

# StartClim2015.E

**Erstellung von Risikoprofilen für ausgewählte  
Schutzwaldgebiete des Ostalpenraums  
(Österreich und Südtirol) in Bezug auf die  
Störungsregime Sturm/Schneebruch/Dürre –  
Borkenkäferbefall – Waldbrand  
und Klimawandel**

**Institut für Forstentomologie,  
Forstpathologie und Forstschutz**



**Universität für Bodenkultur Wien**  
Department für Wald- und Boden-  
wissenschaften

Kurztitel des Projekts:

**Risikoprofile für Störungen der Walddynamik für Schutzwaldgebiete des Ostalpenraums**

**Projektleitung**

Univ.Prof. Dr. phil. Axel Schopf

**Projektmitarbeiter**

DI Dr. Baier Peter

Josef Pennerstorfer, MSc GIS

Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz

Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Schopf, A., Baier, P., Pennerstorfer, J. (2016): Erstellung von Risikoprofilen für ausgewählte Schutzwaldgebiete des Ostalpenraums (Österreich und Südtirol) in Bezug auf die Störungsregime Sturm/Schneebruch/Dürre – Borkenkäferbefall – Waldbrand und Klimawandel. Endbericht von StartClim2015.E in StartClim2015: Weitere Beiträge zur Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBf, Land Oberösterreich

Wien, im Juni 2016

StartClim2015.E

Teilprojekt von StartClim2015

Projektleitung von StartClim2015:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: [www.startclim.at](http://www.startclim.at)

StartClim2015 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWF, der ÖBf und des Landes Oberösterreich gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>E-1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>E-1.1 Problemstellung</b>	<b>5</b>
<b>E-1.2 Zielsetzung des Projekts</b>	<b>5</b>
<b>E-2 Material und Methoden</b>	<b>6</b>
<b>E-2.1 Untersuchungsregionen und Schutzwaldtypen</b>	<b>6</b>
<b>E-2.2 Modellierung der Entwicklung und Phänologie der Borkenkäferarten</b>	<b>6</b>
<i>E-2.2.1 Modellierung der Entwicklung und Phänologie des Buchdruckers (<i>Ips typographus</i>)</i>	7
<i>E-2.2.2 Entwicklungsmodellierung für <i>Ips cembrae</i> und <i>Ips amitinus</i></i>	8
<i>E-2.2.3 Entwicklungsmodellierung für <i>Ips acuminatus</i></i>	8
<i>E-2.2.4 Modellvalidierung mittels Daten des Fallenmonitorings</i>	9
<b>E-2.3 Abschätzung der Prädisposition</b>	<b>10</b>
<b>E-2.4 Stationsbezogene Klimadaten und regionalisierte Klimaprojektionen</b>	<b>13</b>
<b>E-3 Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>15</b>
<b>E-3.1 Modellierung der Phänologie und Entwicklung der Borkenkäfer</b>	<b>15</b>
<i>E-3.1.1 Entwicklungsmodelle für <i>Ips cembrae</i> und <i>Ips amitinus</i></i>	15
<i>E-3.1.2 Entwicklungsmodell für <i>Ips acuminatus</i></i>	20
<b>E-3.2 Risikoprofile für die ausgewählten Regionen und Schutzwaldtypen</b>	<b>23</b>
<i>E-3.2.1 Regionale Klimamodelle und Klimaänderungssignal</i>	23
<i>E-3.2.2 Risikoprofil Nördliche Kalkalpen</i>	24
<i>E-3.2.3 Risikoprofil Osttirol</i>	28
<i>E-3.2.4 Risikoprofil Südtirol/Vinschgau</i>	33
<b>E-4 Schlussfolgerungen</b>	<b>36</b>
<b>E-4.1 Gemeinsame Synthese StartClim 2015 Projekt D und Projekt E</b>	<b>38</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>40</b>
<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>44</b>
<b>Danksagung</b>	<b>46</b>

## Kurzfassung

Borkenkäferkalamitäten können tiefgreifende, flächige Veränderungen der Walddynamik zur Folge haben, die eine nachhaltige Funktionalität von Schutzwäldern beeinträchtigen können. Für die Einschätzung der aktuellen und der zukünftigen Gefährdung unterschiedlicher Schutzwaldtypen durch Störfaktoren wurden Risikoprofile für ausgewählte Gebiete in den Ostalpen erstellt. Grundlage für die Gefährdungsabschätzung ist die Anwendung bestehender Modellierungsansätze für Fichte und die Erweiterung dieser Modelle für die Schutzwaldbaumarten Lärche, Zirbe, Wald- und Schwarzkiefer.

Dazu wurden Phänologie- und Entwicklungsmodelle für die Lärchen- Zirben- und Kiefernborke- käfer, *Ips cembrae*, *Ips amitinus* und *Ips acuminatus* auf Basis vorhandener empirischer Daten und anhand von Literaturangaben etabliert und bestehende wissensbasierte Prädispositions-Schätzsysteme für den Störungskomplex Fichte - *Ips typographus* angewandt. Für die Darstellung der Gefährdungen für vergangenes, gegenwärtiges und zukünftiges Klima wurden unterschiedliche regionale Klimamodelle verwendet.

Die Berechnungen für die verschiedenen Borkenkäferarten zeigen, dass die Klimaänderungen in allen untersuchten Regionen und für alle betrachteten Borkenkäferarten mehr Käfergenerationen ermöglichen. Auch werden die Käfer ihren Flug früher im Jahr beginnen. Der Flug zur Anlage von Geschwisterbruten und der Schwärmflug der Tochtergenerationen werden erheblich früher erfolgen.

All dies bedeutet, dass Borkenkäferbefall insbesondere in den Hochlagen vermehrt auftreten könnte. Abgeleitete Risikoprofile, die Interaktionen zwischen den verschiedenen Borkenkäferarten und Wetterstörungen sowie potentielle Folgeschäden berücksichtigen, können zur Entwicklung geeigneter Anpassungs- und Waldmanagementstrategien im Schutzwald genutzt werden.

## Abstract

Bark beetle outbreaks can have outstanding impacts on forest dynamics. They especially endanger the sustainable functioning of protective forests. Management of these forests has to be focused on the sustained maintenance of protective functions in the future. In order to assess the present and future threats from abiotic/biotic disturbances, risk profiles for selected protective forest types have been established.

The basis for the risk profiling is formed by the application of already existing risk models for Norway spruce and the amplification of these models for other conifer tree species of montane-subalpine protection forests (Larch, Stone pine, Scots pine, Black pine). Modelling of the phenology and development of the bark beetle species *Ips cembrae*, *Ips amitinus*, and *Ips acuminatus* was based on empirical data and literature reviews, and existing knowledge-based susceptibility assessment models for Norway spruce – *Ips typographus* were applied. Past, present and future hazards were assessed using different regional climate models.

The modelling of the development for the different bark beetle species showed that projected climatic change increases the number of potential generations for all bark beetle species and for all regions. Spring swarming as well as the establishment of sister broods and filial generations occur much earlier. Therefore, bark beetle infestations may occur more frequently, especially at high altitudes.

The derived risk profiles with implemented interactions between the different bark beetle species, abiotic disturbances and subsequent hazards can be used for the development of adequate adaptations and preventive mitigation strategies for the management of alpine protective forests.

## E-1 Einleitung

### E-1.1 Problemstellung

Fast ein Fünftel des österreichischen Waldes ist Schutzwald und erfordert eine besondere Behandlung zum Schutz des Bodens oder des Bewuchses bzw. schützt als Objektschutzwald vor Elementargefahren und schädigenden Umwelteinflüssen. Diese „Serviceleistungen“ sind durch das Auftreten abiotischer und biotischer Störungen zunehmend gefährdet. Windwurf, Schneebruch und Borkenkäferbefall wurden als bedeutendste Störungsursachen identifiziert, wobei sich die Analysen auf fichtenreiche und auf Holzproduktion ausgerichtete Bestandestypen konzentrierten (Seidl *et al.*, 2011; Temperli *et al.*, 2013; Pasztor *et al.*, 2014). Schutzwälder sind jedoch von der Baumartenzusammensetzung her vielfältig und befinden sich oft auf schlecht erreichbaren, unerschlossenen Standorten. Klimaänderungen lassen auch für bisher weniger betroffene Baumarten, wie Lärche und Kiefer, eine erhöhte Befallsgefährdung durch Rindenbrüter erwarten. Ein vermehrtes Auftreten des Kiefernborkeäfers, *Ips acuminatus* bzw. des Großen Lärchenborkeäfers, *Ips cembrae*, weisen bereits auf eine erhöhte Prädisposition von Wäldern durch Trockenstress und witterungsbedingt höhere Vermehrungsraten der Käfer hin (Krehan und Cech, 2004; Faccoli *et al.*, 2010; Krehan, 2011). Eine Temperaturzunahme könnte zudem zu einer Ausbreitung mediterraner Schadinsekten an Kiefer (zB. *Thaumetopoea pityocampa*) in höhere Lagen und nach Norden führen, deren Massenvermehrung wiederum Rindenbrüter begünstigt (Battisti *et al.*, 2005).

### E-1.2 Zielsetzung des Projekts

Ziel dieses Projekts war die Erstellung von Risikoprofilen für ausgewählte Regionen mit unterschiedlichen Schutzwaldtypen anhand einer Modellierung der aktuellen und der zukünftigen Gefährdung durch abiotische und biotische Störfaktoren. Grundlage für eine Risikoabschätzung im Rahmen dieser Arbeit ist die Erweiterung bestehender Modellierungsansätze zur Darstellung der Phänologie und der Entwicklung der relevanten Borkenkäferarten und die Anwendung von Modellen zur Charakterisierung der standorts- und bestandesbedingten Prädisposition gegenüber Störungseinflüssen (Führer und Nopp, 2001; Netherer und Nopp-Mayr, 2005) für unterschiedliche Regionen und Schutzwaldtypen.

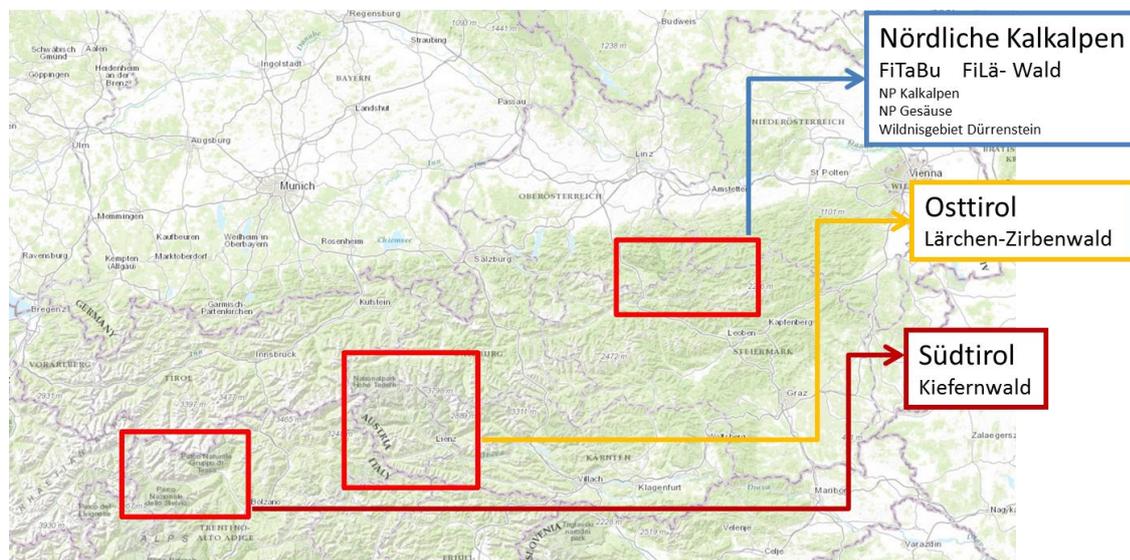
Während für den Buchdrucker, *Ips typographus* ein Phänologie-Modell verfügbar ist (Baier *et al.*, 2007), gibt es noch keine Modelle zur Abschätzung der Entwicklung und Populationsdynamik anderer Borkenkäferarten in alpinen Hochlagen bzw. inneralpinen Trockentälern. Für die Darstellung von Gefährdungen für Borkenkäferbefall in den unterschiedlichen Waldtypen im Zusammenhang mit Klimaänderungen sollen daher Modelle zur zeitlich-räumlichen Analyse der Phänologie und Generationsentwicklung der relevanten Borkenkäferarten an Lärche und Zirbe (*Ips cembrae*, *Ips amitinus*), Wald- bzw. Schwarzkiefer (*Ips acuminatus*) entwickelt und angewandt werden.

Die Risikoprofile für ausgewählte Waldgebiete in den nördlichen Kalkalpen und Zentralalpen sollen einen Beitrag zur Entwicklung und Optimierung präventiver Anpassungs- und Managementstrategien im Schutzwald leisten, letztendlich auch, um einen gezielten Einsatz finanzieller und personeller Ressourcen zu ermöglichen und die nachhaltige Erfüllung regional wichtiger Waldfunktionen gewährleisten zu können.

## E-2 Material und Methoden

### E-2.1 Untersuchungsregionen und Schutzwaldtypen

Für die Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Regionen (Nördliche Kalkalpen, Osttirol, Südtirol) in den Ostalpen ausgewählt, die sich hinsichtlich ihrer bio-geoklimatischen Bedingungen und bezüglich der dominanten Waldtypen unterscheiden (Abb. E- 1). In den Nördlichen Kalkalpen dominieren Fichten-Tannen-Buchen- und Fichten-Lärchenwaldtypen. In dieser Region liegen auch die Nationalparke Kalkalpen und Gesäuse sowie das Wildnisgebiet Dürrenstein. In Osttirol treten, neben den dominierenden montanen/subalpinen Fichtenwaldtypen, Zirben- bzw. Zirben-Lärchenschutzwälder in den höheren Lagen auf. In der Region Südtirol/Vinschgau werden die für inneralpine Trockentäler typischen Schwarz- und Weißkiefernbestände behandelt.



**Abb. E- 1:** Lage der Untersuchungsregionen, relevante Schutzwaldtypen und Abgrenzung der Regionen für die Klimamodelldaten

### E-2.2 Modellierung der Entwicklung und Phänologie der Borkenkäferarten

Mit den unterschiedlichen Schutzwaldtypen sind auch ganz unterschiedliche Borkenkäferarten assoziiert. Neben dem wohl bedeutsamsten Borkenkäfer, dem Buchdrucker (*Ips typographus*) an Fichte, wurden für die Gefährdungsabschätzungen in den unterschiedlichen nadelholzdominierten Schutzwaldtypen auch der kleine Buchdrucker (*Ips amitinus*) an Fichte und Zirbe, *Ips cembrae*, der große Lärchenborkenkäfer (Hauptwirtschaftsbaumart Lärche) und der Sechszählige Kiefernborkekäfer, *Ips acuminatus*, ausgewählt (Abb. E- 2).

<i>Ips typographus</i> Buchdrucker	<i>Ips amitinus</i> Kleiner Buchdrucker	<i>Ips cembrae</i> Lärchenborkenkäfer	<i>Ips acuminatus</i> Sechszähliger Kiefernborke­nkäfer
Wirtsbäume <i>Picea abies</i>	Wirtsbäume <i>Picea abies</i> <i>Pinus cembrae</i>	Wirtsbäume <i>Larix sp.</i>	Wirtsbäume <i>Pinus sp.</i>
			

**Abb. E- 2:** Ausgewählte Borkenkäferarten in nadelholzdominierten Schutzwäldern und deren Hauptwirtsbaumarten

### **E-2.2.1 Modellierung der Entwicklung und Phänologie des Buchdruckers (*Ips typographus*)**

Zur Beschreibung der weitestgehend temperaturabhängigen Entwicklung und Phänologie des Buchdruckers wurde in den vergangenen Jahren ein Modell (PHENIPS) entwickelt (Schopf *et al.*, 2004; Baier *et al.*, 2007), mit dem man sowohl den Schwärm- und Befallsbeginn im Frühjahr, die Entwicklung der Brut, den Beginn von Geschwisterbruten, die Anlage von Folgegenerationen und die Überwinterungsfähigkeit der Brut berechnen und darstellen kann. Als Eingangsparameter für das Modell werden tägliche Temperaturwerte (Tagesmaximum, Tagesmittelwert der Lufttemperatur) und Einstrahlungswerte (Tagessumme der Globalstrahlung) verwendet. Für die Darstellung der Entwicklung der Bruten und der saisonalen Abfolge der potentiell möglichen Generationen werden relative effektive Temperatursummen berechnet, anhand derer man die maximal mögliche Entwicklung (zB. an sonnenexponierten Bestandesrändern oder auf Freiflächen nach Windwurf) unter expliziter Berücksichtigung von einstrahlungsbedingt erhöhten Rindentemperaturen berechnen kann. Bei Verwendung von effektiven Lufttemperatursummen kann auch der minimale Entwicklungsfortschritt in stehenden Bäumen im beschatteten Bestandesinneren beurteilt werden.

Die Anzahl der potentiell möglichen Generationen ist in weiterer Folge ein wesentlicher Parameter zur Abschätzung der standörtlichen Befallsgefährdung, da mit der erfolgreichen Entwicklung von Geschwisterbruten (zweite Brut der Muttertiere) und zusätzlichen Tochtergenerationen ein exponentielles Populationswachstum des Buchdruckers verbunden ist (Wermelinger und Seifert, 1998, 1999; Baier *et al.*, 2007).

**Tab. E- 1:** Schwellenwerte der Lufttemperatur (LTmax: Tagesmaximum der Lufttemperatur) und der effektiven Rindentemperatursummen (dd: Tagesgrade) für die Borkenkäferentwicklungsmo­dellierung mittels PHENIPS

	Summe LTmax >8,3°C ab 1. April	Schwärmtemperatur LTmax	
<b>Befallsbeginn im Frühjahr</b>	≥ 140 dd	≥ 16,5 °C	
<b>Brutentwicklung</b>			
Stadium	Effektive Temperatur- summe (dd)	lfd. Summe (dd)	relative lfd. Summe
Ei	55,7	55,7	0,1
Larven	222,8	278,5	0,5
Puppen	55,7	334,2	0,6
Reifungsfraß	222,8	557	1
Ei bis Puppe		334,2	
<b>Gesamtentwicklung Ei – reife Jungkäfer</b>	557		1
<b>Beginn Geschwisterbrut</b>			0,5
<b>Induktion der Diapause</b>	Tageslänge <14,5 h		
<b>Rel. Temperatursumme für erfolgreiche Überwinterung</b>			0,6

### E-2.2.2 *Entwicklungsmodellierung für Ips cembrae und Ips amitinus*

Für die Erstellung von Entwicklungsmodellen für *Ips cembrae* und *Ips amitinus* wurden Angaben über den Zusammenhang zwischen der Entwicklungsrate der jeweiligen Borkenkäferart und der Temperatur verwendet (*Ips cembrae*: (Suzuki und Imada, 1993; Schebeck, 2014); *Ips amitinus* (Coeln *et al.*, 1996; Coeln, 1997)). Die verwendeten Entwicklungskennwerte für die Gesamtentwicklung vom Ei bis zum reifen Jungkäfer basieren auf Zuchtexperimenten im Labor bei unterschiedlichen konstanten Temperaturbedingungen. Für die Modellierung des Beginns der Entwicklung im Frühjahr und für die Schwärmbedingungen wurden für beide Arten dieselben Schwellenwerte wie für den Buchdrucker herangezogen (Zumr, 1982; Nierhaus-Wunderwald, 1995; Mazur und Kuzminski, 2013).

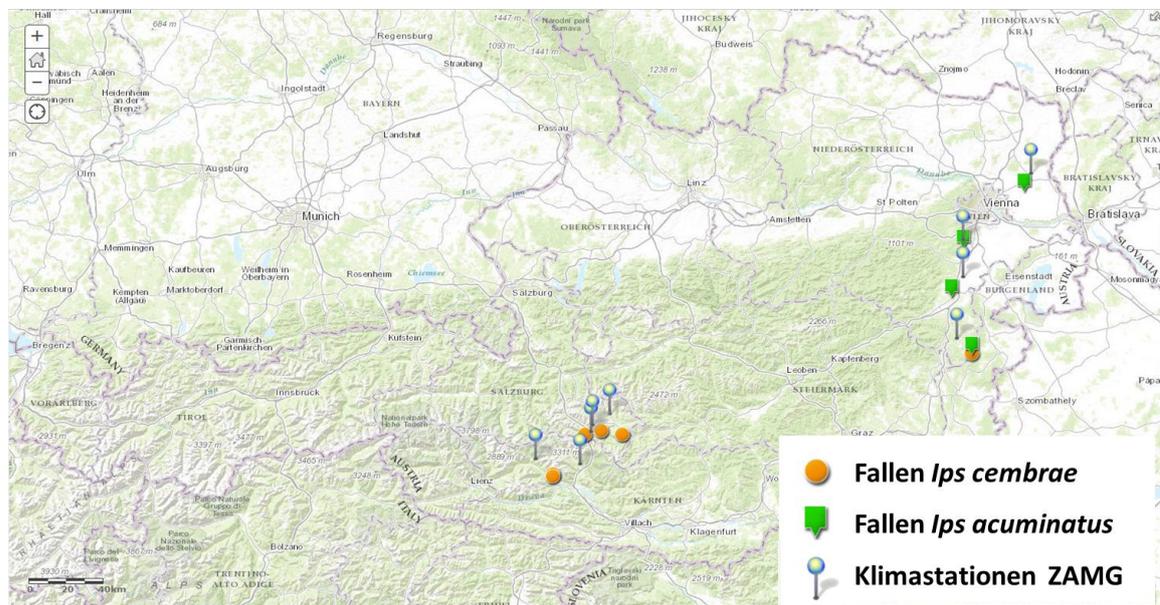
### E-2.2.3 *Entwicklungsmodellierung für Ips acuminatus*

Als Kennwerte für den Schwärmbeginn und den Entwicklungsbeginn der Bruten von *Ips acuminatus* wurden die Angaben von Colombari *et al.* (2012) verwendet.

