

Risikoabschätzung von Borkenkäfer-Massenvermehrungen im Nationalpark Kalkalpen

GZ.: 56.810/02-VA2b/2001

Endbericht

Juni, 2004

Projektleiter: Univ. Prof. Dr. Axel Schopf

Wissenschaftliche Mitarbeiter:

DI. Dr. Peter Baier

DI. Dr. Sigrid Netherer

Josef Pennerstorfer, MSc (GIS)

Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz

Hasenauerstraße 38, A-1190 Wien

Telefon +43-1-3686352-0

Fax: +43-1-3686352-97

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	3
2 Material und Methode	4
2.1 Freilanduntersuchungen zur Borkenkäferphänologie	4
2.2 Parametrisierung des Borkenkäferentwicklungsmodells	6
2.3 Topoklimamodell	9
2.3.1 Sonneneinstrahlung	9
2.3.2 Temperatur	10
2.3.3 Niederschlag	12
2.4 Bestandes- und standortsbezogene Datenbasen zur Prädispositionsabschätzung	13
2.4.1 Digitales Höhenmodell	13
2.4.2 Naturrauminventur Nationalpark Kalkalpen	13
2.4.3 Operatdaten Österreichische Bundesforste AG	13
2.4.4 Satellitenbildinterpretation	13
2.5 Prädispositionsabschätzung	14
2.6 Statistische Auswertungen, Datenverwaltung und GIS	14
3 Ergebnisse	15
3.1 Borkenkäferentwicklungs- und Phänologie-Modell	15
3.1.1 Schwärm- und Befallsbeginn	15
3.1.2 Adaptierung bestehender Borkenkäferentwicklungsmodelle	17
3.1.3 Geschwisterbruten	29
3.1.4 Diapauseverhalten	31
3.2 Topoklimamodell	36
3.2.1 Validierung des Einstrahlungsmodells	37
3.2.2 Modellierung der Lufttemperatur	43
3.2.3 Modellierung der Rindentemperatur	49
3.2.4 Niederschlag	54
3.3 Prädispositionsabschätzung	56
3.3.1 Borkenkäferphänologiemodell und Vermehrungspotential	56
3.3.2 Naturrauminventur	62
3.3.3 Operatdaten ÖBF	71
3.3.4 Satellitenbildinterpretation	72
3.3.5 Bewertung und Verifikation der Prädispositionsabschätzung	75
4 Diskussion	84
4.1 Modellierung der Borkenkäferphänologie	84
4.2 Prädisposition	88
Zusammenfassung	95
Abstract	97
Danksagung	99
Literatur	100
Anhang	106

1 Einleitung und Zielsetzung

Massenvermehrungen von Borkenkäfern führen zu tief greifenden Veränderungen im Ökosystem Wald, die, je nach Standpunkt und Anforderungen des Betrachters, als Gefährdung, Schädigung und Zerstörung von Ressourcen oder als natürlicher Prozess in der Dynamik und Selbstorganisation fichtenreicher Wälder, und damit als Chance für einen Neubeginn angesehen werden können. Die Ermöglichung und Sicherung natürlicher, d.h. vom Menschen weitestgehend unbeeinflusster Abläufe in nutzungsfreien Waldlandschaften, stellt daher in diesem Konfliktumfeld eine außerordentliche Herausforderung, nicht nur für Naturschutzpolitik und Nationalparkbetreiber, sondern auch für die Naturwissenschaft dar.

Massenvermehrungen von Fichtenborkenkäfern in den Nationalparks „Bayerischer Wald“ und „Šumava“ haben in den vergangenen Jahren verdeutlicht, dass die Einschränkung bzw. Einstellung von forstlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen und Forstschutzroutinen in Nationalparks mit hohem Fichtenanteil ein enormes Risiko für Borkenkäfergradationen darstellt. Sich wiederholende Windwurfereignisse, multikausale Devitalisierung von Waldbeständen, Witterungsextreme und Klimawandel sind nur einige Gründe, die Anlass zur Sorge geben, dass auch im Nationalpark Kalkalpen Massenvermehrungen des Buchdruckers größeren Umfangs, nicht zuletzt durch geländebedingt schwierige Zugänglichkeit erosions- und verkarstungsgefährdeter Standorte, zu großflächigen Störungen und Veränderungen des Waldzustandes und auch zu Gefährdungen angrenzender Regionen führen könnten.

Ziel dieses Projekts war daher die Entwicklung und Anwendung von Monitoring-, und Risikoschätzsystemen als Basis für die Herleitung von für den Nationalpark Kalkalpen adäquaten Managementstrategien. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf die Adaptierung und Verbesserung bestehender Borkenkäferentwicklungs- und Phänologiemodelle (Führer und Coeln, 1998, Netherer, 2003) und die Erstellung eines Topoklimamodells, anhand derer die potentielle Entwicklung und Generationszahl des Buchdruckers für das Gebiet des Nationalparks Kalkalpen fundiert eingeschätzt werden soll. Die Kenntnis der potentiellen Entwicklungsmöglichkeit ist ein zentraler Baustein für die Bewertung der standörtlichen und bestandesbedingten Prädisposition für Borkenkäferbefall (Nopp und Führer, 2001; Netherer, 2003), deren räumliche Darstellung die Einschätzung potentieller Risikozonen für Buchdruckergradationen ermöglicht.

2 Material und Methoden

2.1 Freilanduntersuchungen zur Borkenkäferphänologie

Für die Berechnung wesentlicher Eingangsparameter zur Modellierung der Borkenkäferentwicklung wurden an unterschiedlichen Standorten der Schwärmbeginn mittels Pheromonfallen (Tab.1) und die Borkenkäferentwicklung anhand von Fangbäumen (Tab. 2) in Abhängigkeit von Luft- und Rindentemperaturen untersucht.

Die mit Pheroprax beköderten Fallen wurden in 2 bis 3-tägigen Intervallen kontrolliert. Die Entwicklung der Borkenkäferbruten und die Präsenz der Parentalkäfer an den Fangbäumen wurden durch regelmäßige Entnahme von Rindenstücken analysiert. Bei Erreichen des Puppen- bzw. Jungkäferstadiums wurden die Fangbäume aufgearbeitet, wobei zur genauen Ermittlung des Schlüpftermins der Jungkäfer im Freiland ein etwa 2-3 m langes Stammstück belassen wurde. Weiters wurde je Fangbaum ein repräsentatives Stammstück entnommen, um das Ausschlüpfen der Käfer unter kontrollierten Freilandbedingungen in Photoelektoren überprüfen zu können.

Tab. 1: Pheromonfallenstandorte in Nationalpark Kalkalpen in den Untersuchungsjahren 2001 bis 2003

Standort	Seehöhe (m)	Lage	Exposition	Fang-	
				Beginn	Ende
Messerer	580	Talboden	SW	24.4.2001	31.5.2001
Bodinggraben	641	Talboden	S	24.4.2001	31.5.2001
Zaglbaueralm	940	Mittelhang	S	24.4.2001	31.5.2001
Ebenforstalm	1105	Kuppe	eben	30.4.2001	31.5.2001
Krennbauer	620	Talboden	eben	10.4.2002	24.6.2002
Mehlboden	860	Talboden	eben	30.4.2002	24.6.2002
Haslersgatter	1154	Sattel	eben	30.4.2002	24.6.2002
Krennbauer	620	Talboden	eben	15.4.2003	3.6.2003
Mehlboden	860	Talboden	eben	15.4.2003	3.6.2003
Haslersgatter	1154	Sattel	eben	15.4.2003	3.6.2003

Tab. 2: Übersicht über die Fangbaumstandorte im Nationalpark Kalkalpen.

Standort	Seehöhe (m)	Lage	Exposition	Überschirmung	Fällung
Untersuchungsjahr 2001					
1. Fangbaumserie					
Messerer	580	Unterhang	NO	geschlossen	24.4.2001
Bodinggraben	640	Unterhang/Talboden	N	licht	24.4.2001
Zaglbaueralm	940	Mittelhang	S	licht	24.4.2001
Ebenforstalm	1100	Kuppe/Oberhang	eben	keine	18.5.2001
Blumaueralm	820	Unterhang	S	keine	18.5.2001
Tiefling	1100	Oberhang	NO	geschlossen	18.5.2001
2. Fangbaumserie					
Messerer	580	Unterhang	NO	geschlossen	16.7.2001
Bodinggraben	640	Unterhang/Talboden	N	licht	16.7.2001
Zaglbaueralm	940	Mittelhang	S	licht	25.7.2001
Ebenforstalm	1100	Kuppe/Oberhang	eben	keine	16.7.2001
Blumaueralm	860	Unterhang	S	geschlossen	31.7.2001
Untersuchungsjahr 2002					
1. Fangbaumserie					
Krennbauer	726	Mittelhang	NNO	geschlossen	30.4.2002
Holzgraben Süd	1050	Mittelhang	S	keine	6.5.2002
Holzgraben Nord	1047	Mittelhang/Hangverebnun	N	licht	6.5.2002
Mehlboden	860	Unterhang/Talboden	eben	geschlossen	30.4.2002
Haslersgatter	1167	Oberhang	NO	geschlossen	30.4.2002
Weingartalm	1200	Mittelhang	SW	keine	15.5.2002
2. Fangbaumserie					
Krennbauer	647	Unterhang	N	geschlossen	15.7.2002
Holzgraben Süd	1050	Mittelhang	S	keine	15.7.2002
Holzgraben Nord	1047	Mittelhang	N	geschlossen	15.7.2002
Mehlboden	860	Unterhang	SO	geschlossen	15.7.2002
Haslersgatter	1167	Oberhang	NO	geschlossen	15.7.2002
Weingartalm	1200	Mittelhang	SW	keine	15.7.2002
Untersuchungsjahr 2003					
1. Fangbaumserie					
Krennbauer *)	647	Unterhang	N	geschlossen	9.5.2003
Holzgraben Süd *)	1050	Mittelhang	S	keine	9.5.2003
Haslersgatter	1167	Oberhang	NO	geschlossen	9.5.2003
Weingartalm	1200	Mittelhang	SW	keine	9.5.2003

*) vom Wind geworfene Fichten

2.2 Parametrisierung des Borkenkäferentwicklungsmodells

Bestehende Borkenkäferentwicklungsmodelle basieren auf einer vereinfachten, linearen Beziehung zwischen Entwicklungsrate und Temperatur (Führer und Coeln, 1998; Wermelinger und Seifert, 1998; Pennerstorfer, 2000; Netherer, 2003). Für die jeweiligen Modellansätze können sowohl detaillierte Berechnungen für einzelne Stadien (Stadienmodell) als auch für die Gesamtentwicklung (Gesamtmodell) durchgeführt werden (Tab. 3).

Die Beziehung zwischen Entwicklungsrate und Temperatur ist jedoch für den gesamten Bereich natürlich auftretender Temperaturen, insbesondere in Hinblick auf einstrahlungsbedingte hohe Rindentemperaturen, nicht linear. Das Wachstum steigt bei Temperaturen, die über einen optimalen Temperaturbereich hinausgehen nicht weiter an, sondern verlangsamt sich, und kommt bei Erreichen eines oberen Temperaturschwellenwertes zum Stillstand. Basierend auf den Ergebnissen von Wermelinger und Seifert (1998) wurde daher ein nichtlineares Modell entwickelt, um eine systematische Überschätzung der Entwicklung insbesondere bei sonnenexponierten Standorten zu vermeiden und die Präzision des Entwicklungsmodells zu verbessern.

Tab. 3: Übersicht über thermale Kennwerte der Borkenkäferentwicklung (ENP: Entwicklungsnulppunkt (°C), dd: notwendige effektive Temperatursumme zum Erreichen des nächsten Stadiums in Tagesgraden, lfd Sum: laufende effektive Temperatursumme).

