarteten Schäden für das laufende Jahr 2020 hinzu, geht das BMEL von 160 Mio. Kubikmetern Schadholz (Erntefestmeter ohne Rinde) und einer Fläche von 245.000 Hektar aus, die wiederbewaldet werden müssen. Diese Zahlen sind in ihrer Dimension nur schwer fassbar. Da helfen Vergleiche: Die Schadensfläche von 245.000 Hektar entspricht fast der Gesamtfläche des Saarlandes. Würde man von den 160 Mio. Kubikmetern Schadholz einen soliden Steg von 1 m Breite und 40 cm Dicke bauen, so würde er von der Erde bis zum Mond reichen.”*
>
> (Thünen-Institut 2020)

Die Bundesregierung reagierte mit einem nationalen Waldgipfel und dem Vorschlag eines Maßnahmenprogramms auf die sich seit 2019 verschärft entfaltende Waldkrise:

> “*Die Forstwirtschaft in Deutschland trägt maßgeblich dafür Sorge, dass die Wälder nachhaltig und multifunktional bewirtschaftet, gepflegt und an den Klimawandel angepasst werden. Ein naturnaher Waldbau ist vielerorts bereits seit langem die gängige Praxis. Mit Blick auf das aktuelle, dramatische Ausmaß der Waldschäden und die sich abzeichnenden langfristigen Folgen des Klimawandels gilt es, diese*

Bemühungen deutlich zu verstärken. Der Bund wird einen maßgeblichen Beitrag dazu leisten, die akuten Schäden zu bewältigen, geschädigte Wälder schnellstmöglich wieder zu bewalden sowie die Wälder in Deutschland in ihrer Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel insgesamt zu stärken. Darüber hinaus ist es das Ziel, den Klimaschutz durch Wald, nachhaltige Waldbewirtschaftung und eine effiziente Holzverwendung weiter auszubauen".

(Eckpunktepapier, BMEL 2019)

Auf Vorschlag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) hat der Planungsausschuss der GAK (Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur & Küstenschutz) (PLANAK) bereits am 27. November 2018 einen neuen GAK Fördertatbestand *„Förderung von Maßnahmen zur Bewältigung der durch Extremwetterereignisse verursachten Folgen im Wald“* beschlossen (BMEL 2020). Bereits in diesem Rahmen werden die folgenden Maßnahmen gefördert:

1. „Maßnahmen zur bestandes- und bodenschonenden Räumung von Kalamitätsflächen, einschließlich der Entnahme von Kalamitätshölzern zur Beseitigung von resultierenden Gefahren.

2. Waldschutzmaßnahmen (Überwachung, Vorbeugung und Bekämpfung von Schadorganismen mit Lockstoffen und anderen Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes; Bekämpfung von Schadorganismen durch Auffinden und Aufarbeitung von befallenem oder unmittelbar befalls-gefährdetem Holz (z.B. Sanitärhiebe, Entrinden, Rinde entsorgen, Rücken und Transport von Holz) oder sonstige Maßnahmen, die die Bruttauglichkeit von Holz, Restholz, Reisig soweit herabsetzen, dass Gefährdungen von diesem Material nicht mehr ausgehen oder gar nicht erst entstehen; die Anlage von Holzlagerplätzen (Naß-und Trockenlager) zur Lagerung der Kalamitätshölzer; Wiederherstellung von infolge von Starkregenereignissen beschädigten Waldwegen und der dazugehörigen notwendigen Anlagen (z.B. Durchlässe, Ausweichstellen); Maßnahmen zur Prävention und Bekämpfung von Waldbränden.

3. Vor-, Nach-und Unterbau sowie Nachbesserung in lückigen oder verlichteten Beständen, die durch Extremwetterereignisse und deren Folgen entstanden sind, durch Saat oder Pflanzung sowie Naturverjüngung einschließlich Kulturvorbereitung. Hierzu gehören auch der Schutz und die Sicherung der Kultur während der ersten fünf Jahre.“

Entsprechende Maßnahmen mit einem Schwerpunkt auf Sanitär- und Räumungshiebe sowie Wiederaufforstungs- und Pflanzungsmaßnahmen werden derzeitig in allen Regionen Deutschlands von den diversen öffentlichen und privaten Waldbesitzern durchgeführt.

Bewertung des BMEL-Maßnahmenkatalogs

Die im Rahmen des nationalen Waldgipfels im September 2019 vom Bundeslandwirtschaftsministerium entworfenen und hernach entsprechend verfolgten Maßnahmen lassen sich in zwei unterschiedliche Kategorien einteilen: Zum einen jene, die direkt im Wald wirksam werden und Aktivitäten auf konkreten Flächen stimulieren bzw. unterstützen und zum anderen jene, die eher institutioneller Art sind und etwa die Unterstützung von Personal, Monitoring oder Forschung zum Ziel haben.

Bezüglich der Eingriffe und Maßnahmen auf Waldflächen ist festzustellen, dass sie allein angesichts der außergewöhnlichen Umstände des massiven Absterbens von Bäumen und der entsprechend sehr großen betroffenen Gesamtfläche sich weit jenseits von Praktiken bewegen, die bislang unter 'ordnungsgemäßer Forstwirtschaft' verstanden werden konnten. Es handelt sich um eine nationale Ausnahmesituation, die in besonderem Maße aber nicht ausschließlich die in der Vergangenheit angelegten Monokulturen betrifft. Das Absterben von Bäumen ist teilweise direkt hitze- und dürrebedingt, die starke Schädigung von Nadelbäumen (aber auch einzelner Laubbaumarten) ist allerdings in großem Umfang Resultat einer komplexen Krise, an der Witterungsbedingungen, physiologische Reaktionen, Schadinsekten wie v.a. Borkenkäfer sowie auch Pilzkrankheiten beteiligt sind.

Bislang sind über 2 % der ca. 11,4 Mio. Hektar Waldfläche in Deutschland von den massiven Absterbephänomenen betroffen. Darüber hinaus ist gemäß der Waldzustandsberichte der verschiedenen Bundesländer ein hoher Anteil aller Bäume geschädigt (z.B. 2019: in Brandenburg nur 14 % und in Bayern ca. 25 % der Bäume augenscheinlich gesund).[21] Da Bäume und Wälder durchaus resistente und vergleichsweise träge Systeme darstellen, die mit Verzögerung auf Stresssituationen reagieren - dafür aber auch mehrere Jahre nach Extremsituationen wie etwa einer Dürre eine dauerhafte Schwächung aufweisen - besteht das realistische Risiko, dass sich die Schadenssymptomatik erheblich ausbreitet und immer größere Teile der Waldfläche betrifft.

Die konkreten Maßnahmen der Forstwirtschaft, die derzeitig in den meisten Bundesländern bereits umgesetzt werden, sind in erheblichem Maße reaktiv und zielen darauf ab, die aktuellen ökonomischen Schäden zu begrenzen, das anfallende "Schadholz" zu beseitigen und Flächen wiederzubewalden (vgl. Maßnahmen 1 und 3 des Bundesprogramms). Sie gehen einher mit folgenden Aktivitäten, deren Wirkung und Wirksamkeit zu prüfen sind:

1. Vorbereitung der Flächen und Schaffung des Zugangs durch Anlage bzw. Verstärkung von Waldwegen und/oder Rückegassen;

2. Befahrung mit schweren Erntemaschinen (z.T. auch abseits der Rückegassen) und Fällung von geschädigten, geschwächten und/oder toten Bäumen;

3. Räumung des Holzes und entsprechende Anlage von z.T. ausgedehnten Kahlflächen mit freigelegtem Boden sowie Holzabtransport auf Rückegassen und Waldwegen;

[21] Waldzustandsberichte 2019 Brandenburg und Bayern: http://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/wald/waldschutz/dateien/waldzustandserhebung_2019_web.pdf sowie https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Waldzustandsbericht_2019_Land_Brandenburg.pdf

4. Ggf. Bodenbearbeitung im Vorfeld von Pflanzungen (z.T. Bodenverwundungen, Pflügen, erneute Befahrung, z.T. vollflächig);

5. Pflanzung von Bäumen, zumindest z.T. mit exotischen, ökosystemfremden Arten.

Bemerkenswert ist, dass die genannten Aktivitäten gefördert und auch bereits umgesetzt werden, ohne jegliche Verträglichkeitsprüfungen und Risikoabschätzungen vorzuschalten. Allein im Zuge der Räumung des sogenannten Schadholzes werden erhebliche Schädigungen von Böden und Wasserhaushalt, Mikro- und Lokalklima sowie Biodiversität einschließlich von Waldartenvielfalt, ökologischen Interaktionen und Prozessen und der Funktionstüchtigkeit von Ökosystemkomplexen in Kauf genommen. In ihrer Kombination bergen sie das Potenzial, die Situation für die verbleibenden Waldbestände, die nachwachsenden Bestände sowie insgesamt auch ausgedehnte Landschaftsökosysteme in Deutschland zu verschlechtern. Dies legen unzählige wissenschaftliche Studien nahe, die sich mit Kahlschlägen und der Degradation von Waldböden beschäftigen. Deutschland gehört zu den wenigen Ländern, die eigentlich explizit von Kahlschlägen abgerückt sind (vgl. BNatschG §5(3)); nunmehr werden sie im Rahmen von Sanitär- und Räumungshieben regelmäßig und großflächig durchgeführt.

Die Wechselwirkungen der Beeinträchtigung von Biodiversität, Böden, Wasserhaushalt und Mikroklima mit drohenden klimawandelbedingten Witterungsextremen werden nicht beachtet. In Bezug auf etliche Folgeschäden besteht der Verdacht, dass diese in ausgeprägtem Maße irreversibel sein könnten. Entsprechende Befunde und Risiko-Szenarien ergeben sich aus der existierenden wissenschaftlichen Literatur, die bei Planung, Förderung und Durchführung der Maßnahmen keine (angemessene) Beachtung findet. Weiter unten wird ein Einblick in entsprechende wissenschaftliche Literatur gegeben, die diesen Sachverhalt darstellen.

Ebenso erfolgen Borkenkäferbekämpfung und Pflanzungen zur Wiederbewaldung ohne eine angemessene Abwägung auf Grundlage von dokumentierten Erfahrungen und wissenschaftlicher Literatur. Hieraus resultiert auch ein erhebliches ökonomisches Risiko in Bezug auf die eingesetzten Ressourcen sowie zukünftige Folgeschäden. Zudem wird die langfristige Beeinträchtigung bzw. Verringerung von Ökosystemleistungen in Kauf genommen, welche nicht mit der Holzproduktion in Verbindung stehen. Hier sind v.a. regulierende Leistungen zu nennen, die mit Wasser- und Kohlenstoffhaushalt in Verbindung stehen, aber auch mit der lokalen und regionalen Klimaregulation. Insbesondere geht es auch um Leistungen, die mit der Anpassung an den Klimawandel in Verbindung stehen und auf kühlenden und puffernden Ökosystemfunktionen beruhen.

Die aktuellen Maßnahmen zum Umgang mit der Waldkrise sind auch aus ökonomischer Perspektive problematisch, da sie das Naturraumpotenzial und die Erbringung wichtiger Ökosystemleistungen nachhaltig reduzieren, ohne dass dabei ein ökonomischer Nutzen der Holzräumung und die entsprechende Flutung des Holzmarktes mit Schadholz nachgewiesen wäre. Es steht zu befürchten, dass Waldbesitzer diverse Kosten externalisieren und die Gesellschaft in erheblichem Maße für ökologisch schädliche und ökonomisch fragwürdige Maßnahmen finanziell aufzukommen hat.

Wissenschaftliche Befunde zur Bewertung von Praktiken, die direkte Wirkungen auf Waldflächen entfalten (mit direktem Bezug zu Maßnahme 1 – 3 und Maßnahme 5)

Die hier im folgenden dargestellten Sachverhalte und Literaturangeben nehmen direkten Bezug auf die vom BMEL erstellten Maßnahmen 1-3 und Maßnahme 5, die v.a. einen flächigen (Schad-)Holzeinschlag, die Schadholzbeseitigung durch Befahrung und den Holzabtransport sowie einem damit verbundenen Ausbau des Wegenetz sowie der Wiederbewaldung vorsehen.

- Maßnahme 1: Aktuelle Schäden begrenzen, Schadholz beseitigen und Verkehrssicherungspflicht beachten.
- Maßnahme 2: Holztransport und –lagerung regional abstimmen und ausbauen.
- Maßnahme 3: Geschädigte Flächen wiederbewalden und die Wälder insgesamt stärker an den Klimawandel anpassen.
- Maßnahme 5: Wegenetze, allg. Infrastruktur zum Schutz der Wälder sowie Löschteiche instandhalten.