Für die Modellierung der Brutentwicklung wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (Wild, 2016) Laborzuchten von *Ips acuminatus* (Herkunft: Aicha, nahe Brixen; Südtirol) bei konstanten Temperaturen durchgeführt. Die ermittelten Entwicklungsraten bei unterschiedlichen Temperaturstufen wurden für die Berechnung des Entwicklungsnullpunktes und der effektiven Temperatursumme für die Gesamtentwicklung (Eistadium - reife Jungkäfer) herangezogen.

### E-2.2.4 Modellvalidierung mittels Daten des Fallenmonitorings

Die Modellergebnisse für den Schwärm- bzw. Entwicklungsbeginn von *Ips cembrae* und *Ips acuminatus* wurden anhand von Pheromonfallenfängen für unterschiedliche Standorte in Österreich überprüft. Verwendet wurden dabei Daten des österreichischen Borkenkäfermonitorings des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW; <http://www.borkenkaefer.at/>). Die Fallenstandorte für *Ips cembrae* befinden sich im Pongau (Szbj.) und in Oberkärnten. Einen Standort mit Fallenfängen von *Ips cembrae* befindet sich auch in Ostösterreich (Kirchschlag). Die Standorte des Monitorings für *Ips acuminatus* befinden sich alle im Südosten Niederösterreichs (Abb. E- 3). Für die Validierung wurden die Modellergebnisse, berechnet anhand von Klimadaten von Referenzklimastationen in der näheren Umgebung zu den Fallenstandorten (Tab. E- 2), mit den jeweiligen Terminen des Schwärmbeginns und der ersten Hauptschwärmphase im Frühjahr bei den Fallen verglichen und die Abweichungen (in Tagen) berechnet.



**Abb. E- 3:** Lage der Fallenstandorte des österreichischen Borkenkäfermonitorings zur Validierung der Modellergebnisse für *Ips cembrae* und *Ips acuminatus* sowie Lage von relevante Klimastationen

**Tab. E- 2:** Fallenstandorte für *Ips cembrae* und *Ips acuminatus* und gewählte Klimareferenzstationen

Borkenkäferart	Fallenstandorte					Klimastation			
	Name	Länge	Breite	Seehöhe (m)	Zeitraum	Name	Länge	Breite	Seehöhe (m)
<i>Ips cembrae</i>	Muhr	13,56751	47,08561	1200	2005-2006	MARIAPFARR	13,74500	47,15222	1151
	Hollerberg	13,68211	47,10182	1525	2005; 2007-2015	MARIAPFARR	13,74500	47,15222	1151
	Lasaberg	13,83280	47,08428	1420	2005-2011	MARIAPFARR	13,74500	47,15222	1151
	Kirchschlag	16,29607	47,48885	560	2010	KRUMBACH	16,18667	47,52806	545
	Burgstallweg	13,34357	46,88591	1578	2011-2012	OBERVERLACH	13,22333	46,92889	809
	Hattelberg	13,34586	46,87630	1214	2011-2012	OBERVERLACH	13,22333	46,92889	809
<i>Ips acuminatus</i>	Kirchschlag	16,29607	47,48885	560	2008	KRUMBACH	16,18667	47,52806	545
	Baden	16,23078	48,01344	330	2005-2012	BADEN	16,23556	48,01139	245
	Gänserndorf	16,66238	48,28824	165	2005-2015	GAENSERNDORF	16,71361	48,33778	163
	Neunkirchen	16,15040	47,77219	324	2005-2016	WR.NEUSTADT	16,23139	47,83222	275

### E-2.3 Abschätzung der Prädisposition

Die Abschätzung der Anfälligkeit der Waldbestände und –standorte erfolgt anhand empirischer, wissensbasierender Prädispositionsschlüssel für abiotische Faktoren (Sturm, Schnee) und für biotische Faktoren (Borkenkäferbefall (Führer und Nopp, 2001; Netherer und Nopp-Mayr, 2005). Damit kann die standorts- und bestandesbezogene Gefährdung gegenüber diesen Schadfaktoren mittels eines speziellen Tools (MapModels) berechnet und in ArcView GIS visualisiert werden (Riedl und Kalasek, 1998; Schopf *et al.*, 2004).

Datengrundlage für die Beurteilung der Anfälligkeit der Waldbestände und Standorte gegenüber Sturm- und Schneeschäden bzw. Borkenkäferbefall sind einerseits die Beschreibung der Waldbestände (Baumartenzusammensetzung, Bestandesalter, strukturelle Bestandesparameter (Schichtung, Bestandeshöhe und –dichte)) und der Standortstypen (Bodentyp, Wasserversorgung, Gründigkeit) wie sie im Rahmen der Forsteinrichtungen und Standortkartierungen erhoben werden. Andererseits fließen in die Berechnung der Prädisposition auch modellbasierte Daten (Bewertung des Geländes und der Topographie hinsichtlich der Exposition für Sturm- und Schneeschäden anhand eines digitalen Geländemodells, räumlich-zeitlich modellierte Temperatur- und Niederschlagsverteilungen und die Ergebnisse der Modellierung der Borkenkäferentwicklung) mit ein.

In Tab. E- 3 und Tab. E- 4 sind die für die Prädispositionsabschätzung von Waldflächen der Österreichischen Bundesforste in der Region „Nördliche Kalkalpen“ verwendeten Indikatoren und Kriterien und deren Gewichtung bzw. relative Bewertung angeführt. Für die standörtliche Prädispositionsabschätzung der Waldstandorte in Osttirol wurden zusätzliche Standortparameter aus den detaillierten Beschreibungen der Waldtypen (Bodentyp, Gründigkeit, Skelettgehalt und Wasserversorgung) verwendet und entsprechend bewertet (Schopf *et al.*, 2004).

Entsprechend ihrer relativen Bedeutung werden für die Gefährdungsabschätzung die einzelnen Kriterien des Prädispositionsschlüssels ursachengerecht gewichtet (Tab. E- 3; Tab. E- 4) und deren Ausprägung je nach Einflussnahme auf die Prädisposition mittels Award-Penalty-Point-Systems bewertet (Berryman, 1986; Führer und Nopp, 2001). Für die weitere Berechnung der einzelnen Beiträge zur Gesamtprädisposition werden die Prädispositionspunkte reskaliert (Werte zwischen 0 und 1) und anhand ihrer relativen Gewichtung entsprechend gewertet. Der Quotient aus der Punktesumme der einzelnen Kriterien und der maximal möglichen Punktesumme gibt den Wert der relativen Prädisposition der Beurteilungseinheit wieder.

Durch Addition der Prädispositionspunkte der Einzelkriterien werden für die jeweiligen Standorte/Bestände die Prädispositionsbewertungen für Sturm- und Schneeschäden sowie für Buchdruckerbefall ermittelt. Zudem finden „knock-out“-Kriterien (KO) und Korrekturen der Punktesummen für Jungbestände (Jungwuchs- bis Stangenholz bzw. Bestandesalter <60 Jahre) Anwendung (Schopf *et al.*, 2004). Für die kartographische Darstellung werden die korrigierten, relativen Punktesummen in Form von Gefährdungsklassen ausgegeben (sehr gering: < 20%; gering: 20-<40%; mittel: 40-<60%; hoch: 60-<80%; sehr hoch:  $\geq$ 80% der maximal möglichen Punktesumme).

**Tab. E- 3:** Verwendete Indikatoren und deren Gewichtung zur Prädispositionsabschätzung für Sturm- und Schneeschaden und Borkenkäferbefall

		Indikatoren und Gewichtung				
		bestandesbedingte Prädisposition		standortsbedingte Prädisposition		
<b>Sturm</b>	Anteil Fichte u/o Kiefer		3	Seehöhe		3
	Bestandesentwicklungsstufe		2	Windexposition		2
	Schlußgrad		2	Neigung		2
				Geländemorphologie		1
				Bonität		1
				Wasserhaushalt		1
<b>Schnee</b>	Bestandesalter		5	Geländemorphologie		5
	Schlußgrad		4	Geländeneigung		2
	Fichtenanteil		3	Bonität		1
	Laubholzanteil		3			
	Anteil Lärche, Kiefer, Tanne		3			
<b>Borkenkäfer</b>	Fichtenanteil		5	Generationsentwicklung		5
	Alter		5	Prädisposition Wind		5
	Prädisposition Wind		4	Wasserhaushalt		4
	Bestandesdichte		2	Niederschlagsverhältnisse		3
	Prädisposition Schnee		1	Geländemorphologie		2
				Prädisposition Schnee		1

**Tab. E- 4:** Relative Bewertung der Kriterien zur Prädispositionsabschätzung für Sturm- und Schneeschäden und Borkenkäferbefall anhand der Forsteinrichtungsdaten der Österreichischen Bundesforste für Waldbestände und -standorte in der Region nördliche Kalkalpen

Sturm Bestand		Sturm Standort	
Indikatoren und Kriterien	Bewertung	Indikatoren und Kriterien	Bewertung
<b>Fichtenanteil in %</b>		<b>Bonität</b>	
>=90	0,60	gering	0,00
<90	0,00	mittel	0,10
<b>Laubholzanteil in %</b>		hoch	
<30	0,60		
>=30	0,00	<b>Neigung (%)</b>	
<b>Anteile Lä, Kie, Ta</b>		0-3	0,40
<30	0,60	4-9	0,33
>=30	0,00	10-17	0,27
<b>Bestandesoberhöhe in m</b>		18-36	0,20
<=10	0,00	37-58	0,13
11-15	0,20	59-100	0,07
16-20	0,40	>100	0,07
21-25	0,60	<b>Geländemorphologie (Hauptwindrichtung NW)</b>	
26-30	0,80	Verebnung, Ebene; Plateau	1,00
>30	1,00	Hanglage, Tal quer zur WR	Oberhang 0,96
<b>Bestandesdichte</b>			Mittelhang 0,64
dicht	0,27		Unterhang 0,32
geschlossen	0,00	Hanglage, Tal parallel zur WR	Oberhang 0,32
locker	0,27		Mittelhang 0,96
licht	0,53		Unterhang 0,32
räumdig/ gruppig	0,80	Hanglage, Tal schräg zur WR	Oberhang 0,8
			Mittelhang 0,96
			Unterhang 0,32
		Lee	0,16

<b>Schnee Bestand</b>		<b>Schnee Standort</b>		
<b>Indikatoren und Kriterien</b>	<b>Bewertung</b>	<b>Indikatoren und Kriterien</b>	<b>Bewertung</b>	
<b>Fichten/Kiefern-Anteil</b>		<b>Seehöhe in m ü NN</b>		
>=90	0,75	<=400	0,40	
70-89	0,40	401-600	1,00	
50-69	0,30	601-800	1,00	
40-49	0,20	801-1000	0,80	
<40	0,10	1001-1400	0,60	
<b>Bestandesklasse</b>		>1400		
Jungwuchs	0,10	<b>Wasserhaushalt</b>		
Dickung	0,50	nass	0,33	
Stangenholz	0,50	feucht	0,27	
Baumholz	0,30	sehr frisch	0,20	
<b>Schlussgrad</b>		mäßig frisch	0,13	
gedrängt	0,20	mäßig trocken	0,07	
geschlossen	0,10	trocken	0,00	
locker	0,00	Sonstiges	0,00	
licht	0,20	<b>Bonität</b>		
lückig	0,50	gering	0,00	
		mittel	0,33	
		hoch	0,67	
		<b>Geländemorphologie (Hauptwindrichtung NW)</b>		
		Verebnung, Ebene; Plateau	1,00	
		Hanglage, Tal quer zur WR	Oberhang	0,33
			Mittelhang	0,33
			Unterhang	0,07
		Hanglage, Tal parallel oder schräg zur WR	Oberhang	0,46
			Mittelhang	0,46
			Unterhang	0,20
		Lee	Oberhang	1,00
			Mittelhang	1,00
			Unterhang	0,74
		<b>Neigung (%)</b>		
		0-5	0,67	
		6-20	0,33	
		21-40	0,00	
		41-60	0,33	
		>60	0,67	

<b><i>Ips typographus</i> Bestand</b>		<b><i>Ips typographus</i> Standort</b>	
Indikatoren und Kriterien	Bewertung	Indikatoren und Kriterien	Bewertung
<b>Fichtenanteil in Prozent</b>		<b>Generationsentwicklung</b>	
>70	1,00	> 2 Generationen möglich	1,00
50-70	0,83	2 Generationen	0,60
25-49	0,50	1 Generation und Geschwisterbruten	0,20
10-25	0,17	1 Generation	0,10
1-10	0,08	keine Generationsentwicklung	0,00
keine Fichte	KO	<b>Niederschlagsverhältnisse</b>	
<b>Alter</b>		<360 mm	0,60
< 60	0,20	>=360 mm	0,00
60-79	0,60	<b>Geländemorphologie</b>	
80-100	0,90	Kuppe/ Plateau/ Kammlage	0,40
>100	1,00	Ober- und Mittelhang	0,28
<b>Bestandesdichte</b>		Unterhang/ Tal- oder Muldenlage	0,04
gedrängt, dicht	0,16	<b>Wasserhaushalt</b>	
geschlossen	0,04	trocken	0,80
locker	0,28	mäßig trocken	0,64
licht, räumdig	0,40	mäßig frisch	0,32
<b>Prädisposition ggü Sturm</b>		(sehr) frisch	0,00
keine bis sehr geringe Prädisposition	0,00	feucht	0,32
geringe Prädisposition	0,20	nass	0,48
mittlere Prädisposition	0,40	sonst.	0,00
hohe Prädisposition	0,60	<b>Prädisposition ggü Sturm</b>	
sehr hohe Prädisposition	0,80	keine bis sehr geringe Prädisposition	0,00
<b>Prädisposition ggü Schneebruch</b>		geringe Prädisposition	0,25
keine bis sehr geringe Prädisposition	0,00	mittlere Prädisposition	0,50
geringe Prädisposition	0,05	hohe Prädisposition	0,75
mittlere Prädisposition	0,10	sehr hohe Prädisposition	1,00
hohe Prädisposition	0,15	<b>Prädisposition ggü Schneebruch</b>	
sehr hohe Prädisposition	0,20	keine bis sehr geringe Prädisposition	0,00
		geringe Prädisposition	0,05
		mittlere Prädisposition	0,10
		hohe Prädisposition	0,15
		sehr hohe Prädisposition	0,20

#### E-2.4 Stationsbezogene Klimadaten und regionalisierte Klimaprojektionen

Für die Regionen Nördliche Kalkalpen und Osttirol sowie für die Validierung der Entwicklungsmodelle für *Ips cembrae* und *Ips acuminatus* wurden relevante stationsbezogene Klimadaten (Temperatur, Globalstrahlung und Niederschlag) von Stationen der ZAMG (bereitgestellt von Inst. f. Meteorologie, BOKU) und Daten von Waldklimamessstationen im Bereich der Nationalparke Kalkalpen und Gesäuse sowie des Wildnisgebiets Dürrenstein (online-Monitoringstationen (<http://iff-riskanalyses.boku.ac.at/>); Tab. E- 2) verwendet. Für die Region Südtirol wurden vom Amt für Forstwirtschaft sowie vom Hydrographischen Amt Klimadaten einiger Messstationen im Vinschgau sowie für den Standort Brixen-Vahrn bereitgestellt (Abb. E- 4).

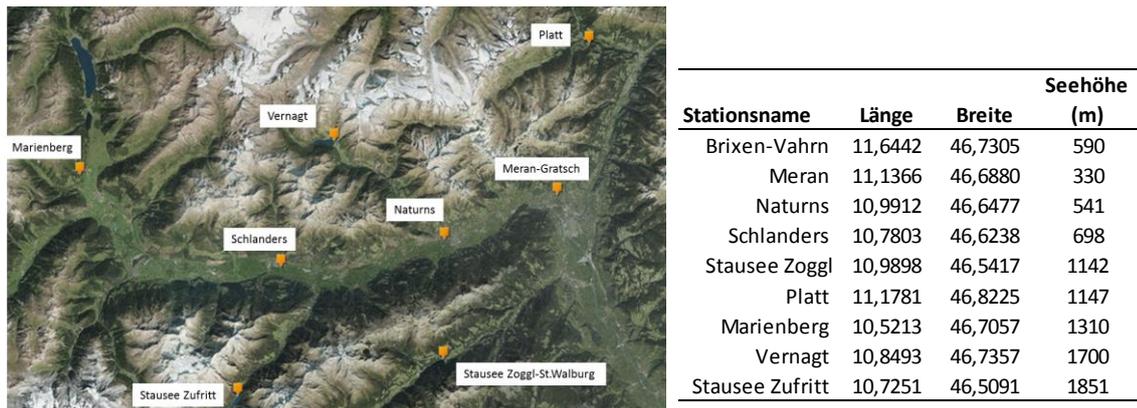


Abb. E- 4: Lage der Klimastationen in Südtirol/Vinschgau

Zur räumlich-zeitlichen Darstellung der Entwicklung der Borkenkäfer für vergangene, gegenwärtige und für die Zukunft projizierte Klimabedingungen wurden drei unterschiedliche, regionalisierte Klimamodelle (RCM Aladin (CNRM, SRES A1B); Modell REMO (UBA, SRES A1B) und CMIP5 (RCP 8.5)) verwendet, die vom Institut für Meteorologie (BOKU) bereitgestellt wurden. Diese Modelldaten haben eine räumliche Auflösung von 1x1 km. Für die Modellierung der Borkenkäferentwicklung und die Prädispositionsabschätzungen wurden tägliche Temperatur-, Einstrahlungs- und Niederschlagsdaten für den Zeitraum 1951-2100 für die in Abb. E- 1 dargestellten Regionen verwendet.

## E-3 Ergebnisse und Diskussion

### E-3.1 Modellierung der Phänologie und Entwicklung der Borkenkäfer

Mit dem Modell PHENIPS für den Buchdrucker wurde anhand täglicher Temperatur- und Einstrahlungsdaten für die drei unterschiedlichen Klimamodelle die jährliche potentielle Entwicklung für alle drei Untersuchungsregionen modelliert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden für 30-Jahresperioden zusammengefasst und entsprechend auch für die weitere standörtliche Gefährdungsabschätzung für Buchdruckerbefall mit dem Prädispositionssystem verwendet. Das Modell PHENIPS wird für das tagesaktuelle Monitoring der Schwärmaktivität und der Entwicklung des Buchdruckers in vielen Gebieten laufend eingesetzt (<http://iff-riskanalyses.boku.ac.at/>; (Schopf *et al.*, 2010)), diente als Grundlage für Risikoabschätzungen und wurde in unterschiedlichen Regionen evaluiert (Seidl *et al.*, 2007; Baier *et al.*, 2009; Berec *et al.*, 2013). Für die weiteren Borkenkäferarten wurden in diesem Projekt Entwicklungsmodelle erstmals auf Basis von Literaturangaben (*Ips amitinus* und *Ips cembrae*) und eignen Untersuchungen (*Ips acuminatus*) entwickelt und angewandt.

