

# Walddynamik im Klimawandel

Modellstudie zeigt: innerartliche Variabilität und Störungsinteraktionen haben bedeutenden Einfluss auf die künftige Waldentwicklung

Klara Dolos und Björn Reineking

**Innerartliche Variabilität und Störungsinteraktionen stellen eine Herausforderung für die Prognose zukünftiger Walddynamik im Klimawandel dar. Modellierungsstudien bilden eine wertvolle Grundlage für ein besseres Verständnis dieser Themenkomplexe und unterstützen daraus abgeleitete wissenschaftlich basierte Handlungsempfehlungen.**



Foto: K. Dolos

Abbildung 1: Windwurf am »Lotharpfad« im Schwarzwald

Wälder sind zeitlich dynamische Ökosysteme, die Lebensraum für eine Vielzahl unterschiedlichster Organismen bieten. Ihre Struktur und Artzusammensetzung werden ausgehend vom lokalen Artenpool von *Umweltfaktoren* wie Klima und Boden sowie von *kurzfristigen Ereignissen*, wie dem Eintreten von Störungen, bestimmt. Die Reaktion eines Waldes auf Umweltveränderungen und die Fähigkeit seine Ökosystemdienstleistungen aufrecht zu erhalten, werden durch die Eigenschaften und das Anpassungspotential der vorkommenden Organismen beeinflusst. Wichtige Arteigenschaften sind beispielsweise *Dürreempfindlichkeit* und *Schattentoleranz*. Für eine Einschätzung der Auswirkungen von Umweltveränderungen wie des Klimawandels werden oftmals *mittlere* Arteigenschaften herangezogen. In realen Ökosystemen unterscheiden sich jedoch *Individuen*, auch innerhalb derselben Art, voneinander (Jung et al. 2010). Daher ist eines der Ziele des Teilprojektes 14 »Auswirkungen klimatischer Extremereignisse auf Störungsregime in Wäldern der Mittel- und Hochgebirge« des Forschungsverbundes FORKAST, herauszufinden, wie sich Prognosen hinsichtlich der zukünftigen Waldentwicklung verändern, wenn die innerartliche Variabilität bezüglich der Dürretoleranz berücksichtigt wird.

Störungsregime und ihre Interaktionen stellen einen weiteren Themenkomplex innerhalb des Projektes dar. Neben mittel- und längerfristigen Schwankungen der Umweltbedingungen prägen insbesondere die Störungsregime *Borkenkäfer*, *Windwurf*, *Dürre* und in Zukunft voraussichtlich verstärkt auch *Feuer* die Dynamik temperater Wälder. Es wird angenommen, dass die einzelnen Störungstypen maßgeblich durch Klima und Waldstruktur bestimmt werden. Prognosen bezüglich der in Zukunft zu erwartenden Störungsregime werden häufig auf dieser Annahme erstellt. Unberücksichtigt bleiben dabei oftmals Interaktionen zwischen Störungen, die zu einer gegenseitigen Verstärkung oder Abschwächung führen können. In einem ersten Schritt wurde daher ein konzeptionelles Modell von Störungsinteraktionen entwickelt. Es formuliert explizit die Annahmen, welche häufig in störungsregimebezogenen Interaktionsstudien getroffen werden, und es ermöglicht, die Konsequenzen dieser Annahmen über Interaktionen abzuschätzen.

In beiden Studien – zur innerartlichen Variabilität und zu Störungsinteraktionen – liegt der methodische Schwerpunkt auf der Modellierung. Modellierung ist ein nützliches Werkzeug, um vorhandenes Wissen über Systeme zu strukturieren, ihre Prozesse besser zu verstehen, um allgemeine Konzepte zu testen und die Konsequenzen von Annahmen bezüglich zukünftigen Verhaltens einzuschätzen. Im Folgenden werden der aktuelle Stand der beiden Studien und vorläufige Ergebnisse zusammengefasst beschrieben.