Waldböden und Befahrung

Der Waldboden ist die Grundlage für die Entwicklung eines funktionstüchtigen Waldökosystems. Er ist das Wuchssubstrat, stellt die Nährstoffe für Bäume und andere Pflanzen bereit, beeinflusst in besonderem Maße die Wasserversorgung der Bäume v.a. in niederschlagsarmen Perioden und ist eine entsprechend kritische Ressource. Die für die Ökosystemfunktionalität bedeutsamen Eigenschaften von Waldböden sind z.B. über lange Zeit im Zuge der Ökosystementwicklung gereift - hierzu gehören etwa Porengröße und Durchlüftung, die Besiedelung mit Organismen, chemische Parameter und der Anteil organischen Materials.

Waldvegetation und Boden haben sich als gekoppelte Ökosystemkomponenten über einen langen Zeitraum durch natürliche Sukzession an einem Ort entwickelt. Waldböden sind entsprechend einzigartig und umfassen in der Regel poröse, aggregierte, gut differenzierte Böden mit viel organischer Substanz, die oft eine Auflage auf dem Oberboden bildet (Osman 2012). Kennzeichnend für Waldböden ist eine hohe biotische Aktivität, die wesentlich ein effizientes Nährstoffrecycling bedingt. Auf relativ armen Ausgangsböden können sich deshalb im Laufe der Zeit dennoch relativ biomassereiche Wälder entwickeln (Osman 2012). Die Bodenorganismen interagieren zudem in komplexen Wirkungsgefügen und befördern die Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems. Wälder sind zudem gerade auch wegen der Eigenschaften ihres Bodens effiziente Wasser- und auch Kohlenstoffspeicher.

Wenn die Waldwege berücksichtigt werden, gehören Wälder in einigen Regionen Deutschlands zu den Landschaftsökosystemen, die am stärksten von der Zerschneidung

durch Wege und Straßen betroffen sind (Freudenberger et al., 2013). Selbst wenn die eigentliche Befahrung selten sein mag, wirken Wege und Straßen in Wäldern z.B. als Einfallspforten für invasive Arten und durch die Ausbildung von Waldbinnenrändern mit Folgen für Mikroklima und Sturmempfindlichkeit ungünstig auf die Ökosystemfunktionalität.[22]

Wasserhaushalt und Mikroklima

Eine besondere Beachtung verdient die Disziplin der Ökohydrologie (Li et al., 2017). Wälder sind herausragende Regulatoren der Wasser-, Energie- und Kohlenstoffkreisläufe und bekommen diesbezüglich noch nicht hinreichend Aufmerksamkeit im Rahmen von Klimawandelanpassungsstrategien (Ellison et al., 2017); auch in Deutschland ist der entsprechende Diskurs völlig unterentwickelt. Bäume bzw. Wälder haben eine 'transformative' Kraft und beeinflussen in erheblicher Weise die Wasserverfügbarkeit an Standorten (Sheil et al., 2019). Exotische Baumarten und Nadelholzmonokulturen können allerdings in dieser Hinsicht auch eine negative Rolle spielen. Besonders kritisch sind Maßnahmen zu sehen, die Vegetation und Strukturen beeinträchtigen, welche für den Wasserhaushalt bedeutsam sind.

Eine größere internationale Übersichtsstudie kam jüngst zum Ergebnis, dass ein Paradigmenwechsel dringend ansteht: Die Betrachtung der Wäldern muss sich von rein kohlenstoff-zentrierten Modellen abwenden und stärker den hydrologischen und klimakühlenden Wirkungen von Wäldern widmen. Aus Gründen der Nachhaltigkeit müsse die Leistung der Kohlenstoffspeicherung eher als zwar überaus wertvolles, aber sekundäres Nebenprodukt der Bemühungen um Walderhaltung und Aufforstung angesehen werden. Die Autoren riefen auf, die regionalen (und kontinentalen) Waldwirkungen auf Wasser und Klima ins Land(nutzungs)management zu integrieren (Ellison et al., 2017).

Die Auswirkungen des globalen Klimawandels betreffen u.a. die Veränderungen von Niederschlags- und Temperaturregimen (u.a. größere Schwankungen und Extreme, zunehmende saisonale Schwankungen, Zunahme von Hitze- und Dürreperioden). Dabei kommt es nicht nur zur Wechselwirkung der klimatischen Trends und Witterungsphänomene (z.B. Hitze und Trockenheit), sondern auch zur Verstärkung der Klimawandelvulnerabilität durch lokale Klimaveränderungen, die wesentlich durch die Landnutzung beeinflusst werden. So kommt es zu einer verstärkten Erwärmung von vegetationsarmen Freiflächen, von denen Beeinträchtigungen für benachbarte Waldgebiete ausgehen können. Höhere Temperaturen wiederum steigern Hitzestress und Wasserverluste durch Verdunstung und vertikale Advektion (Aufsteigen warmer und feuchter Luft über sich stark erwärmenden Flächen, wobei Wasser der Landschaft entzogen werden kann) (Ibisch et al., 2019, Blumröder et al., 2019, Ibisch et al., 2018, Ibisch & Blumröder 2018).

---

[22] Teile der folgenden acht Absätze aus [IBISCH, P.L. (2019): Umgang mit der aktuellen extremwetterbedingten Waldkrise (Deutscher Bundestag Ausschussdrucksache 19(10)280-A) für die 41. Sitzung des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft (DOI 10.13140/RG.2.2.21368.60163)] exzerpiert.

Grundsätzlich besteht das Risiko, dass für einzelne Organismenarten - inkl. Baumarten - kritische Schwellenwerte überschritten werden, die sehr kurzfristig zu schweren physiologischen Schäden und zum Ausfall führen können. Entsprechende Schwellenwerte, die auch in Bezug auf die Kombination verschiedener Extremsituation existieren können, sind meist ebenso unbekannt wie die konkreten organismischen Reaktionen. Große Unsicherheit besteht auch beim Auftreten von neuartigen Phänomenen oder Rekordwerten (z.B. Temperaturmaxima, Niederschlagsminima in der Vegetationsperiode, Länge von Dürreperioden). Dies bedeutet, dass bezüglich der Empfindlichkeit von Arten und der Wirkungen bestimmter forstlicher Maßnahmen (wie etwa starkes Auflichten und Freistellen von Bäumen) nur sehr eingeschränkt von Erfahrungen aus der Vergangenheit über Wirkungen in Gegenwart und Zukunft geschlossen werden kann.

Die Räumung von sogenanntem Schadholz auf von Kalamitäten betroffenen Flächen richtet erhebliche Folgeschäden an; diese erfolgen durch die Befahrung und Beeinträchtigung der Böden, aber wesentlich auch durch die auf Kahlschlägen auftretenden mikroklimatischen Extreme. Das Waldökosystem wird seiner Substanz und vieler Nährstoffe beraubt. Die Wasserspeicherungs- und Pufferungsvermögen gehen genauso verloren wie das Habitat von Tausenden von Arten, die für die biotische Regulation von Bedeutung sind. Die ungünstigen Wirkungen der Holzberäumung auf die Waldökosystemgesundheit zeigen auch eindeutig Befunde der internationalen Forschung zum Beräumen von Kalamitätsholz und zu den sogenannten Sanitärhieben, von denen dringend abgeraten wird (Thorn et al., 2019).

Klimawandel in Wäldern wirkt nicht nur auf die auffälligsten Organismen, die Bäume, sondern betrifft alle Ebenen des Ökosystems (vgl. Geyer et al., 2011). Nur unzureichend bekannt sind die komplexen Wechselwirkungen zwischen Böden, Wald und (Mikro-)Klima. In besonderem Maße gilt dies für die Räumung von geschädigten Waldflächen. Es wird deutlich, dass komplexe Interaktionen zu einer nichtlinearen Verstärkung von physiologischem und ökologischem Stress führen können; dadurch droht auch der Verlust von wichtigen Ökosystemleistungen (vgl. Leverkus et al., 2018a, b). Sollten regional große Flächen betroffen sein, können die Folgen über mikroklimatische Veränderungen hinausgehen. Positive Rückkopplungen können zu einer immer stärkeren Erwärmung und Austrocknung von größeren Flächen führen, welche die verbleibende Waldvegetation schädigt sowie die Wiederbewaldung hemmt. Derartige komplexe Risiko-Szenarien werden im Rahmen des BMEL-Programms und der aktuellen Umsetzung durch Bundesländer und Waldbesitzer nicht bedacht.

Pflanzung und Baumartenwahl

Exotische Baumarten von anderen Kontinenten gelten als eine einfache Lösung für die Herausforderung des Klimawandels, obwohl bereits bekannt ist, dass auch eingeführte Arten wie Douglasie, die Japanische Lärche und ähnliche Arten ebenso unter extremer Dürre, Hitze und Krankheiten leiden (z.B. Sergent et al., 2012, Schenck et al., 2018, Vejpustková & Čihák 2019). Auch in Deutschland gibt es erste Nachrichten zu Problemen von vermeintlichen Zukunftsbäumen wie der nordamerikanischen Douglasie.

> *Ein bemerkenswertes Beispiel ist der Stadtwald von Rheinbach südlich von Bonn. Nach Sturmwurf wurden Flächen noch mit Douglasien aufgeforstet ("Douglasien*

sollten es sein, so [der lokale Forstexperte] Frank Bungart, „weil die sturmfest sind, nicht so anfällig für Käfer und sich auch noch stark verjüngen"; Generalanzeiger 2017). Im Jahr 2018 wurde über starke Schäden in Douglasienbeständen geklagt: " Der Rheinbacher Stadtförster Sebastian Tölle sieht Teile des Waldes in einem katastrophalen Zustand. Neben der Trockenheit setzen vor allem aus dem Ausland eingeschleppte Schädlinge wie Pilze und Insekten den Bäumen zu. (...) 'Die [Douglasie] macht uns im Moment die meisten Sorgen.' Zumal man in Rheinbach gehofft hatte, diesen Baum anstatt der sturmanfälligen Fichte als Wirtschaftsbaum zu etablieren. 'Von dem Ziel können wir uns verabschieden', glaubt [Stadtförster] Tölle. Schuld ist ein Schädling in Gestalt der Douglasiengallmücke, die eigentlich in Nordamerika zu Hause ist. Die Larven der Mücken verursachen eine Gallenbildung an den Knospen und den Nadeln der Douglasie, was dazu führt, dass der Baum für Pilzbefall anfällig wird und die Nadeln abwirft: 'Ein Nadelbaum ohne Nadeln ist tot', unterstreicht er. Seit 2017 seien die gefräßigen Mücken auch hierzulande bekannt, 'aber in diesem Frühjahr sind massive Schäden aufgetreten', führt Tölle aus: 'Praktisch alle Bäume sind betroffen.' (Generalanzeiger 2018). 2019 schritten die Probleme weiter voran: "Weiterhin schlecht gehe es der Douglasie. Hier seien wirtschaftlich für die Zukunft die größten Einschnitte zu befürchten. Auch 2019 sei der bereits aus dem Vorjahr zu erkennende Nadelabwurf weiter fortgeschritten. „Die ersten beiden älteren Douglasienbestände mussten fast komplett gefällt werden. Auslöser für diese Schädigung scheint weiterhin primär die Douglasiengallmücke zu sein, die aus Nordamerika eingeschleppt wurde", erklärte Tölle." (Blick aktuell 2020).

Ausgewählte wissenschaftliche Befunde (unter Berücksichtigung von Studien auch zu Wäldern anderer Biome/ Ökoregionen, wenn zu erwarten ist, dass die gleichen Probleme, Prinzipien oder Wirkmechanismen in Deutschland gelten)

Schädigungen der Standorte (abiotisch)

1) Die **Holzernte** ist eine **bodenstörende** Tätigkeit, die Böden freilegt und zu Sedimentation in Gewässern führen kann (Ballard 2000; Najafi et al., 2009; Lotfalian & Bahmani 2011; Alexander 2012).

2) **Kahlschläge** sind mit schwerwiegenden Umweltauswirkungen verbunden (Ziegler et al., 2006). Meist werden schwere Maschinen eingesetzt, was zu einer **Verdichtung** des Bodens und einer Verringerung der **Makroporosität** und der Infiltrationskapazität führt (Malmer und Grip, 1990).

3) Holzerntearbeiten führen zur **Verdichtung** von Waldböden (Naghdi et al., 2007; Naghdi et al., 2009).

4) Bodenverdichtung wirkt sich langfristig negativ auf die **Bodeneigenschaften** und die **Wachstumsraten** der Bäume aus, wobei besonders die **erste Befahrung** und das maschinelle Rücken von Stämmen den Unterboden stören (Rab 2004).

5) Entscheidend sind die Art der eingesetzten **Maschinen**, die **Häufigkeit** der Befahrung und die angewandten Waldschutzmaßnahmen (Sowa & Kulak 2008; Demir et al., 2010; Servadio 2010).

6) Die **ersten beiden Befahrungen** von Waldböden mit schweren Maschinen führen zu einer maximalen Zunahme der Bodenverdichtung und einer maximalen Abnahme der Infiltrationsrate (Silva et al., 2008).

7) Die **erste Befahrung hat den größten negativen Einfluss** auf den Boden, v. a. auf die oberste Bodenschicht (Tan et al., 2008; Cambi et al., 2015; Abdi et al., 2017).