Stadium	Netherer (2003) „Tatra“			Netherer (2003) „Nasswald“		
	ENP	dd	lfd Sum	ENP	dd	lfd Sum
Ei	10,3	54,51	54,51	4,51	81,61	81,61
Larve	4,07	246,64	301,15	7	234,3	315,91
Puppe	12,81	39,32	340,47	3,66	90,67	406,58
Reifungsfraß	3,38	307,00	647,47	5,39	281,18	687,76
Ei - Puppe	3,38	460,51		5,39	421,77	
Gesamtentwicklung	3,38	767,51		8,25	568,81	
Stadium	Wermelinger und Seifert (1998)			Führer und Coeln (1998)		
	ENP	dd	lfd Sum	ENP	dd	lfd Sum
Ei	10,6	51,8	51,8	7,35	80	80
Larve	8,2	204,4	256,2	11,52	168	248
Puppe	9,9	57,7	313,9	6,73	95	343
Reifungsfraß	8,3	222,8	536,7	11,77	179,95	522,95
Ei - Puppe	8,3	334,2		11,77	269,92	
Gesamtentwicklung	8,3	557,0		12,9	365,67	
Stadium	Annala (1969)			Willmann (1951)		
	ENP	dd	lfd Sum	ENP	Dd	lfd Sum
Ei	7	71	71	7	73,5	73,5
Larve	7	183	254	7	198	271,5
Puppe	7	81	335	7	90	361,5
Reifungsfraß	7	223	558,33	7	240,67	601,67
Ei - Puppe	7	335		7	361	
Gesamtentwicklung	7	558,33		7	601,67	

Wermelinger und Seifert (1998) verwendeten für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Entwicklungsrate der verschiedenen Entwicklungsstadien das modifizierte „Logan Modell“ (Logan *et al.*, 1976; Lactin *et al.*, 1995). Unter Verwendung der von Wermelinger und Seifert (1998) geschätzten Parameter für das obere Temperaturlimit (T_o) und des Temperaturoptimums (T_{opt}) des jeweiligen Entwicklungsstadiums und unter Beibehaltung des unteren Temperaturlimits (T_u) und der Temperatursumme (dd) aus dem linearen Modell wurde die effektive Temperatur für die Borkenkäferentwicklung für Temperaturen $T_u < T < T_o$ hergeleitet aus:

$$T_{eff} = (T_{opt} - T_u) * (e^{a*T} - e^{(a*T_{max} - (T_{max} - T)/\beta)} - ?)$$

Für Temperaturen $T = T_u$ bzw. $T = T_o$ gilt:

$$T_{eff} = 0$$

Die Parameter a , β , $?$ und T_{max} (Tab. 4) wurden dabei so gewählt, dass sich für Temperaturen zwischen unterem Entwicklungsnulldpunkt (T_u) und dem Temperaturoptimum ein annähernd linearer Verlauf der zu berechnenden effektiven Temperatur ergibt (Abb. 1).

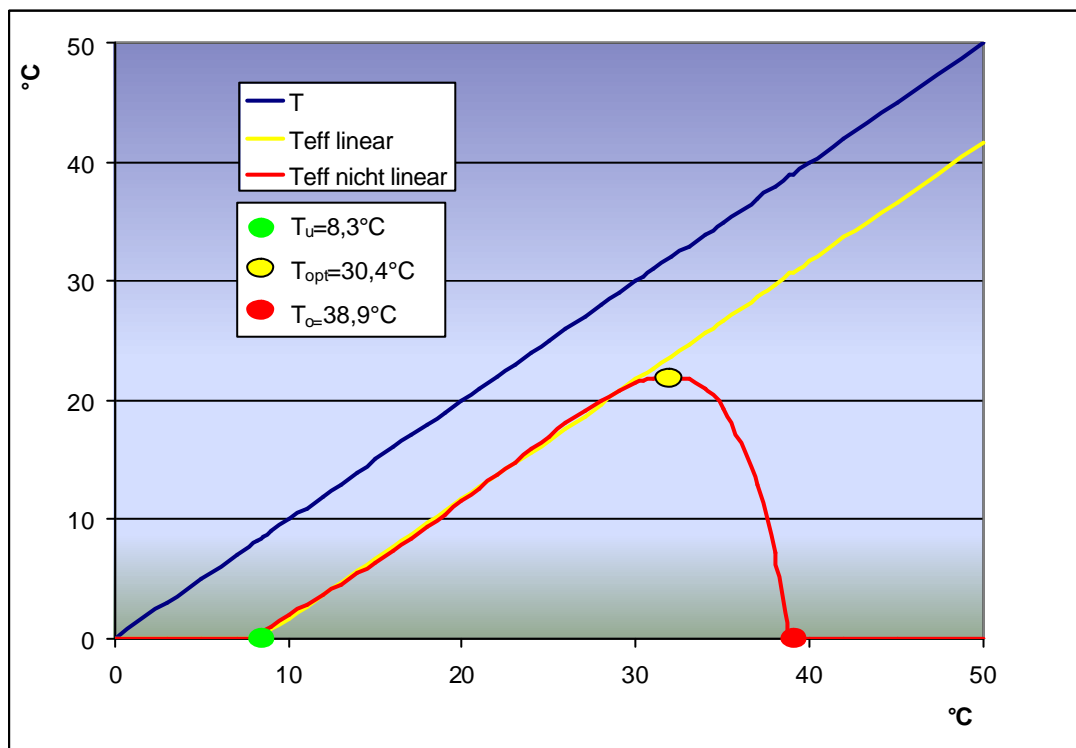


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Temperatur und berechneter effektiver Temperatur für ein lineares (T_{eff} linear) und nichtlineares (T_{eff} nichtlinear) Modell am Beispiel der Gesamtentwicklung (Temperaturkennzahlen nach Wermelinger und Seifert(1998)).

Tab. 4: Parameter (a , β , γ , T_{\max}) des nichtlinearen Modells zur Berechnung der effektiven Temperatur für die Entwicklung der jeweiligen Stadien und der Gesamtentwicklung (T_u : unterer Entwicklungsnullpunkt; T_{opt} : Temperaturoptimum; T_o : oberer Entwicklungsnullpunkt; dd : effektive Temperatursumme zum Erreichen des nächsten Stadiums („degree-days“), $lfd\ Sum$: kumulierte effektive Temperatursumme (Wermelinger und Seifert, 1998)).

Stadium	Parameter		dd	lfd Sum
Ei	a	0,02794619	51,8	51,8
	β	3,05852998		
	γ	1,31908326		
	T_{\max}	41,3319776		
	T_u	10,6		
	T_{opt}	32		
	T_o	39,4		
Larven	a	0,0304292	204,4	256,2
	β	4,21282082		
	γ	1,26606029		
	T_{\max}	41,4524008		
	T_u	8,2		
	T_{opt}	29,5		
	T_o	39,1		
Puppen	a	0,02608745	57,7	313,9
	β	2,71915753		
	γ	1,26932574		
	T_{\max}	41,6421473		
	T_u	9,9		
	T_{opt}	33,3		
	T_o	39,9		
Reifungsfraß	a	0,02876507	222,8	536,7
	β	3,5922336		
	γ	1,24657367		
	T_{\max}	40,9958913		
	T_u	8,3		
	T_{opt}	30,4		
	T_o	38,9		
Ei bis Puppe	a	0,02876507		334,2
	β	3,5922336		
	γ	1,24657367		
	T_{\max}	40,9958913		
	T_u	8,3		
	T_{opt}	30,4		
	T_o	38,9		
Gesamt	a	0,02876507		557
	β	3,5922336		
	γ	1,24657367		
	T_{\max}	40,9958913		
	T_u	8,3		
	T_{opt}	30,4		
	T_o	38,9		

2.3 Topoklimamodell

2.3.1 Sonneneinstrahlung

Die potentielle Sonneneinstrahlung für einen beliebigen Geländepunkt leitet sich aus den geländegeometrischen Faktoren (Seehöhe, Exposition, Neigung), der geographischen Breite sowie dem Betrachtungszeitpunkt (Tag des Jahres, Uhrzeit) ab. Die Berechnung der potentiellen Sonneneinstrahlung erfolgte mittels Arc View Extention RADCALC (Pennerstorfer, 2000). Zur Berücksichtigung der Variabilität der Sonneneinstrahlung durch atmosphärische Einflüsse (Bewölkung) wurde die potentielle Einstrahlung über die Monatsmittel der Tageswerte der an einer Referenzstation (Schoberstein bzw. Steyregg (2003)) gemessenen tatsächlichen Einstrahlung relativiert.

$$SI_{rel}(x_k)_i = (SI_{pot}(x_k)_m / SI_{pot}(ref)_m) * SI_{ref}_i = SI_{ref}_i * (SF_{topo}(x_k)_m / 100)$$

$SI_{rel}(x_k)_i$: relativierte Sonneneinstrahlung der Station x_k für Tag i

$SI_{pot}(x_k)_m$: potentielle Sonneneinstrahlung der Station x_k für Monat m

$SI_{pot}(ref)_m$: potentielle Sonneneinstrahlung der Referenzstation für Monat m

SI_{ref}_i : gemessene Sonneneinstrahlung bei Referenzstation für Tag i

Das Verhältnis $(SI_{pot}(x_k)_m / SI_{pot}(ref)_m)$ beschreibt dabei die Abschirmung durch die Topographie (% Strahlungsintensität):

$$SF_{topo}(x_k)_m = (SI_{pot}(x_k)_m / SI_{pot}(ref)_m) * 100$$

Zur Abschätzung der Überschirmungsverhältnisse beim jeweiligen Fangbaum wurden „hemisphärische Aufnahmen“ angefertigt (Pennerstorfer, 2000) und mit dem Programm HEMIVIEW ausgewertet (Abb. 2). Dabei wurde anhand der Lückenanteile in den Kronendächern der Prozentsatz der direkten und indirekten Strahlung die auf den Waldboden gelangt für den jeweiligen Monat ermittelt. Der „global site factor“ (GSF) gibt den Prozentsatz der gesamten, den Waldboden erreichenden Globalstrahlung für den Standort im jeweiligen Monat an.

Für die Verifizierung des Einstrahlungsmodells wurde im Untersuchungsjahr 2003 am Standort Weingartalm die Einstrahlung im Zeitraum vom 3.7. - 30.9.2003 gemessen und mit den modellierten Einstrahlungswerten verglichen.

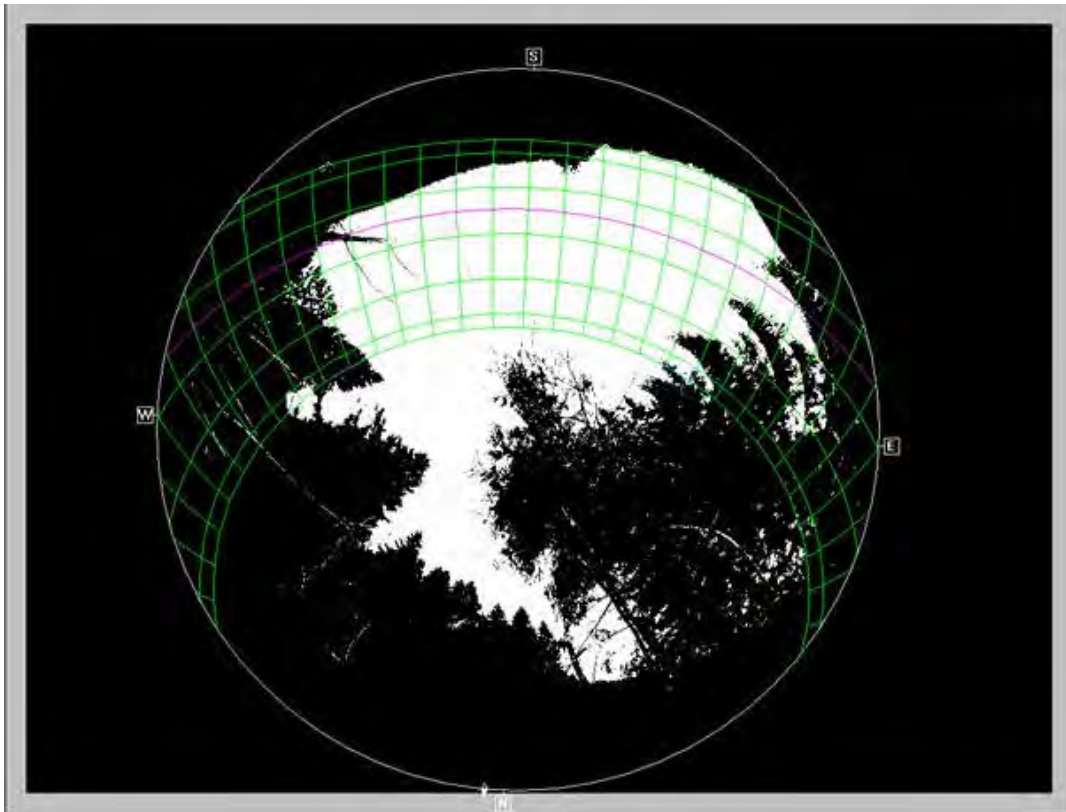


Abb. 2: Hemisphärische Aufnahme mit den Jahres-Sonnenbahnen und der Tagessonnenbahn zum Zeitpunkt der Aufnahme von Standort Zaglbaueralm, Fangbaum Nr. 9/2001 .