#### E-3.1.1 Entwicklungsmodelle für *Ips cembrae* und *Ips amitinus*

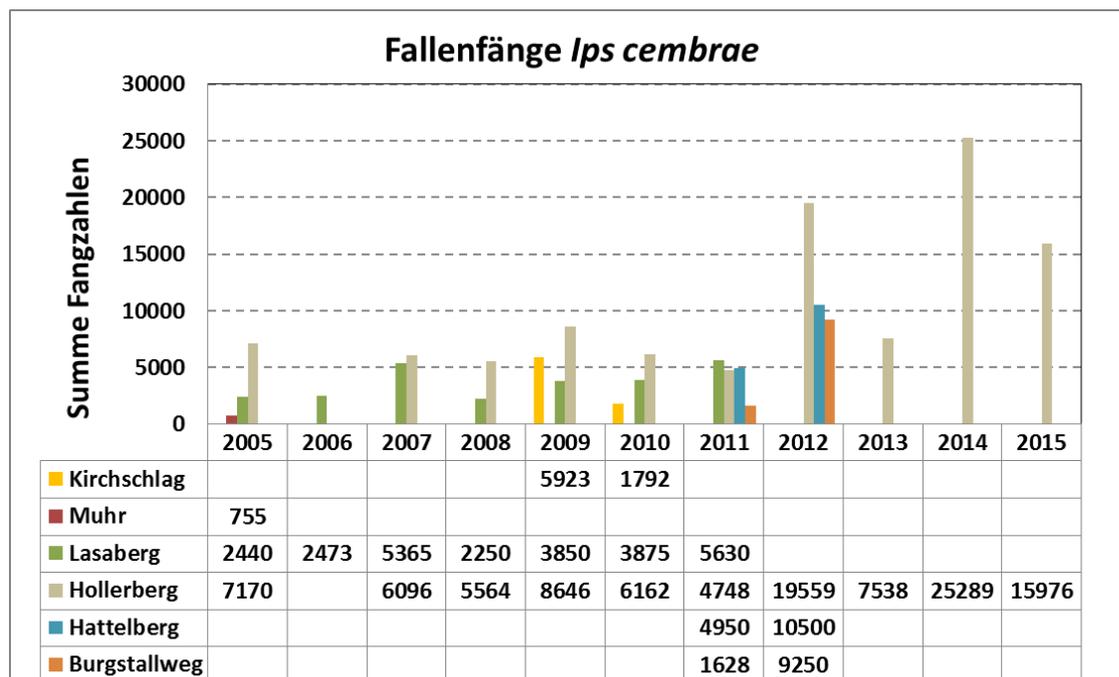
Basierend auf Literaturangaben zur Entwicklung des Lärchenborkenkäfers und des kleinen Buchdruckers wurden Modelle entwickelt mit denen man, ähnlich wie für den Buchdrucker, den Befallsbeginn im Frühjahr, die Schwärmaktivität und die Entwicklung der Bruten in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen abschätzen kann. Für beide Arten werden dabei dieselben Schwellenwerte für den Schwärm- und Befallsbeginn wie für den Buchdrucker verwendet. Das Frühjahrsschwärmverhalten und damit der Beginn der Entwicklung ist für *Ips cembrae* und *Ips amitinus* im Wesentlichen nicht sehr unterschiedlich zum Buchdrucker (Schimitschek, 1931; Zuber, 1992; Nierhaus-Wunderwald, 1995; Nierhaus-Wunderwald und Foster, 2004).

Hinsichtlich der weiteren Entwicklung der Bruten unterscheiden sich aber diese Borkenkäferarten sehr deutlich. Für die Modellierung der Gesamtentwicklungsdauer des Lärchenborkenkäfers vom Eistadium bis zum reifen Jungkäfer wird ein Entwicklungsnullpunkt  $T_0 = 10,1^\circ\text{C}$  und eine effektive Temperatursumme ( $T_{\text{eff}}$ ) von 543 Tagesgraden (dd) verwendet. Für den kleinen Buchdrucker (*Ips amitinus*) beträgt der Entwicklungsnullpunkt  $T_0 = 3,3^\circ\text{C}$  und die effektive Temperatursumme für die Entwicklung einer Generation 945 dd. Im Vergleich zum Buchdrucker ( $T_0 = 8,3^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{eff}} = 557$  dd; Tab. E- 1) besitzt *Ips cembrae* bei vergleichbarer Temperatursumme einen deutlich höheren Entwicklungsnullpunkt. *Ips amitinus* weist dagegen eine hohe Wärmesumme bei gleichzeitig sehr niedrigem Entwicklungsnullpunkt auf.

Die Modellergebnisse für die Entwicklung von *Ips cembrae* wurde anhand verfügbarer Fallendaten evaluiert. Für *Ips amitinus* gibt es kein Monitoring mit Pheromonfallen. Auch sind systematische Beobachtungen und Angaben über die Entwicklung des kleinen Buchdruckers spärlich. Die modellierte Entwicklung von *Ips amitinus* stimmt mit den wenigen Beobachtungen aber gut überein (eine Generation in den Hochlagen, mögliche doppelte Generationszahl in den wärmeren Tallagen (Zuber, 1992; Mazur und Kuzminski, 2013).

E-3.1.1.1 Modellvalidierung *Ips cembrae*

Das Modell für den Lärchenborkenkäfer wurde anhand der Fangzahlen für unterschiedlicher Standorte in Österreich überprüft (Abb. E- 5). Dabei wurden der Entwicklungsbeginn und der Beginn von Folgegenerationen (berechnet anhand beobachteter Wetterdaten benachbarter Klimastationen) mit dem Beginn der Schwärmaktivität und dem saisonalen Verlauf der Fangzahlen verglichen. Die Fangzahlen von *Ips cembrae* weisen auf lokal sehr unterschiedliche Populationsdichten hin. Zudem sind die jährlichen Fangergebnisse sehr stark schwankend und mitunter werden erheblich hohe Fangzahlen erreicht (Maximum: Standort Hollerberg 2014: 25289 gefangene *Ips cembrae*; Abb. E- 5).



**Abb. E- 5:** Jährliche Fangzahlen von *Ips cembrae* für die unterschiedlichen Fallenstandorte

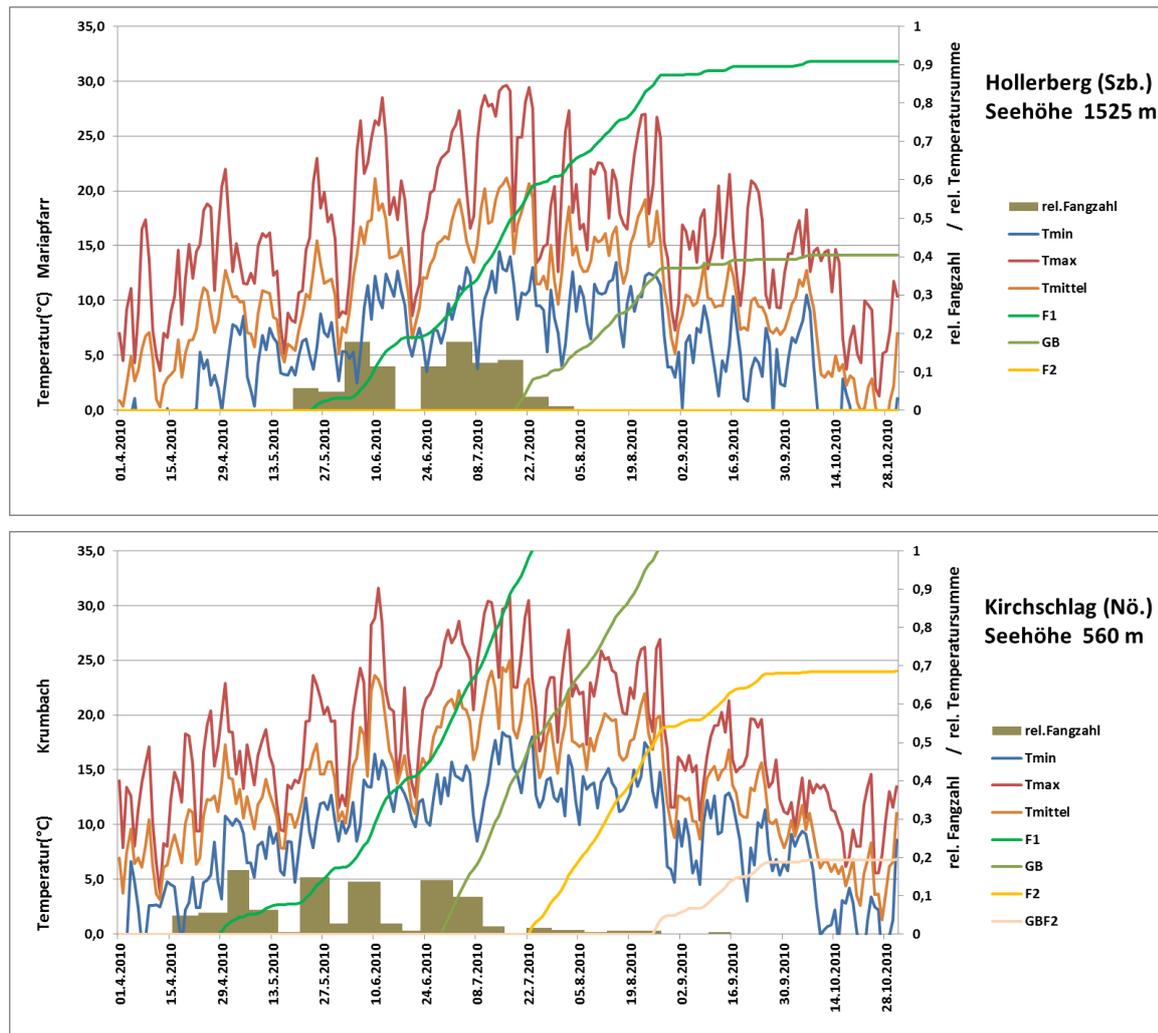
Der Vergleich des modellierten Entwicklungsbeginns von *Ips cembrae* mit dem beobachteten Termin der ersten Hauptschwärmphase bei den unterschiedlichen Fallenstandorten 2005 – 2015 ergab für 39% der Fälle eine exakte Übereinstimmung (Tab. E- 5). Bei diesem Vergleich wurde auch das Kontrollintervall der Pheromonfalle (in der Regel 7 Tage) mitberücksichtigt. Die durchschnittliche Abweichung bei Unterschätzung des Beginns durch das Modell beträgt  $9,3 \pm 5,7$  Tage (Minimum: 3 Tage; Maximum: 20 Tage). Bei Überschätzung des Zeitpunkts der ersten Hauptschwärmphase beträgt die Abweichung  $5,5 \pm 5,7$  Tage (Minimum: 1 Tag; Maximum: 17 Tage).

In Abb. E- 6 wird ein Vergleich der modellierten relativen Temperatursummen für *Ips cembrae* und den relativen Fangzahlen (in Prozent der Jahresfangzahl) für die Standorte Hollerberg und Kirchschiag 2010 dargestellt. Am hochgelegenen Standort Hollerberg kann im Jahr 2010 nur eine Generation von *Ips cembrae* erfolgreich absolviert werden. Die spätbeginnende Geschwisterbrut (Mitte Juli) erreicht bis zum Oktober nicht mehr das für die Überwinterung von *Ips cembrae* notwendige Puppen- bzw. Jungkäferstadium (Teff < 50% der notwendigen Wärmesumme für die Gesamtentwicklung). Flugbeginn und Dauer der Schwärmaktivität stimmen mit dem modellierten Beginn und der simulierten Generationsfolge gut überein. Beim Standort Kirchschiag (Seehöhe 560m) im südlichen Niederösterreich stimmt der berechnete Flugbeginn mit den Fangergebnissen exakt

überein. Beim simulierten Beginn von Geschwisterbruten (F1GB) zeigt sich ein Wiederanstieg der Fangzahlen (Ende Juni). Ab dem Beginn einer zweiten Tochtergeneration (ab 22.Juli) treten nur noch sehr geringe Fangzahlen auf, sodass eine potentielle zweite Generation von *Ips cembrae* sich nur in geringem Ausmaß etablieren kann. Die beobachteten Flugzeiten von *Ips cembrae* stimmen somit auch bei diesem Standort gut mit der modellierten Entwicklung überein.

**Tab. E- 5:** Vergleich des modellierten Entwicklungsbeginns von *Ips cembrae* (berechnet anhand der Wetterdaten von Referenzklimastationen) mit dem beobachteten Termin der ersten Hauptschwärmphase für die unterschiedlichen Fallenstandorte 2005 – 2015

Klimastation	Jahr	modellierter		1. Hauptflug	Abweichung	
		Beginn	Fallenstandort	Falle	(Tage)	
Mariapfarr	2005	13.05.2005	Lasaberg	03.05.2005	10	Unterschätzung
	2006	12.05.2006		09.05.2006	3	Unterschätzung
	2007	22.04.2007		01.05.2007	-2	Überschätzung
	2008	13.05.2008		13.05.2008	0	zutreffend
	2009	07.05.2009		12.05.2009	0	zutreffend
	2010	24.05.2010		04.05.2010	20	Unterschätzung
	2011	23.04.2011		17.05.2011	-17	Überschätzung
Mariapfarr	2005	13.05.2005	Hollerberg	03.05.2005	10	Unterschätzung
	2007	22.04.2007		01.05.2007	-2	Überschätzung
	2008	13.05.2008		27.05.2008	-10	Überschätzung
	2009	07.05.2009		12.05.2009	0	zutreffend
	2010	24.05.2010		25.05.2010	0	zutreffend
	2011	23.04.2011		10.05.2011	-10	Überschätzung
	2012	08.05.2012		15.05.2012	0	zutreffend
	2013	29.04.2013		07.05.2013	-1	Überschätzung
	2014	06.05.2014		13.05.2014	-1	Überschätzung
2015	04.05.2015	12.05.2015	-1	Überschätzung		
Mariapfarr	2005	13.05.2005	Muhr	03.05.2005	10	Unterschätzung
Krumbach	2010	29.04.2010	Kirchschlag	30.04.2010	0	zutreffend
Obervellach	2011	12.04.2011	Burgstallweg	09.04.2011	3	Unterschätzung
	2012	29.04.2012		04.05.2012	0	zutreffend
Obervellach	2011	12.04.2011	Hattelberg	16.04.2011	0	zutreffend
	2012	29.04.2012		04.05.2012	0	zutreffend



**Abb. E- 6:** Vergleich der modellierten Entwicklung für *Ips cembrae* mit dem Temperaturverlauf und den relativen Fangzahlen für die Standorte Hollerberg und Kirchschatz 2010

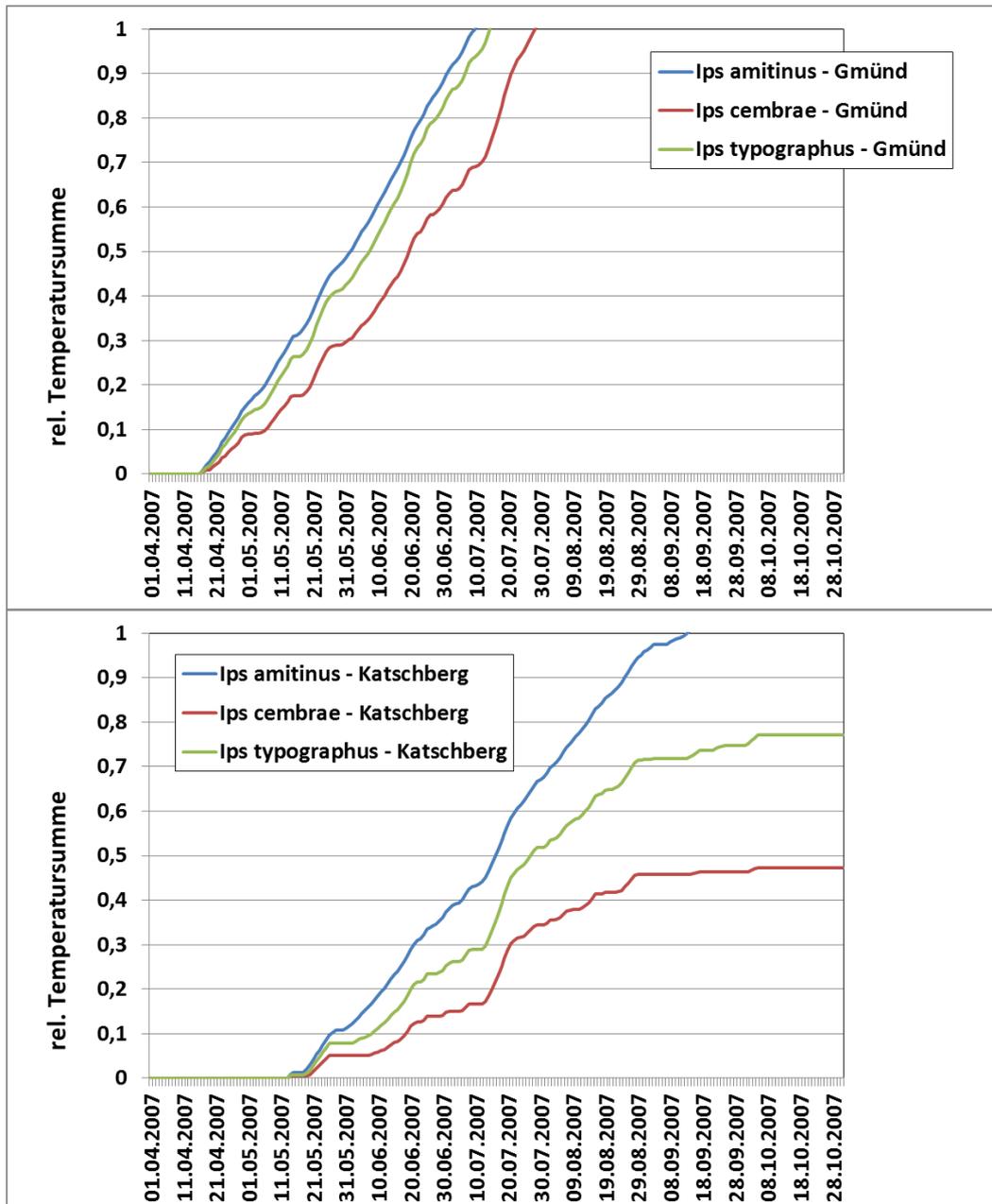
(F1: relative Temperatursumme für die erste Generation; GB: relative Temperatursumme für die Geschwisterbruten; F2; GBF2: relative Temperatursumme für die zweite Filialgenerationen bzw. die Geschwisterbrut der zweiten Generationen)

### E-3.1.1.2 Vergleich der modellierten Entwicklung von *Ips cembrae*, *Ips amitinus* und *Ips typographus*

Ein direkter Vergleich der modellierten Temperatursummen zwischen *Ips cembrae*, *Ips amitinus* und *Ips typographus* zeigt erhebliche Unterschiede in der Entwicklung zwischen diesen Borkenkäferarten auf (Abb. E- 7). Der Große Lärchenborkenkäfer weist dabei aufgrund des hohen Entwicklungsnullpunkts eine deutlich langsamere Entwicklung im Vergleich zu den beiden Buchdruckerarten auf. *Ips cembrae* ist demnach eine wärmeliebende Borkenkäferart, deren Hauptverbreitung eher im randalpinen Bereich zu finden ist. Massenvermehrungen des Lärchenborkenkäfers traten in der Vergangenheit vor allem in den Gebieten auf wo die Lärche als Gastbaumart eingebracht wurde (Nierhaus-Wunderwald, 1995; Schröder *et al.*, 2012).

*Ips amitinus* und *Ips typographus* zeigen in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen in unterschiedlichen Höhenstufen einen sehr unterschiedlichen Entwicklungsverlauf. Während in wärmeren Lagen (zB. Standort Gmünd: 738m Seehöhe; Abb. E- 7) sich

beide Arten annähernd gleich entwickeln, kann sich *Ips amitinus* in den höheren Lagen erheblich schneller entwickeln als der Buchdrucker (Abb. E- 7; Standort Katschberg). *Ips typographus* reagiert hier viel stärker mit reduzierter bzw. stagnierender Entwicklung auf kühle Witterungsverhältnisse als *Ips amitinus*. Im Gegensatz dazu erlauben die vergleichsweise hohen Entwicklungsraten des Buchdruckers bei höheren Temperaturen eine raschere Entwicklung bei günstigen Temperaturverhältnissen, sodass *Ips typographus* in wärmeren Jahren bzw. warmen Lagen durch eine raschere Entwicklung profitiert. *Ips amitinus* dürfte dagegen besser an die generell kühlen Bedingungen in hochmontan/subalpinen Lagen angepasst sein.



**Abb. E- 7:** Vergleich der entwicklungsrelevanten relativen Temperatursummen für die erste Generation der drei unterschiedlichen Borkenkäferarten für einen montanen (Gmünd: Seehöhe 738 m) und einen hochmontanen/ subalpinen Standort (Katschberg: Seehöhe: 1635 m)

### **E-3.1.2    *Entwicklungsmodell für Ips acuminatus***

Der Kiefernborckenkäfer, *Ips acuminatus* ist ein Rindenbrüter der vor allem im dünnrindigen oberen Stamm- und Kronenbereich von Weiß- und Schwarzkiefern brütet. Die Larven von *Ips acuminatus* sind in der Regel mycetophag, d.h. sie ernähren sich nicht nur vom Rinden- und Holzgewebe, sondern auch von Ambrosiapilzen, die sich an den Innenseiten der Larvengänge entwickeln (Francke-Grosmann, 1952, 1963). Massenvermehrungen dieses Borckenkäfers in alpinen Kiefernbeständen in den letzten Jahren haben gezeigt, dass Gradationen von *Ips acuminatus* die Schutzwirksamkeit von Kiefernbeständen erheblich vermindern können (Faccoli *et al.*, 2010; Krehan, 2011; Colombari *et al.*, 2013).