8) Maschinell durchgeführte Kahlschläge führten zu einer 30-%igen Zunahme der **Bodenverdichtung** (Weert 1974).

9) Das Rücken von gefällten Kiefern führte zu einer 20-%igen Zunahme der **Bodenverdichtung** und zur Abnahme der **Bodenporosität** (Dickerson 1976).

10) Auf **sandigen** humusreichen Waldböden verursacht ein Anstieg des Kontaktdrucks um 100 kPa einer Abnahme der Bodenporosität in 10-15 cm Tiefe um 5,7 % nach 24 Befahrungen (Sakai et al., 2008).

11) Auf sandigen Böden sinkt der negative Einfluss auf die Bodenverdichtung mit geringerem **Gewicht** der Maschinen. Die Häufigkeit der Befahrung ist weniger relevant als das Gewicht, wobei die erste(n) Befahrung(en) den größten Einfluss haben, der negative Einfluss auf nicht verdichtete Böden am stärksten ist und es **sehr lange Zeit dauert**, bis die Böden sich erholen (Ampoorter et al., 2012).

12) Die prozentuale Zunahme der Bodenverdichtung auf einer Rückegasse war auf vulkanischem Boden höher als auf granitischem Boden, aber die Erholungsraten waren ähnlich. Mit Ausnahme des granitischen Oberbodens (obere 5,1 cm) ist nach **23 Jahren** keine der Fahrspuren wieder zum ursprünglichen Zustand, wie er vor der forstlichen Maßnahme war, zurückgekehrt (Froehlich et al. 1985).

13) Die Bodenverdichtung reduziert die **Gesamtporosität** des Bodens (Silva et al., 2008) und vor allem die Anzahl der Makroporen. Wasser versickert im unverdichteten Boden schneller als in einem massiv verdichteten Boden desselben Typs (Hamza und Anderson 2003).

14) Die Bodenverdichtung verursacht eine Abnahme der **Sauerstoffdiffusion** (Renault und Stengel 1994) und kann zu anoxischen Bedingungen in verdichteten Böden führen, wenn der Sauerstoffverbrauch schneller als die Diffusion ist (Schnurr-Putz et al., 2006).

15) Eine Bodenverdichtung kann aufgrund einer **verringerten Wasserinfiltrationsrate** dazu führen, dass sich das Oberflächenwasser auf Fahrspuren staut, was wiederum alle bodenkundlichen Prozesse, insbesondere die Eisengeochemie, beeinflussen kann (Munch and Ottow 1983).

16) Die durch Holzrücken verursachte Bodenverdichtung führt zur Verringerung sowohl der gesättigten **hydraulischen Leitfähigkeit** (HC) als auch der **Infiltrationsrate** (IR) des Oberflächenbodens nach den ersten drei Malen an acht Standorten, an denen das Bodenwasserpotenzial zum Zeitpunkt des Rückens höher als -15 kPa war. Zusätzliche Befahrung, bis zu 12 Mal, verursachte keine weitere signifikante Abnahme der HC oder IR. Auf intensiver befahrenen Böden blieb die Infiltration jedoch mindestens 3 Jahre lang betroffen (Startsev & McNabb 2000).

17) Bodenverdichtung beeinflusst die Konzentration von **Kohlendioxid** (Conlin & Van den Driessche 2000) und die **Mineralisierung** des organischen Kohlenstoffs und Stickstoffs im Boden (De Neve & Hofman 2000). Die Bodenverdichtung führt direkt zu einem geringeren CO_2-Ausstoß aus verdichteten Böden (Silveira et al., 2010), kann aber indirekt, durch den vermehrten Einsatz von Maschinen zum Pflügen des verdichteten Bodens, zu einem höheren Verbrauch des Brennstoffs und letztlich zu einem höheren CO_2-Ausstoß führen (Voorhees & Hendrick 1977).

18) Die **Denitrifikation** nimmt mit der Bodenverdichtung zu (Arah & Smith 1989), was zu einer erhöhten Emission von N_2O in die Atmosphäre führt (Douglas & Crawford 1993).

19) Der **Oberflächenwasserabfluss** kann verstärkt und häufiger auftreten und zu Sedimentauswaschung führen (Mohr et al., 2013; Birkinshaw et al., 2011; Carr & Loague, 2012; Croke et al., 2001; Iroumé, et al., 2005; Iroumé et al., 2006; Jones & Grant 1996; Malmer & Grip, 1990).

20) Auf Kahlschlägen und Großschirmschlägen wurde eine Reduktion des **organischen Bodenkohlenstoffs** und **Stickstoffs** um bis zu 70 % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle festgestellt (Christophel et al., 2015).

21) Anaerobe Bedingungen im Boden aufgrund der Bodenverdichtung können zu einer verminderten Zersetzung von Pestiziden und schließlich zu einer erhöhten **Auswaschung von Pestiziden** in das Grundwasser und in Grundwasserleiter führen (Alletto et al., 2010). Ebenso kann eine **verringerte hydraulische Leitfähigkeit** zu einer langsamen Abwärtsbewegung des Wassers und letztlich zu höheren Nitratgehalten im Grundwasser führen (Alletto et al., 2010).

Schädigung der biologischen Vielfalt bzw. Ökosystemfunktionalität durch Befahrung, Ernte und Kahlschläge

22) **Bodenverdichtung** beeinflusst die **biologische Vielfalt des Bodens** negativ und führt zu einer Abnahme der **mikrobiellen Biomasse**, der **enzymatischen Aktivität**, der **Bodenfauna** und der **Bodenflora** (Nawaz et al., 2013).

23) Die **mikrobielle Biomasse** des Bodens wird durch Bodenverdichtung negativ beeinflusst (Frey et al., 2009; Pupin et al., 2009) und führte zu einer verringerten Bodenbelüftung (13-36-%ige Abnahme der luftgefüllten Porosität), was zu einer Verringerung des mikrobiellen Biomasse-**Kohlenstoffs** und des mikrobiellen Biomasse-**Stickstoffs** führte (Tan & Chang 2007).

24) Jede Störung oder Belastung des Bodens kann die **enzymatischen Aktivitäten** im Boden beeinflussen (Buck et al., 2000).

25) Die Bodenverdichtung verändert die **physikalischen und chemischen Eigenschafte**n des Bodens, was zu einer Verringerung der **Phosphatase**-, **Urease**-, **Amidase**- und **Dehydrogenase**-Aktivitäten führt (Dick et al. 1988; Jordan et al., 2003; Pupin et al., 2009; Tan et al., 2008) oder zur Erhöhung der Phosphatase-Aktivität (Buck et al., 2000).

26) Verdichtete Rückegassen zeigen eine 38 % niedrigere **mikrobielle Kohlenstoffbiomasse** und eine 41-75 % geringere **Enzymaktivität** als nicht verdichteter Boden (Dick et al 1988).

27) In stark verdichteten Böden kommt es zur Abnahme der bakterien- und allesfressenden **Nematoden** bei gleichzeitiger Zunahme von pflanzenfressenden Nematoden (Bouwman & Arts 2000).

28) Es wird berichtet, dass **Regenwürmer** durch die Bodenverdichtung beeinflusst werden (Kretzschmar 1991; Radford et al., 2001) und ihre Population mit zunehmender Bodenverdichtung abnimmt (Chan & Barchia 2007).

29) In gemäßigten Wäldern bestimmen Kronenschlussgrad und Lebensraum-Heterogenität (Totholzsubstrate) die Diversität **saproxyler Käfer** und insbesondere in gemäßigten montanen Mischwäldern sollte Totholz in Form von großen Stämmen in sonnigen Lebensräumen vorhanden sein (Seibold et al., 2016).

30) Jede Störung eines Waldökosystems und/oder des Bodens wirkt sich **nachteilig auf die einheimische Bodenflora** aus (Zenner et al., 2006; Demir et al., 2008).

31) Bodenverdichtung führt zu einer Veränderung der Bodenflora hin zu **giftigen/invasiven und störungstypischen Waldarten** (Zenner & Berger 2008).

32) Durch Holzernte hervorgerufene **Temperatur- und Niederschlagsänderungen** bewirken deutliche Veränderungen des **Boden-Stickstoff-Zyklus**. Stickstoffverluste im Boden durch das Ernten ganzer Bäume könnte durch den Klimawandel verstärkt werden (McDaniel et al., 2014).

33) Bedeutung von tiefgründigen und humusreichen Böden am Beispiel von genutzten und alten Wäldern in den USA (Oregon): Der **Artenreichtum** der Mineralboden-Mesofauna korrelierte signifikant (+) mit dem prozentualen Anteil der **organischen Substanz** und der **Bodenfeuchtigkeit**, während der Reichtum der Waldboden-Mesofauna mit der **Tiefe des Waldbodens** korrelierte (+). Die Bodenfeuchtigkeit korrelierte stark mit dem Prozentsatz der organischen Bodensubstanz, wobei es keine Anzeichen für eine Austrocknung an Standorten gab, die relativ spät in der Sommertrockenheit beprobt wurden. Dies deutet darauf hin, dass die Verluste an Oberflächenfeuchtigkeit zumindest teilweise durch **hydraulischen Auftrieb** (*hydraulic lift*) ersetzt wurden (Perry et al., 2012).

34) Biomassereiche Wälder mit hohen Humus- und Totholzvorräten wirken günstig auf **Bodenfeuchtigkeit** und **Baumwachstum** und auf **Mikroorganismen**, die wiederum zum **Kohlenstoff-Haushalt** im Waldboden beitragen (Magnússon et al., 2016).

35) Obwohl Wälder in Deutschland zu den Ökosystemen mit einer vergleichsweise geringeren menschlichen Überprägung gehören, ist auch hier ein Rückgang der Biodiversität zu verzeichnen. Eine aktuelle Studie hat dargelegt, dass in ausgewählten Waldregionen Deutschlands die Artenvielfalt und Biomasse der (die Insekten einschließenden) Arthropoden um 36 % bzw. 41 % zurückgegangen sind (Seibold et al., 2019).

Mikroklima und Ökosystemfunktionalität

36) Insbesondere in heißen Sommern ist der **Temperaturunterschied** zwischen Wald und Nichtwaldflächen besonders ausgeprägt. Im Falle des Kölner Beckens um den Hambacher Forst in Nordrhein-Westfalen konnte gezeigt werden, dass der durchschnittliche Unterschied der **Oberflächentemperatur** (Sommer, mittags/ nachmittags) zwischen den heißesten und den kühlsten Punkten (letztere in einem Waldgebiet) über 20°C betrug (Blumröder et al., 2019, Ibisch et al., 2019).

37) Ausgedehnte, dichte und biomassereiche Wälder schaffen sich nicht nur ein die eigene Stabilität förderndes **Mikroklima** (Norris et al., 2011), sondern kühlen zudem ganze Landschaften in substanzieller Weise.

38) Zwischen Großstädten wie Berlin und größeren Waldgebieten kann der Unterschied der **Tagesoberflächentemperatur** im Sommer über 12°C betragen; zwischen aufgelichteten Kiefernforsten und alten, biomassereichen Buchenwäldern wurden an heißen Tagen Unterschiede der durchschnittlichen **Maximaltemperaturen** von bis ca. 8°C beobachtet (Ibisch et al., 2018, Ibisch & Blumröder 2018; intl. Publikationen in Vorbereitung).

39) Zwischen Kahlschlag und den umliegenden, nicht abgeholzten Wäldern ergibt sich aus dem starken **Temperaturunterschied** ein Druckgradient, der zu lokal abweichenden **Windrichtung** über dem Wald führt und es können systematische starke Aufwinde während des Tages auftreten, gefolgt von nächtlichen Abwinden, wobei der Wind aus dem abgeholzten Gebiet kommt. Dies deutet auf das Vorhandensein horizontaler **Advektion** hin, die tagsüber warme Luft (oder nachts kühle Luft) vom Kahlschlag in das Waldgebiet transportiert (Zhang et al., 2011).

40) Schnellere Windgeschwindigkeiten verringern die **Feuchtigkeit** der Bodenoberfläche und durch eine Erhöhung der **Bodenverdunstung** sinkt die **Bodentemperatur**; diese Effekte verringerten die **Bodenatmung**. Die hydrologischen Auswirkungen waren in der Trockenzeit am deutlichsten, während die thermischen Auswirkungen das ganze Jahr über zu beobachten waren (Tanaka & Hashimoto 2006).

41) Kahlschläge führen zu einer Erhöhung der durchschnittlichen **Jahresmitteltemperatur** im **Boden** (in 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 m Tiefe um 3.2, 3.0, 2.2, und 1.8°C; Hashimoto & Suzuki 2004).

42) Eine satellitenbildbasierte Studie im Bayrischen Wald zeigt eine Erhöhung der **Oberflächentemperatur** um 5,2 bzw. 3,5°C auf einer vom Borkenkäfer befallenen Fläche, die geräumt wurde, im Vergleich zur nicht geräumten Kontrollfläche (Hais & Kucera 2008).