2.3.1 Temperatur

Anhand der Klimaaufzeichnungen des Stationsnetzes innerhalb und außerhalb des Nationalparks, topographischer Parameter aus dem digitalen Geländemodell und bestandesbezogener Daten kann mit Hilfe bestehender GIS-basierender Modelle (Pennerstorfer, 2000) sowohl die Lufttemperatur als auch die entwicklungsrelevante Rindentemperatur für jeden Punkt im Gelände modelliert werden.

Für die Berechnung der Lufttemperaturen (Tagesmittel, Tagesmaxima) wurden tägliche Regressionen (Bolstad *et al.*, 1997; Russo *et al.*, 1993) mit der Seehöhe (H) und der relativierten Sonneneinstrahlung (S_{rel}) der Temperaturmessstationen als Eingangsparameter durchgeführt. Die Regressionsgleichung zur Berechnung der Lufttemperaturparameter lautet:

$$T_{(\text{Tagesmittel} / \text{Tagesmaximum})}(x_k)_i = a_i + b_i * H(x_k) + c_i * S_{rel}(x_k)_i$$

$T_{(\text{Tagesmittel} / \text{Tagesmaximum})}(x_k)_i$: Lufttemperaturtagesmittel (–maximum) der Station x_k für Tag i

$H(x_k)$: Seehöhe der Station x_k

$S_{rel}(x_k)$: relativierte Sonneneinstrahlung der Station x_k (Monatsmittel)

Ein Set von Koeffizienten (a_i , b_i , c_i) dieser Regressionsgleichung wurde für jeden Tag für die Monate April bis Oktober der Jahre 2001 bis 2003 anhand der Tagesmittelwerte und der Tagesmaxima von 12 Stationen im Bereich des Nationalparks (Tab.5) berechnet.

Tab. 5: Seehöhe und Lage der Temperaturmessstationen im Nationalpark Kalkalpen.

Station	Kennung	Seehöhe (m)	Koordinaten	
			X	Y
Brauneben	BE	760	516500	298350
Ebenforstalm	EA	1050	531650	296950
Feichtaualm	FA	1370	524200	296400
Hengstpass	HP	990	534700	285500
Kogleralm	KO	1240	519750	293680
Mitterweng	MW	720	526800	285000
Rettenbach	RB	610	523680	291150
Rotwagmauer	RW	750	529600	295750
Saubachgut	SA	875	518750	292000
Schoberstein	SH	1260	524182	307905
Wurbauer	WU	850	526350	288000
Zaglbaueralm	ZA	990	528050	296150

Die Modellierung der entwicklungsrelevanten, effektiven täglichen Rindentemperaturen der wärmsten Stammseite erfolgte anhand der Rindentemperaturmessungen von 27 Fangbäumen. Mittels multipler linearer Regression - mit reduzierter relativer Sonneneinstrahlung und dem Tagesmittel bzw. Tagesmaximum der Lufttemperatur als Eingangsvariablen - wurde die mittlere (maximale) tägliche Rindentemperatur berechnet. Die effektive tägliche Rindentemperatursumme ergab sich aus der Differenz der mittleren täglichen Rindentemperatur und dem unteren Entwicklungsnullpunkt ($T_u=8,3^{\circ}\text{C}$). Die Überschätzung der effektiven Rindentemperatursumme bei Rindentemperaturen, die über den Temperaturoptimum ($T_{opt}=30,4^{\circ}\text{C}$) auftritt (vgl. Abb.1 und Tab.1), wurde durch die Abschätzung der Differenz zwischen tatsächlich aufgetretener effektiver Rindentemperatursumme (nichtlineares Modell) und der linear modellierten Rindentemperatursumme anhand des Zusammenhangs zwischen dem Rindentemperaturmaximum und dieser Differenz kompensiert.

Für die Validierung der geschätzten Lufttemperatur (Tagesmittel, - maxima) wurden die bei den Fangbäumen gemessenen Lufttemperaturen verwendet, die nicht für die Modellierung herangezogen wurden. Die Überprüfung der Interpolationsgüte, bei der

Zeitreihen der gemessenen und interpolierten Daten miteinander verglichen wurden, erfolgte für die Schätzung der Lufttemperaturen (Tagesmittelwert, - maxima) anhand des RMSE (Root Mean Square Error) bzw. für Temperatursummen anhand des RPME (Relative Percentage Mean Error) (Scheifinger, 1998). Die Schätzung der effektiven Rindentemperatursummen wurde anhand der tatsächlich bei den Fangbäumen aufgetretenen Rindentemperatursummen bewertet.

2.3.2 Niederschlag

Für die Berechnung der durchschnittlichen Niederschlagsmenge in den Monaten Mai bis Oktober und von monatlichen Niederschlagsdefiziten im Gebiet des Nationalparks Kalkalpen (Abweichung der Monatsniederschlagssumme von der durchschnittlichen Niederschlagsmenge der Jahre 1996 bis 2003) wurden die Messwerte von 34 Niederschlagsmessstationen herangezogen (Tab. 6).

Tab. 6: Bezeichnung, Messbeginn, Seehöhe und Lage der Niederschlagsmessstationen im Nationalpark Kalkalpen.

Stationsname	Kennung	Messbeginn	Seehöhe (m)	Koordinaten	
				X	Y
Andstandmauer	AM	1997	970	516400	297200
Bärenriedlau	BR	1997	1345	521500	293500
Blumaueralm	BA	1997	710	527100	294650
Dörfmoaralm	DA	1997	1200	534350	287900
Ebenforstalm	EA	1996	1050	531650	296950
Eiseneck	EE	1996	1300	525100	297200
Feichtaualm	FA	1996	1370	524200	296400
Grosse Klause	GK	1996	485	535760	296230
Hagler	HA	1998	1580	523100	293100
Haslersgatter	HG	1996	1160	528600	289380
Hengstpaß	HP	2001	990	534700	285500
Hopfing	HO	1996	570	519350	297250
Jörglalm	JA	1997	800	532550	294350
Kogleralm	KO	1996	1240	519750	293680
Krahlalm	KA	1997	700	529710	293800
Mehlboden	MB	1997	855	526300	291200
Messerer	ME	1997	580	528450	297300
Mieseck	MI	1997	1220	531500	297950
Mistleben	ML	1997	740	521050	296350
Pankraz	PZ	1997	513	516200	292000
Polzalpe	PA	1997	725	524500	298430
Rettenbach	RB	1996	610	523680	291150
Saigerin	SG	1997	725	538500	289400
Sitzenbachhütte	SI	1996	895	533450	290610
Speringbauer	SB	1997	533	514550	294200
Spering Unten	SU	1996	570	513100	297500
Spering Oben	SO	1997	990	514350	297450
Steyernquelle	SQ	1996	550	526620	298950
Weingartalm	WA	1997	1150	531450	291260
Wällerhütte	WH	1996	550	535450	293170
Zöbelboden	ZB	1997	910	533000	300530
Hausbach	HS	1999	570	527150	303100
Weissenbach	WB	1999	500	532000	302850
Laussabauernalm	LB	1999	790	536200	283000

2.4 Bestandes- und standortsbezogene Datenbasen zur Prädispositionsabschätzung

2.4.1 Digitales Höhenmodell

Grundlage für die Topoklimamodellierung und zur Klassifikation geomorphologischer Parameter (sofern nicht wie bei den Naturrauminventurpunkten detailliert erhoben) bildete ein digitales Höhenmodell.

2.4.2 Naturrauminventur Nationalpark Kalkalpen

Zur Berechnung der bestandes- und standortsbezogenen Prädisposition für Sturm-, Schnee- und Borkenkäferschäden wurden die Daten von insgesamt 1495 Probepunkten der Naturrauminventur im Nationalpark (Probeflächenradius = 15 m, Rasterabstand = 300 m), die im Zeitraum von 1994 bis 2000 erhoben wurden, verwendet, auf Plausibilität geprüft und mit den Ergebnissen der Topoklimamodellierung verschnitten.

2.4.3 Operatdaten Österreichische Bundesforste AG

Anhand der von den Österreichischen Bundesforsten zur Verfügung gestellten Operatdaten der Forstverwaltung Reichraming (Nationalparkforstverwaltung) und der angrenzenden Forstverwaltungen Molln und Steyr wurden für jede Unterabteilungsteilfläche Prädispositionsabschätzungen vorgenommen. Detaillierte Angaben zu Schadaufreten im Nationalpark in den Jahren 2000 - 2002 wurden entsprechend klassifiziert und zur Verifikation der Ergebnisse der Prädispositionsabschätzungen herangezogen.

2.4.4 Satellitenbildinterpretation

Zur Abschätzung der Prädisposition von Waldflächen außerhalb des Nationalparks, die nicht im Besitz der Österreichischen Bundesforste AG sind und für die keine Bestandesangaben zur Verfügung standen, wurde anhand einer objektbezogenen Klassifikation von Daten aus einer Satellitenbildinterpretation eine Einschätzung dieser Flächen hinsichtlich Baumartenzusammensetzung und Bestandesalter vorgenommen. Die Bildanalyse erfolgte anhand einer Landsat TM5 Aufnahme vom 27. Juli 1997 mit dem Analyseprogramm ERDAS IMAGINE 8.6. Die Klassifizierung wurde mit dem Programm eCognition durchgeführt.

2.5 Prädispositionsabschätzung

Anhand empirischer, wissensbasierender Prädispositionsschlüssel für abiotische Faktoren (Sturm, Schnee) (Führer und Nopp, 2001) und für biotische Faktoren (Borkenkäferbefall, (Wiefler, 1998; Nopp *et al.*, 2000; Netherer *et al.*, 2002; Netherer, 2003)) kann die standorts- und bestandesbezogene Gefährdung gegenüber diesen Schadfaktoren abgeschätzt und mittels eines speziellen Tools (MapModels) berechnet und in ArcView GIS visualisiert werden (Riedl und Kalasek, 1998; Netherer *et al.*, 2002). Diese Prädispositionsabschätzung wurde nicht nur für den Nationalpark selbst, sondern auch für die weitere Umgebung des Nationalparks berechnet.

Entsprechend ihrer relativen Bedeutung werden dabei die einzelnen Prädispositionskriterien ursachengerecht gewichtet und deren Ausprägung je nach Einflussnahme auf die Prädisposition mittels Award-Penalty-Point-Systems bewertet (Berryman, 1986; Speight und Wainhouse, 1989; Führer und Nopp, 2001). Für die weitere Berechnung der einzelnen Beiträge zur Gesamtprädisposition wurden die Prädispositionspunkte reskaliert (Werte zwischen 0 und 1) und anhand ihrer relativen Gewichtung entsprechend gewertet („Fuzzy Set“). Der Quotient aus der Punktesumme der einzelnen Kriterien und der maximal möglichen Punktesumme gibt den Wert der relativen Prädisposition der Beurteilungseinheit wieder.