## Innerartliche Variabilität

Bisher wurde innerartliche Variabilität in Modellierungsansätzen auf Landschaftsebene kaum berücksichtigt und das Potential dieser Variabilität für die Anpassung bestehender Wälder an das für die Zukunft prognostizierte Klima nur unzureichend bewertet. Mittels des Waldlandschaftsmodells *LandClim* (Schumacher und Bugmann 2006a; Schumacher et al. 2006b; Henne et al. 2011) werden derzeit die Auswirkungen innerartlicher Variabilität in der Dürretoleranz auf das Baumwachstum untersucht.

LandClim ist ein räumlich explizites Simulationsmodell, das entwickelt wurde, um die Bedeutung von Klima, Waldbränden und Management für die aktuelle und zukünftige Wald-dynamik zu untersuchen. Es besteht aus einem lokalen Vegetationsmodell für die Waldsukzession und einem Landschaftsmodell für Störungsregime, Management und Samenausbreitung. LandClim simuliert die Waldentwicklung über lange Zeiträume (Jahrhunderte bis Jahrtausende) und große räumliche Ausdehnung von mehreren Quadratkilometern in relativ hoher Auflösung (Raumeinheiten von 25 mal 25 Metern). LandClim wurde in Studien über Wälder der Europäischen Alpen, der Rocky Mountains in Nordamerika und im mediterranen Raum erfolgreich verwendet (Henne et al. 2011; Colombaroli et al. 2010; Cairns et al. 2008).

Durch den modularen Aufbau LandClims war es möglich, den Prozess der Etablierung von Bäumen um ein Modell für die innerartliche Variabilität zu ergänzen. Anstelle eines identischen Wertes für die Dürretoleranz aller Individuen einer Art erhielt jedes Individuum einen Wert für die Dürretoleranz, der zufällig aus einer Verteilung mit festem Mittelwert und Varianz gezogen wird. Dabei dienten die bayerischen Populationen der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) sowie an diese angelehnte Modellarten als Beispiele. Die Konsequenzen der Modellregeln für das Wachstum und den relativen Erfolg von Arten mit unterschiedlicher innerartlicher Variabilität wurden in Simulationsstudien untersucht.

In einer Landschaft, in der Dürre eine Rolle spielte, kam es auf Grund von innerartlicher Variabilität zu einer Verschiebung des realisierten Mittelwertes hin zu größerer Dürretoleranz. Ursache dieser Entwicklung war, dass sich besser angepasste, konkurrenzstärkere Individuen etablierten, welches in diesem Modell immer die dürretoleranteren Individuen waren.

Entlang eines Dürregradienten, der zum Beispiel in Mittelgebirgswäldern mit einem Höhengradienten einhergehen kann, zeigte sich folgendes Muster: In geringer Höhe, wo Dürre in der simulierten Landschaft stärker wachstumshemmend wirkte, hatten Arten mit großer Variabilität bezüglich Dürretoleranz und ansonsten gleichen Eigenschaften eine größere mittlere Biomasse als Arten mit geringer Variabilität. Mit zunehmender Höhe und abnehmender Bedeutung von Dürre wirkte sich große innerartliche Variabilität negativ auf die mittlere Biomasse aus. Dies konnte damit erklärt werden, dass Arten mit einer größeren Variabilität in höheren Lagen keinen Vorteil mehr auf Grund größerer Dürretoleranz erzielen konnten. In höheren Lagen hatten sie sogar einen Konkurrenznachteil, wenn sich durch Zufall nur schlecht angepasste Individuen in einer Raumeinheit befanden. Die Strategie, mittels innerartlicher Variabilität flexibel auf die Umwelt reagieren zu können, war damit bei günstigen Wuchsbedingungen risikoreicher.

In einem nächsten Schritt soll die Robustheit dieser Ergebnisse bezüglich der spezifischen Modellregeln zur innerartlichen Variabilität geprüft sowie das Ausmaß innerartlicher Variabilität in realen Wäldern für Rotbuche und Fichte abgeschätzt werden.