43) Das **Mikroklima** (Durchschnittstemperatur, Maximaltemperatur, Temperaturschwankungen, relative Luftfeuchte) auf Kahlschlägen unterscheidet sich stark zum Primärwald (Blumröder et al., 2019).

44) Mit zunehmender Hitze erhöht sich das Risiko eines **Borkenkäferbefalls**. Sanitärer Holzeinschlag und Bergungsarbeiten verringern die Entstehung von Borkenkäferbefall. Die Räumungsarbeiten nach einem Windwurf sind im ersten Jahr dringender als spätere Sanitärhiebe (Stadelmann et al., 2013).

45) In einer Pufferzone eines Schutzgebietes wurde die durch **Borkenkäfer** verursachte Baummortalität durch frühere natürliche Störungen (Wind- und Borkenkäfer), das Sanitärmanagement und die jahreszeitliche Temperatur modelliert: In Pufferzonen blieben die Auswirkungen der Sanitärhiebe aufgrund der Wanderung der Borkenkäfer aus nicht bewirtschafteten Gebieten begrenzt (Mezei et al., 2017).

46) Sanitärhiebe (in einem realistischen Szenario werden < 95 % der befallenen Bäume entfernt) hatten **keinen signifikanten Einfluss** auf die **Borkenkäferdynamik** und den Kohlenstoff in lebenden Bäumen und reduzierten den gesamten in der Landschaft gespeicherten Kohlenstoff. Darüber hinaus wurde die Wind-Störungsanfälligkeit erhöht (Dobor et al., 2020).

47) In komplexen Systemen können synergistisch oder rückkoppelnd wirkende, also sich gegenseitig oder selbst verstärkende Prozesse zu überraschenden kumulativen Wirkungen, zur Eskalation von Änderungen oder zu ökologischen **Kettenreaktionen** führen. Die **dürrebedingte verringerte Infektionsresistenz von Organismen** (vgl. u.a. Eastburn et al., 2011), wie etwa bei Bäumen, die in Folge von Dürre weniger

Abwehrstoffe produzieren, kann z.B. mit der Ausbreitung und stärkeren Vermehrung von neuartigen Krankheiten zusammenkommen. Starke Effekte können also verzögert auftreten. Die Beurteilung von Klimawandelwirkungen in Ökosystemen wird durch diese nicht-linearen Dynamiken erschwert.

48) Das Absterben einer einzelnen von einer Krankheit betroffenen Baumart kann dazu führen, dass mehr Sonnenstrahlung auf den Waldboden trifft, diesen stärker austrocknet und verbleibende Bäume unter vermehrtem Strahlungs- und Trockenstress leiden müssen. Die Interaktion von Bodeneigenschaften, Dürreperioden und dem Zustand des **Boden-Mikrobioms** verdient eine deutlich größere Aufmerksamkeit als bisher (Sangüesa-Barreda et al., 2015, Gazol et al., 2018, Colangelo et al., 2018).

49) Trockniswirkungen auf **Pilze** im Wurzelraum wurden bereits mit Folgen für die Waldgesundheit in Verbindung gebracht (Hopkins et al., 2018).

50) Im Falle von Buchenwäldern ist festgestellt worden, dass die **Bäume in genutzten Beständen trockenheitsempfindlicher** waren als in geschlossenen ungenutzten (Mausolf et al., 2018).

51) Das **Auflichten** von Beständen und die **Entnahme von Baumbiomasse** können nicht nur zur größeren **Erwärmung** und Austrocknung führen, sondern auch die Empfindlichkeit des Waldes gegenüber **Sturmwirkungen** erhöhen. Die Windenergie, die auf einzelne Stämme wirkt, kann sich in aufgelichteten Beständen erheblich erhöhen; der Wind wirkt tiefer in das Waldesinnere, Bäume schwingen stärker, und der positive Effekt eines verwobenen Wurzelwerks entfällt; nach der Auflichtung bleiben die Bäume u. U. jahrelang sturmempfindlicher (vgl. Ruel 1995). Sturmwurf ist wiederum oftmals Startpunkt für insektenbedingte Kalamitäten.

52) Wälder können für eine gewisse Zeit durchaus **Resistenz** gegenüber Stressoren zeigen, ehe dann erst die mehrfache Überschreitung von kritischen Schwellenwerten zu Reaktionen führt (Itter et al., 2016).

53) Derartige Reaktionen unterscheiden sich von Art zu Art, aber auch je nach **Alter und Zustand von individuellen Bäumen** (Vanoni et al., 2016).

54) Langlebige Organismen wie Bäume zeichnen sich zudem durch ein '**physiologisches Gedächtnis**' aus, welches die Erholungsfähigkeit nach Dürreereignissen betrifft (Camarero et al., 2018).

55) Pflanzen können ein **immunologisches** Gedächtnis ausbilden, das als "defense priming" bezeichnet wird. Versuche mit subletalen Pilzimpfungen oder der Anwendung des Phytohormons Methyljasmonat (MeJA) auf die Resistenz von 48-jährigen Fichten (*Picea abies*) gegen den Massenbefall durch einen 35 Tage später beginnenden baumzerstörenden **Borkenkäfer** zeigen, dass Borkenkäfer unbehandelte Bäume befielen und töteten, aber **pilzgeimpfte** Bäume und MeJA-behandelte Bäume weitgehend mieden. Die Quantifizierung der defensiven **Terpene** zum Zeitpunkt des Borkenkäferbefalls zeigte, dass die Pilzimpfung eine 91-fach höhere Terpenkonzentration im Vergleich zu unbehandelten Bäumen induzierte, während die Anwendung von MeJA die Terpene nicht signifikant erhöhte (Mageroy et al., 2020).

Wirkung von Befahrung und Räumung von ‚Schad'-Holz/ Totholz auf Verjüngung und Waldentwicklung

56) Bodenverdichtung führt zu eingeschränktem **Wurzelwachstum**, verminderter Zugänglichkeit von Nährstoffen und erhöhtem Verlust der Bodennährstoffe durch Auswaschung, Abfluss und Gasverluste in die Atmosphäre, die das **Pflanzenwachstum** beeinträchtigen können. Die Durchwurzelungsfähigkeit wird durch die Bodenverdichtung aufgrund der erhöhten Bodenfestigkeit und der verringerten Anzahl von Makroporen negativ beeinflusst (Gerard et al. 1982; siehe auch Hamza & Anderson 2005; Kirby & Bengough 2002; Masle & Passioura 1987; Taylor et al. 1966; Taylor & Ratliff 1969; Voorhees et al. 1975). Bodenverdichtung führt zu einer Verringerung der Wurzellänge, der Eindringtiefe und der Wurzeltiefe (Glinski & Lipiec 1990; Kristoffersen & Riley 2005).

57) Bodenverdichtung kann bei einigen Pflanzenarten **Wurzelkrankheiten** verschlimmern (Fritz et al. 1995).

58) Das **Feinwurzelwachstum** von Zuckerahorn wurde auf Rückegassen und in deren unmittelbaren Umgebung um ein Fünffaches reduziert. Da die Maschinenspuren zwischen 15 % und 25 % (nach Durchforstung) eines Bestandes ausmachen, könnte dies für das Wachstum und Überleben der verbleibenden ausgewachsenen Ahornbäume kritisch werden (Malo & Messier 2011).

59) **Pflanzenwachstum und Ernteertrag** sind auf vorgeschädigten Böden (z.B. erhöhter Salzgehalt) doppelt so stark von einer Bodenverdichtung betroffen (Saqib et al., 2004).

60) **Keimung** von Baumsamen wird durch **Bodenverdichtung** negativ beeinflusst (Dürr und Aubertot, 2000). Eine Erhöhung von 1,3 auf 1,8 Mg/m3 führte zum späten Aufgehen von Eichenjungpflanzen, einer **Mortalitätsrate** von 70 % und geringeren **Höhe** der jungen Jungpflanzen und einer geringeren Stickstoff-Erholung (Jordan et al., 2003; Corns 1988; Moehring & Rawls 1970; Tworkoski et al. 1983). Die Reaktion des Wachstums der Sämlinge auf die Bodenverdichtung ist auch von den Bodentypen und Pflanzenarten abhängig, da manchmal eine moderate Verdichtung von Sandböden für das Wachstum von Sämlingen von holzigen Pflanzenarten nützlich sein kann (Alameda & Villar 2009).

61) Kahlschläge beeinträchtigen das natürliche **Verjüngungspotential** und Regenerationsprozesse. Die **Artenzusammensetzung** nach einer natürlichen Störung im Ökosystem unterscheidet sich u. U. dauerhaft von der eines Kahlschlages (Ough 2001).

62) Nach Sanitärhieben wurde eine erhebliche **Reduktion der anfänglichen Regeneration** festgestellt (Donato et al., 2006). Ähnliche Verringerungen der Verjüngungshäufigkeit und Änderungen der Sukzession sind an anderer Stelle dokumentiert worden (Stuart et al. 1993, Van Nieuwstadt et al., 2001). Andere Arten von Folgen sind Auswirkungen auf die Tierwelt (Nappi et al., 2003), die Hydrologie (Foster et al. 1997) und die Bodennährstoffe (Brais et al., 2000).

63) Das Belassen von (einigen) verbrannten **Baumstümpfen** auf Waldbrandflächen ist wichtig für die **biologische Vielfalt** und trägt zu einer nachhaltigeren Waldbewirtschaftung bei (Nappi et al., 2004).

64) **Retentionsbäume** (1) liefern einige der für frühe Sukzessionsarten wichtigen Substrattypen, (2) mildern die schwerwiegendsten Folgen des Kahlschlags auf die Biota, aber (3) können die Merkmale intakter, reifer Wälder nicht erhalten. Größere Holzvolumina und mehr Bäume erhalten die Vielfalt tendenziell besser (Gustafsson et al., 2010).

65) Vom Borkenkäfer befallene montane Fichtenwälder zeigen, dass **unbehandelte** Flächen eine **Pionierphase** überspringen und direkt bzw. eher zur natürlichen Artenzusammensetzung zurückkehren. **Sanitärhiebe** zeigten negative Auswirkungen auf die **Artenzusammensetzung** der Fichtenwälder, verzögerten die Walderholung und sollten im Nationalpark nicht zugelassen werden (Jonášová & Prach 2008).

66) Die **Bedeckung und Vielfalt der Krautvegetation** wurde Gebieten mit Sanitärhieben reduziert und die Zusammensetzung in Richtung einer stärkeren Dominanz von Gräsern verschoben (Rumbaitis del Rio 2006).

67) Peterson und Leach (2008) zeigen wiederum, dass es **nach Sanitärhieben keine negativen Auswirkungen auf die Dichte, den Reichtum oder die Vielfalt der Baumverjüngung** gibt. Allerdings war die **Artenzusammensetzung** betroffen.

68) **Mit oder ohne Räumung von Sturmholz kommt es zu Regeneration durch Naturverjüngung** (Kramer et al., 2014).

69) Auf einer kahlgeschlagenen Fläche Waldbrandfläche (Sanitärhieb) betrug die **Überlebensrate** nach drei Vegetationsperioden 96 % für gepflanzte Setzlinge, 90 % für gesäte und 100 % für natürliche Verjüngung (Gustafsson et al., 2019).

70) Die **Baumdichte ist nach einem Sturm in den beräumten Lücken höher als in den belassenen Lücken**, was mit den Ergebnissen anderer Studien übereinstimmt (Ilisson et al., 2007; Schönenberger, 2002). Bei den Holzbergungsarbeiten werden die Vegetation entfernt und der Boden gestört, was zu einem guten Keimsubstrat führt, das früh nach der Störung frei von Konkurrenz ist (Connell, 1978; Davis et al., 2000; Wohlgemuth et al., 2002).

71) Im Gegensatz dazu ist **Totholz in feuchten Fichtenwäldern in höheren Lagen entscheidend für die Baumverjüngung**, wie in vielen Studien in Nordamerika (z.B. Harmon und Franklin, 1989; McKee et al., 1982), in Schweizer Bergwäldern (Imbeck und Ott, 1987) und im Böhmerwald in Tschechien (Svoboda et al., 2010) festgestellt wurde. Zehnjähriges Totholz ist jedoch noch kein geeignetes Saatbeet. Seine Bedeutung als Substrat nimmt mit dem Alter zu (vgl. Priewasser et al., 2013; Zielonka, 2006). Entsprechend sei es nicht verwunderlich, dass **Totholz in den ersten 10-20 Jahren nach der Störung keinen signifikanten (positiven) Effekt auf die Regeneration** hatte (Priewasser et al., 2013).

72) Sanitärhiebe können die Artenzusammensetzung über mehrere Jahrzehnte hinweg verändern, weil sie **Pionierarten** fördern (Močalov & Lässig, 2002; Schönenberger, 2002).

