

DISS. ETH NO. 21447

**Spatio-temporal infestation dynamics of the European spruce bark beetle  
in Switzerland: quantifying environmental drivers and effects of forest  
management**

A dissertation submitted to to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Golo Stadelmann

MSc ETH Environ. Sc.

Born on 13.08.1982

citizen of Kriens (LU) & Escholzmatt-Marbach (LU)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner

Dr. Christof Bigler, co-examiner

Dr. Beat Wermelinger, co-examiner

Prof. Dr. Axel Schopf, co-examiner

2013

## Summary

Disturbances affect the development of forest ecosystems and are therefore key factors of forest dynamics. Climate variability can modify biotic and abiotic disturbance regimes by altering their frequency, intensity and severity. Increasing summer temperatures, for example, may accelerate the life cycle of detrimental insects and pathogens. In forests of Central Europe and Scandinavia, the European spruce bark beetle (*Ips typographus*) is the most devastating biotic disturbance agent of Norway spruce (*Picea abies*), which accounted for roughly 10% of the forest damages between 1950 and 2000 in Central Europe. Storm damages and other disturbances such as drought are key triggering factors of bark beetle outbreaks, as they result in ample supply of initial breeding material. Therefore, foresters aim to reduce bark beetle damage by preventing outbreaks, i.e., by salvage logging of storm-damaged timber and lowering damages by sanitation felling of infested trees. In 1999, the storm Lothar damaged 8 000 000 m<sup>3</sup> of Norway spruce in the Swiss lowlands, and despite control measures, roughly the same volume of timber was infested by *I. typographus* in the subsequent years. However, our quantitative understanding of the drivers of bark beetle infestations is still rather limited.

Thus, the overall objective of this thesis is to better understand the factors determining the spatio-temporal dynamics of the European spruce bark beetle. Particular emphasis is placed on (i) the quantification of environmental variables determining the spatio-temporal pattern of bark beetle infestations across Switzerland at a rather coarse scale (i.e., at the level of forest districts); (ii) the effects of management control measures against new bark beetle infestations in subsequent years; and (iii) the identification of environmental variables that explain the spatial pattern of storm damage and bark beetle infestations at a fine scale.

In Chapter I, I quantified the drivers of bark beetle infestations using a spatio-temporal survey dataset with annual resolution covering 17 years and 469 forest districts across Switzerland. Applying Poisson log-normal models in a Bayesian framework, I found that bark beetle infestations increased with increasing heat sum, volume of standing Norway spruce stock, and the increasing number of infestation spots in the previous year, with heat sum being the most important and consistent predictor. This study is a contribution towards quantifying the combined effects of various environmental variables on bark beetle infestations.

The effectiveness of management measures against bark beetle infestations are discussed controversially in forest practice, but it has not yet been analyzed thoroughly and quantitatively. Thus, in Chapter II, I analyzed a survey dataset with annual resolution including 9 years and 487 forest districts across Switzerland to quantify the drivers of bark beetle infestations, in particular salvage logging of storm-damaged timber and sanitation felling of bark-beetle infested spruce. Statistical analyses based on Poisson log-normal models predicted increasing bark beetle infestations with increasing storm damage, heat sum, Norway spruce stock and the number of infestation spots in the previous year. In contrast, infestation risk decreased with increasing proportions of sanitation felling relative to the total volume of infested spruce, and with increasing proportions of salvaged windthrown spruce. Sanitation felling and salvage logging clearly reduce the emergence of new infestation spots. However, in regions with large-scale storm damage, bark beetle outbreaks cannot be prevented entirely. Nevertheless, salvage

logging of damaged timber in the summer after a storm is a suitable management measure to reduce the number of subsequent bark beetle infestations.