Eine Verifizierung der Gefährdungsklassifikation erfolgte anhand flächenbezogener Angaben zum Schadauftreten im Nationalpark Kalkalpen in den Jahren 2000 – 2002.

2.6 Statistische Auswertungen, Datenverwaltung und GIS

Statistische Auswertungen wurden mit dem Programm SPSSTM11.0 durchgeführt (SPSS INC., 1990). Lineare Zusammenhänge wurden mittels multipler, linearer Regressionsanalysen überprüft; nichtlineare Beziehungen mit der Prozedur NLR-Regression berechnet. Sollwert-Vergleiche wurden mit dem one-samples T-Test durchgeführt. Die Datenverwaltung erfolgte mit dem Programm MS Access. Für die Berechnungen des Topoklimamodells wurde das Datenbankprogramm Microsoft SQL Server 2000 verwendet. Die Prädispositionsschätzwerte wurden mit der Implementierungsplattform MapModels berechnet und eingebunden (Riedl und Kalasek, 1998). Die Erstellung von Karten erfolgte mit der GIS-Software ArcView Gis 3.2.a bzw. ArcGis 8.3.

3 Ergebnisse

3.1 Borkenkäferentwicklungs- und Phänologie-Modell

3.1.1 Schwärm- und Befallsbeginn

Anhand der Fallenfänge von insgesamt sieben Fallenstandorten (Tab. 1) zeigte sich, dass Schwärmaktivitäten bereits dann auftraten, wenn im jeweiligen Beobachtungszeitraum (Tab. 1) die Tagesmaxima der Lufttemperatur ein Minimum vom 16,5°C erreichten. Dies entspricht exakt den Angaben von Lobinger (1994). Ein starker Anflug (Anzahl gefangener Käfer höher als 10% der insgesamt bis Ende Mai gefangenen Käfer) konnte bereits bei einem Lufttemperaturmaximum von 19,4°C beobachtet werden (Abb. 3).

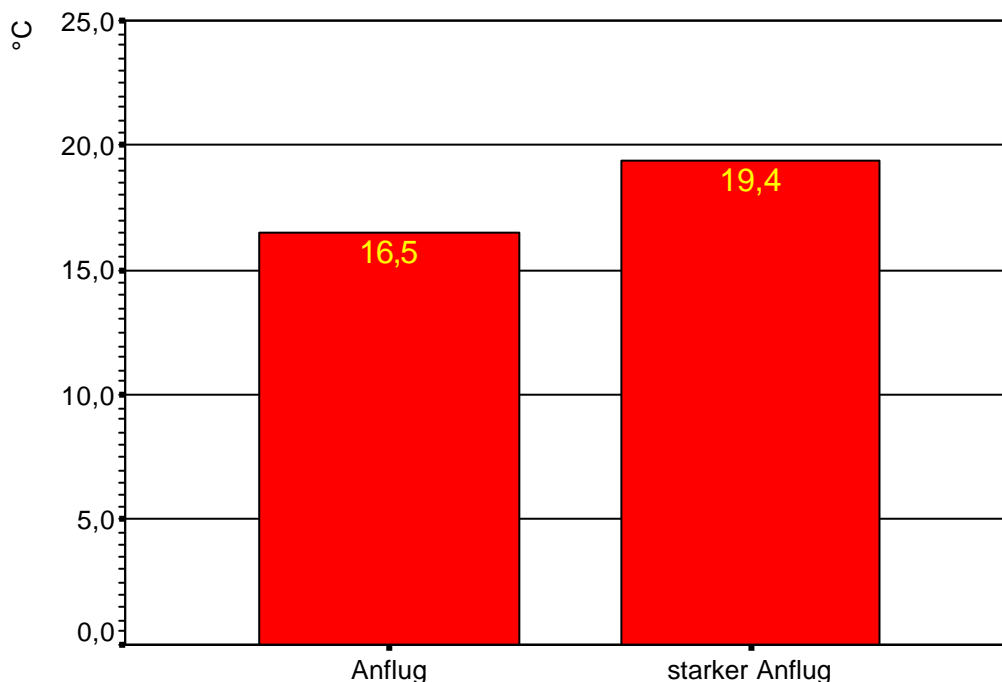


Abb. 3: Schwellenwerte der Lufttemperaturtagesmaxima für den Anflug von *Ips typographus* an Pheromonfallen (starker Anflug: Anzahl gefangener Käfer höher als 10% der insgesamt bis Ende Mai gefangenen Käfer).

Für die weitere Modellierung der Borkenkäferentwicklung sind jedoch nicht jene Bedingungen entscheidend, die zum ersten Anflug von zumeist nur wenigen Individuen führen, sondern solche, die einen Befall von disponierten Bäumen einleiten. Hier zeigte sich in 7 von 9 Fällen, dass innerhalb von 3 Tagen nach einem starken Pheromonfangtermin auch ein erster Befall an den Fangbäumen stattfand

(Tab. 7). Nur bei einem Fangbaum konnte ein erster Befall bereits vor der ersten Hauptschwärmphase (Fangbaum Mehlboden 2002). Im Mittel betrug das Lufttemperaturmaxima zum Zeitpunkt des ersten Befalls an den Fangbäumen 21,5 °C. Der niedrigste Wert der Lufttemperaturtagesmaxima, bei dem ein Erstbefall an einem der Fangbäume auftrat, betrug 16,79°C (Fangbaum Zaglbaueralm 2001).

Tab. 7: Zeitraum für ersten Anflug an Fallen, erste Hauptschwärmphase (Anzahl gefangener Käfer höher als 10% der insgesamt bis Ende Mai gefangenen Käfer) und Erstbefall bei Fangbäumen sowie Lufttemperaturmaximum (LTmax) bei Erstbefall.

Falle /Fangbaum	1.Anflug		1.Hauptflug		1.Befall		LTmax (°C) bei 1. Befall
	von	bis	von	bis	von	bis	
Messerer	24.04.01	26.04.01	30.04.01	02.05.01	30.04.01	02.05.01	25,83
Bodinggraben	24.04.01	26.04.01	02.05.01	04.05.01	02.05.01	04.05.01	28,61
Zaglbaueralm	24.04.01	26.04.01	02.05.01	04.05.01	06.05.01	10.05.01	16,79
Ebenforstalm	30.04.01	02.05.01	02.05.01	04.05.01	22.05.01	25.05.01	21,54
Krennbauer	27.04.02	29.04.02	30.04.02	02.05.02	04.05.02	06.05.02	19,12
Mehlboden	30.04.02	02.05.02	16.05.02	18.05.02	08.05.02	10.05.02	19,54
Haslersgatter	06.05.02	08.05.02	16.05.02	18.05.02	16.05.02	18.05.02	20,66
Krennbauer		20.04.03	25.04.03	30.04.03	30.4.03	02.05.03	24,86
Mehlboden	21.04.03	26.04.03	29.04.03	02.05.03	-	-	
Haslersgatter	29.04.03	02.05.03	04.05.03	06.05.03	07.05.03	09.05.03	18,34
Blumaueralm					18.05.01	31.05.01	23,48
Tiefing					18.05.01	31.05.01	19,06
Weingartalm					16.05.02	20.05.02	22,75
Holzgraben Süd					07.05.02	15.05.02	18,78
Holzgraben Nord					07.05.02	15.05.02	17,61
Weingartalm					07.05.03	09.05.03	24,29
Holzgraben Süd					26.04.03	30.04.03	22,66
Mittelwert							21,5
Minimum							16,79
Median							21,1

Abgesehen von den minimalen Temperaturanforderungen zum Zeitpunkt des Schwärmbeginns und des Befalls, spielen die Photoperiode (Tageslänge), der Reifungsgrad und eine thermale Akklimatisierung der überwinterten Käfer im Frühjahr eine erhebliche Rolle. So können Lufttemperaturmaxima von mehr als 16,5°C bereits sehr zeitig im Frühjahr auftreten, ohne dass dadurch bereits Schwärmaktivitäten, Dispersion oder Befall durch die Käfer ausgelöst werden. Als ein Indikator für eine „Präkonditionierung“ für den Schwärmflug im Frühjahr kann die kumulierte Summe der Lufttemperaturtagesmaxima ab Anfang April angesehen werden. Nach Abzug des Entwicklungsnullpunktes ($T_0=8,3^{\circ}\text{C}$) zeigte sich, dass bis zum 1. Anflug von Käfern an Pheromonfallen im Mittel $60,54 \pm 19,18$ Tagesgrade und bis zum 1. Befall an den Fangbäumen $140,26 \pm 23,68$ Tagesgrade erreicht

werden. Berechnet wurden diese Werte mittels modellierter Lufttemperaturmaxima ab 1. April für die jeweiligen Fallen- und Fangbaumstandorte (siehe Kap. 3.2). Mit Hilfe dieser zu erreichenden Summen und einem Schwellenwert von 16,5°C für den Flugbeginn konnte der Zeitpunkt des 1. Anflugs und des 1. Befalls relativ genau prognostiziert werden (Tab. 8). Für den günstigsten Fall wurde der 1. Befall an den Fangbäumen im Minimum um 4 Tage früher (Fangbaum Mehlboden) und maximal 3 Tage später (Fangbaum Messerer) eingeschätzt (mittlerer Fehler für $n = 13$ Fangbäume: $\pm 1,31$ Tage).

Tab. 8: Prognostizierter Zeitpunkt und Abweichung in Tagen für den Beginn des Anflugs von *Ips typographus* an Pheromonfallen und den ersten Befall an Fangbäumen im Nationalpark Kalkalpen (Min: minimale Abweichung in Tagen; Max: maximale Abweichung in Tagen; MAE: mittlere absolute Abweichung in Tagen).

	prognost. Zeitpunkt		Abweichung in Tagen	
	1. Anflug Falle	1. Befall Fangbaum	1. Anflug	1. Befall
Messerer	25.04.2001	02.05.2001	1	0
Bodinggraben	25.04.2001	02.05.2001	1	0
Zaglbaueralm	29.04.2001	05.05.2001	3	1
Ebenforstalm	30.04.2001	14.05.2001	0	*)
Krennbauer	26.04.2002	03.05.2002	1	1
Mehlboden	01.05.2002	08.05.2002	1	0
Haslersgatter	16.05.2002	18.05.2002	8	0
Krennbauer	28.04.2003	06.05.2003	8	4
Mehlboden	26.04.2003	-	0	-
Haslersgatter	03.05.2003	09.05.2003	1	0
Weingartalm	09.05.2002	17.05.2002		1
Holzgraben Süd	01.05.2002	16.05.2002		1
Holzgraben Nord	07.05.2002	17.05.2002		2
Weingartalm	29.04.2003	06.05.2003		3
Holzgraben Süd	25.04.2003	04.05.2003		4
			Min	-1
			Max	8
			MAE	2,4
				1,31

*) Fangbäume, die erst zu einem späten Zeitpunkt gefällt wurden, wurden nicht berücksichtigt.

3.1.2 Adaptierung bestehender Borkenkäferentwicklungsmodelle

Für die Modellierung der Borkenkäferentwicklung wurden in den Jahren 2001 bis 2003 an insgesamt 27 Fangbäumen die Zusammenhänge zwischen Rindentemperatur und Brutentwicklung untersucht (Tab. 9). Die Fangbäume der ersten Serie wiesen dabei in der Regel einen raschen, intensiven Befallsverlauf auf. Nur die Fangbäume an den höher gelegenen, schattigen Standorten Tiefling (2001)

und Haslersgatter (2002) zeigten einen deutlich geringeren Befallsgrad bzw. verzögerten Befallsverlauf. Bei der zweiten Fangbaumserie trat im Untersuchungsjahr 2001 nur auf den Standorten Bodinggraben und Messerer kein Befall ein. Bei den Standorten Mehlboden und Haslersgatter konnte 2002 nur spärlicher Befall registriert werden. Im Untersuchungsjahr 2003 wurde keine 2. Fangbaumserie vorgelegt.