73) Die Anzahl an vorzufindenden **Eicheln** war in geschlossenen Wäldern hoch, mittelmäßig auf "preparation cuttings" und in "retention tree groups", gering in Lücken, auf Kahlschlägen gleich Null. Vier Jahre nach den Eingriffen war kein nachweisbarer Effekt der verschiedenen forstlichen Behandlungen auf die **Anzahl** der nachwachsenden Baumarten festzustellen, doch die **Überlebensrate** nahm im Vergleich zur Kontrolle zu. Der **Höhenzuwachs** war auf den Lücken und Kahlschlägen am größten, auf "preparation cuttings" mittelmäßig und bei den "retention tree groups" und Kontrollen am geringsten. Arten mit unterschiedlichen Ausbreitungsmechanismen reagierten unterschiedlich auf die Behandlungen: Eichen waren in den Lücken und Kahlschlägen begrenzt, während anemochore Arten (z.B. Hainbuche und Manna-Esche) bei jeder Behandlung vorhanden waren (Tinya et al., 2020).

74) Vier Jahre nach der Holzernte hat sich die **Baumdichte** eines Espenbestandes um das 100-fache erhöht, wobei die Dichte nach der Vollbaumernte höher ist als nach der konventionellen Ernte. Zwischen 2 und 4 Jahren nach der Ernte kam es zu keiner Selbstausdünnung der Espe. Es besteht die Gefahr, dass die Vollbaumernte auf weniger fruchtbaren Standorten in der Region dichte, unproduktive Espenbestände mit geringer Durchforstungsrate produziert (Hendrickson 1988).

75) Verschiedene Behandlungsvarianten von Waldbrandflächen zeigen unterschiedliche Effekte auf die **Baumverjüngung**: Sanitärhiebe und damit verbundene Biomasseberäumung führen zu extremen Bedingungen wie erhöhte Bodentemperatur und **signifikant verringerte Bodenfeuchtigkeit**. Die höchste potentiell kurzwellige Strahlung, die den Boden erreichte, wurde immer auf Räumungsflächen verzeichnet. Das Beräumen von Totholz beeinflusst die mikroklimatischen Bedingungen stark und verändert die Verfügbarkeit und das Muster von "sicheren Standorten" für die Keimung von nachwachsenden Bäumen. Die Bedeutung dieser sicheren Mikrohabitate, an denen eine bevorzugte Verjüngung stattfindet, wird besonders deutlich an klimatisch gestressten Standorten. Belassen von Totholz verbessert die **mikroklimatischen** Bedingungen für nachwachsende Bäume. Eine bevorzugte Strategie zur Beschleunigung der natürlichen Prozesse und zur weiteren Erhöhung der Sicherheit der Verjüngungsstandorte könnte das Fällen von stehenden toten Bäumen sein, während das **Totholz** (zumindest teilweise) am Boden freigesetzt wird. Totholz kann eine **entscheidende Rolle bei der Bestimmung von Verjüngungsmustern** spielen. Sein Vorhandensein kann die Verfügbarkeit geeigneter Standorte für die Etablierung und das Überleben von Jungpflanzen erhöhen und als Schutz oder Abschirmung gegen mehrere limitierende Faktoren dienen (Marcolin et al., 2019).

76) Untersuchungen auf älteren **Waldbrandflächen** auch in Deutschland belegen das Potenzial der Naturverjüngung (Stähr et al., 2019). Die entsprechende Studie konnte auch häufig geäußerte Befürchtungen bzgl. der Vergrasung von Flächen zerstreuen und aufzeigen, dass die Sukzession aus wirtschaftlicher Sicht zum Aufbau einer akzeptablen Waldstruktur führt. Die Beräumung von Flächen habe zunächst einen **Sukzessionsvorsprung** bewirkt, der sich aber nach einer Dekade rasch verringerte.

77) Zwei verschieden Waldbewirtschaftungsvarianten (Kahlschlag und Schirmschlag) zeigten 27 Jahren nach dem Eingriff keinen unterschiedlichen Einfluss auf die **Dichte oder das Wachstum der sich verjüngenden Arten**, während **Bodenverwundung** hochsignifikante Auswirkungen hatte. Im Jahr 1999 waren die vertikutierten Flächen mit Weißfichtensämlingen und Setzlingen dicht besiedelt. Die nicht aufgeforsteten Gebiete hatten weit weniger Fichtenstämme, waren aber dennoch gut bestückt. Anfangs wuchs die Fichte am besten auf vertikutierten Flächen, aber nach 27 Jahren war Höhe der höchsten Fichtenschösslinge auf nicht vertikutierten Flächen deutlich größer als auf vertikutierten Flächen. Nach 27 Jahren hatte die Bedeckung mit ***Calamagrostis canadensis*** bei allen Behandlungsarten wieder den Stand von vor der Ernte erreicht (Wurtz & Zasada 2001).

78) Nach einem Kahlschlag sind vorwiegend ruderale Baumarten oder **Pionierbaumarten** in der Verjüngung vorzufinden, wobei die **Gesamtzahl** an nachwachsenden Bäumen sogar geringer als die in einem nie bewirtschaften Referenzwald sein kann (Blumröder et al., 2019).

79) Die **Abundanz** und das **Wachstum** von Keimlingen wird oft durch Mechanismen begrenzt, die in feinen Maßstäben arbeiten, wobei die Wahrscheinlichkeit des langfristigen Überlebens streng mit dem physischen Lebensraum, der einen Keimling umgibt, verbunden ist (Collins et al. 1987).

80) Die Verbesserung von **Mikrostandorten** kann durch reife Pflanzen, Sträucher, Totholz oder Steine durch die Senkung der Bodentemperatur und die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit und der Bodenfeuchtigkeit erreicht werden (Callaway 2007, Flores & Jurado 2003, Al-Namazi et al., 2017).

81) Die Rolle des **Totholzes** bei der Etablierung von **Keimpflanzen** als Keimsubstrat und als Samenfalle wurde schon oft betrachtet, wobei erstere Funktion streng mit dem Zersetzungsgrad und letztere mit der **Dimension** und der **Art** zusammenhängt (Pounden et al., 2008).

82) **Totholz** kann auch Regenerationsprozesse stark beeinflussen, indem es die **mikroklimatischen** Bedingungen durch die Verringerung der Sonneneinstrahlung (Verschattungseffekt) und die Erhöhung der Feuchtigkeitsaufnahme modifiziert (Pichler et al., 2012).

83) Studien hoben eine positive Beziehung zwischen **Keimlingen** (insbesondere Kiefern) und **Totholz** hervor, wobei die Keimung bevorzugt an den Schattenseiten von schützenden Elementen erfolgt, die in den sonnigsten Stunden einen entscheidenden Schutz vor Strahlung bieten (Beghin et al., 2010, Marzano et al., 2013).

84) Liegendes **Totholz** ist essentiell für die **Naturverjüngung** (im untersuchten Fall von Eichen) in naturnahen Wäldern, indem es die jungen Pflanzen gegen Verbiss durch herbivore Großsäuger schützt (Smit et al., 2012).

85) Nach **Beräumung** - in Reaktion auf eine Kalamität – und Pflanzung dominierte bei einer Kontrolle nach 14 Jahren mit 73% **Naturverjüngung**. Die Pflanzung wurde als unnötig

bewertet; zudem wären Schädigungen des Bodens und lebender Bäume, die bei der Bearbeitung entstanden, vermieden worden (Loch et al., 2001).

86) Das Fehlen von **Schutzelementen**, die die direkte **Sonneneinstrahlung** reduzieren, führt zu einem Anstieg der **Bodentemperatur**, wie es auf verschiedenen Räumungs- und Kahlschlagsflächen beobachtet wurde (Castro et al., 2011, Vlassova et al., 2016).

87) Die Etablierung und das Überleben von Sämlingen in trockenen, südexponierten Lagen hängen stark vom **Wassergehalt des Bodens** ab. Selbst Pionierarten und trockenheitsresistente Arten wie Kiefern benötigen im Etablierungsstadium Feuchtigkeit, um zu keimen (Marzano et al., 2013, Hardegree et al., 2018).

88) Am häufigsten waren **Laufkäfer** auf den jüngsten Standorten (1-2 Jahre nach dem Kahlschlag) und in reifen Beständen auf feuchtem Boden zu finden. Der Artenreichtum war auf den sich verjüngenden Standorten höher als in den reifen Wäldern. Die Reaktionen der häufigen Arten auf den Holzeinschlag fielen in drei Gruppen: (1) **Waldgeneralisten** (2 Arten) waren nicht dramatisch betroffen, (2) **Arten offener Lebensräume** (27 Arten) erschienen und/oder nahmen in ihrer Häufigkeit zu, und (3) **reife Waldarten** (10 Arten) verschwanden oder nahmen in ihrer Häufigkeit ab. Die Populationen vieler reifer Waldarten scheinen sich nach der Abholzung zu erholen, aber mehrere Spezialisten haben nicht einmal die ältesten sich regenerierenden Bestände wieder besiedelt. Darüber hinaus können die Fragmentierung und die Schaffung großer Flächen relativ homogener Jungwaldstadien durch den Holzeinschlag auch für die reichlich vorhandenen Waldgeneralisten nachteilige langfristige Auswirkungen haben (Niemelä et al. 1993).

89) Natürliche Regeneration in verschiedenen Bedingungen (Bodenfeuchtigkeit und Lichtverfügbarkeit): **Sämlinge unter Totholz und dikotyle Pflanzen zeigten eine bessere ökophysiologische Leistung, Etablierung und Wachstum als Pflanzen, die unter Monokotylen oder ohne den Schutz anderer Pflanzen wachsen. Eine hohe Kronenbedeckung durch Restbäume und stark gestörte Bereiche (Rückegassen) zeigten die schlechtesten Bedingungen für eine natürliche Verjüngung** (Manríquez et al., 2019).

90) Auf vom **Borkenkäfer** befallenen Fichtenbeständen in Tschechien zeigte sich, dass ich **Fichten** und **Ebereschen** gut unter einem stehenden toten **Restholzbestand** verjüngen und sogar **Buchen** anzufinden sind. Auf geräumten (kahlgeschlagenen) Flächen waren die Bestände an Fichte und Eberesche deutlich geringer als unter dem toten Kronendach. Pionierarten wie Weide (*Salix aurita*), Birke (*Betula pubescens*) und Espe (*Populus tremula*) erschienen in den Kahlschlagsgebieten. Die Abhängigkeit der Fichtenverjüngung von der Verfügbarkeit geeigneter Mikrohabitate (Totholz und Nadelstreu) wurde festgestellt. **Die ursprünglichen Baumarten der Bergfichtenwälder regenerieren sich gut unter dem toten Kronendach** (Jonášová & Prach 2004).

91) Viele mediterrane Ökosysteme sind zwar sehr **widerstandsfähig** gegen Feuer (Buschland und Eichenwälder), einige sind jedoch **feuerempfindlich** (z.B. Kiefernwälder). Die beobachteten Erosionsraten sind in einigen Fällen relativ hoch, vor allem unter Bedingungen mit hoher Brandintensität. Die empfindlichen Ökosysteme (im

Sinne von starken Vegetationsveränderungen und Bodenverlusten nach Bränden) sind meist **menschlichen** Ursprungs (z.B. ausgedehnte Kiefernwälder) (Pausas et al., 2009).

92) Die höchste **Baumverjüngung** wurde auf einer **Referenzfläche**, unter einem geschlossenen Kronenwald gefunden (67.500 und 38.000 Individuen/ha), die niedrigste Dichte auf einer gerodeten Windwurffläche (3380 und 1210 Individuen/ha). Bei den nicht gerodeten Windwurfflächen wurden 8835 und 7225 Individuen/ha gezählt. Pionierarten wie Birke und Weide wurden am häufigsten auf nicht beräumten Windwurfflächen gefunden (Jonášová & Cudlín 2010).

93) Auf einem 1-jährigen Kahlschlag betrug die Nettoprimärproduktion nur 22 % (wobei N, P, K, Mg, and Ca etwa 29-44 % ausmachten) im Vergleich zu einem benachbarten ungestörten Wald (Boring et al. 1981).

94) Eine Studie aus Brasilien zeigt, dass weder die Zeit seit der Holzernte noch die Baumbestockung vor der Ernte oder Bodenfaktoren in einem signifikanten Zusammenhang mit der **jährlichen Zuwachs** stehen. Stattdessen wird gezeigt, dass der Regenfall den größten Teil (72 % bzw. 96 %) der Variation erklärt (Pareyn et al 2020).