Foto: M. Steinbauer

Abbildung 2: Borkenkäfer-Flächen im Bayerischen Wald

## Interaktionen zwischen Störungsregimen

Jedes Waldökosystem besitzt eine eigene Kombination aus Störungsregimen, die Waldstruktur und Verjüngung wesentlich beeinflusst (Dale et al. 2000). Für Bayern von besonderer Bedeutung sind Borkenkäferkalamitäten (Abbildung 2), deren Dynamik noch unzureichend verstanden ist und nur eingeschränkt prognostiziert werden kann. Der Lebenszyklus von Borkenkäfern ist stark temperaturabhängig. Tendenziell entwickeln sich Borkenkäferlarven schneller unter wärmeren Bedingungen und ihre Sterblichkeit sinkt (Wermelinger 2004). Zusätzlich ist die Populationsdynamik potentiell von den Störungen Windwurf, Dürre und Feuer beeinflusst, deren Häufigkeit und Intensität sich wahrscheinlich mit dem Klima verändern werden. Interaktionen zwischen Störungsregimen und mögliche positive wie negative Rückkoppelungen machen eine Abschätzung von Risiken für Wälder unter dem zukünftig erwarteten Klima zu einer Herausforderung.

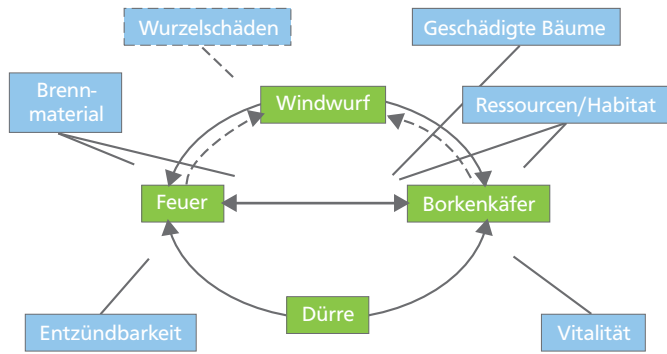


Abbildung 3: Mögliche Interaktionen zwischen den wichtigsten Wald-Störungsregimen

Bisherige Studien erlaubten es, ein Konzept der Interaktionen zwischen den vier wichtigsten Störungsregimen Borkenkäfer, Windwurf, Dürre und Feuer zu entwerfen (Abbildung 3). Viele empirische Studien ermöglichten aber lediglich eine qualitative Einschätzung der jeweils untersuchten Interaktion (Veblen et al. 1994). Darüber hinaus wurden in Feldstudien sehr verschiedene Methoden eingesetzt, unterschiedliche Kenngrößen erhoben (Hebertson und Jenkins 2008; Okland und Berryman 2004) und uneinheitliche Zeit- und Raumskalen betrachtet (Bigler et al. 2005; Schroeder und Lindelow 2002), so dass ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Studien erschwert wurde. Ein quantitativer Vergleich von Ergebnissen verschiedener Studien ist jedoch wesentlich um abzuschätzen, ob die angesprochenen Interaktionen von ökologischer und ökonomischer Bedeutung sind. Darüber hinaus ermöglicht das Wissen um den Zusammenhang zwischen Störungen die Prognose zukünftiger ökologischer Zustände (z.B. bezüglich der Altersstruktur eines Bestandes).

Um zu einem besseren Verständnis dieses Systems von Störungsregimen und ihren Wechselwirkungen beizutragen, wurde das Konzept der Störungsinteraktionen im Rahmen eines strukturell einfachen, zeitlich diskreten mathematischen Modells formuliert, das mit Standardmethoden analysiert werden konnte. Dabei zeigte sich, dass auch dann ein stabiles Gleichgewicht zwischen Waldbestand und Störungsflächen entstehen konnte, wenn sich alle Störungen gegenseitig verstärken.

In einem nächsten Schritt sollen die Ergebnisse dieses strategischen Störungsinteraktionsmodells mit Simulationsstudien des Landschaftsmodells LandClim, in dem die Störungen Borkenkäfer, Windwurf, Dürre und Feuer repräsentiert sind, in Situationen realistischer Komplexität überprüft werden.