Für die Ermittlung der Prognosegenauigkeit der einzelnen Modellansätze wurden je Kontrolltermin die Abweichungen prognostizierter Brutstadien von tatsächlich aufgetretenen Stadien, die Abweichungen der prognostizierten Entwicklungsdauer für einzelne Stadien und der Gesamtentwicklung in Tagen sowie die prognostizierte Temperatursumme zum Zeitpunkt des Schlüpfens der Jungkäfer in Relation zur notwendigen Temperatursumme verglichen.

Beim Vergleich zwischen sonnenexponierten und schattigen Standorten hinsichtlich der Prognosegenauigkeit der bestehenden Berechnungsmodelle zeigte sich bei allen linearen Modellen eine deutliche Überschätzung der Entwicklung für Fangbäume an sonnigen Standorten (Abb. 4). Diese Fehleinschätzung ist darauf zurückzuführen, dass bei linearen Modellen (Tab.3) selbst bei extrem hohen Rindentemperaturen eine weitere Entwicklung der Käfer unterstellt wird. Daher wurde mittels nichtlinearer Modellierung eine systematische Fehleinschätzung dieser Art korrigiert. Beim nichtlinearen Modell bleibt die Einschätzung der Entwicklung bei Fangbäumen auf schattigen Standorten gegenüber dem linearen Modell (Model Wermelinger) nahezu unverändert, bei sonnigen Standorten mit expositionsbedingt hohen Rindentemperaturen wird dagegen eine deutliche Reduktion der effektiven Temperatursumme und damit eine erhebliche Verbesserung der Prognosegenauigkeit erzielt (Abb. 4).

Tab. 9: Fällung, Erstbefall und Jungkäferschlüpftermin bei den untersuchten Fangbäumen im Nationalpark Kalkalpen.

Standort Kennung	Fällung	1.Befall	Schlüpftermin Freiland	Schlüpftermin Photoelektoren
1. Fangbaumserie 2001				
Messerer FB1	24.4.2001	02.05.2001	31.07.2001	27.07.2001
Bodinggraben FB2	24.4.2001	04.05.2001	31.07.2001	27.07.2001
Zaglbaualm FB3	24.4.2001	10.05.2001	31.07.2001	27.07.2001
Ebenforstalm FB4	18.5.2001	25.05.2001	24.08.2001	30.07.2001
Blumaueralm FB 5	18.5.2001	25.05.2001	07.08.2001	07.08.2001
Tiefpling FB6	18.5.2001	31.05.2001		24.04.2002
2. Fangbaumserie 2001				
Messerer FB7	16.7.2001	kein Befall		
Bodinggraben FB8	16.7.2001	kein Befall		
Zaglbaualm FB9	25.7.2001	27.07.2001		02.05.2002
Ebenforstalm FB10	16.7.2001	23.07.2001		29.04.2002
Blumaueralm FB11	31.7.2001	02.08.2001		07.05.2002
1. Fangbaumserie 2002				
Krennbauer FB1	30.4.2002	06.05.2002	01.08.2002	17.07.2002
Holzgraben Süd FB2	6.5.2002	08.05.2002	15.07.2002	11.07.2002
Holzgraben Nord FB3	6.5.2002	08.05.2002	19.07.2002	17.07.2002
Mehlboden FB4	30.4.2002	10.05.2002	15.08.2002	03.08.2002
Haslersgatter FB5	30.4.2002	18.05.2002		28.04.2003
Weingartalm FB6	15.5.2002	20.05.2002	15.08.2002	28.04.2003
2. Fangbaumserie 2002				
Krennbauer FB7	15.7.2002	30.07.2002		02.05.2003
Holzgraben Süd FB8	15.7.2002	30.07.2002		30.04.2003
Holzgraben Nord FB9	15.7.2002	30.07.2002		30.04.2003
MehlbodenFB10	15.7.2002	*)		
Haslersgatter FB11	15.7.2002	*)		
Weingartalm FB12	15.7.2002	30.07.2002		30.04.2002
Fangbaumserie 2003				
Krennbauer	**)	08.05.2003	11.07.2003	09.07.2003
Holzgraben Süd	**)	30.04.2003	11.07.2003	09.07.2003
Haslersgatter	9.5.2003	04.06.2003	19.08.2003	01.08.2003
Weingartalm	9.5.2003	24.05.2003	24.07.2003	21.07.2003

*) Befall nur vereinzelt

**)vom Wind geworfene Fichten

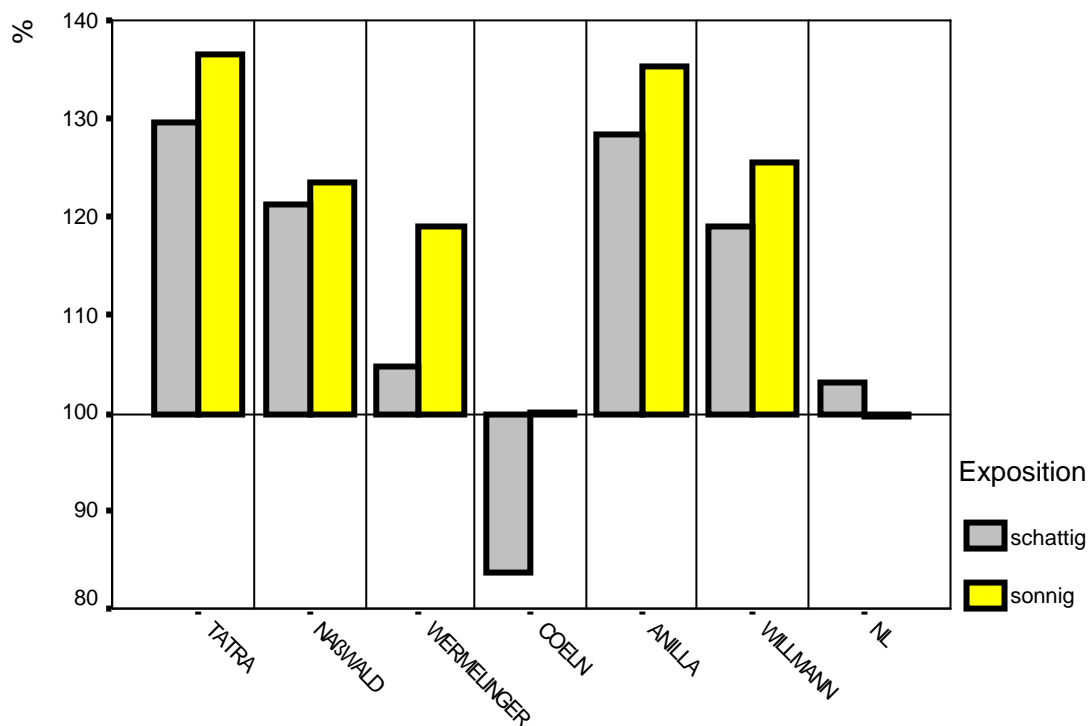


Abb. 4: Mittelwerte der Relation zwischen der berechneten Temperatursumme und der je Modell notwendigen Temperatursumme (vgl. Tab.3) zum Zeitpunkt des tatsächlichen Jungkäferschlupfbeginns, getrennt nach Lichtregime (NL: nichtlineares Modell).

Für die Modelle Tatra, Nasswald , Wermelinger, Annila und Willmann zeigte sich beim Vergleich der prognostizierten Stadien mit dem tatsächlich zum jeweiligen Kontrolltermin aufgetretenen Entwicklungsstadium eine maximale Überschätzung von 2 Stadien. Die Modelle Tatra und Wermelinger unterschätzten die Entwicklung um maximal 1 Stadium. Das Modell nach Coeln unterschätzte die Entwicklung bereits um maximal 2 Stadien. Bei den Modellen Nasswald, Annila und Willmann wurde die Entwicklung nie unterschätzt. Das nichtlineare Modell (NL) unter- bzw. überschätzte die Entwicklung um maximal 1 Stadium, wobei mit diesem Modell in mehr als 80% der Fälle das tatsächliche Entwicklungsstadium korrekt prognostiziert wurde (Abb. 5).

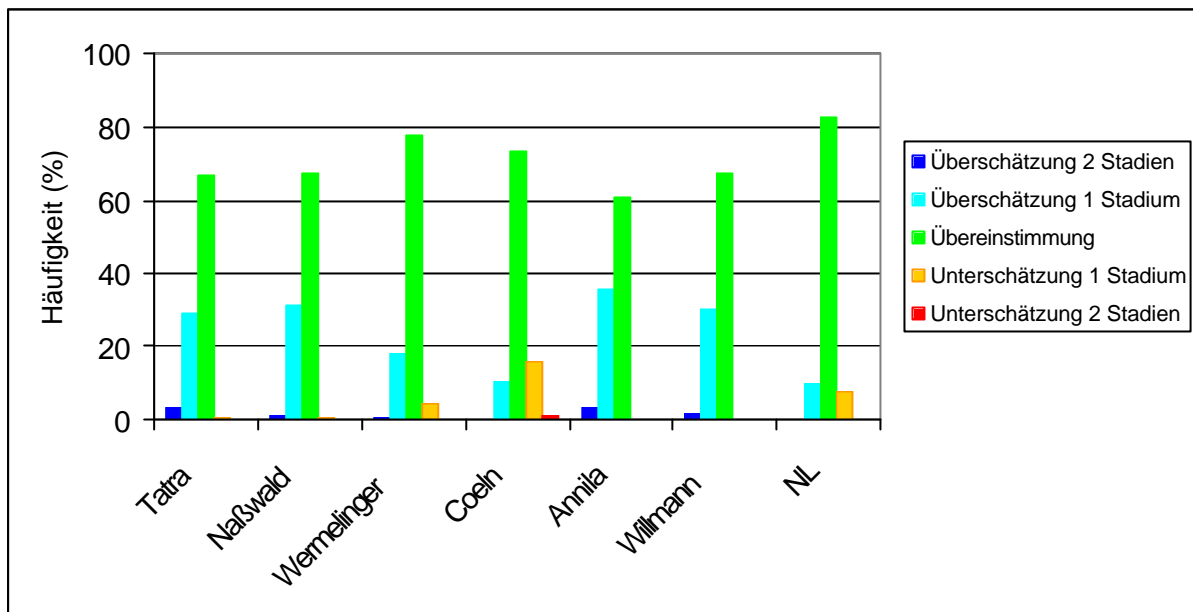


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung von Unter- und Überschätzung des tatsächlichen Entwicklungsstadiums (n=213 Kontrollen)

Alle linearen Modelle zeigten hinsichtlich der Gesamtentwicklungsdauer (= Dauer von Ei bis Jungkäferschlupf) erhebliche Abweichungen von der tatsächlichen Entwicklungsdauer, wobei das Modell nach Coeln die Entwicklungsdauer im Mittel stark unterschätzte. Alle anderen Modelle ergaben eine Überschätzung der Gesamtentwicklungsdauer, wobei jedoch die Dauer der einzelnen Stadien durch die verschiedenen Modelle zum Teil sehr unterschiedlich eingeschätzt wurde. Die Dauer des Larvenstadiums wurde von den Modellen Naßwald, Wermelinger und vom nichtlinearen Modell im Mittel unterschätzt (Abb. 6). Die Gesamtentwicklungsdauer wurde jedoch vom nichtlinearen Modell mit einer mittleren Abweichung von 1,47 Tagen am genauesten prognostiziert.

