

Windwurf und Borkenkäferepidemien im Alptal nach Vivian und Lothar

Marc Scherstjanoi Landnutzungsdynamik, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Urs Gimmi Landnutzungsdynamik, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Annett Wolf Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)
Harald Bugmann Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)

Windthrow and bark beetle attacks in the Alptal after the wind storms Vivian and Lothar

After the strong winter storms Vivian (1990) and Lothar (1999), many Swiss forests have been severely infested by bark beetles. Based on detailed forest management information from 28 forest compartments this study tested a set of potential explanatory variables as predictors for the occurrence of bark beetle damage in the Alptal valley (northern Swiss Prealps). For each storm we developed a separate multiple linear regression model. Bark beetle occurrence was measured as the sum of insect-damaged wood within five years after the winter storms. Two predictors (wind-damaged wood during a winter storm and occurrence of adult spruce) explained more than 50% of the variance of bark beetle occurrence. Our results support the idea that windthrow damage is highly conducive to subsequent bark beetle attack of the surrounding forests. Additionally, the occurrence of larger spruce trees (diameter at breast height > 40 cm) explains a significant fraction of the remaining variance of bark beetle occurrence, which underpins the importance of forest age structure for windthrow and insect damage as causes of tree death. Methodologically, our study highlights the value of historical forest management data in the context of ecological modeling.

Keywords: Lothar, Vivian, bark beetle, windthrow, modeling
doi: 10.3188/szf.2010.0036

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail marc.scherstjanoi@wsl.ch

Die zwei grossen Sturmereignisse der jüngeren Vergangenheit, Vivian am 27. Februar 1990 und Lothar am 26. Dezember 1999, führten in vielen Wäldern der Schweiz zu massiven Schäden. Von den beiden Orkanen war ein erheblicher Teil der Schweizer Waldfläche betroffen. Das grosse Ausmass der Schäden wurde unter anderem dadurch begünstigt, dass der Holzvorrat in der Schweiz in den Jahrzehnten zuvor stark zugenommen hatte (Brassel & Brändli 1999, Usbeck et al 2009). Dadurch waren die Wälder entsprechend anfällig für Windwurf.

Die Waldschäden entstanden entweder direkt durch Windwurf oder durch das darauf folgende Wirken von Insekten. Bei den Insektenfolgeschäden handelte es sich fast ausschliesslich um Schäden durch Borkenkäfer. Die häufigste Borkenkäferart ist der Buchdrucker (*Ips typographus*), der sich in Fichtenwäldern unter bestimmten Voraussetzungen massenhaft vermehrt. Von 1950 bis 2000 hatten europaweit 53% der natürlichen Waldschäden ihren Ursprung in Sturmereignissen (Schelhaas et al 2003), während Borkenkäfer in diesem Zeitraum für 8% der natürlichen Waldschäden verantwortlich waren (Schelhaas

et al 2003). Insekten dürften derzeit neben Wind die wichtigste natürliche «Störung» in den Wäldern Europas darstellen (Requart et al 2007, zitiert in Rigling et al 2008).

In der Schweiz sind bei Vivian und Lothar insgesamt etwa 18.5 Mio. m³ Holz geworfen worden (Rigling et al 2008). Das entspricht rund 3.5% des nationalen Holzvorrates (Brassel & Brändli 1999). Besonders in den Wäldern der Voralpen haben beide Westwindstürme sehr starke Forstschäden hervorgerufen (WSL & BUWAL 2001, Forster et al 2003). Beispielsweise wurden durch die zwei Sturmereignisse über 8% des gesamten Waldbestandes des Alptals im Kanton Schwyz beschädigt und danach forstwirtschaftlich genutzt (Gimmi et al 2009).

In den betroffenen Gebieten der Alpen fiel zusätzlich zum Windwurfholz eine grosse Menge an Käferholz an. Diese entsprach nach Vivian, in den Jahren von 1990 bis 1994, etwa 30% der Menge des Windwurfholzes (Frey et al 1995). Nach Lothar betrug die Gesamtmenge des vom Borkenkäfer betroffenen Holzes mehr als die Hälfte der Menge des Sturmholzes (Rigling et al 2008). Dieses Verhältnis konnte in etwa auch im Alptal beobachtet werden:

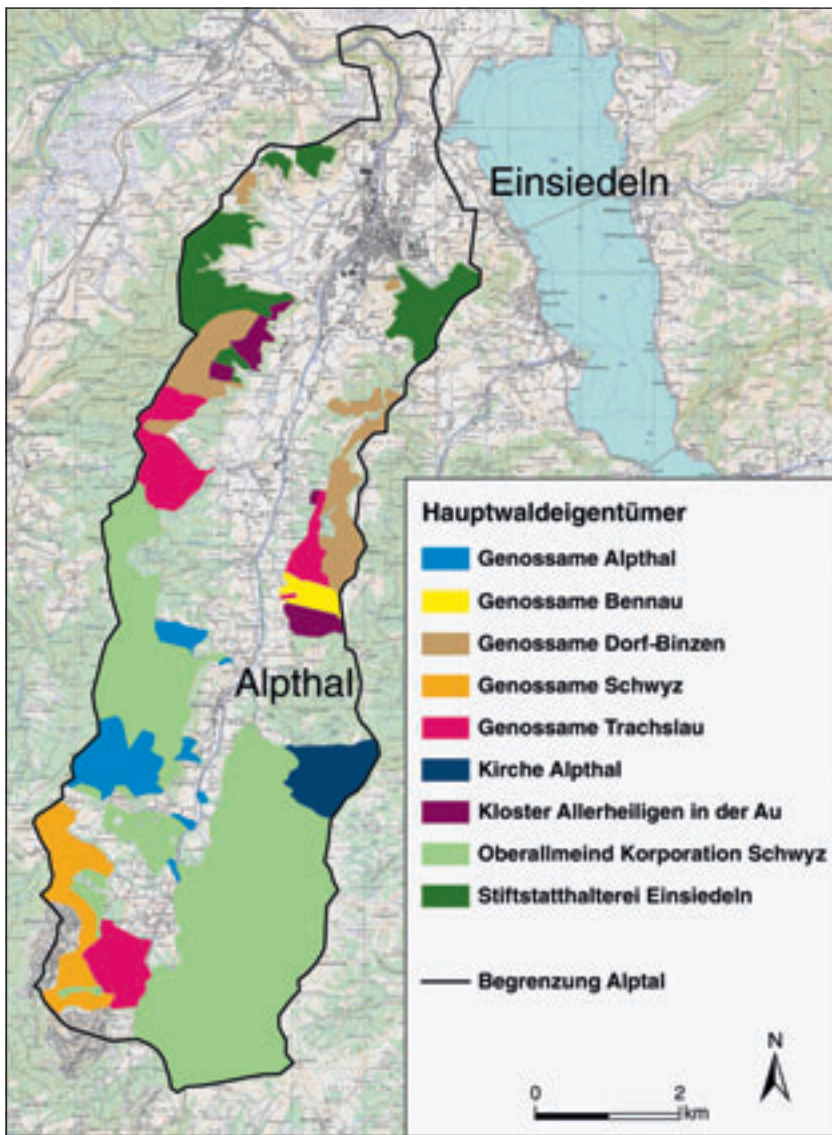


Abb 1 Karte des Alptals mit den zwei grössten Gemeinden Einsiedeln und Alpthal und den Gebieten der neun grösseren Waldeigentümer. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA100024).