Die Schwellenwerte für das Schwärmen und für den Befallsbeginn im Frühjahr wurden von Colombari *et al.* (2012) übernommen. Die Kennwerte für die Brutentwicklung von *Ips acuminatus* wurden anhand von Laborzuchten bei konstanten Temperaturen ermittelt (Wild, 2016).

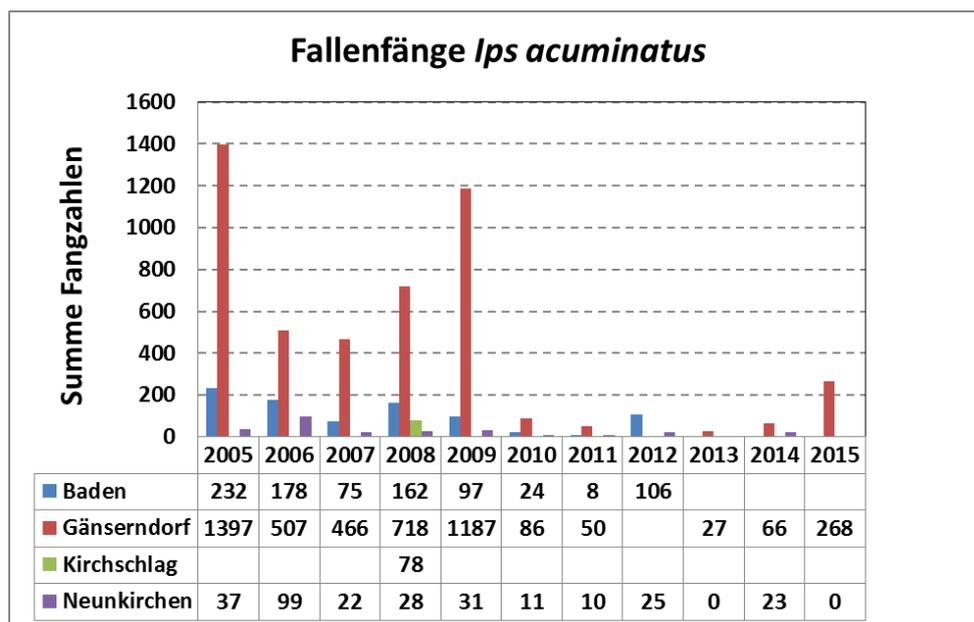
Der Zeitpunkt des Schwärm- bzw. Befallsbeginns von *Ips acuminatus* ist dann gegeben, wenn im Frühjahr das Maximum der Lufttemperatur (LTmax) über 14°C liegt und eine Temperatursumme des Lufttemperaturtagesmittelwerts > 6°C von 98,5 Tagesgraden erreicht wird (Colombari *et al.*, 2012). Diese relativ niedrigen Schwellenwerte charakterisieren *Ips acuminatus* als einen Frühschwärmer, dessen Schwärmflug generell früher einsetzt als bei den anderen Borckenkäferarten (vgl. Tab. E- 1).

Der anhand der Laborexperimente ermittelte Entwicklungsnullpunkt für die Gesamtentwicklung beträgt 6°C. Die notwendige Temperatursumme für die erfolgreiche Absolvierung einer Generation von *Ips acuminatus* beträgt 796 Tagesgrade (Wild, 2016).

#### **E-3.1.2.1    Modellvalidierung Ips acuminatus**

Das Modell für *Ips acuminatus* wurde anhand von Monitoringdaten überprüft. Zum Unterschied zu anderen Borckenkäferarten, Buchdrucker oder Großer Lärchenborckenkäfer, sind die Fangergebnisse von *Ips acuminatus* in der Regel sehr gering (Abb. E- 8). Die Fangzahlen in den Jahren 2005-2015 unterlagen extremen Schwankungen zwischen den Standorten. In einigen Jahren war der Anflug bei den Pheromonfallen zu gering für eine Beurteilung der Flugdynamik von *Ips acuminatus* (Abb. E- 8; Tab. E- 6).

Anhand der verwertbaren Monitoringdaten wurde der jeweilige Entwicklungsbeginn, der anhand von Messdaten benachbarter Klimastationen berechnet wurde, überprüft. Dabei ergab sich für 8 von 18 Fällen eine genaue Übereinstimmung zwischen dem Zeitpunkt der ersten Hauptschwärmphase und dem berechneten Beginn der Brutentwicklung (Tab. E- 6). Die Unter- bzw. Überschätzung des Termins der ersten Hauptflugphase durch das Modell betrug nur wenige Tage (mittlere Abweichung bei Unterschätzung: 6,2 ± 6,5 Tage; bei Überschätzung: 3,3 ± 1,1 Tage). Eine hohe Abweichung des berechneten Beginns von der beobachteten Flugaktivität ergab sich aber im Jahr 2014 für den Standort Gänserndorf (Abweichung 20 Tage), weil hier bereits Ende März/Anfang April aufgrund hoher Temperaturen ein ungewöhnlich starker Flug von *Ips acuminatus* registriert wurde.

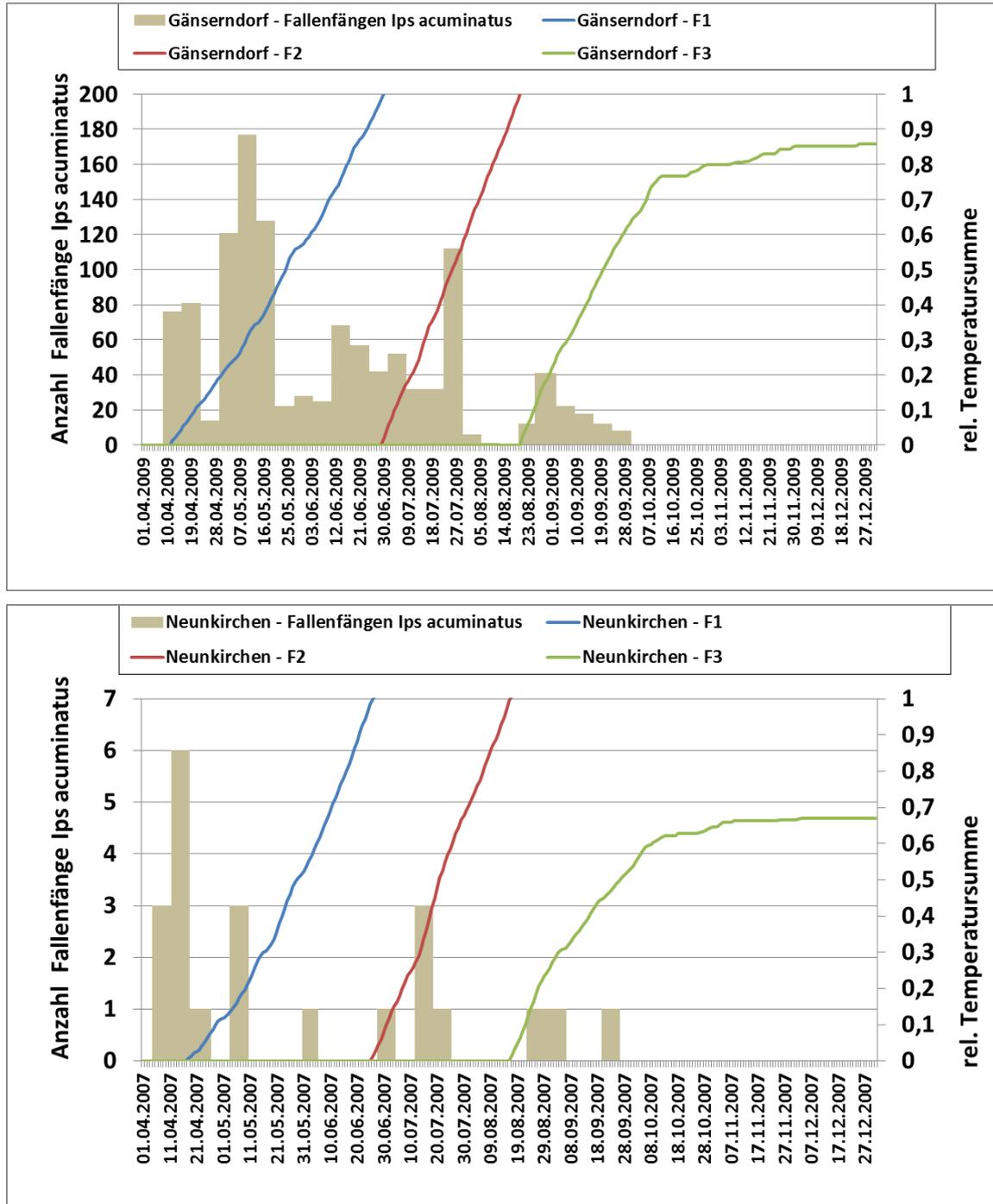


**Abb. E- 8:** Jährliche Fangzahlen von *Ips acuminatus* für die unterschiedlichen Fallenstandorte in Ostösterreich

**Tab. E- 6:** Vergleich des modellierten Entwicklungsbeginns von *Ips acuminatus* (berechnet anhand der Wetterdaten von Referenzklimastationen) mit dem beobachteten Termin der ersten Hauptschwärmphase für die unterschiedlichen Fallenstandorte 2005 – 2015

Klimastation	Jahr	modellierter		1. Hauptflug Abweichung		Anmerkung	
		Beginn	Fallenstandort	Falle	(Tage)		
Baden	2005	23.04.2005	Baden	01.07.2005		keine Fänge im Frühjahr	
	2006	22.04.2006		28.04.2006	0	zutreffend	
	2007	16.04.2007		26.04.2007	-3	Überschätzung	
	2008	25.04.2008		25.04.2008	0	zutreffend	
	2009	12.04.2009		15.04.2009	0	zutreffend	
	2010	27.04.2010		29.04.2010	0	zutreffend	
	2011	17.04.2011					zu wenige
	2012	28.04.2012		25.04.2012	3	Unterschätzung	
Gänserndorf	2005	23.04.2005	Gänserndorf	04.05.2005	-5	Überschätzung	
	2006	23.04.2006		26.04.2006	0	zutreffend	
	2007	17.04.2007		18.04.2007	0	zutreffend	
	2008	25.04.2008		24.04.2008	1	Unterschätzung	
	2009	12.04.2009		22.04.2009	-3	Überschätzung	
	2010	27.04.2010		12.04.2010			keine Fänge im Sommer
	2011	18.04.2011		27.07.2011			keine Fänge im Frühjahr
	2012	27.04.2012					keine Daten
	2013	23.04.2013		24.04.2013	0	zutreffend	
	2014	22.04.2014		02.04.2014	20	Unterschätzung	Flugbeginn schon Ende März
	2015	24.04.2015		22.04.2015	2	Unterschätzung	
Krumbach	2008	02.05.2008	Kirchsschlag	21.05.2008		Fallenaufstellung zu spät	
Wr.Neustadt	2005	25.04.2005	Neunkirchen	20.07.2005		zu wenige	
	2006	24.04.2006		20.04.2006	4	Unterschätzung	
	2007	18.04.2007		11.04.2007	7	Unterschätzung	
	2008	24.04.2008		25.06.2008			zu wenige
	2009	14.04.2009		22.04.2009	-2	Überschätzung	
	2010	28.04.2010		28.04.2010	0	zutreffend	
	2011	17.04.2011		06.09.2011			zu wenige
	2012	28.04.2012		22.08.2012			zu wenige
	2013	24.04.2013					keine Fänge
	2014	23.04.2014		25.06.2014			zu wenige
	2015	24.04.2015					keine Fänge

Die berechnete Generationsentwicklung wurde auch mit den Fallenfängen verglichen. Generell könnte *Ips acuminatus* in Ostösterreich aufgrund der hohen Temperatursummen drei Generationen absolvieren. Die berechnete Generationsabfolge der Tochtergenerationen zeigt einen deutlichen Zusammenhang mit der beobachteten Flugdynamik (Anstieg der Fangzahlen zum jeweils berechneten Beginn von Tochtergenerationen; Abb. E- 9).



**Abb. E- 9:** Vergleich der modellierten Entwicklung für *Ips acuminatus* mit den wöchentlichen Fangzahlen für die Fallenstandorte Gänserndorf 2009 und Neunkirchen 2007

F1: relative Temperatursumme für die erste Generation; F2: zweite Filialgenerationen F3: dritte Generation

## E-3.2 Risikoprofile für die ausgewählten Regionen und Schutzwaldtypen

### E-3.2.1 Regionale Klimamodelle und Klimaänderungssignal

Die für die Modellierung der Borkenkäferentwicklung und die Abschätzung der standörtlichen Prädisposition für Borkenkäferbefall für vergangene, gegenwärtige und zukünftige Klimabedingungen genutzten regionalen Klimamodelle zeigen, entsprechend der zugrunde liegenden Szenarien (A1B, A2, RCP 8.5), sehr unterschiedliche Temperaturänderungssignale für die Untersuchungsregionen und Projektionszeiträume (Tab. E- 7). Die stärksten Zunahmen ( $> +7^{\circ}\text{C}$ ) der projizierten Temperaturen ergeben sich für das Model CMIP5 (Daten nur für die Regionen Osttirol und Nördliche Kalkalpen). Für die Modelle Aladin und REMO ergeben sich Temperaturänderungen zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur Periode 1981-2010 von  $+2,7^{\circ}\text{C}$  bis  $+3,7^{\circ}\text{C}$ . Die projizierten Temperaturänderungen sind dabei für die Region Südtirol höher als für die Region Osttirol bzw. Nördliche Kalkalpen.

Für die Darstellung der Prädisposition wurde das „realistischere“ Modell Aladin genutzt. Hinsichtlich der Veränderung des Niederschlags zeigt das Modell Aladin eine geringe Zunahme des durchschnittlichen Jahresniederschlags für die Periode 2021-2050 und eine Abnahme gegen Ende des Jahrhunderts in den Regionen Osttirol und Nördliche Kalkalpen (Tab. E- 8). Für Südtirol stellen die verwendeten Modelle keine validen Daten bereit. Projektionen der Niederschlagsänderung in Südtirol mit anderen Modellen (Adler *et al.*, 2015) ergeben ein ähnliches Bild wie für die beiden anderen Regionen.

**Tab. E- 7:** Jahresdurchschnittstemperaturen und projizierte Temperaturänderungen gegenüber 1981-2010 der regionalen Klimamodelle Aladin, REMO und CMIP5 für die unterschiedlichen Regionen

	Aladin			REMO			CMIP5	
	nördl. Kalkalpen	Osttirol	Südtirol	nördl. Kalkalpen	Osttirol	Südtirol	nördl. Kalkalpen	Osttirol
<b>Jahresdurchschnittstemperatur (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>								
1981-2010	5,76	2,31	2,14	5,60	2,23	2,08	6,31	2,61
2021-2050	6,72	3,38	3,35	6,55	3,26	3,20	9,44	5,62
2071-2100	8,48	5,12	5,29	8,65	5,69	5,74	14,00	10,12
<b>Temperaturänderung(<math>^{\circ}\text{C}</math>) gegenüber 1981-2010</b>								
2021-2050	0,96	1,07	1,20	0,96	1,03	1,12	3,13	3,00
2071-2100	2,73	2,81	3,14	3,06	3,45	3,66	7,69	7,51

**Tab. E- 8:** Mittlere Niederschlagssumme und projizierte Änderung des Niederschlags (Klimamodell Aladin) für die Regionen Nördliche Kalkalpen und Osttirol

	mittlere Jahressumme des Niederschlags (mm)	
	Nördl. Kalkalpen	Osttirol
1981-2010	942	941
2021-2050	984	971
2071-2100	832	884
<b>Niederschlagsänderung (%) gegenüber 1981-2010</b>		
2021-2050	4,5	3,3
2071-2100	-11,6	-5,9

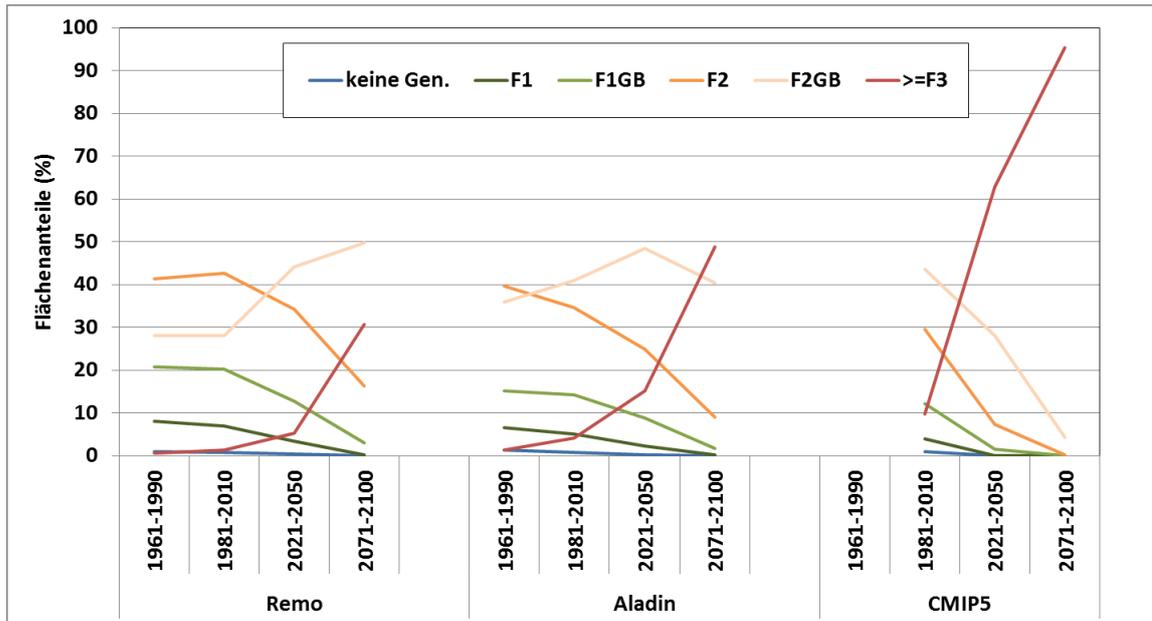
### **E-3.2.2 Risikoprofil Nördliche Kalkalpen**

Für die in der Region Nördliche Kalkalpen dominierenden Fichten-Tannen-Buchen- bzw. Fichten-Lärchenwälder, die teils durch die forstliche Bewirtschaftung sehr hohe Fichtenanteile aufweisen, ist der Befall durch den Buchdrucker (*Ips typographus*) ein wesentlicher Störungsfaktor. Ein wichtiger Indikator für die Gefährdung eines Standorts durch den Buchdrucker ist die Anzahl an Generationen, die pro Jahr absolviert werden können. Mit jeder weiteren Tochtergeneration wächst die Populationsgrösse exponentiell an, wenn ausreichend befallsdisponierte Wirtsbäume zur Verfügung stehen.

Die Simulation der Entwicklung des Buchdruckers für vergangene, gegenwärtige und für die Zukunft projizierte Klimabedingungen zeigt für alle Klimamodelle eine deutliche Zunahme der potentiell möglichen Generationen (Abb. E- 10). In der Vergangenheit und unter gegenwärtigen Klimabedingungen dominiert in der Region Nördliche Kalkalpen die bivoltine Entwicklung, d.h. es können überwiegend zwei Generationen (mit Geschwisterbruten) erfolgreich absolviert werden. Bereiche mit nur einer Generation (+ Geschwisterbrut; univoltine Generationsabfolge) beschränken sich auf die höheren Lagen (Abb. E- 11). Mit der projizierten Zunahme der Temperatur vollzieht sich ein Wandel von dominierend bivoltiner hin zu multivoltiner Entwicklung (drei oder mehr Generationen/Jahr können etabliert werden). Am deutlichsten ist dieser Wandel für die projizierten Klimabedingungen des Modells CMIP5 (Szenario RCP 8.5) mit klarer Dominanz einer potentiell multivoltinen Generationsabfolge in der Periode 2071-2100 (Abb. E- 10). Für die projizierten Temperaturen der Modelle Aladin und REMO nehmen die Flächenanteile mit bi- und multivoltiner Generationsfolge stark zu. Bereiche mit nur einer Generation sind zukünftig auf die höchsten Erhebungen in der Region limitiert. Standorte, die keine erfolgreiche Generationsentwicklung des Buchdruckers erlauben, verschwinden völlig.