Forderungen, die sich im Lichte der aktuellen wissenschaftlichen Literatur aus der Bewertung der direkt auf den Flächen wirksamen Maßnahmen ergeben

1. Es wäre dringend ein Moratorium des normalen Holzeinschlags zu erwirken, ehe gesichert geklärt ist, dass dieser nicht ökologisch und ökonomisch kontraproduktiv wirkt und dass hierdurch nicht der existierende Waldkohlenstoffspeicher sowie die Senkenwirkung reduziert werden. Hierfür müsste ein unabhängiges Gutachten erstellt werden.
2. Auf den aktuellen und zukünftigen[23] Kalamitätsflächen ist die Kahlschlagpraxis sofort einzustellen, zumindest, bis geklärt ist, ob die angewendeten Praktiken auch hinsichtlich des flächigen Ausmaßes nicht einer Umweltverträglichkeitsprüfung bedürfen. Unabhängig davon bedarf es eines angemessenen und interdisziplinären Dialogs darüber, wie Richtlinien für einen differenzierten Umgang mit Kalamitätsflächen ausgestaltet werden sollen (u.a. unterschiedliche Behandlungen von Laub- und Nadelwäldern unterschiedlichen Alters, diverse Standorte, wie Hanglagen etc.; Größe von maximal möglichen Kahlschlägen, Menge von Restholz auf den Flächen etc.). Dies muss ggf. separat für die einzelnen Bundesländer erwirkt werden.
3. Entsprechendes ist für die Wiederaufforstung zu fordern. Bis zur Erarbeitung differenzierter Richtinien unter Berücksichtigung der Vorgaben des Naturschutzes und des ökologischen Wissensstandes sowie der Prüfung, ob nicht UVPs durchgeführt werden müssen, sind das Vorbereiten der Flächen für die Pflanzungen und das Pflanzen selbst sofort einzustellen. Entsprechende Richtlinien müssten regeln, welche Arten in welcher Mischung auf welchen Standorten unter welchen Bedingungen zu pflanzen sind. In jedem Falle muss ein flächig differenzierter Ansatz verfolgt werden, keine Einheitsbehandlung. V.a. muss vor dem Pflanzen ein

[23] Es ist davon auszugehen, dass die Herausforderung weiter voranschreitet. Es wäre ungenügend, sich nur auf die bisher identifizierten Kalamitätsflächen zu beziehen.

angemessener Zeitraum abgewartet werden, um Naturverjüngung eine Chance zu geben (3-5 Jahre).

4. Während 2.-3. auf der Ebene der Bundesländer greift, ist auf der Bundesebene sicherzustellen, dass die entsprechenden Hilfen und Förderungen nicht perverse Anreize dafür darstellen, den Ökosystemen massive und irreversible Schäden zuzufügen. Es scheint nicht richtig zu sein, dass die Bundesmittel verausgabt werden, ohne dass auf das Vorlegen von Folgen- und Risikoabschätzungen / UVP bestanden wird, um solche Schäden zu verhindern.

(…)

Literaturverzeichnis

Abdi, E., Moghadamirad, M., Hayati, E., & Jaeger, D. (2017). Soil hydrophysical degradation associated with forest operations. *Forest Science and Technology*, *13*(4), 152-157.

Alameda, D., & Villar, R. (2009). Moderate soil compaction: implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil and Tillage Research*, *103*(2), 325-331.

Alexander, A. B. (2012). Soil compaction on skid trails after selective logging in moist evergreen forest of Ghana. *Agriculture and Biology Journal of North America*, *3*(6), 262-264.

Alletto, L., Coquet, Y., Benoit, P., Heddadj, D., & Barriuso, E. (2010). Tillage management effects on pesticide fate in soils. In *Sustainable Agriculture Volume 2* (pp. 787-831). Springer, Dordrecht.

Al-Namazi, A. A., El-Bana, M. I., & Bonser, S. P. (2017). Competition and facilitation structure plant communities under nurse tree canopies in extremely stressful environments. *Ecology and Evolution*, *7*(8), 2747-2755.

Ampoorter, E., De Schrijver, A., Van Nevel, L., Hermy, M., & Verheyen, K. (2012). Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, *69*(5), 533-542.

Arah, J. R. M., & Smith, K. A. (1989). Steady-state denitrification in aggregated soils: a mathematical model. *Journal of Soil Science*, *40*(1), 139-149.

Ballard, T. M. (2000). Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, *133*(1-2), 37-42.

Beghin, R., Lingua, E., Garbarino, M., Lonati, M., Bovio, G., Motta, R., & Marzano, R. (2010). Pinus sylvestris forest regeneration under different post-fire restoration practices in the northwestern Italian Alps. *Ecological Engineering*, *36*(10), 1365-1372.

Berretti, R., Motta, R., Vacchiano, G., Blanc, S., Brun, F., Bricarello, M., ... & Dotta, A. (2012). FORESTE DI PROTEZIONE DIRETTA. Selvicoltura e valutazioni economiche nelle Alpi occidentali.

Birkinshaw, S. J., Bathurst, J. C., Iroumé, A., & Huber, A. (2010). The effect of forestry on peak flow and sediment discharge in central-southern Chile. *Hydrol. Process. doi*, *10*.

Blick aktuell (2020). Trockenheitsschäden und ungewöhnlich starker Schädlingsbefall führen zu hohem Defizit, *Blick aktuell Aus Liebe zur Heimat, Krupp Verlags GmbH, Sinzig,* 1. [Online]. Available on: https://www.blick-aktuell.de/Politik/Trockenheitsschaeden-und-ungewoehnlich-starker-Schaedlingsbefall-fuehren-zu-hohem-Defizit-431904.html

Blumröder, J. S., Ibisch P. L., & Kriewald S. (2019). Hambacher Forst in der Krise (II) Temperaturmessungen zur Beurteilung der mikroklimatischen Situation des Waldes und des Randbereichs. *Greenpeace, Hamburg,* 19.

Blumröder, J.S., Burova, N., Winter, S., Goroncy, A., Hobson, P.R., Shegolev, A., Dobrynin, D., Amosova, I., Ilina, O., Parinova, T., Volkov, A., Graebener, U.F., Ibisch, P.L., 2019. Ecological effects of clearcutting practices in a boreal forest (Arkhangelsk Region , Russian Federation) both with and without FSC certification. *Ecol. Indic.* 106.

BMEL 2019. Deutschland Wald im Klimawandel, Eckpunkte und Massnahmen, Diskussionspapier zum Nationalen Waldgipfel, *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Referat 513, Berlin,* 11. [Online]. Available on: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Wald-Jagd/Wald_Diskussionspapier.pdf?__blob=publicationFile

BMEL 2019. Dürre: finanzielle Hilfen für Waldbesitzer, *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Referat 513, Berlin,* 1. [Online]. Available on: https://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/Forst-Holzwirtschaft/_texte/Duerrehilfen-Waldbesitzer.html

Boring, L. R., Monk, C. D., & Swank, W. T. (1981). Early regeneration of a clear-cut southern Appalachian forest. *Ecology*, *62*(5), 1244-1253.

Bouwman, L. A., & Arts, W. B. M. (2000). Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. *Applied Soil Ecology*, *14*(3), 213-222.

Brais, S., David, P., & Ouimet, R. (2000). Impacts of wild fire severity and salvage harvesting on the nutrient balance of jack pine and black spruce boreal stands. *Forest Ecology and Management*, *137*(1-3), 231-243.

Buck, C., Langmaack, M., & Schrader, S. (2000). Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. *Applied Soil Ecology*, *14*(3), 223-229.

Callaway, R. M. (2007). *Positive interactions and interdependence in plant communities*. Springer Science & Business Media.

Camarero, J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Cantero, A., Sánchez-Salguero, R., Sánchez-Miranda, A., ... & Ibáñez, R. (2018). Forest growth responses to drought at short-and long-term scales in Spain: squeezing the stress memory from tree rings. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *6*, 9.

Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, *338*, 124-138

Carr, A., & Loague, K. (2012). Physics-based simulations of the impacts forest management practices have on hydrologic response. In *In: Standiford, Richard B.; Weller, Theodore J.; Piirto, Douglas D.; Stuart, John D., tech. coords. Proceedings of coast redwood forests in a changing California: A symposium for scientists and managers. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-238. Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, US Department of Agriculture. pp. 41-51* (Vol. 238, pp. 41-51).

Castro, J., Allen, C. D., Molina-Morales, M., Marañón-Jiménez, S., Sánchez-Miranda, Á., & Zamora, R. (2011). Salvage logging versus the use of burnt wood as a nurse object to promote post-fire tree seedling establishment. *Restoration Ecology*, *19*(4), 537-544.

Chan, K. Y., & Barchia, I. (2007). Soil compaction controls the abundance, biomass and distribution of earthworms in a single dairy farm in south-eastern Australia. *Soil and Tillage Research*, *94*(1), 75-82.

Chećko, E., Jaroszewicz, B., Olejniczak, K., & Kwiatkowska-Falińska, A. J. (2015). The importance of coarse woody debris for vascular plants in temperate mixed deciduous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, *45*(9), 1154-1163.

Christophel, D., Höllerl, S., Prietzel, J., & Steffens, M. (2015). Long-term development of soil organic carbon and nitrogen stocks after shelterwood-and clear-cutting in a mountain forest in the Bavarian Limestone Alps. *European Journal of Forest Research*, *134*(4), 623-640.

Colangelo, M., Camarero, J. J., Borghetti, M., Gentilesca, T., Oliva, J., Redondo, M. A., & Ripullone, F. (2018). Drought and Phytophthora are associated with the decline of oak species in southern Italy. *Frontiers in lant Science*, *9*, 1595.

Collins, S. L., & Good, R. E. (1987). The seedling regeneration niche: habitat structure of tree seedlings in an oak-pine forest. *Oikos*, 89-98.

Conlin, T. S. S., & Driessche, R. V. D. (2000). Response of soil CO2 and O2 concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, *80*(4), 625-632.

Connell, J. H. (1978). Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, *199*(4335), 1302-1310.

Corns, I. G. (1988). Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. *Canadian Journal of Forest Research*, *18*(1), 75-84.

Croke, J., Hairsine, P., & Fogarty, P. (2001). Soil recovery from track construction and harvesting changes in surface infiltration, erosion and delivery rates with time. *Forest Ecology and Management*, *143*(1-3), 3-12.

Davis, M. A., Grime, J. P., & Thompson, K. (2000). Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology*, *88*(3), 528-534.

De Neve, S., & Hofman, G. (2000). Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology and Fertility of Soils*, *30*(5-6), 544-549.

Demir, M., Makineci, E., & Gungor, B. S. (2008). Plant species recovery on a compacted skid road. *Sensors*, *8*(5), 3123-3133.

Demir, M., Makineci, E., Comez, A., & Yilmaz, E. (2010). Impacts of repeated timber skidding on the chemical properties of topsoil, herbaceous cover and forest floor in an eastern beech (Fagus orientalis Lipsky) stand. *Journal of Environmental Biology*, *31*(4), 477.

Dick, R. P., Myrold, D. D., & Kerle, E. A. (1988). Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soils. *Soil Science Society of America Journal*, *52*(2), 512-516.

Dickerson, B. P. (1976). Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Soil Science Society of America Journal*, *40*(6), 965-966.

Dobor, L., Hlásny, T., Rammer, W., Zimová, S., Barka, I., & Seidl, R. (2020). Is salvage logging effectively dampening bark beetle outbreaks and preserving forest carbon stocks? *Journal of Applied Ecology*, *57*(1), 67-76.

Donato, D. C., Fontaine, J. B., Campbell, J. L., Robinson, W. D., Kauffman, J. B., & Law, B. E. (2006). Post-wildfire logging hinders regeneration and increases fire risk. *Science*, *311*(5759), 352-352.

Douglas, J. T., & Crawford, C. E. (1993). The response of a ryegrass sward to wheel traffic and applied nitrogen. *Grass and Forage Science*, *48*(2), 91-100.

Dürr, C., & Aubertot, J. N. (2000). Emergence of seedlings of sugar beet (Beta vulgaris L.) as affected by the size, roughness and position of aggregates in the seedbed. *Plant and Soil*, *219*(1-2), 211-220.

Eastburn, D. M., McElrone, A. J., & Bilgin, D. D. (2011). Influence of atmospheric and climatic change on plant–pathogen interactions. *Plant Pathology*, *60*(1), 54-69.

Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., ... & Gaveau, D. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, *43*, 51-61.

Flores, J., & Jurado, E. (2003). Are nurse-protégé interactions more common among plants from arid environments?. *Journal of Vegetation Science*, *14*(6), 911-916.

Foster, D. R., Aber, J. D., Melillo, J. M., Bowden, R. D., & Bazzaz, F. A. (1997). Forest response to disturbance and anthropogenic stress. *BioScience*, *47*(7), 437-445.

Freudenberger, L., Hobson, P. R., Rupic, S., Pe'er, G., Schluck, M., Sauermann, J., ... & Ibisch, P. L. (2013). Spatial road disturbance index (SPROADI) for conservation planning: a novel landscape index, demonstrated for the State of Brandenburg, Germany. *Landscape Ecology*, *28*(7), 1353-1369.

Frey, B., Kremer, J., Rüdt, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, *45*(4), 312-320.

Fritz, V. A., Allmaras, R. R., Pfleger, F. L., & Davis, D. W. (1995). Oat residue and soil compaction influences on common root rot (Aphanomyes euteiches) of peas in a fine-textured soil. *Plant and Soil*, *171*(2), 235-244.

Froehlich, H. A., Miles, D. W. R., & Robbins, R. W. (1985). Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, *49*(4), 1015-1017.