Die Borkenkäferschäden machten nach Vivian ein Drittel des Windwurfholzes aus, nach Lothar waren die Insektenschäden im Alptal etwa halb so gross wie die durch Windwurf entstandenen Schäden (Gimmi et al 2009).

Mit der vorliegenden Studie wollten wir ermitteln, inwiefern sich die Mengen an Schadholz, welche durch Borkenkäferbefall verursacht wurden, durch andere Bestandesfaktoren vorhersagen lassen. Als Fallstudie untersuchten wir die Käferschäden im Alptal nach den Stürmen Lothar und Vivian. Dazu analysierten wir, in welchem Masse die Käferschäden vom Sturmschaden, von den Bestandeseigenschaften (Vorrat, Altersstruktur) und von klimatischen Faktoren abhängen und welcher dieser Faktoren für die Vorhersage der Käferschäden am wichtigsten war.

Methoden

Untersuchungsgebiet

Unser Untersuchungsgebiet ist das Alptal (8°43'E, 47°05'N). Es umfasst das Einzugsgebiet der Alp bis zur Pegelstation «Alp-Einsiedeln». Die höch-

ten Erhebungen im Alptal sind mit knapp 1900 m über dem Meeresspiegel die Mythen am südlichen Ende des Tales. Von den Mythen erstreckt sich das Tal nordwärts auf über 14 km Länge. An der westlichen und östlichen Seite wird das Tal von zwei Bergkämmen begrenzt, sodass die Ost-West-Ausdehnung etwa 4 km beträgt. Gemäss der Schweizerischen Arealstatistik (BFS 2001) sind 52% des Alptales bewaldet. Das Untersuchungsgebiet umfasst die Höhenstufen der Tannen-Buchen-Wälder und Tannen-Fichten-Wälder. Da ein Grossteil der Bestände aus Aufforstungen besteht, ist die Fichte mit fast 80% der Bäume die häufigste Baumart. Auf die Tanne entfallen etwa 20%. Vor allem in den tieferen Lagen kommen auch Buchen vor (Gimmi et al 2009).

Fast 70% der bewaldeten Fläche, ungefähr 2300 ha, verteilen sich auf neun grössere Waldeigentümer (Abbildung 1). In unserer Untersuchung beschränken wir uns auf diese Fläche, da hierfür detaillierte Bestandesinformationen und Bewirtschaftungsdaten vorhanden sind. Die Oberallmeind-korporation Schwyz ist die grösste Waldbesitzerin (Gimmi et al 2009). Auf sie entfällt über die Hälfte der untersuchten Waldgebiete. Die restlichen 30% des Waldes sind auf eine Vielzahl von privaten Eigentümern verteilt. Für diese Flächen sind aber leider keine Bewirtschaftungsdaten vorhanden.

Quantifizierung des Schadholzes

Von den Waldflächen der neun grössten Waldbesitzer gibt es ausführliche Wirtschaftspläne, aus denen die forstwirtschaftlichen Daten abgeleitet wurden. Wie aus den Wirtschaftsplänen hervorgeht, wurden die durch Störungen angefallenen Mengen Schadholz weitgehend genutzt (Zwangsnutzungen). Die Angaben über die Zwangsnutzungen wurden den Nutzungskontrollen entnommen, welche in den Waldwirtschaftsplänen enthalten sind. Die räumliche Auflösung der Daten ist an die Grösse der Waldabteilungen gebunden. Die Zwangsnutzungen konnten insgesamt 40 Abteilungen der neun Hauptwaldeigentümer zugewiesen werden. Diese wurden von uns zu 28 gleichrangigen Waldflächen zusammengefasst, damit die Flächengrössen der Untersuchungseinheiten vergleichbar wurden. Die Abteilungsgrössen reichen von 19 bis 230 ha. Die Abteilungsgrößen sind in Abbildung 2 ersichtlich.

Statistische Auswertung der Borkenkäferschäden

Das Ziel der Auswertung war es, die von Borkenkäfern verursachte Schadenmenge mit statistischen Methoden zu erklären. Wir verwendeten dafür eine multiple lineare Regression, wobei die beiden Stürme Vivian und Lothar jeweils separat untersucht wurden. Als abhängige Variablen für die statistische Untersuchung benutzten wir die Mengen des durch Insekteneinwirkung entstandenen Schadhol-

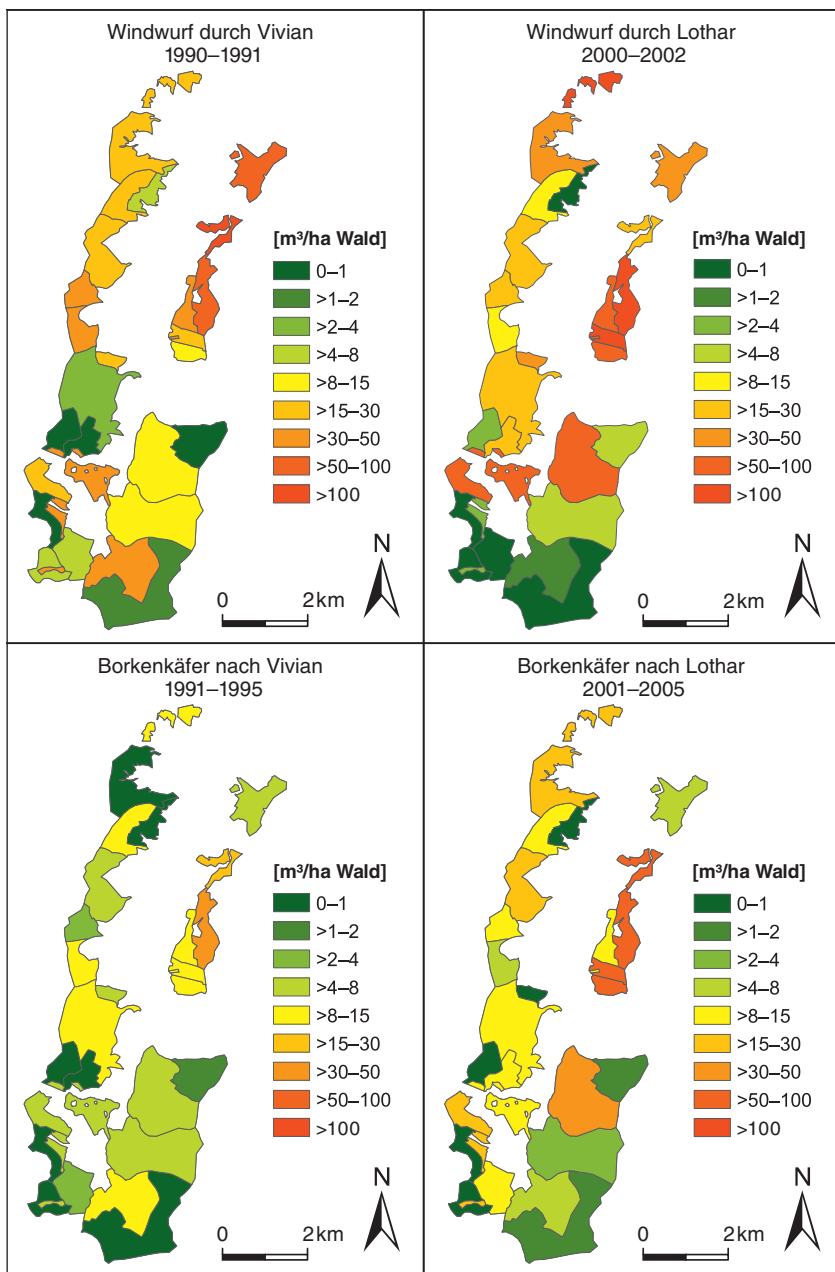


Abb 2 Zwangsnutzung von Windwurf- und Borkenkäferschäden als Folge von Vivian und Lothar. Alle Angaben in m^3 Schadholz/ha Wald.

zes (m^3 Schadholz/ha) der ersten fünf Jahre nach dem jeweiligen Sturmereignis (1991 bis 1995 für Vivian und 2001 bis 2005 für Lothar).