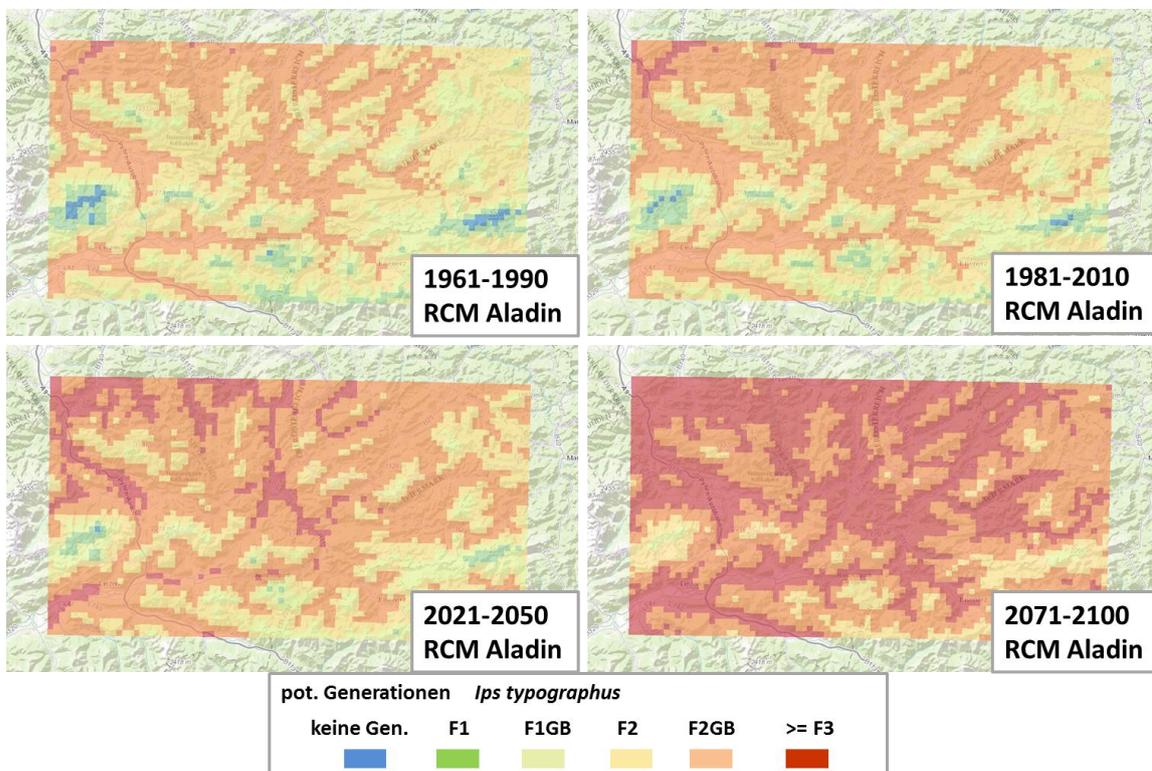
Die Zunahme der potentiell möglichen Generationen ist auch mit einem früheren Schwärm- und Befallsbeginn sowie einer Verschiebung des Ausschwärmens zur Anlage von Geschwisterbruten und der zweiten Generation verbunden, obwohl hier die Photoperiode (Tageslänge) sowohl beim Frühjahrsflug der überwinterten Käfer als auch bei der Anlage von zusätzlichen Geschwister- und Tochtergenerationen limitierend wirkt (Dobart, 2006; Dolezal und Sehnal, 2006). Zudem können unter wärmeren Klimabedingungen spätbegonnene Generationen des Buchdruckers noch das für die erfolgreiche Überwinterung notwendige Jungkäferstadium erreichen und unterliegen daher einer geringen Wintermortalität (Schopf und Kritsch, 2010).

Die projizierten Klimaänderungen bewirken eine Zunahme der Anzahl an erfolgreich absolvierten Generationen, eine abnehmende Wintermortalität spätbegonnener Bruten und eine Verschiebung der Schwärmzeiten des Buchdruckers zu früheren Zeitpunkten im Laufe der Vegetationsperiode. Die zusätzlichen Generationen könnten dazu führen, dass schneller kritische Populationsdichten zur Besiedelung vitaler, stehender Bäume erreicht werden. Grundsätzlich bedeutet eine weitere, vollständige Generation in einem Gebiet einen weiteren Käferflug und damit ein zusätzliches Befallsereignis pro Jahr.



**Abb. E- 10:** Flächenanteile der potentiell möglichen Anzahl an Generationen des Buchdruckers in den nördlichen Kalkalpen für die unterschiedlichen Klimamodelle (Durchschnittswerte für die jeweilige 30-Jahresperiode)

Durchschnittswerte der jährlich maximal möglichen Generationen für die Perioden 1961-1990, 1981-2010 und für die Klimaprojektionen (Modell Aladin) für 2021-2050 und 2071-2100 (F1: eine Filialgeneration; F1GB: eine Filialgeneration und Geschwisterbruten; F2: zwei Filialgenerationen; F2GB: zwei Generationen und Geschwisterbruten; >=F3; drei Filialgenerationen oder mehr)

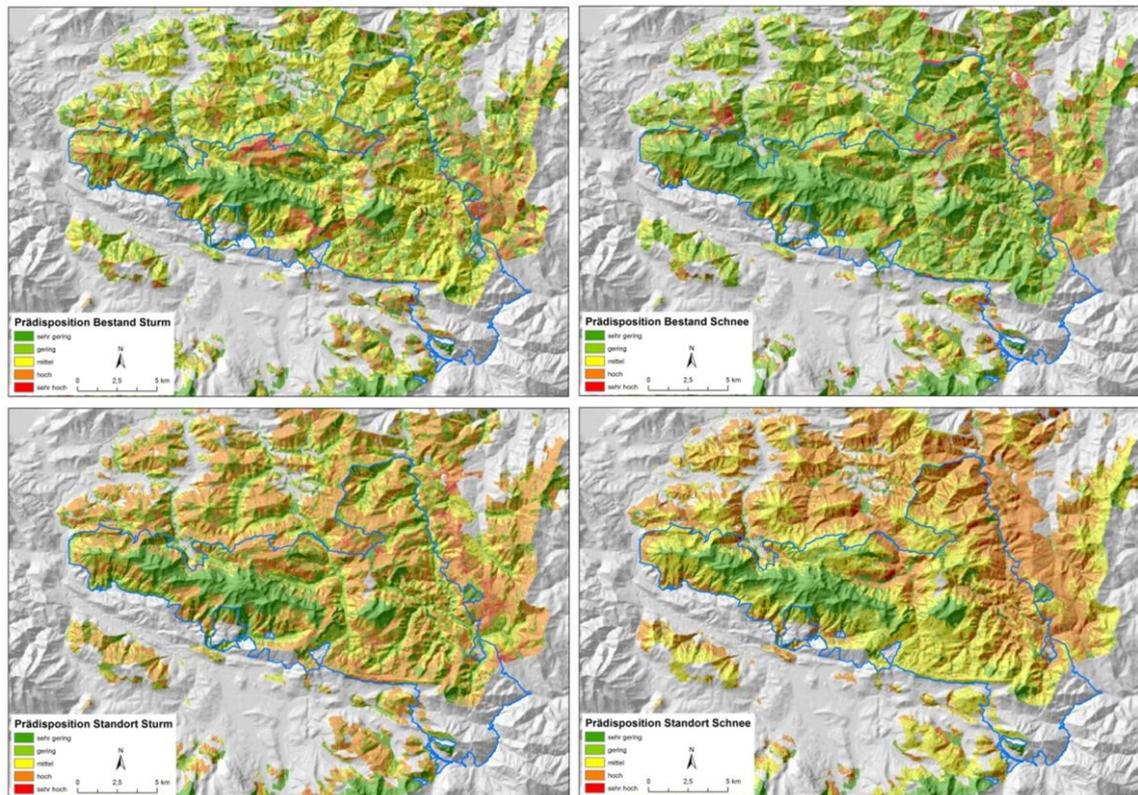


**Abb. E- 11:** Potentiell mögliche maximale Anzahl an Generationen des Buchdruckers in den nördlichen Kalkalpen (Abkürzungen wie in Abb. E- 10)

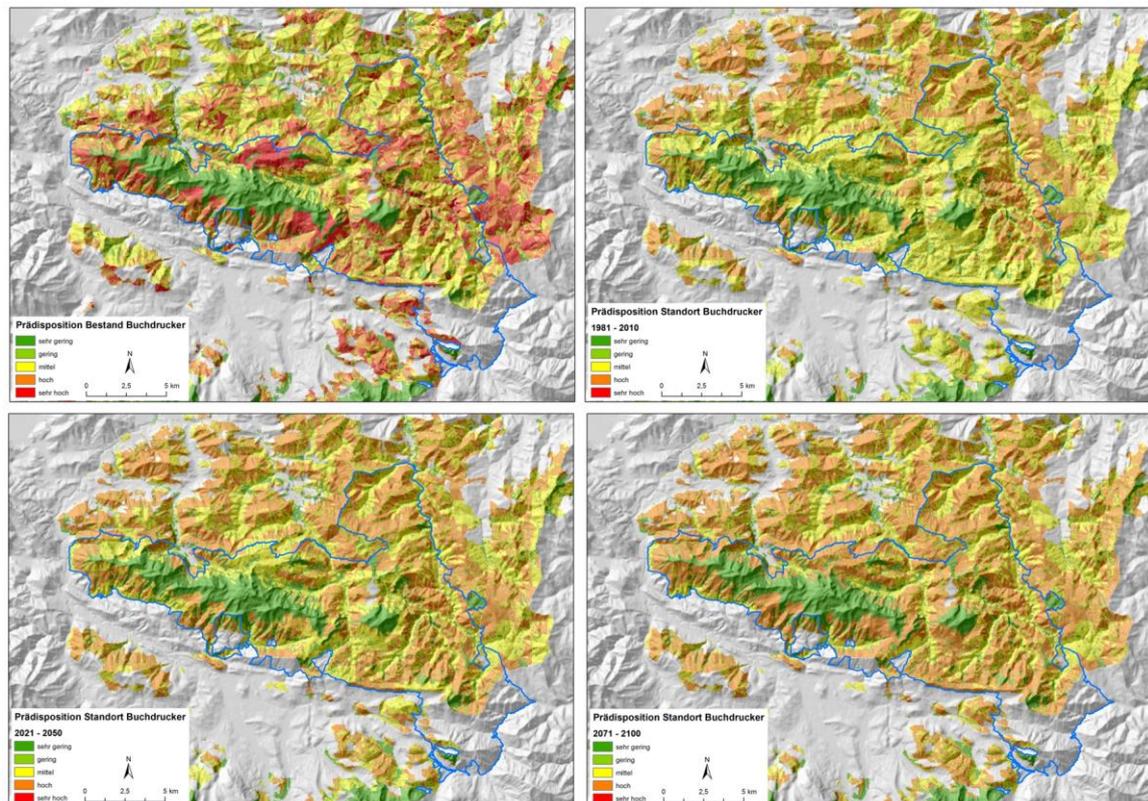
Die mögliche Zunahme der Generationszahl des Buchdruckers in der Region Nördliche Kalkalpen könnte daher die Anfälligkeit der Waldbestände- und -standorte für den Befall entscheidend verändern. Neben dem Vermehrungspotential des Buchdruckers ist die standörtliche und bestandesbedingte Prädisposition für Sturm- und Schneeschäden ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Anfälligkeit für Borkenkäferbefall. Grundsätzlich ist diese Region vergleichsweise stärker exponiert für Sturm- und Schneebruchschäden (Nordstaulage) als andere Regionen in den Ostalpen. Sturmereignisse sind in dieser Region als ein wesentlicher Auslöser für Massenvermehrungen des Buchdruckers anzusehen, da dieses Gebiet hohen Jährlichkeiten von extremen Windspitzen (insbesondere in Folge von Winterstürmen) ausgesetzt ist (vgl. <http://www.hora.gv.at/>). In Abb. E- 12 sind für Waldflächen der österreichischen Bundesforste im Bereich des Nationalparks Kalkalpen die Bewertungen hinsichtlich der Anfälligkeit gegenüber Sturm- und Schneeschäden dargestellt. Die Abschätzung der standortsbezogenen Prädisposition gegenüber Schnee- als auch Sturmschäden anhand des Prädispositionsschätzsystems verdeutlicht die unterschiedlichen Charakteren dieser beiden Schadfaktoren. Während hohe standörtliche Schneeschadensanfälligkeit für tiefergelegene, leeseitige Lagen ausgewiesen wird, tritt hohe standortsbezogene Sturmschadensanfälligkeit bei windexponierten Oberhängen, Kuppenlagen sowie Geländeverebnungen und pseudevergleyten/vernässten Standorten auf. Hinsichtlich der bestandesbezogenen Prädisposition gegenüber Sturm- und Schneeschäden tritt hohe bis sehr hohe Gefährdung nur lokal, insbesondere in zum Nationalpark angrenzenden, fichtendominierten Wirtschaftswäldern und in den höheren Lagen auf.

Hohe bis sehr hohe bestandesbezogene Gefährdungsmomente für Buchdruckerbefall ergeben sich für besonders fichtenreiche, lichte Altbestände (Abb. E- 13), wobei größere, flächig zusammenhängende Bereiche mit hoher bis sehr hoher bestandesbezogener Prädisposition für Buchdruckerbefall im Gebiet des Nationalparks vor allem in den höheren Lagen auftreten. Insgesamt werden anhand der Bestandeseigenschaften 19 % der Waldflächen im Nationalpark als sehr hoch, 32,8 % der Waldfläche als hoch prädisponiert gegenüber Borkenkäferbefall eingestuft.

Die relativ geringen Unterschiede hinsichtlich der Einschätzung des Vermehrungspotentials des Buchdruckers im Bereich des Nationalparks Kalkalpen (überwiegend doppelte Generation), die durchschnittlich hohen Niederschlagsmengen sowie hohe standörtliche Sturmschadensprädisposition in höheren, exponierten Lagen einerseits und hohe Schneeschadensanfälligkeit der tieferen Lagen andererseits, führen zu einer insgesamt wenig differenzierten standortsbezogenen Prädisposition gegenüber Buchdruckerbefall unter gegenwärtigen Klimabedingungen (Abb. E- 13). Tiefere Lagen weisen eine überwiegend hohe Befallsgefährdung, höhere Lagen dagegen eine geringe bis mittlere standörtliche Prädisposition gegenüber Borkenkäferbefall auf. Durch die Zunahme der Generationszahl des Buchdruckers in Folge der Klimaerwärmung nimmt die standörtliche Prädisposition in den Hochlagen deutlich zu (überwiegend hohe Prädisposition am Ende des Jahrhunderts; Modell Aladin, Abb. E- 13). Die durchschnittlich hohen Niederschlagsmengen ergeben aber auch zukünftig für die tiefer gelegenen Standorte keine sehr hohe standörtliche Prädisposition gegenüber Buchdruckerbefall.



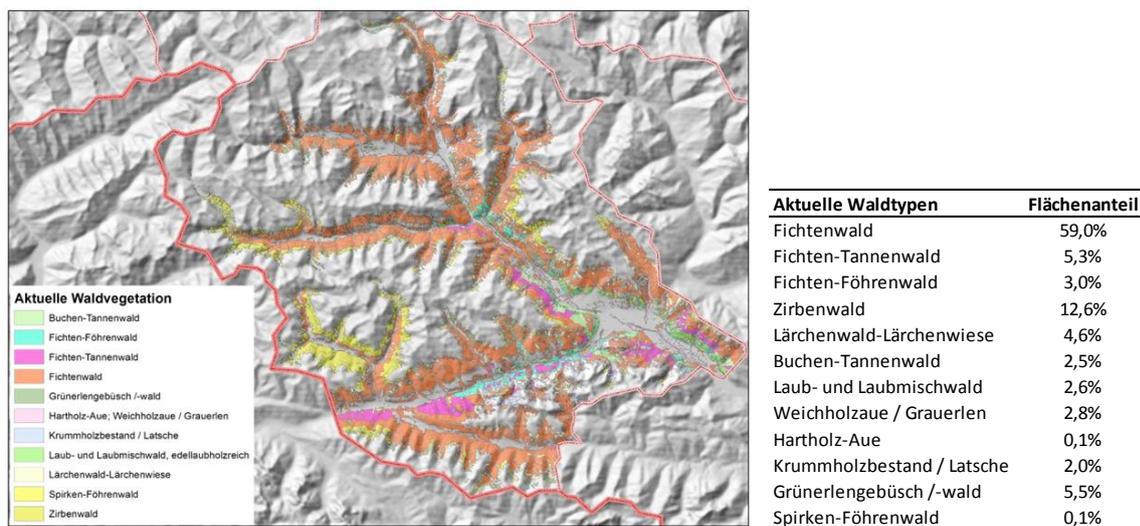
**Abb. E- 12:** Bestandes- und standortsbedingte Prädisposition gegenüber Sturmschäden und Schneebruch für Waldbestände der ÖBf im Bereich des Nationalparks Kalkalpen



**Abb. E- 13:** Bestandes- und standortsbedingte Prädisposition gegenüber Borkenkäferbefall und Veränderung der standörtlichen Prädisposition basierend auf Klimadaten des Modells Aladin

### E-3.2.3 Risikoprofil Osttirol

Die Waldvegetation in Osttirol ist geprägt durch das überwiegend natürliche Vorkommen fichtenreicher Gebirgswaldtypen in der montanen bis subalpinen Höhenstufe (Abb. E-14). Mehr als 60% der Waldfläche in Osttirol werden Fichtenwaldtypen zugeordnet. Die Schutzwälder in Osttirol umfassen aber auch Zirben-Lärchenwälder (teils in Höhenlagen über 2000m) und reine Lärchenwälder bzw. Lärchenmischwälder. Für die Gefährdungsabschätzung wurde daher, neben der Modellierung der Buchdruckerentwicklung, auch eine Abschätzung der potentiellen Entwicklung der an Zirbe und Lärche vorkommenden Arten, Kleiner Buchdrucker (*Ips amitinus*) und Großer Lärchenborkenkäfer (*Ips cembrae*) für gegenwärtige und zukünftig Klimaverhältnisse vorgenommen.

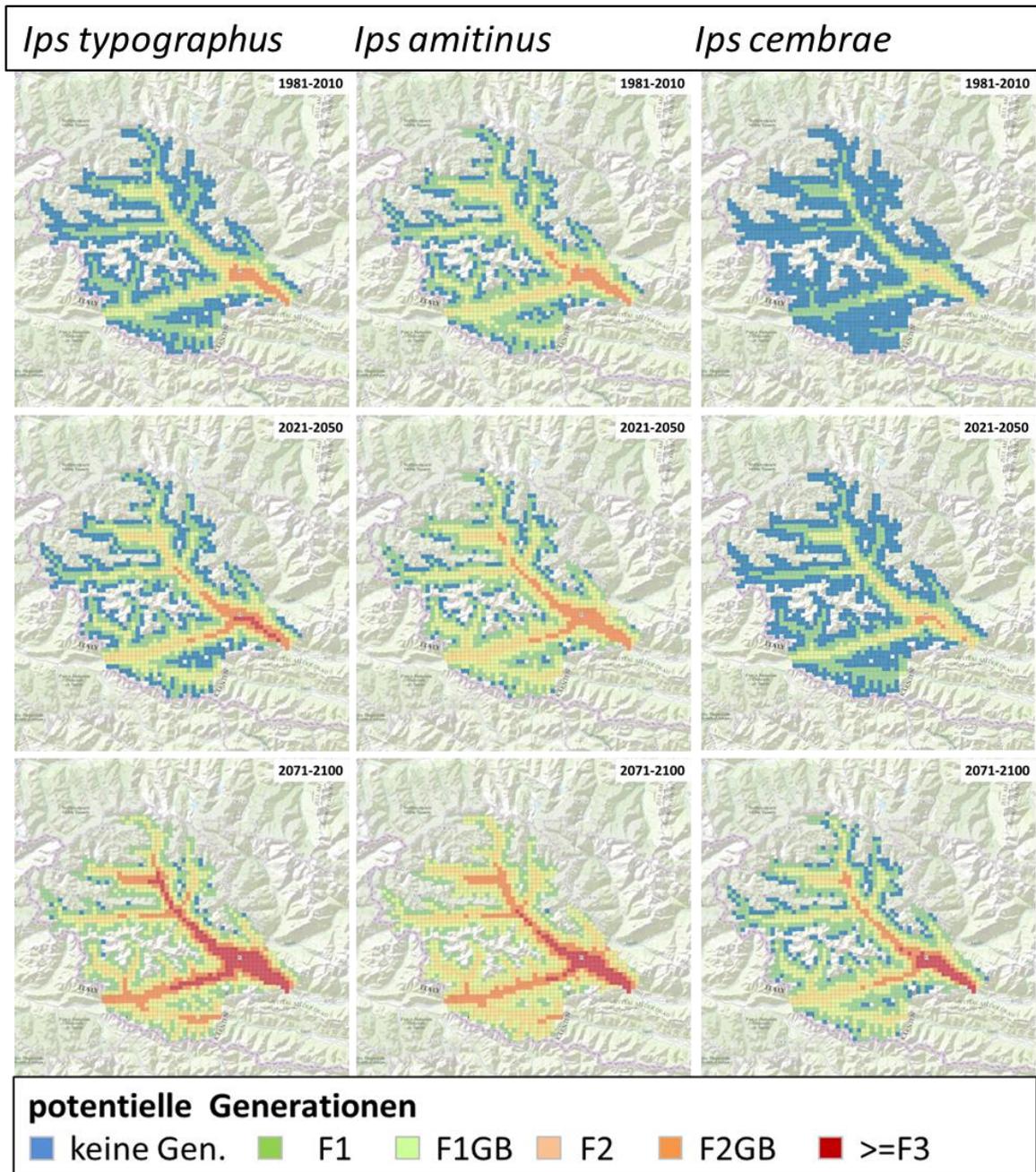


**Abb. E- 14:** Aktuelle Waldvegetation und Flächenanteile der unterschiedlichen Typen in Osttirol (nach der Kartierung von Schiechtl/Stern)

Für den Buchdrucker ergeben die Modellierungen anhand der Daten des regionalen Klimamodells Aladin eine Erhöhung der Generationszahl. Unter gegenwärtige Temperaturbedingungen kann der Buchdrucker in den höheren Lagen (>800 m - 1700 m Seehöhe) in Osttirol in der Regel nur eine Generation (+Geschwisterbrut) absolvieren. Oberhalb von 1700 m Seehöhe kann *Ips typographus* generell seine Entwicklung nicht erfolgreich abschließen. Dies ändert sich mit der projizierten Temperaturzunahme, sodass in der Periode 2071-2100 in den unteren Tal- und Hanglagen der Buchdrucker bereits drei Generationen erfolgreich etablieren könnte (Abb. E- 15). In Berglagen von 1100 m bis 1700m dominiert die doppelte Generationsentwicklung. Waldstandorte, für die keine Entwicklung des Buchdruckers möglich ist, verschwinden fast vollständig gegen Ende des Jahrhunderts ((Abb. E- 15).