Gazol, A., Camarero, J. J., Jiménez, J. J., Moret-Fernández, D., López, M. V., Sangüesa-Barreda, G., & Igual, J. M. (2018). Beneath the canopy: Linking drought-induced forest die off and changes in soil properties. *Forest Ecology and Management*, *422*, 294-302.

Generalanzeiger (2018). Trockenheit und eingeschleppte Insekten, Rheinbacher Wald in katastrophalem Zustand, *General-Anzeiger Bonn GmbH, Bonn,* 1. [Online]. Available on: https://www.general-anzeiger-bonn.de/region/voreifel-und-vorgebirge/rheinbach/rheinbacher-wald-in-katastrophalem-zustand_aid-43889517

Gerard, C. J., Sexton, P., & Shaw, G. (1982). Physical Factors Influencing Soil Strength and Root Growth 1. *Agronomy Journal*, *74*(5), 875-879.

Geyer, J., Kiefer, I., Kreft, S., Chavez, V., Salafsky, N., Jeltsch, F., & Ibisch, P. L. (2011). Classification of climate-change-induced stresses on biological diversity. *Conservation Biology*, *25*(4), 708-715.

Glinski, J., Lipiec, J. (1990). Soil physical conditions and plant roots. *CRC Press Boca Raton*

Gustafsson, L., Berglind, M., Granström, A., Grelle, A., Isacsson, G., Kjellander, P., ... & Stridh, B. (2019). Rapid ecological response and intensified knowledge accumulation following a north European mega-fire. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *34*(4), 234-253.

Gustafsson, L., Kouki, J., & Sverdrup-Thygeson, A. (2010). Tree retention as a conservation measure in clear-cut forests of northern Europe: a review of ecological consequences. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *25*(4), 295-308.

Hais, M., & Kučera, T. (2008). Surface temperature change of spruce forest as a result of bark beetle attack: remote sensing and GIS approach. *European Journal of Forest Research*, *127*(4), 327-336.

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2003). Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, *54*(3), 273-282.

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, *82*(2), 121-145.

Hardegree, S. P., Roundy, B. A., Walters, C. T., Reeves, P. A., Richards, C. M., Moffet, C. A., ... & Flerchinger, G. N. (2018). Hydrothermal germination models: Assessment of the wet-thermal approximation of potential field response. *Crop Science*, *58*(5), 2042-2049.

Harmon, M. E., & Franklin, J. F. (1989). Tree seedlings on logs in Picea-Tsuga forests of Oregon and Washington. *Ecology*, *70*(1), 48-59.

Hashimoto, S., & Suzuki, M. (2004). The impact of forest clear-cutting on soil temperature: a comparison between before and after cutting, and between clear-cut and control sites. *Journal of Forest Research*, *9*(2), 125-132.

Hendrickson, O. Q. (1988). Biomass and nutrients in regenerating woody vegetation following whole-tree and conventional harvest in a northern mixed forest. *Canadian Journal of Forest Research*, *18*(11), 1427-1436.

Hopkins, A. J., Ruthrof, K. X., Fontaine, J. B., Matusick, G., Dundas, S. J., & Hardy, G. E. (2018). Forest die-off following global-change-type drought alters rhizosphere fungal communities. *Environmental Research Letters*, *13*(9), 095006.

Ibisch, P. L., Blumröder, J. S., & Kriewald S. (2019). Hambacher Forst in der Krise Studie zur Beurteilung der mikro- und mesoklimatischen Situation sowie Randeffekten. *Greenpeace, Hamburg,* 23.

Ibisch, P.L., & Blumröder J. S. (2018). Ökosysteme unter Druck: eine stark beanspruchte Landschaft muss sich im Klimawandel behaupten. In: Ibisch, P.L., Kloiber J., & Hoffmann M. T. (Hrsg.). Barnim-Atlas. Lebensraum im Wandel. Eine Ökosystembasierte Betrachtung des Barnims zum Wohle der Menschen. *Ehm-Welk-Verlag, Schwedt,* 63-64.

Ibisch, P.L., Kriewald S., & Thies S. (2018). Kleinräumige Differenzierung des Mikroklimas. In: Ibisch, P.L., Kloiber J., & Hoffmann M. T. (Hrsg.). Barnim-Atlas. Lebensraum im Wandel. Eine Ökosystembasierte Betrachtung des Barnims zum Wohle der Menschen. *Ehm-Welk-Verlag, Schwedt*, 29-30.

Ibisch, PL, Welle T, Blumröder JS, Sommer J. 2020. Wälder sind Kohlenstoffspeicher. Holzverbrennung ist nicht klimaneutral. Hintergrundpapier anlässlich des Filmbeitrags „Klimaschutz auf dem Holzweg. Wird unser Wald verheizt?“ von Güven Purtul (Frontal 21, ZDF) https://www.zdf.de/politik/frontal-21/holzverbrennung-100.html. Centre for Econics and Ecosystem Management, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde; Naturwald Akademie; Deutsche Umweltstiftung. Eberswalde, Lübeck, Berlin (https://www.researchgate.net/publication/340309866_ePaper_Holzverbrennung_ist_nicht

_klimaneutral_31_Marz20_fin).

Ilisson, T., Köster, K., Vodde, F., & Jõgiste, K. (2007). Regeneration development 4–5 years after a storm in Norway spruce dominated forests, Estonia. *Forest Ecology and Management*, *250*(1-2), 17-24.

Imbeck H., Ott E. (1987). Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneeablagerung und der Lawinenbildung. *Eidgenösschische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf,* 202.

Iroumé, A., Huber, A., & Schulz, K. (2005). Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chile. *Journal of Hydrology*, *300*(1-4), 300-313.

Iroumé, A., Mayen, O., & Huber, A. (2006). Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. *Hydrological Processes*, *20*(1), 37-50.

Itter, M. S., Finley, A. O., D'Amato, A. W., Foster, J. R., & Bradford, J. B. (2016). Variable effects of climate on forest growth in relation to climate extremes, disturbance, and forest dynamics. *Ecological Applications*, *27*(4), 1082-1095.

Jonášová, M., & Prach, K. (2004). Central-European mountain spruce (Picea abies (L.) Karst.) forests: regeneration of tree species after a bark beetle outbreak. *Ecological Engineering*, *23*(1), 15-27.

Jonášová, M., & Prach, K. (2008). The influence of bark beetles outbreak vs. salvage logging on ground layer vegetation in Central European mountain spruce forests. *Biological Conservation*, *141*(6), 1525-1535.

Jonášová, M., Vávrová, E., & Cudlín, P. (2010). Western Carpathian mountain spruce forest after a windthrow: natural regeneration in cleared and uncleared areas. *Forest Ecology and Management*, *259*(6), 1127-1134.

Jones, J. A., & Grant, G. E. (1996). Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, *32*(4), 959-974.

Jordan, D., Ponder Jr, F., & Hubbard, V. C. (2003). Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, *23*(1), 33-41.

Kirby, J. M., & Bengough, A. G. (2002). Influence of soil strength on root growth: experiments and analysis using a critical-state model. *European Journal of Soil Science*, *53*(1), 119-127.

Kramer, K., Brang, P., Bachofen, H., Bugmann, H., & Wohlgemuth, T. (2014). Site factors are more important than salvage logging for tree regeneration after wind disturbance in Central European forests. *Forest Ecology and Management*, *331*, 116-128.

Kretzschmar, A. (1991). Burrowing ability of the earthworm Aporrectodea longa limited by soil compaction and water potential. *Biology and Fertility of Soils*, *11*(1), 48-51.

Kristoffersen, A. Ø., & Riley, H. (2005). Effects of soil compaction and moisture regime on the root and shoot growth and phosphorus uptake of barley plants growing on soils with varying phosphorus status. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *72*(2), 135-146.

Leverkus, A. B., Lindenmayer, D. B., Thorn, S., & Gustafsson, L. (2018a). Salvage logging in the world's forests: Interactions between natural disturbance and logging need recognition. *Global Ecology and Biogeography*, *27*(10), 1140-1154.

Leverkus, A. B., Rey Benayas, J. M., Castro, J., Boucher, D., Brewer, S., Collins, B. M., ... & Lindenmayer, D. B. (2018b). Salvage logging effects on regulating and supporting ecosystem services—A systematic map. *Canadian Journal of Forest Research*, *48*(9), 983-1000.

Li, X., Yang, D., Zheng, C., Li, X., Zhao, W., Huang, M., ... & Yu, P. (2017). Ecohydrology. In *The Geographical Sciences During 1986—2015* (pp. 407-417). Springer, Singapore.

Loch, J., Chwistek, P., Wężyk, P., Małek, S. & Pająk, M. (2001). Natural regeneration vs tree planting in the subalpine spruce forest Plagiothecio-Piceetum tatricum of the Gorce National Park. *Nature Conservation* 58: 5-15.

Lotfalian, M., & Bahmani, H. (2011). Effects of ground based skidding system on soil compaction and herbaceous species in a hyrcanian forest. *European Journal of Scientific Research*, *61*(4), 601-606.

Mageroy, M. H., Christiansen, E., Långström, B., Borg-Karlson, A. K., Solheim, H., Björklund, N., ... & Krokene, P. (2020). Priming of inducible defenses protects Norway spruce against tree-killing bark beetles. *Plant, Cell & Environment*.

Magnússon, R. Í., Tietema, A., Cornelissen, J. H., Hefting, M. M., & Kalbitz, K. (2016). Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils. *Forest Ecology and Management*, *377*, 1-15.

Malmer, A., & Grip, H. (1990). Soil disturbance and loss of infiltrability caused by mechanized and manual extraction of tropical rainforest in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, *38*(1-2), 1-12.

Malo, C., & Messier, C. (2011). Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting. *Canadian Journal of Forest Research*, *41*(4), 892-897.

Manríquez, M. D. T., Cellini, J. M., Lencinas, M. V., Peri, P. L., Rojas, K. A. P., & Pastur, G. J. M. (2019). Suitable conditions for natural regeneration in variable retention harvesting of southern Patagonian Nothofagus pumilio forests. *Ecological Processes*, *8*(1), 18.

Marcolin, E., Marzano, R., Vitali, A., Garbarino, M., & Lingua, E. (2019). Post-Fire Management Impact on Natural Forest Regeneration through Altered Microsite Conditions. *Forests*, *10*(11), 1014.

Marzano, R., Garbarino, M., Marcolin, E., Pividori, M., & Lingua, E. (2013). Deadwood anisotropic facilitation on seedling establishment after a stand-replacing wildfire in Aosta Valley (NW Italy). *Ecological Engineering*, *51*, 117-122.

Masle, J., & Passioura, J. B. (1987). The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Functional Plant Biology*, *14*(6), 643-656.

Mausolf, K., Wilm, P., Härdtle, W., Jansen, K., Schuldt, B., Sturm, K., ... & Fichtner, A. (2018). Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. *Science of the total environment*, *642*, 1201-1208.

McDaniel, M. D., Kaye, J. P., & Kaye, M. W. (2014). Do “hot moments” become hotter under climate change? Soil nitrogen dynamics from a climate manipulation experiment in a post-harvest forest. *Biogeochemistry*, *121*(2), 339-354.

McKee, A., LaRoi, G., & Franklin, J. F. (1982). Structure, composition, and reproductive behavior of terrace forests, South Fork Hoh River, Olympic National Park. *Ecological Research in National Parks of the Pacific Northwest*, 22-29.

Mezei, P., Blaženec, M., Grodzki, W., Škvarenina, J., & Jakuš, R. (2017). Influence of different forest protection strategies on spruce tree mortality during a bark beetle outbreak. *Annals of Forest Science*, *74*(4), 65.

Močalov, S. A., & Lässig, R. (2002). Development of two boreal forests after large-scale windthrow in the Central Urals. *For Snow Landsc Res*, *77*, 171-186.

Moehring, D. M., & Rawls, I. W. (1970). Detrimental effects of wet weather logging. *Journal of Forestry*, *68*(3), 166-167.

Mohr, C. H., R. Coppus, A. Iroume´, A. Huber, and A. Bronstert (2013), Runoff generation and soil erosionprocesses after clear cutting. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*,118, 814–831, doi:10.1002/jgrf.20047

Munch, J. C., & Ottow, J. C. G. (1983). Reductive transformation mechanism of ferric oxides in hydromorphic soils. *Ecological Bulletins*, 383-394.

Naghdi, R., Bagheri, I., Akef, M., & Mahdavi, A. (2007). Soil compaction caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Shefarood forest, northern Iran). *Journal of Forest Science*, *53*(7), 314-319.

Naghdi, R., Bagheri, I., Lotfalian, M., & Setodeh, B. (2009). Rutting and soil displacement caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Asalem forest northern Iran). *Journal of Forest Science*, *55*(4), 177-183.

Najafi, A., Solgi, A., & Sadeghi, S. H. (2009). Soil disturbance following four wheel rubber skidder logging on the steep trail in the north mountainous forest of Iran. *Soil and Tillage Research*, *103*(1), 165-169.