Unter der Annahme, dass vom Wind geworfenes Holz eine wichtige Grundlage für die Massenvermehrung des Borkenkäfers bildet, wurde die Menge des durch Windwurf entstandenen Schadholzes (m^3 Schadholz/ha) als erste unabhängige Variable verwendet. Eine erste grafische Auswertung bestätigte den Zusammenhang zwischen Windwurfschäden und dem Auftreten von Schadinsekten (Abbildung 2). Für Vivian wurden die aufgerüsteten Windwurfmengen von 1990 und 1991 aufsummiert. Nach Lothar wurde auch noch im dritten Jahr überdurchschnittlich viel Windwurfholz in den Nutzungskontrollen der Waldwirtschaftspläne verzeichnet, ohne dass ein neues Sturmereignis aufgetreten ist. Deshalb nahmen wir an, dass die Arbeiten zur Beseitigung des Windwurfholzes nach Lothar länger andauerten als nach Vivian, und wählten für die

Erfassung der Windwurfmenge einen Zeitraum von drei Jahren (2000 bis 2002). Die Schadholzmengen wurden logarithmisch transformiert, da ihre Häufigkeitsverteilung sehr stark von einer Normalverteilung abweicht. Da auch null als Wertangabe vorkommt (kein Schaden), wurde vor der Log-Transformierung zu den Schadenswerten der Wert 1 addiert.

Der Nadelholzvorrat ist ein entscheidendes Kriterium bei der Verbreitung von Borkenkäfern (Nüsslein et al 2000). Da im Alptal fast ausschliesslich Nadelholz wächst, wurde der Gesamtholzvorrat in die Untersuchung aufgenommen, um den Nadelholzvorrat zu repräsentieren. Der Buchdrucker ist auf Fichten spezialisiert und für den überwiegenden Teil der Borkenkäferschäden verantwortlich (Rigling et al 2008). Deshalb wurde der Vorrat von Fichtenholz ebenfalls als unabhängige Variable verwendet. Ausserdem bevorzugten Buchdrucker grosse Fichten (Wermelinger 2004). Deshalb wurden der Vorrat von Fichten mit über 30 cm Brusthöhendurchmesser (BHD) und jener von Fichten mit über 40 cm BHD als zusätzliche unabhängige Variablen verwendet.

Die Entwicklungsgeschwindigkeit der Insekten als wechselwarme Organismen hängt sehr stark von der Temperatur ab (Wermelinger & Seifert 1999, Wermelinger 2004, Baier et al 2007, Raffa et al 2008). Weil dazu aber keine detaillierten Daten zur Verfügung standen, wurde stellvertretend die mittlere Höhe über dem Meeresspiegel als unabhängige Variable einbezogen, in der Annahme, dass die Entwicklungsbedingungen für Insekten in tieferen Lagen günstiger sind. Als weitere topografische Merkmale gingen Angaben über die durchschnittliche Neigung und die durchschnittliche Exposition der Abteilungen in die Untersuchung ein.

Um ein Bild der gegenseitigen Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Variablen zu erhalten, wurden Korrelationskoeffizienten zwischen ihnen ermittelt. Weiter wurde der partielle Determinationskoeffizient ermittelt, welcher angibt, wie viel der Restvarianz durch eine bestimmte Variable erklärt werden kann, nachdem alle anderen unabhängigen Variablen schon betrachtet worden sind. Wenn die unabhängigen Variablen stark miteinander korrelieren, so trägt jede weitere Variable nur noch wenig zur Erhöhung des Erklärungswertes bei.

Aus mehreren statistischen Modellen mit unterschiedlichen Kombinationen der unabhängigen Variablen wurde das jeweils am besten geeignete Modell für Vivian und Lothar ausgewählt, wobei das korrigierte Bestimmtheitsmass (B) als Kriterium verwendet wurde. Das Bestimmtheitsmass gibt an, wie viel der statistischen Varianz durch ein Modell erklärt wird. Die Korrektur dient dazu, die Zahl der unabhängigen Variablen zu berücksichtigen. In der Folge wurde mit t-Tests untersucht, welche Prädiktoren signifikant zur Beschreibung des Auftretens der Insektenschäden beitragen.

Verwendete Software

Alle kartografischen Abbildungen wurden mit ESRI ArcGIS v9.3 erstellt. Für die statistischen Analysen und die dreidimensionalen Koordinatensysteme der Insektenschäden in Abhängigkeit der Windschäden und der Vorräte an grossen Fichten verwendeten wir die Statistiksoftware R Version 2.8.1.¹ Die dreidimensionalen Koordinatensysteme wurden mithilfe des Zusatzpaketes Scatterplot3d² erstellt.

Resultate

Die beiden Sturmereignisse zeigten eine Reihe von Gemeinsamkeiten. Die Schadenmenge durch Windwurf war die wichtigste unabhängige Variable, um die Menge an Insektenschäden zu erklären. Diese Vermutung wurde durch die hohen Korrelationen zu den Insektenschäden bestätigt (Tabellen 1 und 2).

	H	WS	IS	V _{Fi}	V _{Fi,30}	V _{Fi,40}	V _{tot}
H	1						
WS	-0.56	1					
IS	-0.34	0.78	1				
V _{Fi}	-0.24	0.62	0.58	1			
V _{Fi,30}	-0.24	0.61	0.60	0.97	1		
V _{Fi,40}	-0.18	0.56	0.58	0.82	0.92	1	
V _{tot}	-0.56	0.70	0.53	0.85	0.83	0.68	1

Tab 1 Korrelationstabelle für Vivian für alle untersuchten Variablen.

H: Höhe über Meer (m)
 WS: Windwurfschadholz pro Hektar Wald, logarithmiert ($\ln[(m^3/ha)+1]$)
 IS: Insektenschadholz pro Hektar Wald, logarithmiert ($\ln[(m^3/ha)+1]$), abhängige Variable
 V_{Fi}: Holzvorrat Fichte gesamt (m³/ha)
 V_{Fi,30}: Holzvorrat Fichte BHD > 30 cm (m³/ha)
 V_{Fi,40}: Holzvorrat Fichte BHD > 40 cm (m³/ha)
 V_{tot}: Gesamtvorrat (m³/ha)
 fett: Beträge der Korrelationen ≥ 0.5 , farbig: Beträge der Korrelationen ≥ 0.75

	H	WS	IS	V _{Fi}	V _{Fi,30}	V _{Fi,40}	V _{tot}
H	1						
WS	-0.31	1					
IS	-0.28	0.69	1				
V _{Fi}	-0.18	0.11	0.33	1			
V _{Fi,30}	-0.17	0.06	0.34	0.98	1		
V _{Fi,40}	-0.12	-0.05	0.30	0.81	0.91	1	
V _{tot}	-0.33	0.21	0.28	0.79	0.82	0.74	1

Tab 2 Korrelationstabelle für Lothar für alle untersuchten Variablen. Erläuterungen siehe Tabelle 1.