Der Kleine Buchdrucker (*Ips amitinus*) kann bei derzeitigen Klimaverhältnissen in Osttirol in deutlich höheren Lagen als der Buchdrucker noch eine Generation erfolgreich absolvieren. Daher dürfte der kleine Buchdrucker in den hochgelegenen Zirbenwaldbeständen in der Regel seine Entwicklung bis zum Jungkäfer abschließen können (Abb. E- 15; Abb. E- 17). In den tieferen Berglagen ist die Entwicklung des kleinen Buchdruckers ähnlich wie die von *Ips typographus* (überwiegend eine Generation mit Geschwisterbrut). Mit der Temperaturerhöhung nimmt auch die Generationszahl des Kleinen Bruch-

druckers zu, sodass gegen Ende des Jahrhunderts bis in hochmontane Lagen *Ips amitinus* eine doppelte Generationsentwicklung aufweisen könnte.

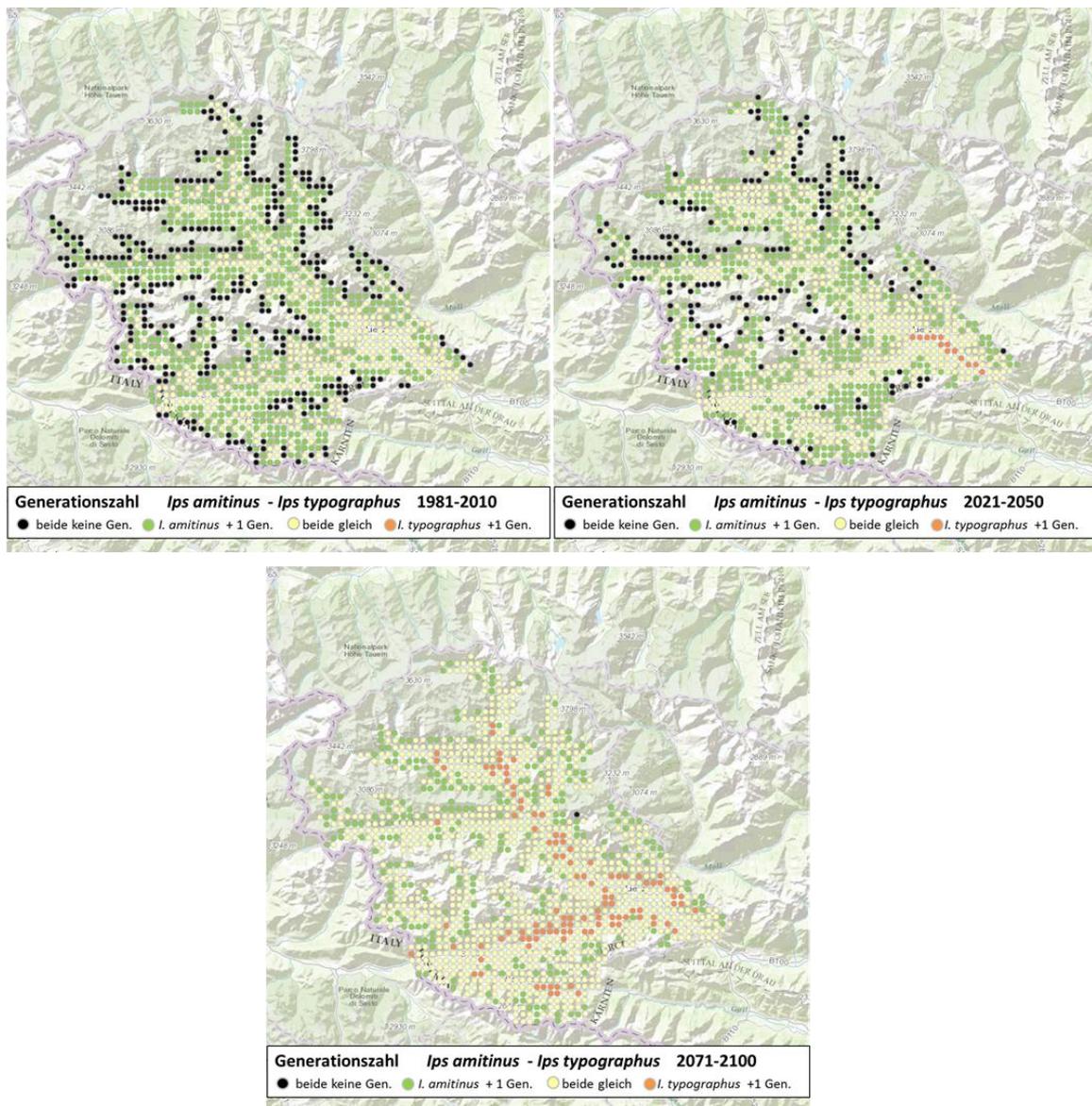


**Abb. E- 15:** Potentiell mögliche Anzahl an Generationen des Buchdruckers (*Ips typographus*), des Kleinen Buchdruckers (*Ips amitinus*) und des Großen Lärchenborkenkäfers (*Ips cembrae*) für Waldstandorte in der Region Osttirol (Modell Aladin, Abkürzungen wie in Abb. E- 10)

Durchschnittswerte der jährlich möglichen Generationen für die Periode 1981-2010 und für die Klimaprojektionen (Modell Aladin) für 2021-2050 und 2071-2100 (Abkürzungen wie in Abb. E- 10)

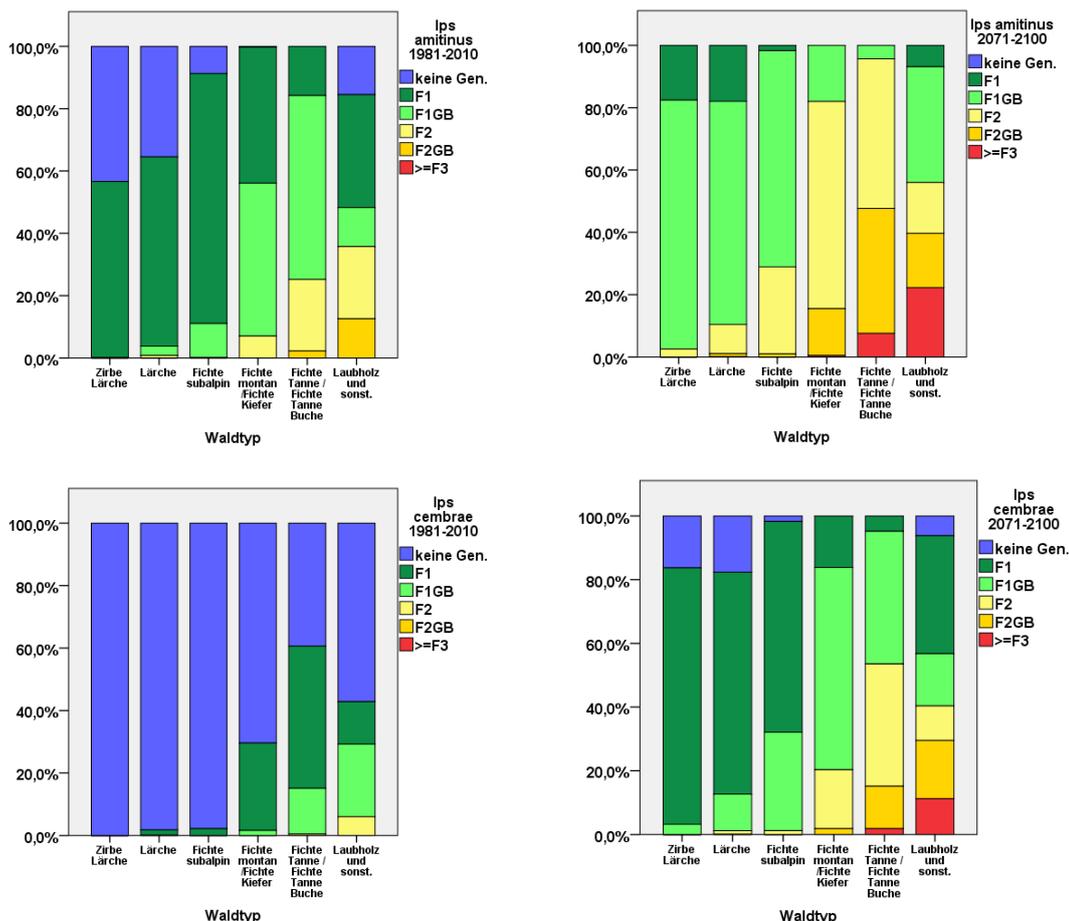
Zudem zeigt sich mit der Zunahme der Temperaturen eine Verschiebung der Entwicklungsverhältnisse zwischen *Ips amitinus* und *Ips typographus*, die sich auch auf die zwi-

schenartige Konkurrenz auswirken könnten. Für die Periode 2071-2100 zeigt sich, dass *Ips typographus* in den Berglagen seine Entwicklung rascher vollführen kann als *Ips amitinus* (Abb. E- 16), und sich daher als Brutraumkonkurrent gegenüber *Ips amitinus* besser etablieren könnte.



**Abb. E- 16:** Differenz der potentiell möglichen Anzahl an Generationen des Kleinen Buchdrückers und des Buchdrückers für die Perioden 1981-2010, 2021-2050 und 2071-2100 für Waldstandorte in Osttirol

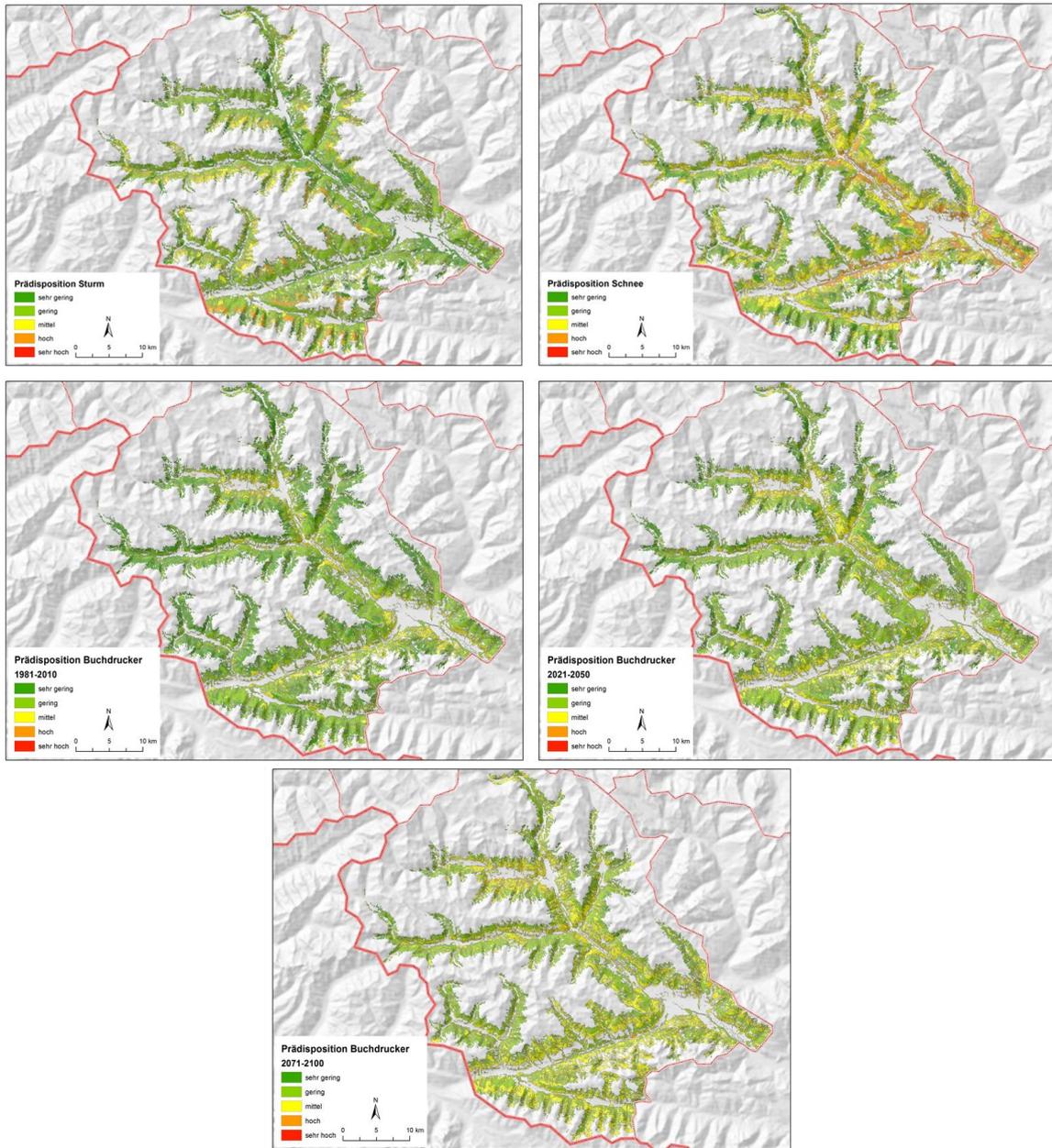
Für den an Lärche vorkommenden Borkenkäfer *Ips cembrae* zeigt die Entwicklungsmodellierung für gegenwärtige Temperaturverhältnisse, dass sich diese Art nur in den unteren Lagen und in den Haupttälern erfolgreich entwickeln kann (Abb. E- 15). *Ips cembrae* dürfte daher nur in außergewöhnlich warmen Jahren in den hochmontan/subalpinen Waldbeständen in Osttirol auftreten. Durch die Klimaerwärmung nimmt die durchschnittliche Generationszahl für *Ips cembrae* zu, sodass der Große Lärchenborkenkäfer gegen Ende des Jahrhunderts auch in den hochmontanen/subalpinen Zirben-Lärchenwäldern eine Generation (und Geschwisterbrut) entwickeln und wesentlich stärker in montanen Lärchen-Fichten-Mischbeständen in Erscheinung treten könnte (Abb. E- 15, Abb. E- 17).



**Abb. E- 17:** Flächengewichtete relative Anteile der verschiedenen Generationen für *Ips amitinus* und *Ips cembrae* für gegenwärtige (1981-2010) und zukünftige Klimabedingungen (2071-2100; Modell Aladin) getrennt nach Waldtyp in Osttirol

Die Abschätzung der Anfälligkeit der Waldstandorte gegenüber Sturm- und Schneeschäden in Osttirol zeigt, ähnlich wie für die Region Nördliche Kalkalpen, hohe Gefährdung für Schneeschäden in den Tallagen und leeseitigen Taleinhängen sowie hohe Sturmgefährdung für exponierte Berglagen und für Standorte mit ungünstigen Bodenwasserhaushalt (wechselfeuchte und staunasse Bodentypen) (Abb. E- 18). Bezüglich Sturmschäden dürften in Osttirol lokale Schadereignisse in Folge von räumlich eng begrenzten Ereignissen (Sommergewitter) eine wesentlich größere Rolle spielen als in nordalpinen Regionen. Diese kleinflächig aber häufig auftretenden Störungen könnten entscheidend die Dynamik der Waldentwicklung beeinflussen (Firm *et al.*, 2009; Klopčič *et al.*, 2009).

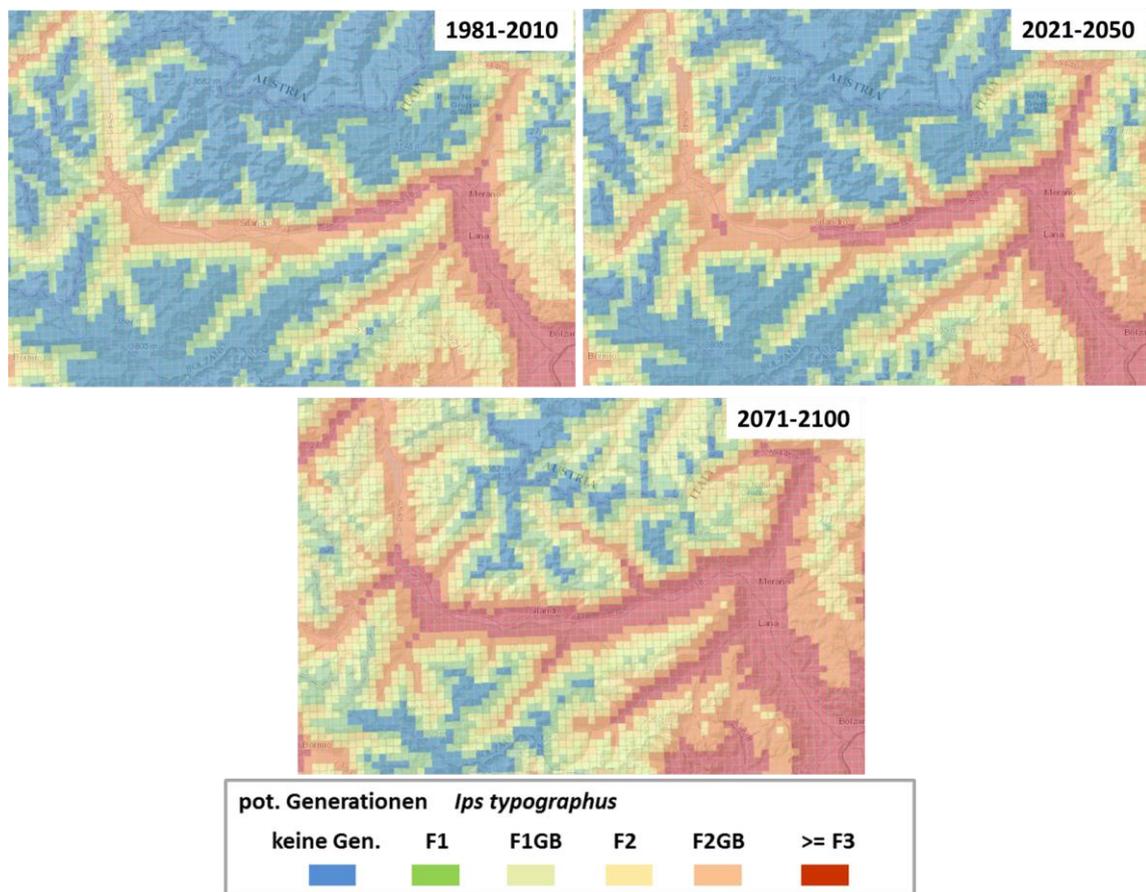
Die Prädispositionsabschätzung für Buchdruckerbefall in der Region Osttirol ergibt für gegenwärtige Klimaverhältnisse in den Tallagen und unteren Berglagen eine überwiegend mittlere Gefährdung. Für Waldstandorte über 1100m Seehöhe wird eine sehr geringe bis geringe Gefährdung auf Grund der Standortseigenschaften und der gegenwärtigen Klimawerte ausgegeben (Abb. E- 18). Mit der projizierten Klimaveränderung nimmt die standörtliche Anfälligkeit gegenüber Buchdruckerbefall zu. In der Periode 2071-2100 weisen die meisten Waldstandorte in Osttirol eine mittlere Gefährdung auf. Insbesondere im Virgental, das sich durch vergleichsweise niedrigere Niederschlagsmengen aufgrund der orographischen Abschattung auszeichnet, treten lokal gehäuft auch hoch prädisponierte Bereiche auf. In Höhenlagen über 1700 m Seehöhe sind jedoch die Standorte in der Periode 2071-2100 noch dominierend gering prädisponiert gegenüber Buchdruckerbefall.