Nappi, A., Drapeau, P., & Savard, J. P. (2004). Salvage logging after wildfire in the boreal forest: is it becoming a hot issue for wildlife?. *The Forestry Chronicle*, *80*(1), 67-74.

Nappi, A., Drapeau, P., Giroux, J. F., & Savard, J. P. L. (2003). Snag use by foraging black-backed woodpeckers (*Picoides arcticus*) in a recently burned eastern boreal forest. *The Auk*, *120*(2), 505-511.

Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. Agron Sustain Dev 33: 291–309.

Niemelä, J., Langor, D., & Spence, J. R. (1993). Effects of clear-cut harvesting on boreal ground-beetle assemblages (Coleoptera: Carabidae) in western Canada. *Conservation biology*, *7*(3), 551-561.

Norris, C., Hobson, P., & Ibisch, P. L. (2011). Microclimate and vegetation function as indicators of forest thermodynamic efficiency. *Journal of Applied Ecology*, *49*(3), 562-570.

Osman, K. T. (2012). Forest soils. In *Soils* (pp. 229-251). Springer, Dordrecht.

Ough, K. (2001). Regeneration of Wet Forest flora a decade after clear-felling or wildfire-is there a difference? *Australian Journal of Botany*, *49*(5), 645-664.

Pareyn, F. G., Pereira, W. E., Salcedo, I. H., Riegelhaupt, E. M., Gomes, E. C., Menecheli, H. T., & Skutsch, M. (2020). What controls post-harvest growth rates in the caatinga forest?. *Agricultural and Forest Meteorology*, *284*, 107906.

Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., & Vallejo, R. (2009). Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin?–A review. *International Journal of wildland fire*, *17*(6), 713-723.

Perry, D. A., Griffiths, R. P., Moldenke, A. R., & Madson, S. L. (2012). Abiotic and biotic soil characteristics in old growth forests and thinned or unthinned mature stands in three regions of Oregon. *Diversity*, *4*(3), 334-362.

Peterson, C. J., & Leach, A. D. (2008). Limited salvage logging effects on forest regeneration after moderate-severity windthrow. *Ecological Applications*, *18*(2), 407-420.

Pichler, V., Homolák, M., Skierucha, W., Pichlerová, M., Ramírez, D., Gregor, J., & Jaloviar, P. (2012). Variability of moisture in coarse woody debris from several ecologically important tree species of the Temperate Zone of Europe. *Ecohydrology*, *5*(4), 424-434.

Pounden, E., Greene, D. F., Quesada, M., & Contreras Sánchez, J. M. (2008). The effect of collisions with vegetation elements on the dispersal of winged and plumed seeds. *Journal of Ecology*, *96*(4), 591-598.

Priewasser, K., Brang, P., Bachofen, H., Bugmann, H., & Wohlgemuth, T. (2013). Impacts of salvage-logging on the status of deadwood after windthrow in Swiss forests. *European Journal of Forest Research*, *132*(2), 231-240.

Pupin, B., Freddi, O. D. S., & Nahas, E. (2009). Microbial alterations of the soil influenced by induced compaction. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *33*(5), 1207-1213.

Rab, M. A. (2004). Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. *Forest Ecology and Management*, *191*(1-3), 329-340.

Radford, B. J., Wilson-Rummenie, A. C., Simpson, G. B., Bell, K. L., & Ferguson, M. A. (2001). Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in central Queensland. *Soil Biology and Biochemistry*, *33*(12-13), 1869-1872.

Renault, P., & Stengel, P. (1994). Modeling oxygen diffusion in aggregated soils: I. Anaerobiosis inside the aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, *58*(4), 1017-1023.

Romme, W. H., Boyce, M. S., Gresswell, R., Merrill, E. H., Minshall, G. W., Whitlock, C., & Turner, M. G. (2011). Twenty years after the 1988 Yellowstone fires: lessons about disturbance and ecosystems. *Ecosystems*, *14*(7), 1196-1215.

Ruel, J. C. (1995). Understanding windthrow: silvicultural implications. *The Forestry Chronicle*, *71*(4), 434-445.

Rumbaitis del Rio, C. M. (2006). Changes in understory composition following catastrophic windthrow and salvage logging in a subalpine forest ecosystem. *Canadian Journal of Forest Research*, *36*(11), 2943-2954.

Sakai, H., Nordfjell, T., Suadicani, K., Talbot, B., & Bøllehuus, E. (2008). Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, *29*(1), 15-27.

Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., García-Martín, A., Hernández, R., & de la Riva, J. (2014). Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth. *Forest Ecology and Management*, *320*, 171-181.

Saqib, M., Akhtar, J., & Qureshi, R. H. (2004). Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil: I. Grain yield and yield components. *Soil and Tillage Research*, *77*(2), 169-177.

Schenck, N., Saurat, C., Guinet, C., Fourrier-Jeandel, C., Roche, L., Bouvet, A., ... & Ioos, R. (2018). First report of Phytophthora ramorum causing Japanese larch dieback in France. *Plant Disease*, *102*(10), 2045-2045.

Schnurr-Pütz, S., Bååth, E., Guggenberger, G., Drake, H. L., & Kirsten, K. (2006). Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes. *FEMS Microbiology Ecology*, *58*(3), 503-516.

Schönenberger, W. (2002). Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: the first ten years after the 1990 storm Vivian. *For. Snow Landsc. Res*, *77*(1/2), 61-80.

Seibold, S., Blässler, C., Brandl, R., Büchse, B., Szallies, A., Thorn, S., Ulyshen, M. D. (2016). Microclimate and habitat heterogeneity as the major drivers of beetle diversity in dead wood. *Journal of Applied Ecology*, *53*(3), 934-943.

Seibold, S., Gossner, M. M., Simons, N. K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarlı, D., ... & Linsenmair, K. E. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, *574*(7780), 671-674.

Sergent, A. S., Rozenberg, P., & Bréda, N. (2012). Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Annals of Forest Science*, *71*(6), 697-708.

Servadio, P. (2010). Applications of empirical methods in central Italy for predicting field wheeled and tracked vehicle performance. *Soil and Tillage Research*, *110*(2), 236-242.

Sheil, D., Bargués-Tobella, A., Ilstedt, U., Ibisch, P. L., Makarieva, A., McAlpine, C., ... & Spracklen, D. V. (2019). Forest restoration: Transformative trees. *Science (New York, NY)*, *366*(6463), 316.

Silva, S. R. D., Barros, N. F. D., Costa, L. M. D., & Leite, F. P. (2008). Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. *Revista brasileira de ciência do solo*, *32*(3), 921-932.

Silveira, M. L., Comerford, N. B., Reddy, K. R., Prenger, J., & DeBusk, W. F. (2010). Influence of military land uses on soil carbon dynamics in forest ecosystems of Georgia, USA. *Ecological Indicators*, *10*(4), 905-909.

Smit, C., Kuijper, D.P.J., Prentice, D., Wassen, M. & Cromsigt, J.P.G.M. (2012). Coarse woody debris facilitates oak recruitment in Białowieża Primeval Forest, Poland. *Forest Ecology and Management* 284: 131-141.

Sowa, J. M., & Kulak, D. (2008). Probability of occurrence of soil disturbances during timber harvesting. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, *29*(1), 29-39.

Stadelmann, G., Bugmann, H., Meier, F., Wermelinger, B., & Bigler, C. (2013). Effects of salvage logging and sanitation felling on bark beetle (Ips typographus L.) infestations. *Forest Ecology and Management*, *305*, 273-281.

Stadtwald Rheinbach (2017). 1171 Douglasien neu gesetzt, *General-Anzeiger Bonn GmbH, Bonn,* 1. [Online]. Available on: https://www.general-anzeiger-bonn.de/region/voreifel-und-vorgebirge/rheinbach/1171-douglasien-neu-gesetzt_aid-43311921

Stähr, F., Hainke K., & Lübge G. (2019). 15 Jahre nach dem Waldbrand – Sekundärsukzession auf dem Weg zum Wirtschaftswald? Die Auswirkungen des Dürrejahres 2018 auf den Wald in Brandenburg. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 67*, 45-63.

Startsev, A. D., & McNabb, D. H. (2000). Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, *80*(4), 617-624.

Stuart, J. D., Grifantini, M. C., & Fox III, L. (1993). Early successional pathways following wildfire and subsequent silvicultural treatment in Douglas-fir/hardwood forests, NW California. *Forest Science*, *39*(3), 561-572.

Svoboda, M., Fraver, S., Janda, P., Bače, R., & Zenáhlíková, J. (2010). Natural development and regeneration of a Central European montane spruce forest. *Forest Ecology and Management*, *260*(5), 707-714.

Tan, X., & Chang, S. X. (2007). Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Soil and Tillage Research*, *93*(1), 77-86.

Tan, X., Chang, S. X., & Kabzems, R. (2008). Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, *44*(3), 471-479.

Tanaka, K., & Hashimoto, S. (2006). Plant canopy effects on soil thermal and hydrological properties and soil respiration. *Ecological Modelling*, *196*(1-2), 32-44.

Taylor, H. M., & Ratliff, L. F. (1969). Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Science*, *108*(2), 113-119.

Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker Jr, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, *102*(1), 18-22.

Thom, D., Golivets, M., Edling, L., Meigs, G. W., Gourevitch, J. D., Sonter, L. J., ... & Keeton, W. S. (2019). The climate sensitivity of carbon, timber, and species richness covaries with forest age in boreal–temperate North America. *Global Change Biology*, *25*(7), 2446-2458.

Thorn, S., Müller, J., & Leverkus, A. B. (2019). Preventing European forest diebacks. *Science*, *365*(6460), 1388-1388.

Thünen-Institut 2020. Fragen und Antworten : Waldschäden durch Trockenheit und Hitze. *Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig,* 1. [Online]. Available on: https://www.thuenen.de/de/thema/waelder/forstliches-umweltmonitoring-mehr-als-nur-daten/waldschaeden-durch-trockenheit-und-hitze/

Tinya, F., Kovács, B., Aszalós, R., Tóth, B., Csépányi, P., Németh, C., & Ódor, P. (2020). Initial regeneration success of tree species after different forestry treatments in a sessile oak-hornbeam forest. *Forest Ecology and Management*, *459*, 117810.

Tworkoski, T. J., Burger, J. A., & Smith, D. W. (1983). Soil texture and bulk density affect early growth of white oak seedlings [Quercus alba, Quercus rubra, soil compaction, root growth inhibition]. *Tree Planters' Notes US Forest Service*.

Van Nieuwstadt, M. G., Sheil, D., & Kartawinata, K. (2001). The ecological consequences of logging in the burned forests of East Kalimantan, Indonesia. *Conservation Biology*, *15*(4), 1183-1186.

Vanoni, M., Bugmann, H., Nötzli, M., & Bigler, C. (2016). Quantifying the effects of drought on abrupt growth decreases of major tree species in Switzerland. *Ecology and Evolution*, *6*(11), 3555-3570.

Vejpustková, M., & Čihák, T. (2019). Climate response of douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in central Europe. *Forests*, *10*(2), 97.

Vlassova, L., & Perez-Cabello, F. (2016). Effects of post-fire wood management strategies on vegetation recovery and land surface temperature (LST) estimated from Landsat images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *44*, 171-183.

Voorhees, W. B., & Hendrick, J. G. (1977). Our newest natural resource; compaction good and bad effects on energy needs. *Crops and Soils*.

Voorhees, W. B., Farrell, D. A., & Larson, W. E. (1975). Soil Strength and Aeration Effects on Root Elongation 1. *Soil Science Society of America Journal*, *39*(5), 948-953.

Weert, R. (1974). Influence of mechanical forest clearing on soil conditions and the resulting effects on root growth. *Tropical Agriculture (Trinidad and Tobago)*.

Wohlgemuth, T., Kull, P., & Wüthrich, H. (2002). Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990. *For. Snow Landsc. Res*, *77*(1), 2.

Wurtz, T. L., & Zasada, J. C. (2001). An alternative to clear-cutting in the boreal forest of Alaska: a 27-year study of regeneration after shelterwood harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, *31*(6), 999-1011.

Zenner, E. K., & Berger, A. L. (2008). Influence of skidder traffic and canopy removal intensities on the ground flora in a clearcut-with-reserves northern hardwood stand in Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management*, *256*(10), 1785-1794.

Zenner, E. K., Kabrick, J. M., Jensen, R. G., Peck, J. E., & Grabner, J. K. (2006). Responses of ground flora to a gradient of harvest intensity in the Missouri Ozarks. *Forest Ecology and Management*, *222*(1-3), 326-334.

Zhang, G., Leclerc, M. Y., Karipot, A., Duarte, H. F., Mursch-Radlgruber, E., & Gholz, H. L. (2011). The impact of logging on the surrounding flow in a managed forest. *Theoretical and Applied Climatology*, *106*(3-4), 511-521.

Ziegler, A. D., Negishi, J. N., Sidle, R. C., Noguchi, S., & Nik, A. R. (2006). Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *Catena*, *67*(2), 89-104.

Zielonka, T. (2006). When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement? *Journal of Vegetation Science*, *17*(6), 739-746.