Die Variablen, welche die Holzvorräte beschreiben (Holzvorrat Fichte gesamt, Holzvorrat Fichte BHD > 30 cm, Holzvorrat Fichte BHD > 40 cm und Gesamtvorrat), korrelierten sehr stark miteinander (Tabelle 1). Darum wurde für die statistischen Modelle nur eine dieser Variablen ausgewählt. Von diesen vier Variablen korrelierten die jeweiligen Vorräte

von Fichten mit BHD > 30 cm am stärksten mit den Insektenschäden, wogegen der Gesamtvorrat am wenigsten mit den Insektenschäden korrelierte. Die Vorräte von Fichten mit BHD > 40 cm korrelierten etwas weniger stark mit den Insektenschäden (Korrelationskoeffizient 0.58 für Vivian und 0.30 für Lothar) als jene von Fichten mit BHD > 30 cm, aber auch weniger mit den anderen Variablen, welche den Fichtenvorrat beschreiben. Deshalb entschieden wir uns für diese Variable (Fichtenvorrat > 40 cm BHD). Aufgrund der Angaben zu den Korrelationen mit den Insektenschäden allein konnte noch nicht beurteilt werden, ob die mittlere Gebietshöhe als erklärende Variable für das Modell ausgeschlossen werden konnte, auch wenn die Korrelationen gering waren. Angaben zu Hangneigung und Exposition wurden relativ früh verworfen, weil die Ortsangaben für die Schäden bezüglich der Heterogenität von Exposition und Hangneigung innerhalb der Abteilungen vermutlich nicht genau genug waren.

Basierend auf diesen Ergebnissen untersuchten wir die wichtigsten unabhängigen Variablen (Windwurfschäden, Anteil an älteren Fichten und mittlere Höhe über Meer) in verschiedenen Kombinationen weiter. Die partiellen Determinationskoeffizienten bestätigten die Bedeutung der drei Variablen (Tabelle 3). Die Menge des Windwurfschadens hat den höchsten partiellen Determinationskoeffizienten und erklärt somit am besten die Restvarianz. Auffällig ist, dass die partiellen Determinationskoeffizienten für Vivian im Allgemeinen niedriger sind als für Lothar. Für Vivian erklärt der vorangegangene Windwurfschaden etwa 43% der Restvarianz und der Vorrat an grossen Fichten nur etwa 6%, wogegen beim Sturm Lothar der Insektenschaden zu 49% durch den Windwurfschaden und zu 21% durch den Vorrat an grossen Fichten erklärt wird. Beim Sturm Vivian waren der Windwurfschaden und der Anteil grosser Fichten sehr stark miteinander korreliert. Dies erklärt, warum der Anteil grosser Fichten nur wenig zur Erklärung der Varianz im Insektenschaden beiträgt, obwohl der Insektenschaden seinerseits stark mit dem Anteil grosser Fichten korrelierte (Tabelle 1).

Für unsere weitere Untersuchung wählten wir vier verschiedene Variablenkombinationen aus und testeten diese vier verschiedenen statistischen Modelle (Tabelle 4). Für beide Sturmereignisse führten die Modelle, welche den Windwurfschaden und den Vorrat an grossen Fichten berücksichtigten, zum höchsten korrigierten Bestimmtheitsmass. Der Einbezug der Höhenlage ins Modell führte zu keiner Verbesserung der Vorhersagen. Auch bei dieser Analyse zeigte sich, dass der Vorrat grosser Fichten für

1 www.R-project.org (12.1.2010).

2 <http://cran.r-project.org/web/packages/scatterplot3d/index.html> (12.1.2010).

	Höhe über Meer (m)	Windwurfschadholz logarithmiert (ln[(m ³ /ha)+1])	Holzvorrat Fichte BHD > 40 cm (m ³ /ha)
Vivian	0.032	0.432	0.064
Lothar	0.007	0.485	0.205

Tab 3 Partielle Determinationskoeffizienten für die wichtigsten unabhängigen Variablen für Vivian und Lothar zur Erklärung des logarithmierten Insektenschadholzes pro Hektar Wald.

die Beschreibung des Insektenschadens nach Lothar wesentlich wichtiger war als nach Vivian. Entsprechend den Bestimmtheitsmassen lassen sich mit Windwurf und Bestand grosser Fichten 64% der Varianz der Verteilung des Insektenschadens nach Vivian und 58% der Varianz der Verteilung des Insektenschadens nach Lothar erklären. Der Wert für Vivian ist höher als für Lothar, obwohl die partiellen Determinationskoeffizienten für Vivian niedriger waren, weil beim Bestimmtheitsmass die Korrelationen zwischen den unabhängigen Variablen nicht berücksichtigt werden.

Modell	verwendete Variablen			Vivian		Lothar	
	WS	H	V _{Fi,40}	B _{korrr}	B	B _{korrr}	B
1	x			0.60	0.61	0.45	0.47
2	x	x		0.60	0.63	0.44	0.48
3	x		x	0.61	0.64	0.55	0.58
4	x	x	x	0.61	0.65	0.53	0.59

Tab 4 Korrigiertes Bestimmtheitsmass (B_{korrr}), Bestimmtheitsmass (B) und verwendete unabhängige Variablen für die einzelnen Regressionsmodelle. Je höher B_{korrr}, desto grösser ist der statistische Zusammenhang zwischen den Variablen. Erläuterungen zu den unabhängigen Variablen siehe Tabelle 1.

In den Abbildungen 3 und 4 ist der Zusammenhang zwischen den Variablen grafisch dargestellt. Man sieht deutlich, wie der Schaden durch Borkenkäfer mit höherem Fichtenanteil und höheren Windwurfschäden zunimmt. Dieser Zusammenhang ist auch in den positiven Regressionskoeffizienten für beide Sturmereignisse erkennbar. Das Insektenschadholz (IS) pro Hektar Wald, logarithmiert (ln[(m³/ha)+1]), kann durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$IS = a_0 + a_1 \times WS + a_2 \times V_{Fi,40}$$

wobei WS das Windwurfschadholz pro Hektar Wald, logarithmiert (ln[(m³/ha)+1]), und V_{Fi,40} den

		a ₀	a ₁	a ₂
a)	Vivian	-0.1379	0.4773	0.0041
	Lothar	-0.5558	0.5531	0.0095
b)	Vivian	0	0.4736	0.0033
	Lothar	0	0.5078	0.0066

Tab 5 Regressionskoeffizienten für die Gleichung $IS = a_0 + a_1 \times WS + a_2 \times V_{Fi,40}$; a) a₀ nicht vorgegeben, b) a₀ = 0. Erläuterungen zu den Variablen siehe Tabelle 1.

Holzvorrat der Fichten mit BHD > 40 cm (m³/ha) darstellt. Die Regressionskoeffizienten a₀, a₁ und a₂ sind aus Tabelle 5 ersichtlich. Vergleicht man die Gleichungen für beide Sturmereignisse miteinander, so unterscheiden sich die Regressionskoeffizienten für den Windwurf nur um etwa 15% (Tabelle 5, Koeffizient a₁). Für den Vorrat an grossen Fichten ist der Regressionskoeffizient bei Lothar jedoch mehr als doppelt so hoch wie beim Sturm Vivian (Tabelle 5, Koeffizient a₂).