Die beiden vorgestellten Studien verdeutlichen, dass die Auswirkungen von innerartlicher Variabilität und Störungsinteraktionen auf die zukünftige Waldentwicklung ein spannendes Forschungsfeld darstellen. Erste Ergebnisse zeigten, dass beide Themen einen Einfluss auf die Prognose zukünftiger Walddynamik im Klimawandel haben und daher ein verbessertes Verständnis dieser Prozesse wichtig für die Ableitung sinnvoller Handlungsempfehlungen ist.

Literatur

Bigler, C.; Kulakowski, D.; Veblen, T. (2005): Multiple disturbance interactions and drought influence fire severity in rocky mountain subalpine forests. *Ecology* 86, S. 3018–3029

Cairns, D.; Lafon, C.; Waldron, J.; Tchakerian, M.; Coulson, R.; Klepzig, K.; Birt, A.; Xi, W. (2008): *Simulating the reciprocal interaction of forest landscape structure and southern pine beetle herbivory using LANDIS*. *Landscape Ecology* 23, S. 403–415

Colombaroli, D.; Henne, P.; Kaltenrieder, P.; Gobet, E.; Tinner, W. (2010): *Species responses to fire, climate and human impact at tree line in the Alps as evidenced by palaeo-environmental records and a dynamic simulation model*. *Journal of Ecology* 98, S. 1346–1357

Dale, V.; Joyce, L.; McNulty, S.; Neilson, R. (2000): *The interplay between climate change, forests, and disturbances*. *Science of the Total Environment* 262, S. 201–204

Hebertson, E.; Jenkins, M. (2008): *Climate factors associated with historic spruce beetle (Coleoptera Curculionidae) outbreaks in Utah and Colorado*. *Environmental Entomology* 37, S. 281–292

Henne, P.; Elkin, C.; Reineking, B.; Bugmann, H.; Tinner, W. (2011): *Did soil development limit spruce (Picea abies) expansion in the Central Alps during the Holocene? Testing a palaeobotanical hypothesis with a dynamic landscape model*. *Journal of Biogeography* 38, S. 933–949

Jung, V.; Violle, C.; Mondy, C.; Hoffmann, L.; Muller, S. (2010): *Intraspecific variability and trait-based community assembly*. *Journal of Ecology* 98, S. 1134–1140

Okland, B.; Berryman, A. (2004): *Resource dynamic plays a key role in regional fluctuations of the spruce bark beetles Ips typographus*. *Agricultural and Forest Entomology* 6, S. 141–146

Schroeder, L.; Lindelow, A. (2002): *Attacks on living spruce trees by the bark beetle Ips typographus (Col. Scolytidae) following a storm-felling: a comparison between stands with and without removal of wind-felled trees*. *Agricultural and Forest Entomology* 4, S. 47–56

Schumacher, S.; Bugmann, H. (2006a): *The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps*. *Global Change Biology* 12, S. 1435–1450

Schumacher, S.; Reineking, B.; Sibold, J.; Bugmann, H. (2006b): *Modeling the impact of climate and vegetation on fire regimes in mountain landscapes*. *Landscape Ecology* 21, S. 539–554

Veblen, T.; Hadley, K.; Nel, E.; Kitzberger, T.; Reid, M.; Villalba, R. (1994): *Disturbance Regime and Disturbance Interactions in a Rocky Mountain Subalpine Forest*. *Journal of Ecology* 82, S. 125–135

Wermelinger, B. (2004): *Ecology and management of the spruce bark beetle Ips typographus - a review of recent research*. *Forest Ecology and Management* 202, S. 67–82

Klara Dolos promoviert an der Juniorprofessur Biogeographische Modellierung im Rahmen des Teilprojekts 14 »Auswirkungen klimatischer Extremereignisse auf Störungsregime in Wäldern der Mittel- und Hochgebirge« des Forschungsverbundes FORKAST. [klara.dolos@uni-bayreuth.de](mailto:klara.dolos@uni-bayreuth.de)  
 Prof. Dr. Björn Reineking ist Juniorprofessor für Biogeographische Modellierung an der Universität Bayreuth. [bjorn.reineking@uni-bayreuth.de](mailto:bjorn.reineking@uni-bayreuth.de)