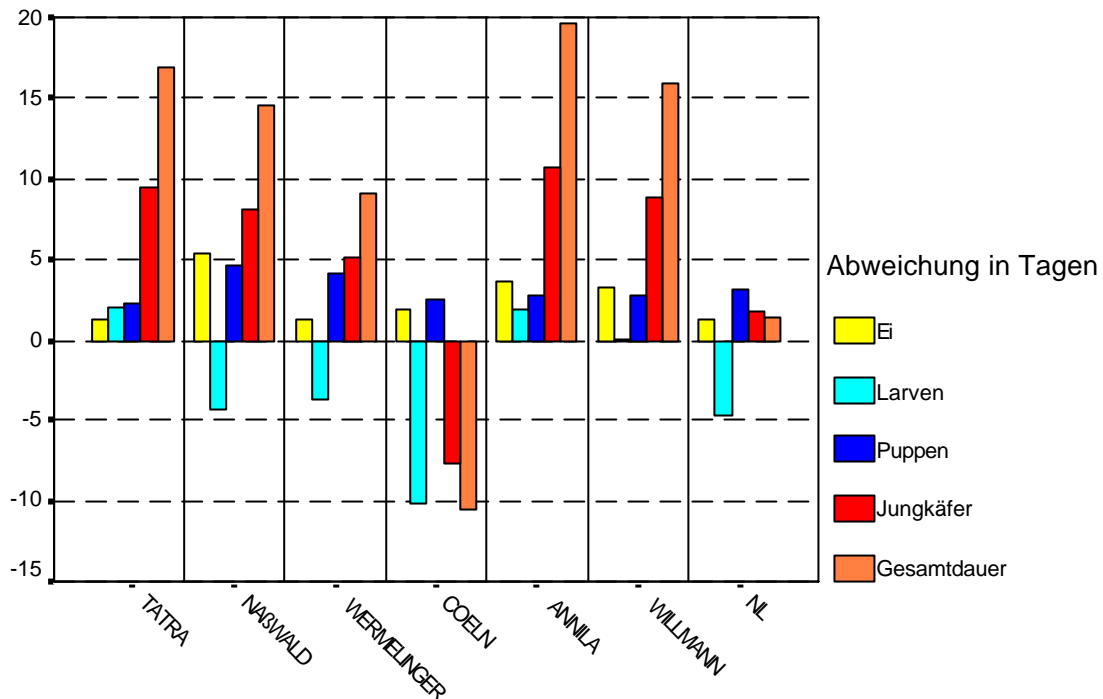


Abb. 6: Abweichung der prognostizierten Dauer der einzelnen Stadien und der Gesamtentwicklung (Ei – Ausschlüpfen der Jungkäfer) von der tatsächlichen Entwicklungsdauer.

Die Berechnung der effektiven Temperatursummen durch fortlaufende Aufsummierung der effektiven Temperaturen anhand der modellspezifischen Entwicklungsnullpunkte und notwendigen Temperatursummen der einzelnen Stadien impliziert natürlich, dass durch Fehleinschätzungen vorangegangener Stadien die Einschätzung aller nachfolgenden Stadien beeinflusst wird. Berechnet man die Temperatursummen separat für jedes einzelne Stadium anhand der sich aus den Fangbaumkontrollen ermittelten Zeitspanne des Auftretens der einzelnen Stadien, können modellspezifische Unterschiede in der Einschätzung der Entwicklung einzelner Stadien verdeutlicht werden (Abb. 7). Dabei zeigte sich, dass mit dem Modell Nasswald sowohl das Ei- als auch das Puppenstadium extrem überschätzt, das Larvenstadium dagegen leicht unterschätzt wird. Das Modell von Coeln zeigte für Ei- und Puppenstadium zwar Überschätzungen, die Reifung der Jungkäfer und insbesondere die Entwicklung der Larven wurden erheblich unterschätzt. Die Modelle Tatra, Annila und Willmann überschätzten die Entwicklung aller Stadien gleichermaßen. Das nichtlineare Modell überschätzte, ähnlich wie das lineare Modell nach Wermelinger und Seifert (1998), die Entwicklung von Ei, Puppen und Jungkäfer geringfügig, die Entwicklung der Larven wurde aber im Mittel doch deutlich unterschätzt.

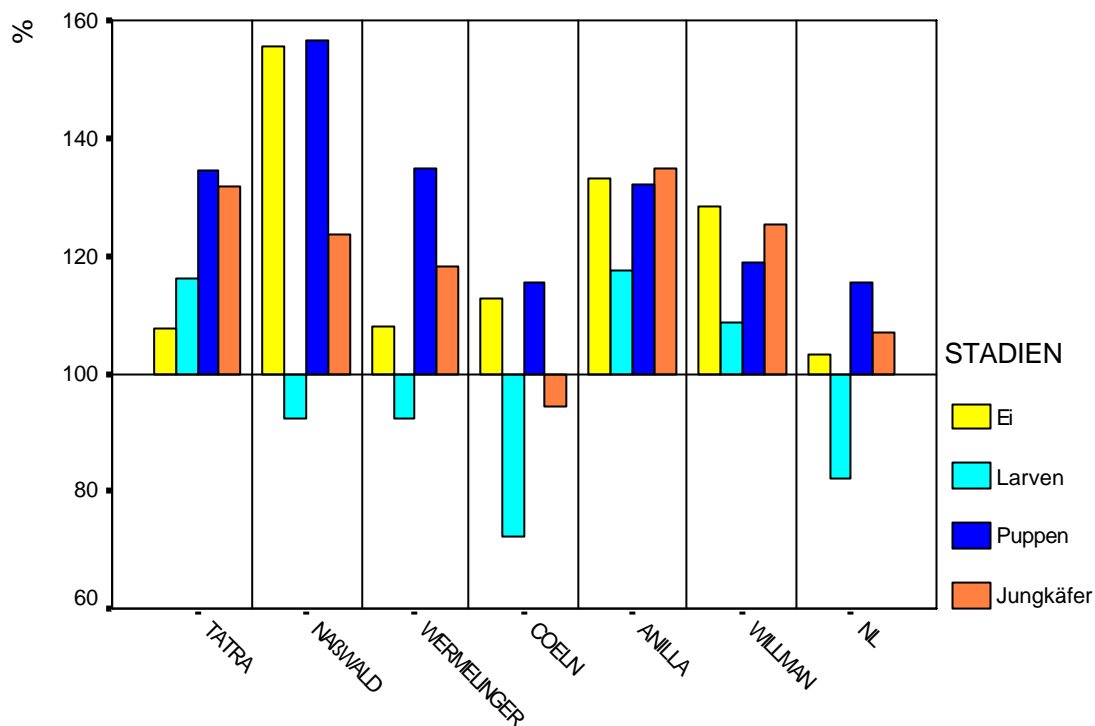


Abb. 7: Mittelwerte der separat für einzelne Stadien berechneten Temperatursummen nach den verschiedenen Modellen in Prozent der notwendigen Temperatursumme.

Der Relation der Temperatursummen, berechnet mittels Stundenwerten der Rindentemperatur an der wärmsten Stammseite für einzelne Stadien bzw. für die Gesamtentwicklung bis zum Zeitpunkt des Ausschlüpfens der Jungkäfer, zur notwendigen Temperatursumme, zeigte für alle linearen Modelle deutliche Abweichungen vom Sollwert = 100 (Tab. 10). Mit dem nichtlinearen Modell kann dagegen der Schlüpfszeitpunkt anhand der effektiven Rindentemperatursumme im Freiland mit $101,5 \% \pm 10,3 \%$ (Stadienmodell), bzw. $102,9 \% \pm 10,0 \%$ (Gesamtentwicklungsmodell) sehr genau prognostiziert werden. Für die an Stämmen in Photoeklektoren ermittelten Temperatursummen kann der Schlüpfszeitpunkt mit $99,7 \% \pm 7,4 \%$ (Stadienmodell) bzw. $100,9 \% \pm 7,7 \%$ (Gesamtmodell) errechnet werden.

Die berechneten Temperatursummen des nichtlinearen Modells zeigen sowohl für die Freilanduntersuchungen als auch für Stämme im Institutsgarten keine signifikante Abweichung vom Sollwert (=100%), wohingegen durch lineare Modelle der Sollwert und damit die Brutentwicklung zum Teil erheblich überschätzt (Tatra, Annila) bzw. unterschätzt (Coeln) wird (Tab. 10).

Tab. 10: Mittelwert und Standardabweichung der modellierten Temperatursumme zum Zeitpunkt des Ausschlüpfens der Jungkäfer und mittlere Abweichung von der notwendigen Temperatursumme (Sollwert = 100 %) je Modell, berechnet nach Stundenwerten der Rindentemperatur im Freiland und für Stämme in Photoelektoren nach Gesamtentwicklungs- und Stadienmodell (n: Anzahl der Fangbäume [nur Bäume der 1. Fangbaumserie, deren Jungkäfer noch in der jeweiligen Saison zu Schlüpfen begannen], T: T-Wert für Sollwertvergleich; Sig.: Signifikanz [***: P=0,001; **:P=0,01; *:P=0,05; n.s.: nicht signifikant])

Rindentemperatur			Mittelwert	Stabw.			mittl. Differenz
Freiland	MODELL	n	(%)	(%)	T	Sig.	(%)
Stadienmodell	Tatra	14	134,3	18,5	6,9	***	34,3
	Naßwald	14	121,7	12,3	6,6	***	21,7
	Wermelinger	14	114,4	14,6	3,7	**	14,4
	Coeln	14	94,3	12,8	-1,7	n.s.	-5,7
	Annala	14	132,5	13,7	8,9	***	32,5
	Willmann	14	122,9	12,7	6,8	***	22,9
	NL	14	101,5	10,3	0,6	n.s.	1,5
Gesamtmodell	Tatra	14	133,3	12,2	10,2	***	33,3
	Naßwald	14	113,4	13,2	3,8	**	13,4
	Wermelinger	14	115,2	13,4	4,2	***	15,2
	Coeln	14	91,9	25,7	-1,2	n.s.	-8,1
	Annala	14	132,5	13,7	8,9	***	32,5
	Willmann	14	122,9	12,7	6,8	***	22,9
	NL	14	102,9	10,0	1,1	n.s.	2,9
Photoelektoren							
Stadienmodell	Tatra	13	123,9	12,8	6,7	***	23,9
	Naßwald	13	114,0	9,7	5,2	***	14,0
	Wermelinger	13	108,9	10,6	3,0	*	8,9
	Coeln	13	91,6	9,0	-3,4	**	-8,4
	Annala	13	125,5	10,5	8,8	***	25,5
	Willmann	13	116,4	9,7	6,1	***	16,4
	NL	13	99,7	7,4	-0,2	n.s.	-0,3
Gesamtmodell	Tatra	13	124,5	10,5	8,4	***	24,5
	Naßwald	13	108,2	9,7	3,1	*	8,2
	Wermelinger	13	109,9	9,8	3,6	**	9,9
	Coeln	13	91,3	17,6	-1,8	n.s.	-8,7
	Annala	13	125,5	10,5	8,8	***	25,5
	Willmann	13	116,4	9,7	6,1	***	16,4
	NL	13	100,9	7,7	0,4	n.s.	0,9

Aufgrund der modellspezifischen Unterschiede hinsichtlich der verwendeten effektiven Temperatursummen und der Entwicklungsnullpunkte für die Gesamtentwicklung bzw. für die detaillierte Modellierung der Entwicklung einzelner Stadien ergaben sich für die unterschiedlichen Modellansätze mehr oder weniger stark ausgeprägte Differenzen zwischen Gesamtentwicklungsmodell und Stadienmodell. Die Modelle nach Annala und Willmann zeigten dabei aufgrund identischer Temperatursummen und Entwicklungsnullpunkte keine Unterschiede. Die

Modelle Tatra und Coeln zeigten zwar keine von Null signifikant verschiedenen Differenzen, wiesen jedoch aufgrund der für die einzelnen Stadien ganz unterschiedlich veranschlagten Entwicklungsnullpunkte (Tab. 3) eine sehr hohe Variabilität der Differenzen auf (Abb. 8). Das Modell Nasswald ergab im Vergleich mit dem Stadienmodell für die Gesamtentwicklungsmodellierung eine signifikant langsamere Entwicklung (Abb. 8), die auf den deutlich höheren Entwicklungsnullpunkt für das Gesamtmodell zurückzuführen ist (Tab. 3). Die Modelle Wermelinger und das nichtlineare Modell wiesen aufgrund ausgeglichener Parametrisierung vom Gesamtmodell und dem detaillierten Stadienmodell eine geringe Streuung der Differenzen und eine für das Gesamtentwicklungsmodell geringfügig raschere Entwicklung (Abb. 8). Die mittlere Differenz der Temperatursumme zwischen Gesamtentwicklungs- und Stadienmodell betrug für das Modell Wermelinger 0,83 % (Differenz nicht signifikant von Null verschieden) und für das nichtlineare Modell: 1,33 % ($P=0,01$).