Die Konstante a₀ beschreibt den Insektenschaden in einem Wald, welcher weder durch Windwurf geschädigt wurde noch alte Fichten enthält. Da wir erwarten, dass unter diesen Bedingungen der Insektenschaden gering oder sogar null sein sollte, wurde eine zusätzliche Regression mit vordefinierter Regressionskonstante a₀ = 0 durchgeführt (Tabelle 5). Die Koeffizienten a₁ unterscheiden sich zwischen den beiden Sturmereignissen bei vordefinierter Regressionskonstante geringfügig. Die Regressionskoeffizienten für den Bestand grosser Fichten a₂ unterscheiden sich zwischen Vivian und Lothar mit vordefinierter Regressionskonstante a₀ = 0 ähnlich stark voneinander wie ohne vordefinierte Regressionskonstante a₀.

Für beide Sturmereignisse waren die für die Regression benutzten Werte für den Windwurf im Mittel nur geringfügig höher als die Werte für den Insektenschaden (Abbildungen 3 und 4). Durch das Logarithmieren, welches bei diesen Variablen angewandt wurde, ist das ursprüngliche Grössenverhältnis zwischen den Schadholzmengen nicht mehr ersichtlich. Zusätzlich zu den Zwangsnutzungen durch die Stürme fallen nicht mehr als 50% dieser Mengen als Schadholz nach Insektenschäden an (siehe Einleitung). Entsprechend den Regressionsebenen liegt bei maximalem Windwurfschaden von über 147 m³/ha (entspricht 5 bis 6 (ln[(m³/ha)+1])) der Insektenschaden zwischen 11 und 54 m³/ha (entspricht 2.5 bis 4 (ln[(m³/ha)+1])) für Vivian (Abbildung 3) und zwischen 19 und 147 m³/ha (entspricht 3 bis 5 (ln[(m³/ha)+1])) für Lothar (Abbildung 4), je nachdem, wie hoch der Anteil von grossen Fichten in den Beständen ist.

Diskussion

Unsere Analyse hat gezeigt, dass die Holzmenge aus Sturmschäden für das Alptal der wichtigste Faktor für die Vorhersage der Menge an Schadholz durch Käferbefall ist. Liegendes Holz auf Windwurfflächen bietet ideale Brutbedingungen für den Borkenkäfer, der in kleineren Populationen in jedem Fichtenwald vorkommt, sodass die Gefahr eines massenhaften Auftretens immer gegeben ist (Schmidt 1999, Schroeder 2003). Die hohe räumliche Korrelation zwischen Windwurf- und Bor-

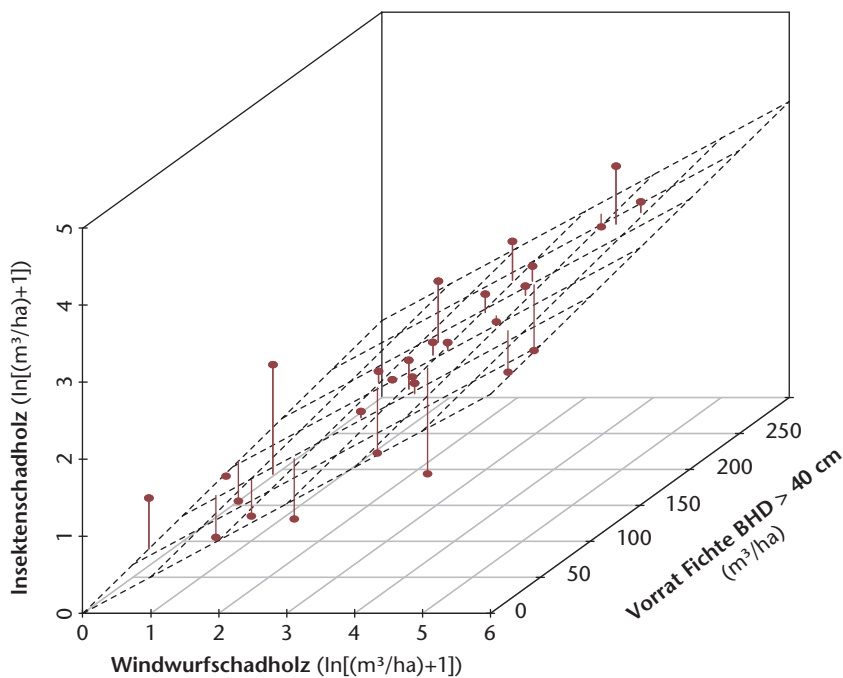


Abb 3 Insektenschadholz in Abhängigkeit von Windwurfschadholz und vom Vorrat an grossen Fichten (BHD > 40 cm) für Vivian.

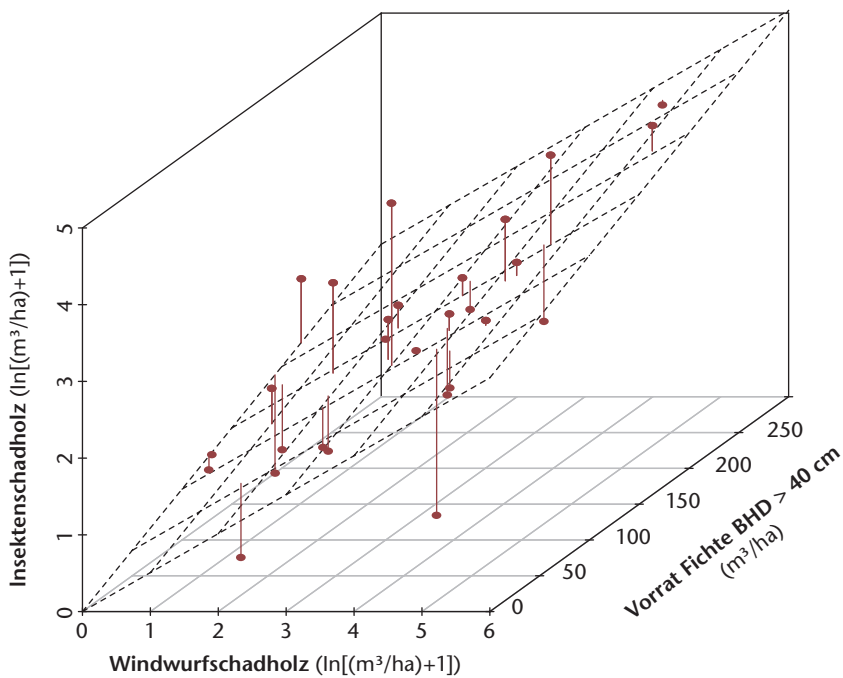


Abb 4 Insektenschadholz in Abhängigkeit von Windwurfschadholz und vom Vorrat an grossen Fichten (BHD > 40 cm) für Lothar.

kenkäferschäden ist ein bekanntes Phänomen (Frey et al 1995, Wichmann & Ravn 2001, Schelhaas et al 2003, Schroeder 2003, Wermelinger 2004). Der Einfluss eines Sturmereignisses auf das Vorkommen von Borkenkäfern ist vor allem innerhalb von wenigen 100 Metern Entfernung zum Sturmschaden bedeutend (Frey et al 1995, Schröter 1999). Man kann also davon ausgehen, dass die von uns untersuchten Abteilungen von ihrer Grösse her zur Modellierung dieses Zusammenhanges geeignet waren.