**Abb. E- 18:** Standortsbedingte Prädisposition gegenüber Sturmschäden, Schneebruch und Buchdruckerbefall und Veränderung der standörtlichen Prädisposition gegenüber Befall durch *Ips typographus* in Osttirol

### E-3.2.4 Risikoprofil Südtirol/Vinschgau

Für die Region Vinschgau in Südtirol zeigt die Modellierung der Entwicklung des Buchdruckers ebenfalls eine Zunahme der Generationszahl pro Jahr mit der Temperaturänderung. Für diese Region wird bis zum Ende des Jahrhunderts ein vergleichsweise höherer Temperaturanstieg simuliert (Tab. E- 7). In der Periode 2071-2100 könnten auch im oberen Vinschgau bis zu drei Generationen des Buchdruckers möglich sein (Abb. E- 19). Die in diesem Projekt verwendeten Klimamodelle stellen für die Region Vinschgau keine Niederschlagsdaten bereit. Für das inneralpine Trockental zeigen andere Untersuchungen keinen klaren Trend einer zukünftigen Niederschlagsänderung (Abnahme des Jahresniederschlags bis Ende des 21. Jahrhunderts; Zunahme der Intensität der einzelnen Niederschlagsereignisse (Adler *et al.*, 2015; Drechsel *et al.*, 2016)).



**Abb. E- 19:** Potentiell maximal mögliche Anzahl an Generationen des Buchdruckers in der Region Vinschgau/Südtirol

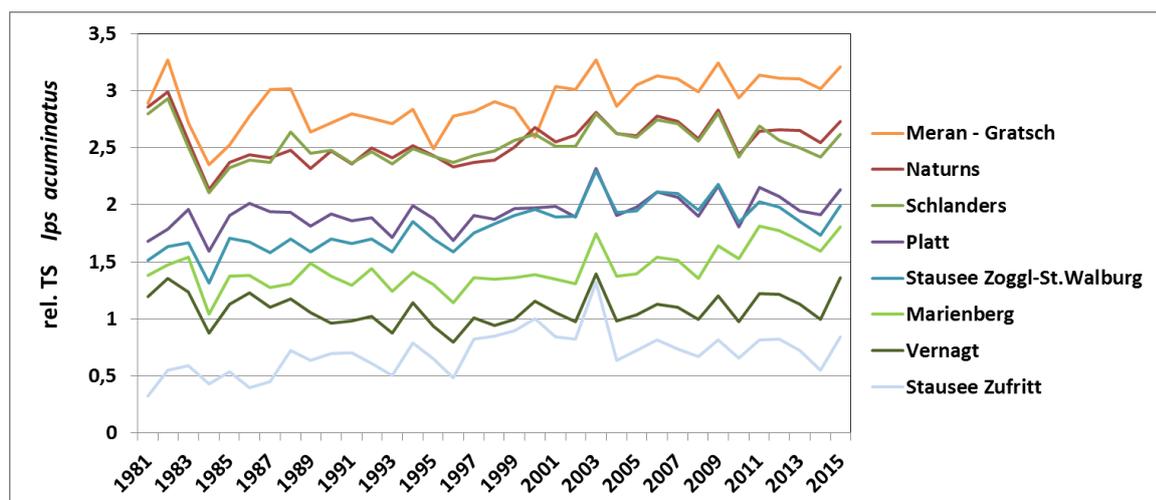
Durchschnittswerte der jährlich maximal möglichen Generationen für die Perioden 1981-2010 und für die Klimaprojektionen (Modell Aladin) für 2021-2050 und 2071-2100 (Abkürzungen wie in Abb. E- 10)

Für den unteren Vinschgau charakteristisch sind kiefernreiche Schutzwälder entlang der trockenen, steilen Taleinhänge (Vinschgauer Flaumeichen-Kiefernwald und Lärchen-Kiefernwald). Diese Waldkiefernbestände und Schwarzkiefernauflorungen stocken auf teils extremen, nährstoffarmen und seichtgründigen Standorten bis in Höhen über 1200

m Seehöhe und sind daher für Trockenstress, Waldbrand und den Befall durch diverse Schadinsekten, u.a. Borkenkäfer, sehr anfällig.

Anhand der Modellierung der Entwicklung des sechszähligen Kiefernborke­nkäfers, *Ips acuminatus*, soll das Vermehrungspotential dieser Borkenkäferart in dieser Region erstmals dargestellt werden. Für die Modellierung wurden die beobachteten Temperaturdaten für Klimastationen im Vinschgau in den Jahren 1981-2015 verwendet.

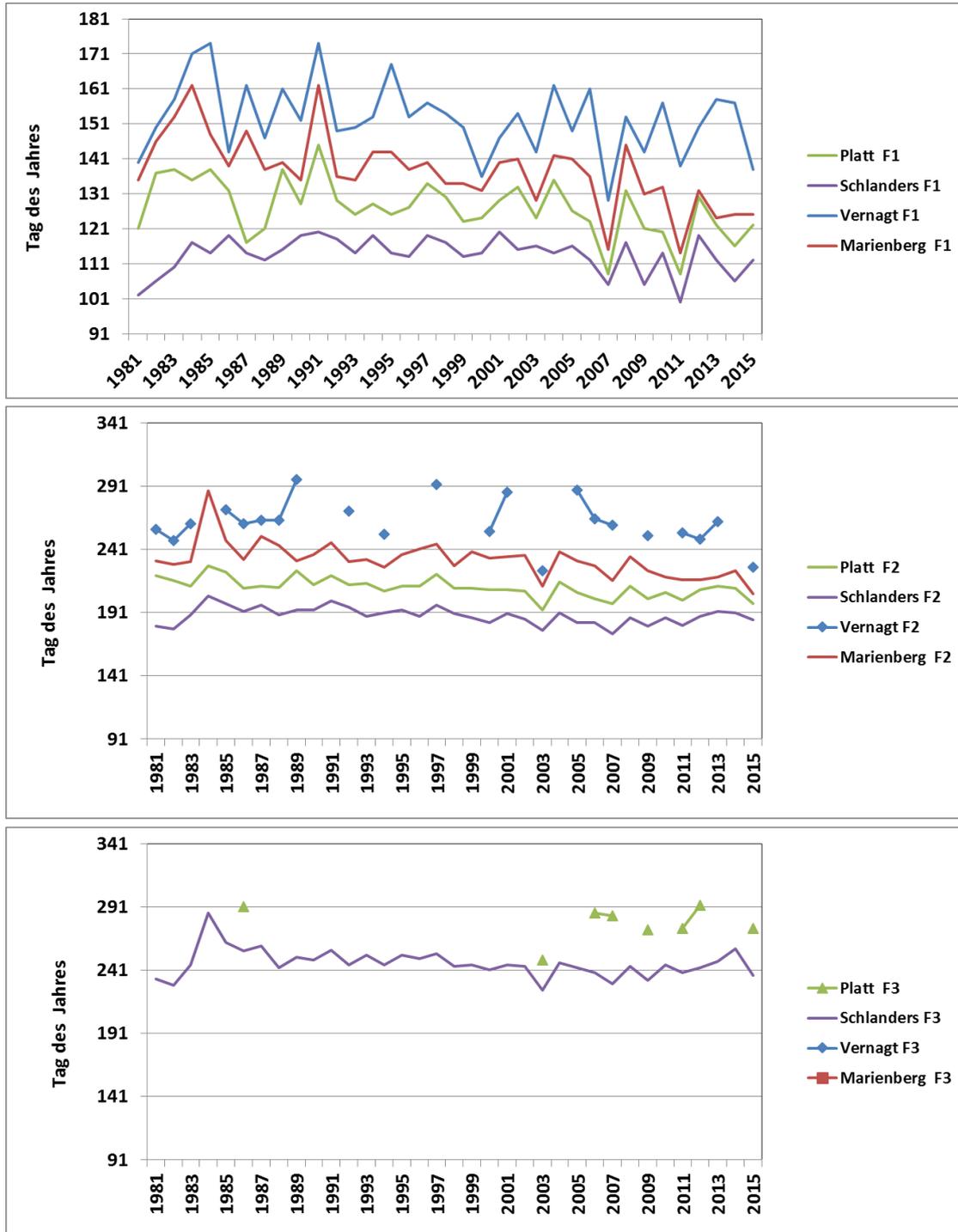
Für Standorte im unteren Vinschgau (Meran, Naturns und Schlanders) reichen die für die Entwicklung nutzbaren effektiven Temperatursummen für *Ips acuminatus* aus um zwei bis drei Tochtergenerationen erfolgreich zu etablieren (relative effektive Temperatursummen > 2,0) (Abb. E- 20). Insbesondere in den letzten 15 Jahren könnte sich eine spätbegonnene dritte Generation noch bis zum Jungkäferstadium entwickeln (relative Temperatursumme >2,6). Ein bis zwei Tochtergenerationen können an höhergelegenen Standorten (Platt, 1147 m und St.Walburg, 1142 m Seehöhe) und im oberen Vinschgau (Station Marienberg, 1310 m) erreicht werden, wobei für diese Standorte ein deutlicher Trend zu höheren Temperatursummen und zu früherem Schwärmbeginn im Frühjahr (Abb. E- 21) zu erkennen ist. Die Untersuchungen von Faccoli *et al.* (2010) und Colombari *et al.* (2012) über eine Massenvermehrung von *Ips acuminatus* in den Dolomiten (Val di Cadore, 900-1100 m Seehöhe) ergaben ebenfalls, dass *Ips acuminatus* in dieser Höhenlage eine doppelte Generationsentwicklung mit zwei Hauptschwärmzeiten (Ende April/Anfang Mai und Juli/August) besitzt.



**Abb. E- 20:** Relative jährliche Temperatursumme (rel. TS) des Kiefernborke­nkäfers, *Ips acuminatus* in den Jahren 1981–2015 berechnet anhand gemessener Temperaturen im Vinschgau/Südtirol

Die potentielle Anzahl an Generationen des sechszähligen Kiefernborke­nkäfers folgt dem temperaturbedingten Höhengradienten, wobei zwei bis (partiell) drei Generationen in der kollinen Höhenzone ein erhebliches Gradationspotential darstellen. Ein aufgrund der Klimaänderung zu erwartender früherer Schwärmbeginn und höhere Temperatursummen dürften dazu beitragen, dass diese Borkenkäferart alleine oder in Kombination mit anderen Schadinsekten eine wesentliche Rolle im komplexen Absterben von alpinen Kiefernbeständen einnehmen wird (Rebetez und Dobbertin, 2004; Wermelinger *et al.*, 2008). Zudem tritt im Vinschgau in den Kiefernbeständen eine mediterrane Schmetterlingsart, der Pinienprozessionsspinner (*Thaumetopoea pityocampa*) auf. Die nadelfressenden Larven dieses Schmetterlings besitzen Brennhaare, die zu Haut-, Augen- und Atemwegsreizungen beim Menschen führen können. Die Larven entwickeln sich in den Wintermonaten, sodass für das Vorkommen dieser Art die Wintertemperaturen wesent-

lich sind. Das verstärkte Auftreten von *Thaumetopoea pityocampa* und dessen Ausbreitung nach Norden und in höhere Lagen (Battisti *et al.*, 2005; Robinet *et al.*, 2007) könnte auch die Anfälligkeit der Kiefernbestände gegenüber Befall durch Borkenkäfer erhöhen.



**Abb. E- 21:** Modellierter Beginn (Tag des Jahres) der Entwicklung der Generationen des Kiefernborrkäfers, *Ips acuminatus*, für ausgewählte Standorte in unterschiedlicher Höhenlage im Vinschgau 1981-2015 (F1: erste Generation; F2: zweite Generation; F3: dritte Generation)

## E-4 Schlussfolgerungen

Bereits unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen sind Borkenkäfer wie der Buchdrucker (*Ips typographus*) ein wesentlicher biotischer Störungsfaktor, der die Dynamik von Waldökosystemen entscheidend beeinflussen kann. Neben der Verfügbarkeit von Wirtsbäumen, der Vorschädigungen durch diverse abiotische Trigger (vor allem Sturmschäden und Trockenheit) ist die Temperatur ein entscheidender Faktor, der die Entwicklung der Borkenkäfer, die Populationsdichte und damit die Anfälligkeit der Waldbestände beeinflusst.

Die Modellierung der Entwicklung der verschiedenen Borkenkäferarten zeigte, dass die projizierte Temperaturzunahme einen Anstieg der mittleren Anzahl an möglichen Käfergenerationen in allen untersuchten Regionen und für alle betrachteten Borkenkäferarten bewirkt. Auch werden die Käfer ihren Flug früher im Jahr beginnen. Der Flug zur Anlage von Geschwisterbruten und der Schwärmflug der Tochtergenerationen werden erheblich früher erfolgen.

Der Buchdrucker wird bis Ende des Jahrhunderts in den tieferen Lagen häufig drei, in der hochmontanen/subalpinen Stufe häufig bis zu zwei Generationen anlegen können. In den Hochlagen werden Bereiche, die bislang keine Entwicklung des Buchdruckers erlaubten, weitestgehend verschwinden.

Der Große Lärchenborkenkäfer, *Ips cembrae*, der bislang nur im künstlichen Anbaugelände der Lärche in wärmeren Tieflagen Schadaufreten hatte, könnte durch die steigenden Temperaturen und der damit verbundenen rascheren Entwicklung auch in den Gebirgslagen an Bedeutung gewinnen.

Der kleine Buchdrucker, *Ips amitinus* ist entwicklungsphysiologisch besser an kühle Bedingungen in den Hochlagen angepasst als *Ips typographus*. Aufgrund der rascheren Entwicklung des Buchdruckers unter zukünftig wärmeren Bedingungen in den Hochlagen könnte *Ips amitinus* in diesen Lagen zugunsten von *Ips typographus* an Bedeutung verlieren. In Zirbenwäldern könnte der Befall durch *Ips amitinus* (aber auch durch andere Kiefernborkearten) in Folge der Klimaänderung und der daraus resultierenden rascheren Entwicklung häufiger in Erscheinung treten.

*Ips acuminatus*, der sechszählige Kiefernborkearten, besitzt bereits unter heutigen Bedingungen ein hohes Vermehrungspotential (häufig bis zu drei Generationen in den Tieflagen, doppelte Generationsentwicklung in der montanen Stufe). Seine Bedeutung im Zusammenhang mit dem komplexen Kiefernsterben in den inneralpinen Trockentälern könnte künftig noch zunehmen. Zukünftig häufigere Trockenstresssituationen in den Sommermonaten in Folge der Temperaturzunahme (Dobbertin *et al.*, 2007) sowie ausgedehnte Massenvermehrungen des Pinienprozessionsspinners im Vinschgau könnten die Kiefernschutzwälder hochgradig prädisponieren gegenüber Kiefernborkeartenbefall.

Mit der Veränderung des Vermehrungspotentials aufgrund der höheren Generationszahl pro Jahr und den günstigeren Schwärmbedingungen ist generell auch eine Zunahme der standörtlichen Prädisposition für Borkenkäferbefall insbesondere in den Hochlagen verbunden. Künftig könnten fichtenreiche Wälder in den Hochlagen eine ähnlich hohe Befallsgefährdung gegenüber dem Buchdrucker aufweisen wie derzeit Standorte in den Tieflagen und in der montanen Höhenzone. Eine Abschätzung der künftigen Bedeutung von Trockenstress für das Auftreten von Borkenkäfermassenvermehrungen in den Bergregionen ist mit großen Unsicherheiten in Hinblick auf die projizierten Veränderungen der Niederschlagsmengen und der saisonalen Niederschlagsverteilung sowie mit Wissenslücken hinsichtlich des Zusammenhangs mit Abwehrmechanismen und Befallsaufreten verbunden (Netherer *et al.*, 2014). Anhand der projizierten durchschnittlichen Nie-

derschlagsmengen ist erst gegen Ende des Jahrhunderts mit einer gewissen Erhöhung der Prädisposition aufgrund von Niederschlagsdefiziten zu rechnen. Das höhere Vermehrungspotential und die günstigeren Schwärmbedingungen in Folge der Temperaturzunahme ermöglichen jedoch einen rascheren Anstieg der Populationsdichten nach akuten Dürreereignissen und nach Störungen in Folge von extremen Witterungsereignissen, sodass kritische Schwellenwerte, die einen Befall von stehenden, vitalen Bäumen erlauben (Raffa *et al.*, 2008), schneller überschritten werden können.

Das künftig verstärkte Auftreten von Borkenkäferbefall in den Gebirgswäldern könnte eine Kaskade von Folgeschädigungen nach sich ziehen. Vom Befall durch aggressive Borkenkäfer wie dem Buchdrucker profitieren auch andere Arten, wie z.B. Bockkäfer (*Tetropium spp.*, *Monochamus spp.*). Bei hoher Dichte können Bockkäfer auch weiteren Stehendbefall verursachen. Bockkäfer sind aber auch Nahrungs- und Brutraumkonkurrenten für den Buchdrucker, sodass sie letztlich im Verlauf einer Massenvermehrung des Buchdruckers zur Absenkung der Borkenkäferpopulationsdichte beitragen können.

Ungeräumte Borkenkäferbefallsflächen könnten zu einer temporär erhöhten Brandgefährdung während Dürrezeiten beitragen. Die Zeitspanne seit dem Befall, Quantität und Struktur des Brandguts dürften dabei entscheidend sein. In Nadelwäldern sind die flüchtigen Harzinhaltsstoffe, die in hohen Mengen im Pflanzengewebe als universelle Abwehrstoffe gegen Pathogene und Insekten gespeichert werden, wesentlich für die Brandgefährdung. Diese flüchtigen Substanzen können bei hoher Temperatur und Trockenheit das Feuer explosionsartig entzünden. In Abhängigkeit von der Befallsphase und des Zerfallsgrads nach dem Absterben dürfte die Brandgefährdung von unbehandelten Borkenkäferbefallsflächen stark variieren (Hicke *et al.*, 2012). Mit dem Verlust der Nadelmasse, des Feinreisigs und der Äste, dem Abbau der Rohhumusaufgabe und der beginnenden Zersetzung des stehenden Schafts nimmt die Gefährdung ab. Akkumulieren sich große Mengen liegenden (Tot-)Holzes, stellt diese Anhäufung von Brandgut ein großes Risiko dar. Es könnten im Brandfall große Feuerintensitäten entstehen, die das Feuer unkontrollierbar machen. Generell ist mit der Zunahme von Dürreperioden als Folge des Klimawandels nicht nur mit einer Häufung von extremen Brandereignissen zu rechnen, sondern auch mit einer größeren Brandanfälligkeit von Wäldern, in denen Feuer bislang unbedeutend war (Wohlgemuth *et al.*, 2008).

Simulationen der zukünftigen Baumartenverteilung unter geänderten Klimabedingungen zeigen eine Abnahme der Fichtenwälder in den Tieflagen infolge von Trockenstress und Störungseinfluss durch Borkenkäferbefall, die letztlich zu einer Reduktion der Borkenkäferpopulationen in den Tieflagen führt (Temperli *et al.*, 2013). Günstigere Klimabedingungen in den Hochlagen könnten das Waldwachstum in diesen Lagen verbessern (siehe auch StartClim2015 Projekt D). Durch die Erhöhung des Bestockungsgrads, des Bestandesvolumens und der Baumhöhen entstehen in den Hochlagen Waldbestände, deren Struktur und Zusammensetzung eine hochgradige Prädisposition für Störungen durch Sturm und Schneebruch bedingen. Letztendlich könnte dies zu räumlich ausgedehnten, lange andauernden Borkenkäfergradationen in nadelholzdominierten Gebirgswäldern führen (Temperli *et al.*, 2013).

#### **E-4.1 Gemeinsame Synthese StartClim 2015 Projekt D und Projekt E**

Borkenkäferkalamitäten infolge von Störungen durch extreme Witterung (Stürme, Schneeschäden, Trockenheit) sind insbesondere für die Schutzwaldbewirtschaftung in wenig erschlossenen, teils unzugänglichen Gebirgswäldern eine Herausforderung für Waldbesitzer und Forstdienste.

Der Klimawandel verändert das abiotische und biotische Umfeld sowohl für die Wirtsbäume als auch für die Dynamik der Borkenkäfer. Der wichtigste direkt auf die Entwicklung der Borkenkäfer wirkende Effekt des Klimawandels ist die Erhöhung der Temperatur. Mit steigenden Temperaturen sind eine Zunahme des Vermehrungspotentials (mehr Generationen pro Jahr; Ausbreitung in höhere Lagen) sowie ein früherer Schwärmbeginn und eine höhere Zahl an möglichen Schwärmtagen verbunden. Dies betrifft nicht nur den für fichtenreiche Schutzwaldtypen relevanten Buchdrucker sondern auch bislang in Gebirgswäldern wenig in Erscheinung getretene Borkenkäferarten, wie den Kleinen Buchdrucker und den Großen Lärchenborkenkäfer in Zirben-Lärchenwäldern in den Hochlagen.