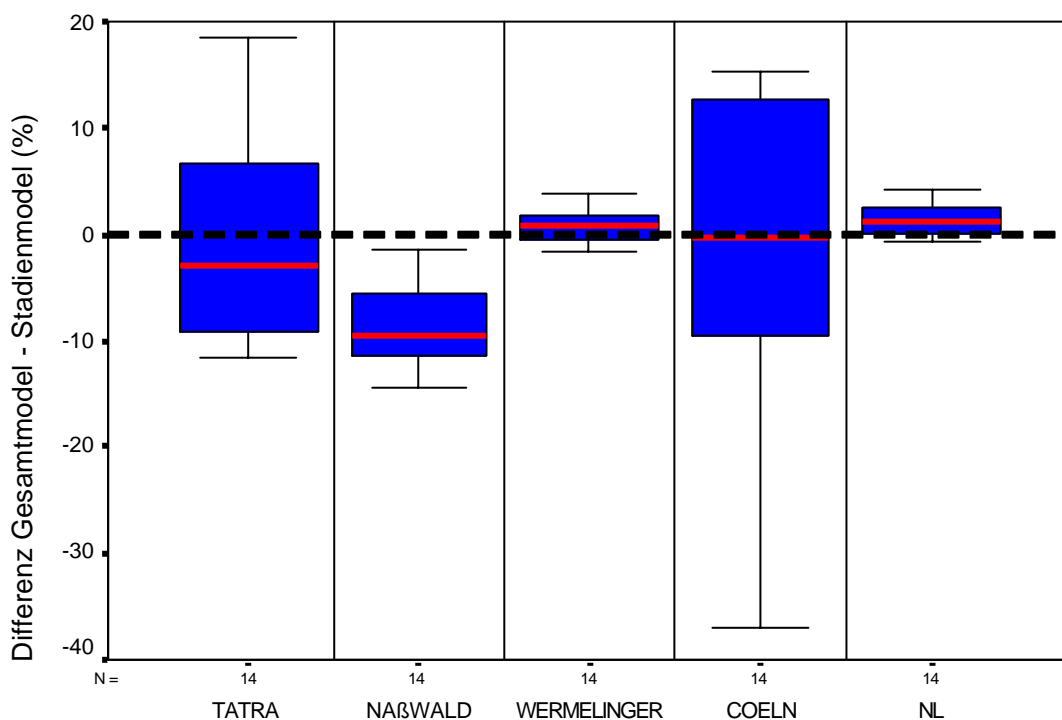


Abb. 8: Differenz der relativen Temperatursumme zum Zeitpunkt des Ausschlüpfens der Jungkäfer zwischen Gesamtentwicklungsmodell und Stadienmodell.

Da für die weiterführende Applikation der Entwicklungsmodellierung für beliebige Punkte im Gelände keine Stundenwerte (Tagesgänge) der Temperaturen zur Verfügung stehen, wurde bislang die Entwicklung anhand des Tagesmittelwerts der Temperatur angeleitet. Da selbst die Tagesmittelwerte der Rindentemperatur kaum Werte annehmen, die über den optimalen Entwicklungskennwert liegen, wurde für

das nichtlineare Modell nicht das Tagesmittel berechnet, sondern bereits die Tagessumme der effektiven Temperatur aus den Stundenwerten abgeleitet. Dies hat auch den Vorteil, dass eine Unterschätzung der Entwicklung vermieden wird, die dann auftritt, wenn z.B. bei länger andauernden Schlechtwetterperioden oder bei generell niedrigem Temperaturniveau im Spätsommer der Tagesmittelwert niedriger ist als der Entwicklungsnullpunkt, tatsächlich aber durch den Tagesgang der Temperatur dennoch Temperaturen auftreten, die für eine weitere Brutentwicklung genutzt werden könnten.

Vergleiche der Temperatursummen für die Gesamtentwicklung, berechnet mit dem Tagesmittel mit der Berechnungen anhand der Stundenwerte, wiesen für alle Modelle nur geringfügige Abweichungen auf ($<1,0\%$). Eine Ausnahme davon zeigte, aufgrund des extrem hohen Entwicklungsnullpunkts für das Gesamtmodell, das Modell nach Coeln (mittlere Differenz : $-6,94\%$).

Die Berechnung der effektiven Temperatursumme nach Tageswerten unterstreicht die hohe Prognosegenauigkeit des nichtlinearen Modells (Tab. 11). Die Berechnung eines detaillierten Stadienmodells ist jedoch hierbei nicht mehr möglich, da die Kalkulation der Tagessumme der effektiven Temperatur nur anhand des Gesamtmodells erfolgen kann. Die jeweils erreichten Stadien können aber dennoch anhand der relativen Anteile der Temperatursummen einzelner Stadien an der Temperatursumme für die Gesamtentwicklung abgeschätzt werden (Tab. 12). Dies ist insofern von Bedeutung, da für potentiell mögliche Folgegenerationen, Geschwisterbruten und Standorten, an denen nur eine Generation zur Ausbildung kommt, eine detaillierte Kenntnis notwendig ist, ob bis zum Ende der Vegetationsperiode überwinterungsfähige Stadien (Jungkäfer) erreicht werden oder nicht.

Tab. 11: Mittelwert und Standardabweichung der relativen Temperatursumme zum Zeitpunkt des Ausschlüpfens der Jungkäfer, berechnet mittels Tagesmittelwert bzw. Tagesumme der effektiven Temperatur (nichtlineares Modell) für Gesamtmodell und Stadienmodell (n: Anzahl der Fangbäume [nur Bäume der 1. Fangbaumserie, deren Jungkäfer noch in der jeweiligen Saison zu Schlüpfen begannen], T: T-Wert für Sollwertvergleich; Sig.: Signifikanz [***: P=0,001; **:P=0,01; *:P=0,05; n.s.: nicht signifikant]).

Rindentemperatur Freiland	MODELL	N	Mittelwert (%)	Stabw. (%)	T	Sig.	mittl. Differenz (%)
Stadienmodell	Tatra	14	132,9	19,4	6,3	***	32,9
	Naßwald	14	122,5	12,1	6,9	***	22,5
	Wermelinger	14	113,0	14,6	3,3	**	13,0
	Coeln	14	92,2	12,3	-2,4	*	-7,8
	Annala	14	133,1	13,4	9,3	***	33,1
	Willmann	14	123,5	12,4	7,1	***	23,5
Gesamtmodell	Tatra	14	134,4	12,0	10,8	***	34,4
	Naßwald	14	113,4	12,8	3,9	**	13,4
	Wermelinger	14	115,1	13,1	4,3	***	15,1
	Coeln	14	84,9	21,9	-2,6	*	-15,1
	Annala	14	133,1	13,4	9,3	***	33,1
	Willmann	14	123,5	12,4	7,1	***	23,5
Photoelektoren							
Stadienmodell	Tatra	13	123,5	12,8	6,6	***	23,5
	Naßwald	13	115,0	9,4	5,7	***	15,0
	Wermelinger	13	108,2	10,2	2,9	*	8,2
	Coeln	13	90,3	8,5	-4,1	**	-9,7
	Annala	13	126,4	10,2	9,4	***	26,4
	Willmann	13	117,3	9,4	6,6	***	17,3
Gesamtmodell	Tatra	13	119,6	15,0	4,7	***	19,6
	Naßwald	13	108,5	8,9	3,4	**	8,5
	Wermelinger	13	110,1	9,1	4,0	**	10,1
	Coeln	13	85,4	14,1	-3,7	**	-14,6
	Annala	13	126,4	9,9	9,6	***	26,4
	Willmann	13	117,3	9,2	6,8	***	17,3
	NL	13	102,1	7,7	1,0	n.s.	2,1

Im Modell nach Wermelinger und Seifert (1998) muss für den erfolgreichen Abschluss des Puppenstadiums 60% der Temperatursumme erreicht werden (Tab. 12). Der Vergleich des Anfang Oktober tatsächlich vorgefundenen Entwicklungsstands mit dem prognostizierten Stadium, berechnet anhand des nichtlinearen Modells (Gesamtmodell), zeigte bis auf den Standort Blumaueralm eine exakte Übereinstimmung (Tab. 13). Der Standort Blumaueralm ist (ähnlich wie der Fangbaumstandort Mehlboden), mit effektiven Temperatursummen von knapp über oder unterhalb des Schwellenwerts von 60%, ein Grenzfall. Eine Kontrolle des

Fangbaums Blumaueralm im Juni 2002 ergab, dass ein geringer Teil der Brut sich doch noch zu Jungkäfern entwickelt hatte. Beim korrespondierenden Stammstück, das zu Vergleichszwecken im Institutsgarten untersucht wurde, schlüpften ebenfalls einige Jungkäfer im Frühjahr 2002 aus. Im Untersuchungsjahr 2002 erreichten die Bruten der Fangbäume Holzgraben Nord und Weingartalm (2.Fangbaumserie) bis Anfang Oktober nur das Puppenstadium und es konnten keine Jungkäfer erfolgreich überwintern (Tab. 13). Die wenigen Käfer die im Frühjahr 2003 aus diesen Brutstämmen erschienen waren offensichtlich überwinternde Parentalkäfer (Tab. 17).

Tab. 12: Relative (kumulierte) Anteile der notwendigen Temperatursummen präimaginaler Stadien, getrennt für Stadien- und Gesamtmodell.

	Tatra	Naßwald	Wermelinger	Coeln	Annala	Willmann
Stadienmodell						
Ei	8,42	11,87	9,65	15,30	12,72	12,22
Larven	46,51	45,93	47,74	47,42	45,49	45,12
Puppen	52,58	59,12	58,49	65,59	60,00	60,08
Gesamtmodell						
Ei-Puppe	60,00	74,15	60,00	73,82	60,00	60,00

Tab. 13: Anhand der Temperatursumme des nichtlinearen Modells (NL: Temperatursumme für das Gesamtmodell in Prozent der notwendigen Temperatursumme) Anfang Oktober prognostizierter und tatsächlich aufgetretener Entwicklungsstand bei den Fangbäumen der 2. Fangbaumserie.

Jahr	Standort	Datum	NL (%)	tatsächlich aufgetretenes Stadium	prognostiziertes Stadium
2001	Messerer	9.10.2001	67,67	kein Befall	<i>Jungkäfer *)</i>
	Bodinggraben	9.10.2001	74,56	kein Befall	<i>Jungkäfer *)</i>
	Zaglbaueralm	9.10.2001	83,15	Jungkäfer	Jungkäfer
	Blumaueralm	9.10.2001	61,62	Puppen	Jungkäfer
	Ebenforstalm	9.10.2001	80,18	Jungkäfer	Jungkäfer
2002	Krennbauer	8.10.2002	67,90	Jungkäfer	Jungkäfer
	Holzgraben Nord	8.10.2002	55,22	Puppen	Puppen
	Holzgraben Süd	8.10.2002	70,84	Jungkäfer	Jungkäfer
	Mehlboden	8.10.2002	59,62	kaum Befall **)	<i>Puppen</i>
	Haslersgatter	8.10.2002	37,80	kaum Befall**)	<i>Larven</i>
	Weingartalm	8.10.2002	56,00	Puppen	Puppen

*) angenommener Befallsbeginn im Modell: 31.7.2001

**) einzelne Einbohrungen am 1.8.2002

3.1.3 Geschwisterbruten

Bei jedem entnommenen Rindenstück für die Kontrolle des Entwicklungsstands wurde auch das Vorhandensein der Parentalkäfer beurteilt. Anhand des teilweisen oder vollständigen Fehlens der Parentalkäfer kann auf den Zeitpunkt der Anlage von Geschwisterbruten geschlossen werden (Tab. 13). Wann die Parentalkäfer ihre Brutsysteme wieder verlassen, ist abhängig vom Befallszeitpunkt, vom Entwicklungsstand der Brut, den entsprechenden konsumierten Temperatursummen und den äußeren Bedingungen (Tageslänge, Temperaturschwellenwert für die Dispersion).