Von hoher Bedeutung für die Stärke der Borkenkäferintensität sind die Art und die Stärke der Windwurfschäden. Im Alptal führten kleinere

Sturmereignisse in den 1980er-Jahren zu verhältnismässig geringen Insektenfolgeschäden (Gimmi et al 2009). Von diesen Ereignissen ist aber nicht bekannt, wie man mit dem Sturmholz umgegangen ist und von welcher Art die Schäden waren. Streuschäden können einen wesentlich höheren Einfluss auf nachfolgende Borkenkäferkalamitäten haben als Flächenschäden, weil das liegende Schadholz länger beschattet bleibt, dadurch langsamer austrocknet und somit attraktiver für den Borkenkäfer ist (Forster et al 2003). Ausserdem erfolgt bei grossflächigen Windwürfen ein Befall von in der Nähe befindlichem stehendem Holz aufgrund des reichlichen Holzangebotes oft zeitlich verzögert (Tomiczek & Krehan 2008). Luftbildanalysen zufolge waren im Alptal bei Lothar die Streu- und Flächenschäden etwa gleich häufig und zeigten einen engen räumlichen Zusammenhang (Buwal & BFL 2001). Über die Art der Windwurfschäden nach Vivian stehen uns hingegen keine genauen Daten zur Verfügung.

Die Dauer, für welche Sturmholz im Wald verbleibt, hat einen bedeutenden Einfluss auf den Insektenfolgeschaden (Wichmann & Ravn 2001, Schroeder 2003). In der Schweiz hat hinsichtlich der Räumung von Windwurfholz in den letzten Jahrzehnten ein Umdenken stattgefunden. Die Erfahrungen nach Vivian trugen dazu bei, dass nach Lothar häufig in Erwägung gezogen wurde, Windwurfholz im Wald zu belassen (Lässig & Schönenberger 2000, Schönenberger et al 2003). Ein solcher teilweiser Verbleib des Windwurfholzes führt dazu, dass aufgrund des belassenen, nicht erfassten Holzes die Insekten Schäden höher ausfallen als aufgrund des entnommenen, erfassten Anteils erwartet werden kann. Auch wurde das Belassen von Borkenkäferholz diskutiert (Wermelinger et al 2002). Für das Alptal liegen bezüglich des Belassens von Windwurf- oder Borkenkäferholz keine genauen Informationen vor. Für das genutzte Windwurfholz ist lediglich bekannt, dass es innerhalb von zwei Jahren nach Vivian und innerhalb von drei Jahren nach Lothar erfasst worden ist. Der genaue Zeitpunkt der Entnahme kann entscheidend gewesen sein für die Ausbreitung des Borkenkäfers. Dieser ist aber für den Grossteil der Waldabteilungen des Alptals nicht bekannt. Es ist zu erwarten, dass die Nutzung des Windwurfholzes direkt nach einem Sturm stattfindet, wodurch der Einfluss des Windwurfes auf die Borkenkäfervermehrung stark reduziert wird. Die genutzte Menge Windwurfholz kann aus zwei Gründen trotzdem als eine den nachfolgenden Borkenkäferschaden beeinflussende Variable verstanden werden: Erstens ist nach grossen Sturmereignissen die Wahrscheinlichkeit hoch, dass das Windwurfholz nicht schnell genug entnommen wird und somit lange genug in einer Abteilung liegen bleibt, um mindestens einmal als Brutherd für Borkenkäfer zu dienen. Zweitens ist es wahrscheinlich, dass dort, wo viel Windwurfholz verzeichnet wurde,

stehen gebliebene Bäume geschwächt zurückbleiben, welche nunmehr anfälliger für Insektenbefall sind (Wichmann & Ravn 2001, Forster et al 2003), was vor allem an den Bestandesrändern wichtig ist (Frey et al 1995). Um diese Thematik in unsere statistische Modellierung einzubauen, wären allerdings sehr detaillierte räumliche Informationen nötig, die für ein Gebiet in der Grösse des Alptals nicht verfügbar sind.

Auch die Altersstruktur des Waldes beeinflusst die Wahrscheinlichkeit des Borkenkäferbefalls. Das zeigte sich in unserer Untersuchung sehr deutlich beim Sturm Lothar, aber weniger ausgeprägt beim Sturm Vivian, vor allem wegen der hohen Korrelation zwischen dem Windwurf und dem Anteil an grossen Fichten. Fichten mit einem Alter bis zu 30 Jahren können als generell ungefährdet für Borkenkäferbefall eingestuft werden (Schröter 1999, Nüsslein et al 2000, Becker & Schröter 2001, Wermelinger 2004). Nur in seltenen Fällen befiel der Buchdrucker junge Bestände, zum Beispiel bei der Massenvermehrung nach den grossen Sturmkatastrophen 1868 und 1870 in Böhmen (Fleischer 1877, zitiert in Weissbacher 1999).

Welche lebenden Fichten vom Buchdrucker befallen werden, hängt neben dem Baumalter, der Nutzung des Sturmholzes und der Art der Sturmschäden von vielen weiteren Einflussfaktoren ab. Von massgebender Bedeutung für das Auftreten von Borkenkäferepidemien sind zum Beispiel die Witterungsverhältnisse (Frey et al 1995, Wermelinger & Seifert 1999, Nüsslein et al 2000, Becker & Schröter 2001, Wermelinger 2004, Dobbertin et al 2007). Der Jahrhundertsommer 2003 etwa führte dazu, dass die bereits abflauende Borkenkäferepidemie nach Lothar nochmals verstärkt wurde (Rigling et al 2008). Das Ausmass der Borkenkäferschäden hängt entscheidend vom Jahresverlauf der Temperatur und der Anzahl warmer Tage ab, weil diese Faktoren massgebend für die Phänologie der Insekten ist (Baier et al 2007, Raffa et al 2008). Je länger innerhalb eines Jahres günstige Temperaturbedingungen herrschen, desto mehr Generationsabfolgen von Borkenkäfern können potenziell erfolgen. Aber weder die mittlere Höhenlage noch der mittlere Neigungswinkel oder die mittlere Exposition, welche alle die Temperatur eines Standortes beeinflussen, hatten einen signifikanten Einfluss auf die Käferschäden im Alptal. Um mögliche Abhängigkeiten zwischen diesen topografischen Kenngrössen und den Insektenbeschädigungen identifizieren zu können, müssten die Zwangsnutzungen bezüglich ihrer Lage innerhalb der Abteilungen besser beschrieben sein. So erstrecken sich einige Abteilungen über einen Höhengradienten von über 400 Meter. Für klimatisch so heterogene Abteilungen ist ein Temperatureffekt schwierig nachzuweisen.