Steigende Temperaturen und sich verändernde Niederschlagsverhältnisse werden vermehrt zu Trockenstress und damit zu einer Erhöhung der Befallsdisposition der Wirtsbäume führen. In Verbindung mit dem Anstieg des Vermehrungspotentials führt dies zu starken Veränderungen der standörtlichen Prädisposition für Borkenkäferbefall insbesondere auf sensiblen, teils extremen, nährstoffarmen und schlecht wasserversorgten Schutzwaldstandorten. Regional unterschiedliche Störungsdynamik (hohe Sturmschadensprädisposition im Nordstau der Alpen, kleinräumige Störungen und akuter Trockenstress nach Trockenperioden südlich des Alpenhauptkamms und in inneralpinen Tälern) sowie Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Borkenkäferarten und anderen Schadinsekten sind bestimmend für das künftige Schadauftreten und tragen maßgeblich zur Bestandesdynamik der heutigen nadelholzdominierten Schutzwaldbestände bei. Durch zukünftig besseres Waldwachstum unter geänderten Klimabedingungen in den Gebirgswäldern (Zunahme des Bestockungsgrads, des Bestandesvolumens und der Baumhöhen) könnten in den Hochlagen Waldbestände entstehen, deren Struktur und Zusammensetzung eine hochgradige Prädisposition für Störungen durch Sturm und Schneebruch bedingen, was wiederum höhere Borkenkäferschäden bedingen würde.

Diese Entwicklung von fichtenreichen Wäldern in den höheren Lagen (mittelmontan, hochmontan, tiefsubalpin) kann durch Bewirtschaftung sowohl verstärkt als auch abgemildert werden. Keine Bewirtschaftung in als Altersklassenwälder begründeten Beständen führt mittel- bis langfristig zu überdichten und wenig strukturierten stark störungsanfälligen Beständen. Schlagweise verjüngte Bestände perpetuieren diese Entwicklung, insbesondere wenn nicht zeitgerecht zielgerichtete Durchforstungseingriffe umgesetzt werden. Verbiss von Verjüngung verhindert die Etablierung von Mischbaumarten und teilweise sogar die zeitgerechte Verjüngung von Fichte. Dies erhöht wiederum schon mittelfristig die Anfälligkeit für Störungen und verhindert das Entstehen von widerstandsfähigeren Wäldern.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Schutzfunktionalität österreichischer Wälder im Klimawandel primär durch Störungen bestimmt werden wird. Dabei sind in den nadelholzdominierten Bergwäldern insbesondere Borkenkäfer von Bedeutung. Um Wälder im Klimawandel resilienter in Bezug auf Störungen zu machen, sollte die Baumartenvielfalt erhöht und eine kleinflächig mosaikartige Bestandesstruktur gefördert werden. Beides bedarf einer funktionierenden Naturverjüngung. Wird diese durch Verbiss unmöglich gemacht, hat dies unmittelbare und weitreichende negative Auswirkungen auf die Erhaltung der Schutzwirksamkeit.

Wirksame Bewirtschaftungskonzepte scheitern oftmals auch an mangelndem fachlichen Know How in schutzwaldspezifischem Waldbau und ertetechnischer Umsetzung im Seilgelände.

Für die Optimierung der Schutzwaldbehandlung sind detaillierte Gefährdungsabschätzungen und angepasste Überwachungsverfahren essentiell. Die Modellierung der potentiellen Borkenkäferentwicklung, die Etablierung von tagesaktuellen Monitoringverfahren und die zeitlich-räumlich Abschätzung der Befallsdisposition können dabei einen wertvollen Beitrag leisten.

Die dynamische Simulation der Waldentwicklung bei sich verändernden Störungsregimen erlaubt die mittel- bis langfristige Abschätzung der Schutzwirksamkeit von Bergwäldern. Mit geeigneten Waldökosystemmodellen kann die Wirksamkeit von Waldbaukonzepten und Wildstandsregulierungsmaßnahmen im Voraus abgeschätzt werden und die Effekte von unterlassenen Maßnahmen (Durchforstungen, Waldverjüngung) flächig dargestellt werden.

## Literaturverzeichnis

- Adler, S., Chimani, B., Drechsel, S., Haslinger, K., Hiebl, J., Meyer, V., Resch, G., Rudolph, J., Vergeiner, J., Zingerle, C., Marigo, G., Fischer, A., Seiser, B., 2015. Das Klima von Tirol - Südtirol - Belluno, Vergangenheit - Gegenwart - Zukunft. Herausgeber: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG); Abteilung Brand- und Zivilschutz - Autonome Provinz Bozen; Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV). pp. 55.
- Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, 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.
- Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., 2009. Online-monitoring of the phenology and the development of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae). *Mitteilungen der deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie* 17, 155-158.
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., Larsson, S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increasing winter temperatures. *Ecological Applications* 15, 2084-2096.
- Berec, L., Doležal, P., Hais, M., 2013. Population dynamics of *Ips typographus* in the Bohemian Forest (Czech Republic): Validation of the phenology model PHENIPS and impacts of climate change. *Forest Ecology and Management* 292, 1-9.
- Berryman, A.A., 1986. *Forest Insects - Principles and practice of population management.* Plenum Press, New York and London.
- Coeln, M., 1997. Grundlagen für ein thermoenergetisches Modell zur Fernüberwachung der Borkenkäferentwicklung. Dissertation. Univ. f. Bodenkultur Wien, pp. 144.
- Coeln, M., Niu, J., Führer, E., 1996. Entwicklung von Fichtenborkenkäfern in Abhängigkeit von thermischen Bedingungen verschiedener montaner Waldstufen (Coleoptera: Scolytidae). *Entomologia Generalis* 21 37-54.
- Colombari, F., Battisti, A., Schroeder, L.M., Faccoli, M., 2012. Lifehistory traits promoting outbreaks of the pine bark beetle *Ips acuminatus* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in the southeastern Alps. *European Journal of Forest Research* 131, 553-561.
- Colombari, F., Schroeder, M.L., Battisti, A., Faccoli, M., 2013. Spatio-temporal dynamics of an *Ips acuminatus* outbreak and implications for management. *Agricultural and Forest Entomology* 15, 34-42.
- Dobart, N., 2006. Studies on the emergence of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) from hibernating sites. Diplomarb., BOKU Wien. pp.48.
- Dobbertin, M., Wermelinger, B., Bigler, C., Bürgi, M., Carron, M., Foster, B., Gimmi, U., Rigling, A., 2007. Linking increasing drought stress to Scots pine mortality and bark beetle infestations. *TheScientificWorldJOURNAL* 7(S1), 231-239.
- Dolezal, P., Sehnal, F., 2006. Effects of photoperiod and temperature on the development and diapause of the bark beetle *Ips typographus*. *Journal of Applied Entomology* 131 165-173.
- Drechsel, S., Chimani, B., Haslinger, K., Resch, G., Zingerle, C., Vergeiner, J., 2016. Alpine Temperatur- und Niederschlagstrends. Tagungsband 17. Klimatag - Aktuelle Klimaforschung in Österreich. 6. - 8. April 2016, Graz, Poster, p. 144.
- Faccoli, M., Colombari, F., Dal Pont, C., Finozzi, V., Ambros, E., Battisti, A., 2010. Large outbreaks of *Ips acuminatus* in Scots pine stands of the Italian Alps. *Forest@ - Journal of Silviculture and Forest Ecology* 7, 259-267.

- Firm, D., Nagel, T.A., Diaci, J., 2009. Disturbance history and dynamics of an old-growth mixed species mountain forest in the Slovenian Alps. *For.Ecol.Manage.* 257, 1893-1901.
- Francke-Grosmann, H., 1952. Über die Ambrosiazucht der beiden Kiefernborckenkäfer *Myelophilus minor* Htg. und *Ips acuminatus* Gyll. . *Meddelanden fran statens skogsforskningsinstitut* 41, 52.
- Francke-Grosmann, H., 1963. Die Übertragung der Pilzflora bei dem Borckenkäfer *Ips acuminatus* Gyll.: Ein Beitrag zur Kenntnis der Ipiden-Symbiosen. *Zeitschrift für angewandte Entomologie* 52, 355-361.
- Führer, E., Nopp, U., 2001. Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden. *Facultas Wien*. pp. 514.
- Hicke, J.A., Johnson, M.C., Hayes, J.L., Preisler, H.K., 2012. Effects of bark beetle-caused tree mortality on wildfire. *Forest Ecology and Management* 271, 81-90.
- Klopcic, M., Poljanec, A., Gartner, A., Boncina, A., 2009. Factors Related to Natural Disturbances in Mountain Norway Spruce (*Picea abies*) Forests in the Julian Alps. *Ecoscience* 16, 48-57.
- Krehan, H., 2011. Borckenkäferprobleme bei Kiefer in einem Steinschlagschutzwald in Kärnten. *Forstschutz Aktuell* 53, 2-4.
- Krehan, H., Cech, T., 2004. Lärchenschäden in der Obersteiermark - Ein Fallbeispiel für komplexe Einwirkungen von Schadursachen. *Forstschutz Aktuell* 32, 4-8.
- Mazur, A., Kuzminski, R., 2013. Phenology of development and population characteristics of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichh.) in the Karkonoski National Park. *Folia Forestalia Polonica, Series A* 55, 89-96.
- Netherer, S., Matthews, B., Katzensteiner, K., Blackwell, E., Henschke, P., Hietz, P., Pennerstorfer, J., Rosner, S., Kikuta, S., Schume, H., Schopf, A., 2014. Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytologist*, n/a-n/a.
- Netherer, S., Nopp-Mayr, U., 2005. Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management-rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification. *For.Ecol.Manage.* 207, 99-107.
- Nierhaus-Wunderwald, D., 1995. Der Grosse Lärchenborckenkäfer - Biologie, Überwachung und forstliche Massnahmen. *Wald und Holz* 11, 8-12.
- Nierhaus-Wunderwald, D., Foster, B., 2004. Zur Biologie der Buchdruckerarten. *WSL - Merkblatt für die Praxis* 18, 1-8.
- Pasztor, F., Matulla, C., Rammer, W., Lexer, M., 2014. Drivers of the bark beetle disturbance regime in Alpine forests in Austria. *For.Ecol.Manage.* 318, 349-358.
- Raffa, K.F., Aukema, B.H., Bentz, B.J., Carroll, A.L., Hicke, J.A., Turner, M.G., Romme, W.H., 2008. Cross-scale Drivers of Natural Disturbances Prone to Anthropogenic Amplification: The Dynamics of Bark Beetle Eruptions. *Bio Science* 58 501-517.
- Rebetez, M., Dobbertin, M., 2004. Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theoretical and Applied Climatology* 79, 1-9.
- Riedl, L., Kalasek, R., 1998. MapModels- Programmieren mit Datenflussgraphen. In: Strobl, Dollinger (ed.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 1998*, 279-288.
- Robinet, C., Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., Roques, A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den.

- & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography* 16, 460-471.
- Schebeck, M., 2014. Entwicklung und Überwinterung des Großen Lärchenborkenkäfers, *Ips cembrae* (Heer, 1836) (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). Master-thesis, Univ. Vienna. pp. 63.
- Schimitschek, E., 1931. Der achtzählige Lärchenborkenkäfer *Ips cembrae* Heer. Zur Kenntnis seiner Biologie und Ökologie sowie seines Lebensvereines. *Z. angew. Entomol.* 17, 253-344.
- Schopf, A., Baier, P., Netherer, S., Pennerstorfer, J., 2004. Risikoabschätzung von Borkenkäfer-Massenvermehrungen im Nationalpark Kalkalpen. Projektendbericht. BOKU Wien. pp.106.
- Schopf, A., Baier, P., Pennerstorfer, J., 2010. Entwicklung einer online Modellierung der Buchdruckerentwicklung mit dem Modell PHENIPS auf Basis täglich vom Deutschen Wetterdienst, Außenstelle Leipzig (DWD) automatisch bereitgestellter Witterungs- und Prognosedaten von 35 agrarmeteorologischen Stationen, Endbericht. IFFF, BOKU Wien, pp. 48.
- Schopf, A., Kritsch, P., 2010. Kältehärtigkeit und Überwinterung des Buchdruckers. *Forstschutz Aktuell* 50, 11-16.
- Schröder, T., Schumacher, J., Bräsicke, N., 2012. Schadorganismen an Europäischer Lärche. *AFZ-Der Wald* 12, 22-26.
- Seidl, R., Baier, P., Rammer, W., Schopf, A., Lexer, M.J., 2007. Modelling tree mortality by bark beetle infestation in Norway spruce forests. *Ecological Modelling* 206 383-399.
- Seidl, R., Schelhaas, M.J., Lexer, M.J., 2011. Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology* 17, 2842-2852.
- Suzuki, S., Imada, H., 1993. Effect of temperatures on the developmental period of *Ips cembrae* (Heer) (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of the Japanese Forestry Society* 75, 538-540.
- Temperli, C., Bugmann, H., Elkin, C., 2013. Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: a landscape modeling approach. *Ecological Monographs* 83, 383-402.
- Wermelinger, B., Rigling, A., Schneider Mathis, D., Dobbertin, M., 2008. Assessing the role of bark- and wood-boring insects in the decline of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Swiss Rhone valley. *Ecological Entomology* 33, 239-249.
- Wermelinger, B., Seifert, M., 1998. Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Ecology* 122, 185-191.
- Wermelinger, B., Seifert, M., 1999. Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecological Entomology* 24 103-110.
- Wild, M., 2016. Untersuchungen zur Entwicklung und Überwinterung von *Ips acuminatus* Gyll. als Grundlage einer Risikomodellierung. Masterarbeit. BOKU Wien. (in prep.).
- Wohlgemuth, T., Conedera, M., Kupferschmid Albisetti, A.D., Moser, B., Usbeck, T., Brang, P., Dobbertin, M., 2008. Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. *Schweiz. Zeitschrift f. Forstwesen* 159, 336-343.
- Zuber, M., 1992. Untersuchungen zur Ökologie und zur Rassendifferenzierung von *Ips amitinus* (EICHH.) und *Ips amitinus* var. *montana* FUCHS (Coleoptera: Scolytidae). Dissertation, ETH Zürich. pp.113.

Zumr, V., 1982. The data for the prognosis of spring swarming of main species of bark beetles (Coleoptera, Scolytidae) on the spruce ( *Picea excelsea* L.). Zeitschrift für angewandte Entomologie 93, 305-320.

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungen

Abb. E- 1: Lage der Untersuchungsregionen, relevante Schutzwaldtypen und Abgrenzung der Regionen für die Klimamodelldaten.....	6
Abb. E- 2: Ausgewählte Borkenkäferarten in nadelholzdominierten Schutzwäldern und deren Hauptwirtsbaumarten .....	7
Abb. E- 3: Lage der Fallenstandorte des österreichischen Borkenkäfermonitorings zur Validierung der Modellergebnisse für Ips cembrae und Ips acuminatus sowie Lage von relevante Klimastationen.....	9
Abb. E- 4: Lage der Klimastationen in Südtirol/Vinschgau.....	14
Abb. E- 5: Jährliche Fangzahlen von Ips cembrae für die unterschiedlichen Fallenstandorte .....	16
Abb. E- 6: Vergleich der modellierten Entwicklung für Ips cembrae mit dem Temperaturverlauf und den relativen Fangzahlen für die Standorte Hollerberg und Kirchschatz 2010.....	18
Abb. E- 7: Vergleich der entwicklungsrelevanten relativen Temperatursummen für die erste Generation der drei unterschiedlichen Borkenkäferarten für einen montanen (Gmünd: Seehöhe 738 m) und einen hochmontanen/ subalpinen Standort (Katschberg: Seehöhe: 1635 m).....	19
Abb. E- 8: Jährliche Fangzahlen von Ips acuminatus für die unterschiedlichen Fallenstandorte in Ostösterreich.....	21
Abb. E- 9: Vergleich der modellierten Entwicklung für Ips acuminatus mit den wöchentlichen Fangzahlen für die Fallenstandorte Gänserndorf 2009 und Neunkirchen 2007 ..	22
Abb. E- 10: Flächenanteile der potentiell möglichen Anzahl an Generationen des Buchdruckers in den nördlichen Kalkalpen für die unterschiedlichen Klimamodelle (Durchschnittswerte für die jeweilige 30-Jahresperiode) .....	25
Abb. E- 11: Potentiell mögliche maximale Anzahl an Generationen des Buchdruckers in den nördlichen Kalkalpen (Abkürzungen wie in Abb. E- 10) .....	25
Abb. E- 12: Bestandes- und standortsbedingte Prädisposition gegenüber Sturmschäden und Schneebruch für Waldbestände der ÖBf im Bereich des Nationalparks Kalkalpen .....	27
Abb. E- 13: Bestandes- und standortsbedingte Prädisposition gegenüber Borkenkäferbefall und Veränderung der standörtlichen Prädisposition basierend auf Klimadaten des Modells Aladin.....	27
Abb. E- 14: Aktuelle Waldvegetation und Flächenanteile der unterschiedlichen Typen in Osttirol (nach der Kartierung von Schiechtl/Stern).....	28
Abb. E- 15: Potentiell mögliche Anzahl an Generationen des Buchdruckers (Ips typographus), des Kleinen Buchdruckers (Ips amitinus) und des Großen Lärchenborkenkäfers (Ips cembrae) für Waldstandorte in der Region Osttirol (Modell Aladin, Abkürzungen wie in Abb. E- 10).....	29
Abb. E- 16: Differenz der potentiell möglichen Anzahl an Generationen des Kleinen Buchdruckers und des Buchdruckers für die Perioden 1981-2010, 2021-2050 und 2071-2100 für Waldstandorte in Osttirol .....	30
Abb. E- 17: Flächengewichtete relative Anteile der verschiedenen Generationen für Ips amitinus und Ips cembrae für gegenwärtige (1981-2010) und zukünftige	

Klimabedingungen (2071-2100; Modell Aladin) getrennt nach Waldtyp in Osttirol .....	31
Abb. E- 18: Standortsbedingte Prädisposition gegenüber Sturmschäden, Schneebruch und Buchdruckerbefall und Veränderung der standörtlichen Prädisposition gegenüber Befall durch <i>Ips typographus</i> in Osttirol .....	32
Abb. E- 19: Potentiell maximal mögliche Anzahl an Generationen des Buchdruckers in der Region Vinschgau/Südtirol .....	33
Abb. E- 20: Relative jährliche Temperatursumme (rel. TS) des Kiefernborckenkäfers, <i>Ips acuminatus</i> in den Jahren 1981–2015 berechnet anhand gemessener Temperaturen im Vinschgau/Südtirol .....	34
Abb. E- 21: Modellierter Beginn (Tag des Jahres) der Entwicklung der Generationen des Kiefernborckenkäfers, <i>Ips acuminatus</i> , für ausgewählte Standorte in unterschiedlicher Höhenlage im Vinschgau 1981-2015 (F1: erste Generation; F2: zweite Generation; F3: dritte Generation) .....	35
Tabellen	
Tab. E- 1: Schwellenwerte der Lufttemperatur (LTmax: Tagesmaximum der Lufttemperatur) und der effektiven Rindentemperatursummen (dd: Tagesgrade) für die Borkenkäferentwicklungsmodellierung mittels PHENIPS .....	8
Tab. E- 2: Fallenstandorte für <i>Ips cembrae</i> und <i>Ips acuminatus</i> und gewählte Klimareferenzstationen .....	9
Tab. E- 3: Verwendete Indikatoren und deren Gewichtung zur Prädispositionsabschätzung für Sturm- und Schneeschaden und Borkenkäferbefall .....	11
Tab. E- 4: Relative Bewertung der Kriterien zur Prädispositionsabschätzung für Sturm- und Schneeschaden und Borkenkäferbefall anhand der Forsteinrichtungsdaten der Österreichischen Bundesforste für Waldbestände und -standorte in der Region nördliche Kalkalpen .....	11
Tab. E- 5: Vergleich des modellierten Entwicklungsbeginns von <i>Ips cembrae</i> anhand der Wetterdaten von Referenzklimastationen mit dem beobachteten Termin der ersten Hauptschwärmphase für die unterschiedlichen Fallenstandorte 2005 – 2015 .....	17
Tab. E- 6: Vergleich des modellierten Entwicklungsbeginns von <i>Ips acuminatus</i> (berechnet anhand der Wetterdaten von Referenzklimastationen) mit dem beobachteten Termin der ersten Hauptschwärmphase für die unterschiedlichen Fallenstandorte 2005 – 2015 .....	21
Tab. E- 7: Jahresdurchschnittstemperaturen und projizierte Temperaturänderungen gegenüber 1981-2010 der regionalen Klimamodelle Aladin, REMO und CMIP5 für die unterschiedlichen Regionen .....	23
Tab. E- 8: Mittlere Niederschlagssumme und projizierte Änderung des Niederschlags (Klimamodell Aladin) für die Regionen Nördliche Kalkalpen und Osttirol .....	23

## **Danksagung**

Für die Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials wird gedankt:

Dr. Herbert Formayer, Institut für Meteorologie, BOKU

Dr. Stefano Minerbi, Amt für Forstverwaltung; Autonome Provinz Bozen - Südtirol

Dr. Alessandro Andriolo, Amt für Forstplanung; Autonome Provinz Bozen - Südtirol

Dr. Christian Schwaninger und Mag. Christoph Kovacs, Amt der Tiroler Landesregierung,  
Abteilung Waldschutz

Dr. Hannes Krehan, BFW Wien

Dipl. Ing. Johann Kammleitner, Oebf Nationalparkbetrieb Kalkalpen