Our understanding of the spatial dispersal of bark beetle infestations at finer scales is still quite limited. In Chapter III, I used a point pattern dataset from a 180 km<sup>2</sup> study area in the Napf region to analyze the emergence pattern of new bark beetle infestations and to quantify the spatial patterns of bark beetle infestations and storm damage. Infestations of *I. typographus* were found to be clustered at short distances (<500 m), while the spatial distribution of the storm damages was randomly distributed and could be explained by environmental covariates. Increasing topographic exposure, south- and west-facing slopes as well as increasing proportion of Norway spruce enhanced the probability of both storm damage and bark beetle infestations. This study is a contribution to assess predisposing factors of bark beetle infestations in a spatially explicit manner.

The study of large-scale datasets on bark beetle infestations allowed me to quantify environmental drivers of bark beetle dispersal that have been known qualitatively for quite a long time. Although large-scale outbreaks triggered by storm damage cannot be prevented entirely, management measures reduce the risk of further bark beetle infestations. Especially on predisposed sites, a more natural forest structure and tree species composition may hinder large-scale availability of susceptible breeding material at lower elevations. Heat sum turned out to be one of the most important factors determining the dispersal of bark beetle infestations. Because of the expected changing climate, the frequency of storm damage and the heat sum may increase and thus, these factors may become more important in the coming decades, with the consequence of possibly increasing the risk of large-scale outbreaks by the European spruce bark beetle.

## Zusammenfassung

Störungen beeinflussen die Entwicklung von Waldökosystemen und sind deshalb Schlüsselfaktoren der Walddynamik. Klimavariabilität kann biotische und abiotische Störungsregimes verändern, indem Frequenz, Intensität und Schadensausmass variiert werden. Zum Beispiel beschleunigen steigende Sommertemperaturen den Lebenszyklus von schädlichen Insekten und Pathogenen. In den Wäldern Zentraleuropas und Skandinaviens ist der Buchdrucker (*Ips typographus*) der schädlichste biotische Störungsakteur an der Fichte (*Picea abies*), welcher zwischen 1950 und 2000 ungefähr 10% aller Waldschäden Mitteleuropas verursacht hat. Sturmschäden und andere Störungen wie zum Beispiel Dürre sind auslösende Schlüsselfaktoren von Borkenkäferausbrüchen, weil sie genügend befallsfähiges Brutmaterial zur Verfügung stellen. Daher versuchen Förster Borkenkäferschäden einzuschränken, indem sie Massenvermehrungen durch das Räumen von Sturmschäden vorbeugen und indem sie das Schadensausmass durch Zwangsnutzungen von befallenen Bäumen beschränken. Im Jahr 1999 beschädigte der Sturm Lothar im Schweizer Mittelland 8 000 000 m<sup>3</sup> Fichtenholz, was in den Folgejahren trotz Kontrollmassnahmen zum Befall von ungefähr der gleichen Holzmenge geführt hat. Das quantitative Verständnis der Treiber von Borkenkäferbefällen ist jedoch immer noch ziemlich limitiert.

Entsprechend ist es das Hauptziel dieser Dissertation besser zu verstehen, welche Faktoren die räumliche und zeitliche Dynamik des Buchdruckers steuern. Spezielle Schwerpunkte liegen auf (i) der Quantifizierung von Umweltvariablen, welche die räumlichen und zeitlichen Muster von Borkenkäferbefällen in der Schweiz auf einer eher groben Massstabebene (d.h. auf der Ebene von Forstrevieren) bestimmen; (ii) der Wirksamkeit von Kontrollmassnahmen gegen Borkenkäferbefall in Folgejahren; und (iii) der Bestimmung von Umweltvariablen, welche die räumlichen Muster von Sturmschaden und Käfernestern auf einer feinen Skala erklären.

In Kapitel I habe ich einen Erhebungsdatensatz mit jährlicher Auflösung über 17 Jahre und Schweizweiter Ausdehnung über 469 Forstreviere verwendet, um die Treiber von Buchdruckerbefall zu quantifizieren. Mittels Poisson log-normalen Modellen unter bayesianischem Ansatz habe ich herausgefunden, dass Borkenkäferbefälle mit ansteigender Wärmesumme, Fichtenvorrat und Anzahl von Käfernestern im Vorjahr zunehmen. Dabei ist die Wärmesumme der wichtigste und konsistenteste Prädiktor. Diese Studie ist ein Beitrag zur Quantifizierung der kombinierten Effekte von zahlreichen Umweltvariablen auf Borkenkäferbefälle.