Im Alptal waren für den Sturm Lothar vor allem zwei Faktoren wichtig, um die Variabilität des

Insektenschadens in Zeit und Raum zu beschreiben: Stark durch Windwurf vorbelastete Gebiete und Abteilungen mit einem hohen Vorrat an grossen Fichten (BHD > 40 cm) wurden stark von Borkenkäfern befallen. Interessanterweise konnte nach Vivian nur der Windwurf als signifikanter Prädiktor ausgemacht werden (Tabelle 6). Nach Vivian war die Korrelation zwischen Holzvorräten und Windwurf sehr hoch (Tabelle 1), das heisst, beim Sturm wurden sehr viele Bestände mit hohem Vorrat durch den Sturm geschädigt. Da ein Grossteil der Varianz in den Borkenkäferschäden schon durch die Menge an Windwurf abgedeckt wurde und die Korrelation zwischen Windwurf und dem Vorrat an grossen Fichten sehr hoch war, ist nicht erstaunlich, dass nur wenig der Restvarianz durch den Anteil grosser Fichten erklärt werden konnte. Der Anteil grosser Fichten leistete aber auch für Vivian einen Beitrag zur Erklärung der Verteilung des Insektenschadens, was sich in einem höheren Bestimmtheitsmass äusserte (Tabelle 4). Dieser Beitrag war aber nicht signifikant (Tabelle 6).

	Insektenschadholz	
	Vivian	Lothar
WS	0.000104 ***	0.000012 ***
$V_{Fi,40}$	0.148238 n.s.	0.0171 *

Tab 6 P-Werte basierend auf t-Tests für unabhängige Variablen bei linearer Regression. Insektenschadholz pro Hektar Wald, logarithmiert als abhängige Variable. Windwurfschadholz (WS) pro Hektar Wald, logarithmiert, und Holzvorrat Fichte BHD > 40 cm ($V_{Fi,40}$) als unabhängige Variablen. Signifikanzniveaus für P-Werte: *** < 0.001, ** < 0.01, * < 0.05, n.s. nicht signifikant.

Bei der Untersuchung des Vorkommens von Borkenkäfern könnte man je nach Zielsetzung und Datenlage viele weitere Einflussgrössen berücksichtigen. So könnte zum Beispiel die Baumartenzusammensetzung von grosser Bedeutung sein (Schröter 1999, Becker & Schröter 2001), was in unserer Studie aber nicht untersucht wurde, weil der Fichtenanteil im Alptal allgemein sehr hoch ist. Ein weiteres wichtiges Standortmerkmal ist die Bodentrockenheit, da zu Vernässung neigende Standorte allgemein weniger Folgeschäden durch Borkenkäfer aufweisen (Lässig & Schönenberger 2000). Im Windwurfholz sind feuchtere Verhältnisse jedoch von Vorteil für die Entwicklung von Borkenkäfern. Abgesehen von den allgemeinen Witterungsverhältnissen kann auch der Jahresverlauf der Witterung entscheidend sein (Schröter 1999, Becker & Schröter 2001). Für das Alptal erschien es uns aber nicht sinnvoll, den Witterungsverlauf und die Bodenverhältnisse standortspezifisch zu berücksichtigen, da das gesamte Tal einen ähnlichen Witterungsverlauf aufweist (keine grossen Klimagradienten) und es deswegen tendenziell auch keinen grossen Bodenfeuchtegradienten gibt. Ferner vermag die Hangneigung, da sie unter

anderem die Bodentrockenheit beeinflusst, einen Einfluss auf die Verbreitung von Borkenkäfern auszuüben. Mit steileren Hängen steigt der Umfang der Käferschäden (Lässig & Schönenberger 2000). Für Untersuchungen, die genaue topografische und standortspezifische Angaben erfordern (zum Beispiel Bodenfeuchte, Hangneigung und Exposition), würde man aber räumlich besser aufgelöste forstliche Daten benötigen als die uns zur Verfügung stehenden.

Das Auftreten von Borkenkäfern hätte durch eine Berücksichtigung topografischer Merkmale wie zum Beispiel der Lage der Abteilungen zueinander, gemeinsamer Abteilungsgrenzen oder äusserer Abteilungsgrenzen vermutlich besser erklärt werden können. Diese Annahme begründet sich vor allem durch die hohe Mobilität der Borkenkäfer und die im Verhältnis zur Fläche grosse Aussenabgrenzung des Untersuchungsgebietes. Die Datenlage hat jedoch eine Berücksichtigung dieser Sachverhalte nicht unterstützt.

Eine entscheidende Limitierung für die Ausbreitung des Borkenkäfers können seine natürlichen Feinde darstellen (Wermelinger 2002, Forster et al 2003). Man kann aber annehmen, dass der Einfluss von Antagonisten des Borkenkäfers aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes weitgehend homogen verteilt ist.

Die in unserer Untersuchung hergeleiteten statistischen Modelle können zur Abschätzung des Ausmasses von Borkenkäferschäden in Fichten-Wirtschaftswäldern nach Sturmereignissen genutzt werden, sodass für künftige Ereignisse potenziell gefährdete Bestände in ähnlicher räumlicher Auflösung identifiziert werden können. Man sollte allerdings berücksichtigen, dass in unseren Modellen wichtige erklärende klimatische, topografische und den Windwurf beschreibende Variablen nicht berücksichtigt wurden. Kompliziertere Modelle, welche solche Variablen berücksichtigen oder nicht lineare Zusammenhänge erfassen, können aber aufgrund der Datenlage fürs Alptal nicht hergeleitet werden.

Diese und andere Untersuchungen zeigen, dass in ausgewachsenen Fichtenwäldern nach Grosssturmereignissen etwa ein Drittel bis die Hälfte der durch die vorausgegangenen Windwurfschäden betroffenen Menge Holz von Insektenfolgeschäden betroffen sein kann (Frey et al 1995, Schroeder 2003, Rigling et al 2008). Unsere Ergebnisse zeigen zudem, dass das Verhältnis zwischen Windwurf- und Borkenkäferholz stark vom Bestand abhängen kann, was besonders nach Lothar deutlich wurde (Abbildungen 3 und 4). Die bereits bekannten Zusammenhänge zwischen Bestandesdaten, Windwurf- und Insektenschäden wurden in unserer Untersuchung empirisch bestätigt. Dabei wurde der hohe Wert, den historische Waldwirtschaftsdaten für eine ökologische Modellierung haben können, deutlich. ■