Die Wirksamkeit des forstlichen Managements gegenüber Borkenkäferbefällen wird immer wieder kontrovers diskutiert, ist bisher aber noch nicht gründlich auf einer quantitativen Basis untersucht worden. Daher habe ich in Kapitel II einen Erhebungsdatensatz mit jährlicher Auflösung über einen Zeitraum von 9 Jahren aus 487 Forstrevieren dazu verwendet, um die Treiber von Buchdruckerbefällen zu quantifizieren. Dabei habe ich insbesondere die Wirkung von Sturmschadenräumung und die Zwangsnutzung von Käferholz untersucht. Statistische Analysen basierend auf Poisson log-normalen Modellen sagten bei einer Zunahme von Sturmschäden, Wärmesumme, Fichtenvorrat und der Anzahl Käfernester des Vorjahres zunehmende Borkenkäferbefälle voraus. Im Gegensatz dazu nahm das Befallsrisiko mit zunehmendem Zwangsnutzungsanteil relativ zum Volumen der befallenen Fichten

und mit zunehmendem Räumungsanteil des Fichtensturmholzes ab. Zwangsnutzungen von befallenen Fichten und das Räumen von Sturmschäden reduzieren das Vorkommen von neuen Käfernestern deutlich. In Regionen mit grossflächigen Sturmschäden können Massenvermehrungen des Buchdruckers jedoch nicht komplett verhindert werden. Dennoch ist das Räumen von Schadholz im Sommer nach einem Sturmereignis eine geeignete Managementmassnahme, um die Anzahl Käfernester im Folgejahr zu reduzieren.

Unser Verständnis der räumlichen Ausbreitung von Buchdruckern auf einer feinen Skala ist noch immer ziemlich limitiert. In Kapitel III habe ich einen Punktmusterdatensatz aus einem 180 km<sup>2</sup> grossen Untersuchungsgebiet in der Napfregion verwendet, um das Ausbreitungsmuster von neuen Borkenkäferbefällen zu untersuchen und die räumlichen Muster von Borkenkäferbefall und Sturmschäden zu quantifizieren. Befälle von *I. typographus* traten in kurzen Distanzen bis 500 m geklumpt auf, während die Sturmschäden zufällig verteilt waren und zudem mit Umweltvariablen erklärt werden konnten. Zunehmende topographische Exponiertheit, Süd- und Westhänge sowie zunehmende Fichtenanteile erhöhten die Wahrscheinlichkeit von Sturmschäden und Buchdruckerbefall. Diese Studie leistet einen Beitrag zur räumlich expliziten Beurteilung von prädisponierenden Faktoren für zukünftige Buchdruckerschäden.

Die Untersuchung von gross-skaligen Datensätzen zu Buchdruckerbefall ermöglichte es mir, Treiber der Borkenkäferausbreitung zu quantifizieren, welche auf qualitativer Ebene bereits ziemlich lang bekannt waren. Obwohl durch Sturmschäden ausgelöste, grossflächige Buchdruckerbefälle nicht vollständig verhindert werden können, reduzieren forstliche Eingriffe gegen Buchdruckerbefall jedoch das Risiko von Folgebefall. Besonders an prädisponierten Standorten in Tieflagen kann eine natürlichere Waldstruktur und Baumartenzusammensetzung die grossflächige Verfügbarkeit von befallsfähigem Brutmaterial verhindern. Die Wärmesumme stellte sich als einer der wichtigsten Faktoren heraus, welche die Ausbreitung von Käfernestern bestimmen. Wegen des erwarteten Klimawandels dürften die Frequenz von Sturmschäden und die Wärmesumme zunehmen und folglich dürften diese Faktoren in den nächsten Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen, weshalb Massenvermehrungen des Buchdruckers zunehmen könnten.