Eingereicht: 24. September 2009, akzeptiert (mit Review): 12. Januar 2010

Literatur

- BAIER P, PENNERSTORFER J, SCHOPFA A (2007)** PHENIPS – A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. *For Ecol Manage* 249: 171–186.
- BECKER T, SCHRÖTER S (2001)** Die Ausbreitung des Borkenkäferbafalls im Bereich von Sturmwurf-Sukzessionsflächen. Eine Untersuchung in Sturmwurf-Bannwäldern Baden-Württembergs. Freiburg: Ber Freibg Forstl Forsch 26. 79 p.
- BFS (2001)** Arealstatistik der Schweiz 1992/97. Neuchâtel: Bundesamt Statistik.
- BRASSEL P, BRÄNDLI U-B (1999)** Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Bern: Haupt. 442 p.
- BUWAL, BFL (2001)** Sturmschadeninventar Lothar 1999. Bericht über die Ergebnisse der Sturmschadenerfassung vom Orkan Lothar anhand von normalfarbigen Luftbildern. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft. 49 p.
- DOBBERTIN M ET AL (2007)** Linking increasing drought stress to Scots pine mortality and bark beetle infestations. *The scientific world journal* 7: 231–239.
- FLEISCHER A (1877)** Der Fichtenborkenkäfer «*Bostrychus typographus*» im Böhmerwald, seine Mithelfer an dem Zerstörungswerke und seine Feinde aus der Klasse der Insekten. *Vereinschrift Forst- Jagd- Naturkunde des böhmischen Forstvereines* 3: 1–42.
- FORSTER B, MEIER F, GALL R, ZAHN C (2003)** Erfahrungen im Umgang mit Buchdrucker-Massenvermehrungen (*Ips typographus* L.) nach Sturmereignissen in der Schweiz. *Schweiz Z Forstwes* 154: 431–436. doi: 10.3188.szf.2003.0431
- FREY W ET AL (1995)** Risiken und Naturgefahren auf Windwurf- flächen. *Schweiz Z Forstwes* 146: 863–872.
- GIMMI U, WOLF A, BÜRGI M, SCHERSTJANOI M, BUGMANN H (2009)** Quantifying disturbance effects on vegetation carbon pools in mountain forests based on historical data. *Regional Environ Change* 9: 121–130.
- LÄSSIG R, SCHÖNENBERGER W (2000)** 10 Jahre nach «Vivian» und «Wiebke» – Nach «Lothar» von «Vivian»-Erfahrungen profitieren. *Wald Holz* 81 (2): 31–35.
- NÜSSLEIN S ET AL (2000)** Zur Waldentwicklung im Nationalpark Bayerischer Wald 1999. Buchdrucker-Massenvermehrung und Schadholzflächen im Rachel-Lusen-Gebiet. *Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft*. Ber Bayer Landesanst Wald Forstwirtschaft 25. 47 p.
- RAFFA KF ET AL (2008)** Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: The dynamics of bark beetle eruptions. *BioScience* 58: 501–517.
- REQUARDT A ET AL (2007)** Feasibility study on means of combating forest dieback in the European Union. Brussels: European Commission. 79 p.
- RIGLING A, FORSTER B, MEIER F, WERMELINGER B (2008)** Insekten – Schlüsselfaktoren der zukünftigen Waldentwicklung? *Eidg. Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Informationsblatt Wald* 23: 1–4.
- SCHELHAAS MJ, NABUURS GJ, SCHUCK A (2003)** Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Glob Chang Biol* 9: 1620–1633.
- SCHMIDT O (1999)** Borkenkäferproblematik in bayerischen Naturwaldreservaten. In: *Forstschutzprobleme in Nationalparks und Naturschutzgebieten*. Berlin: Biologisch Bundesanstalt Land- Forstwirtschaft, Mitteilungen H 362. pp. 47–52.

- SCHÖNENBERGER W ET AL (2003) Vivians Erbe. Waldentwicklung nach Windwurf im Gebirge. Eidg Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Merkblatt Praxis 36. 12 p.
- SCHROEDER LM (2003) Tree mortality by the bark beetle *Ips typographus* (L.) in storm-disturbed stands. *Integrated Pest Manage Rev* 6: 169–175.
- SCHRÖTER H (1999) Ausbreitung des Borkenkäferbefalls in den Bannwäldern Baden-Württembergs. In: Forstschutzprobleme in Nationalparks und Naturschutzgebieten. Berlin: Biologische Bundesanstalt Land- Forstwirtschaft, Mitteilungen H 362. pp. 63–79.
- TOMICZEK C, KREHAN H (2008) Aufarbeitung von Sturmschäden im Wald – aus Forstschuttsicht. Wien: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft. 2 p.
- USBECK T ET AL (2009) Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1958 to 2007. *Agric For Meteorol* 150: 47–55.
- WEISSBACHER A (1999) Situation und Entwicklung der Borkenkäferpopulation im Nationalpark Bayerischer Wald. In: Forstschutzprobleme in Nationalparks und Naturschutzgebieten. Berlin: Biologische Bundesanstalt Land- Forstwirtschaft, Mitteilungen H 362. pp. 53–62.
- WERMELINGER B (2002) Development and distribution of predators and parasitoids during two consecutive years of an *Ips typographus* (Col., Scolytidae) infestation. *J Appl Entomol* 126: 521–527.
- WERMELINGER B (2004) Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *For Ecol Manage* 202: 67–82.
- WERMELINGER B, EPPER C, SCHNEIDER MATHIS D (2002) Warum tote Käferbäume stehen lassen? *Wald Holz* 83 (4): 39–42.
- WERMELINGER B, SEIFERT M (1999) Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecol Entomol* 24: 103–110.
- WICHMANN L, RAVN HP (2001) The spread of *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Scolytidae) attacks following heavy windthrow in Denmark, analysed using GIS. *For Ecol Manage* 148: 31–39.
- WSL, BUWAL (2001) Lothar: Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Birmensdorf: Eidg Forsch.anst Wald Schnee Landsch. 365 p.

Windwurf und Borkenkäferepidemien im Alptal nach Vivian und Lothar

Nach den Winterstürmen Vivian (1990) und Lothar (1999) wurden viele Schweizer Wälder von Borkenkäfern heimgesucht. Basierend auf forstwirtschaftlichen Daten von 28 Waldabteilungen testeten wir verschiedene Variablen auf ihren Einfluss auf das Auftreten von Borkenkäferschäden im Alptal. Für beide Sturmereignisse entwickelten wir je ein multiples lineares Regressionsmodell. Um das Auftreten von Borkenkäfern zu beschreiben, wurde die Gesamtheit von Insektenschadholz herangezogen, welches innerhalb von fünf Jahren nach einem Sturmereignis anfiel. Zwei Prädiktoren, die Menge Sturmholz eines Sturmereignisses und die Anwesenheit grosser Fichten, trugen über 50% zur Erklärung der Varianz des Auftretens von Borkenkäfern bei. Unsere Ergebnisse untermauern die Vorstellung, dass Windwurf das Auftreten von Borkenkäferschäden stark beeinflusst. Zudem wird ein signifikanter Anteil der Restvarianz des Borkenkäfervorkommens durch die Anwesenheit grosser Fichten (Durchmesser in Brusthöhe > 40 cm) erklärt. Dies unterstreicht die Bedeutung der Altersstruktur von Wäldern für Wind- und Insektenschäden. Unsere Untersuchung zeigt, welchen hohen Wert historische forstwirtschaftliche Daten für die ökologische Modellierung haben.

Chablis et recrudescence de scolytes dans l'Alptal après les tempêtes Vivian et Lothar

Après le passage des tempêtes Vivian (1990) et Lothar (1999), de nombreuses forêts suisses ont été infestées par les scolytes. À l'aide d'informations issues de 28 divisions forestières, cette étude teste une série de variables pouvant potentiellement prédire la présence de dommages dus aux scolytes dans la vallée de l'Alptal (Préalpes du nord de la Suisse). Pour chaque tempête, nous avons développé un modèle de régression linéaire multiple. La présence des scolytes est dérivée de la somme des arbres attaqués durant les cinq années ayant suivi chaque tempête. Deux prédicteurs (la quantité de chablis après la tempête ainsi que la présence d'épicéas de grande dimension) suffisent à expliquer plus de 50% de la variance des présences de scolytes. Nos résultats renforcent l'idée que les dégâts dus à une tempête favorisent le développement de scolytes. De plus, la présence de grands épicéas (diamètre à hauteur de poitrine > 40 cm) explique une part significative de la variance résiduelle de la présence des scolytes. Ceci souligne l'influence de la structure des forêts sur les dégâts dus à la tempête et aux insectes. D'un point de vue méthodologique, notre travail montre la valeur des données historiques de gestion des forêts dans un contexte de modélisation écologique.