Die Parentalkäfer von Brutsystemen der 2. Fangbaumserie verließen ihre angelegten Bruten im Spätsommer in der Regel offenbar nicht mehr. Nur beim Fangbaum Holzgraben/Südseite konnte Ende August 2002 vereinzelt das Ausbohren der Parentalkäfer beobachtet werden. Den frühesten Beginn des Ausbohrens (Fehlens) der Parentalkäfer konnte nach nur 29 Tagen nach Brutbeginn beim Fangbaum Messerer festgestellt werden (Tab. 14). Am häufigsten begannen die Parentalkäfer ihre Bruten zu verlassen, wenn sich die Brut bis zum 3. Larvenstadium entwickelt hatte (Abb. 9). Im Mittel betrug dabei die erreichte effektive Temperatursumme (nichtlineares Modell berechnet nach Stundenwerten) $49,28 \% \pm 11,16 \%$ der für die Gesamtentwicklung notwendigen Temperatursumme (Tab. 15). Das Minimum bei erstmaliger teilweiser Absenz der Parentalkäfer betrug 31,18 %. Ein vollständiges Fehlen der Parentalkäfer konnte im Mittel bei einer relativen Temperatursumme von 71,49 % (Minimum: 38,97%) festgestellt werden.

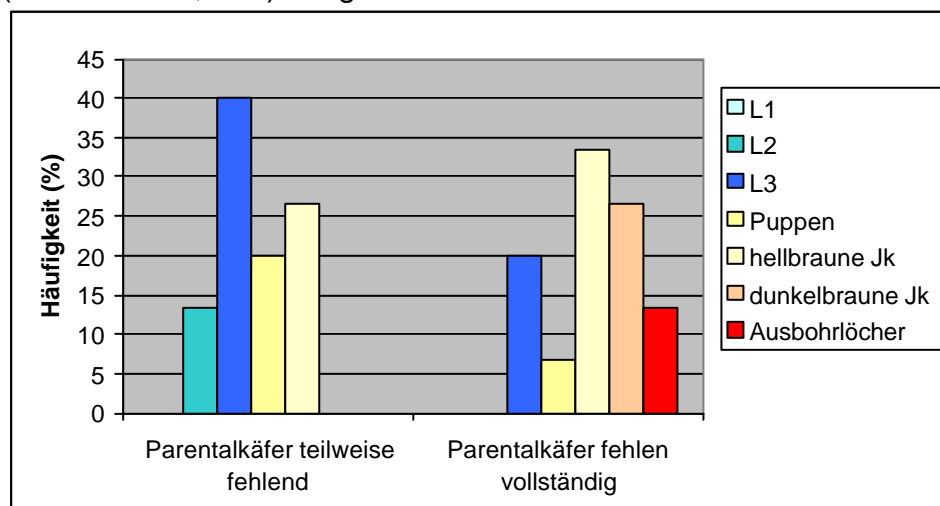


Abb. 9: Häufigkeit des erstmaligen Auftretens eines teilweisen bzw. vollständigen Absenz der Parentalkäfer bei entsprechendem Entwicklungsstand der Brut.

Tab. 14: Beginn und Ende des Verlassens der Bruten durch die Parentalkäfer sowie Zeitdauer (in Tagen) vom 1. Befall bis zum Verlassen der Bruten für Fangbäume der ersten Fangbaumserie.

Fangbaum	Parentalkäfer teilweise fehlend	Parentalkäfer vollständig fehlend	Anzahl Tage zwischen 1. Befall und Parentalkäfer teilweise fehlend	Anzahl Tage zwischen 1. Befall und Parentalkäfer vollständig fehlend
Messerer	31.05.2001	15.06.2001	29	44
Bodinggraben	08.06.2001	15.06.2001	35	42
Zaglbaueralm	03.07.2001	03.07.2001	54	54
Ebenforstalm	03.07.2001	02.08.2001	39	69
Blumaueralm	03.07.2001	31.07.2001	39	67
Krennbauer	11.06.2002	08.07.2002	36	63
Holzgraben Nord	24.06.2002	24.06.2002	47	47
Holzgraben Süd	24.06.2002	24.06.2002	47	47
Mehlboden	24.06.2002	08.07.2002	45	59
Haslersgatter	15.07.2002	14.08.2002	58	88
Weingartalm	24.06.2002	24.06.2002	35	35
Krennbauer	17.06.2003	11.07.2003	40	64
Holzgraben Süd	03.06.2003	02.07.2003	34	63
Haslersgatter	24.07.2003	19.08.2003	50	76
Weingartalm	22.06.2003	11.07.2003	29	48
		Mittelwert	41	58
		Minimum	29	35
		Maximum	58	88

Tab. 15: Mittelwerte, Standardabweichung und Minima der relativen Temperatursumme, berechnet nach dem nichtlinearen Modell, zum Zeitpunkt des erstmaligen, teilweisen bzw. vollständigen Fehlens der Parentalkäfer .

	rel. effektive Temperatursumme (%)		
	Mittelwert	Stabw.	Minimum
Parentalkäfer fehlen teilweise	49,28	11,16	31,18
Parentalkäfer fehlen vollständig	71,49	20,54	38,97

3.1.4 Diapauseverhalten

Der Schlupfbeginn, der Schlupfverlauf und das Diapauseverhalten der Jungkäfer wurden an entnommenen Stammstücken, die in Photoeklektoren im Garten weiter untersucht wurden, für jeden Fangbaum analysiert. Im Untersuchungsjahr 2003 wurden die Brutstämme ab 4.10.2003 im Labor (23°C / Langtagbedingungen) gehalten, um die Anzahl der in der Rinde verbliebenen Jungkäfer zu ermitteln.

Der Anteil nicht diapausierender Jungkäfer ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl jener Jungkäfer, die noch in derselben Vegetationsperiode schlüpfen zur Gesamtanzahl der geschlüpften Jungkäfer. Zudem wurde im Freiland an den belassenen Stammstücken der Fangbäume der 1. Fangbaumserie jeweils am Ende der Vegetationszeit der Anteil diapausierender Jungkäfer anhand der Anzahl von Ausbohrlöchern bzw. der Anzahl von Jungkäfern, die noch in der Rinde vorzufinden waren, semiquantitativ abgeschätzt (Tab. 16).

Tab. 16: Klassifikation des Diapauseverhaltens im Freiland und anhand der Anzahl geschlüpfter Jungkäfer aus Photoeklektoren.

Diapauseverhalten Klassifikation	Abschätzung im Freiland	rel. Anteil nicht diapausierender Jungkäfer
nicht diapausierend	viele Ausbohrlöcher, nur vereinzelt Jungkäfer in Rinde	>75%
teilweise diapausierend	viele Ausbohrlöcher; erhebliche Anzahl von Jungkäfern aber noch in Rinde	51-75%
überwiegend diapausierend	vereinzelt Ausbohrlöcher; viele Jungkäfer noch in Rinde	26-50%
diapausierend	kaum oder keine Ausbohrlöcher; Jungkäfer in Rinde	0-25%

Tab. 17: Diapauseverhalten des Buchdruckers der 1. Generation an den im Freiland entnommenen Brutstämmen der 1. Fangbaumserie und von belassenen Stammstücken im Freiland.

Jahr	Fangbaum	Diapauseverhalten Freiland	Diapauseverhalten Photoelektoren	
			Anteil nicht diapausierender Jungkäfer (%)	
2001	Messerer	teilweise diapausierend	98,13	nicht diapausierend
2001	Bodinggraben	nicht diapausierend	79,38	nicht diapausierend
2001	Zaglbaueralm	nicht diapausierend	98,12	nicht diapausierend
2001	Ebenforstalm	nicht diapausierend	97,30	nicht diapausierend
2001	Blumaueralm	nicht diapausierend	70,16	teilweise diapausierend
2001	Tiefling	diapausierend	0,00	diapausierend
2002	Krennbauer	teilweise diapausierend	34,17	überwiegend diapausierend
2002	Holzgraben Nord	teilweise diapausierend	13,54	diapausierend
2002	Holzgraben Süd	nicht diapausierend	86,41	nicht diapausierend
2002	Mehlboden	überwiegend diapausierend	2,46	diapausierend
2002	Haslersgatter	diapausierend	0,00	diapausierend
2002	Weingartalm	überwiegend diapausierend	0,00	diapausierend
2003	Krennbauer	nicht diapausierend	93,38	nicht diapausierend
2003	Holzgraben Süd	nicht diapausierend	74,52	teilweise diapausierend
2003	Haslersgatter	überwiegend diapausierend	69,95	teilweise diapausierend
2003	Weingartalm	teilweise diapausierend	75,72	nicht diapausierend

Die Analyse des Schlupfverhaltens bei den Brutstämmen (Abb. 10-12) zeigte hinsichtlich der Anzahl diapausierender Jungkäfer der 1. Generation eine sehr hohe Variabilität zwischen den einzelnen Untersuchungsjahren und den Fangbaumstandorten (Abb. 13). Während im Untersuchungsjahr 2002 die überwiegende Anzahl der Jungkäfer, insbesondere bei Fangbäumen aus höheren Lagen (Haslersgatter, Weingartalm) und von eher schattigen Standorten (Krennbauer, Holzgraben Nord) diapausierten, schlüpften im Untersuchungsjahr 2003 selbst beim schattigen Hochlagenstandort Haslersgatter mehr als 2/3 der Jungkäfer noch in derselben Vegetationsperiode (Tab. 17). Im Untersuchungsjahr 2001 diapausierte nur am Standort Tiefling ein hoher Anteil der Jungkäfer. Entscheidend für das Diapauseverhalten ist demnach nicht die Höhenlage der Käferherkunft, sondern vielmehr der Zeitpunkt zu dem die Jungkäfer ihre Entwicklung abschließen. Wie in Abb. 14 ersichtlich ist, treten dann bei Tageslänge von weniger als 15 Stunden überwiegend bzw. vollständig diapausierende Jungkäfer auf. Kann die Entwicklung bis zum Jungkäferstadium bei Tageslängen von mehr als 15 Stunden abgeschlossen werden, schlüpfen die Jungkäfer aus den Stämmen (Abb. 14). Am Schlupfverlauf der Jungkäfer ist deutlich erkennbar, dass das Ausschlüpfen der Jungkäfer ab Mitte August trotz günstiger Witterung zum Teil abrupt endet (besonderes deutlich erkennbar bei Fangbaum Haslersgatter 2003; Abb. 12 bzw. Holzgraben Süd 2002; Abb. 11). Den Witterungsbedingungen in der Zeit nach Vollendung der Entwicklung bzw. im Zeitraum des Jungkäferschlupfs kommt daher

nur eine untergeordnete Rolle zu. Die Wärmesumme nach Vollendung der Entwicklung und damit auch die Anzahl an potentiellen Schwärmtagen (Tage mit Tagesmaxima $> 16,5^{\circ}\text{C}$) beeinflusst das Schlupfverhalten der Käfer quantitativ. Wird aber die Entwicklung der Käfer bei weniger als 15 Stunden Tageslänge abgeschlossen, verbleiben die Jungkäfer, unabhängig von den Witterungsbedingungen, in der Rinde.

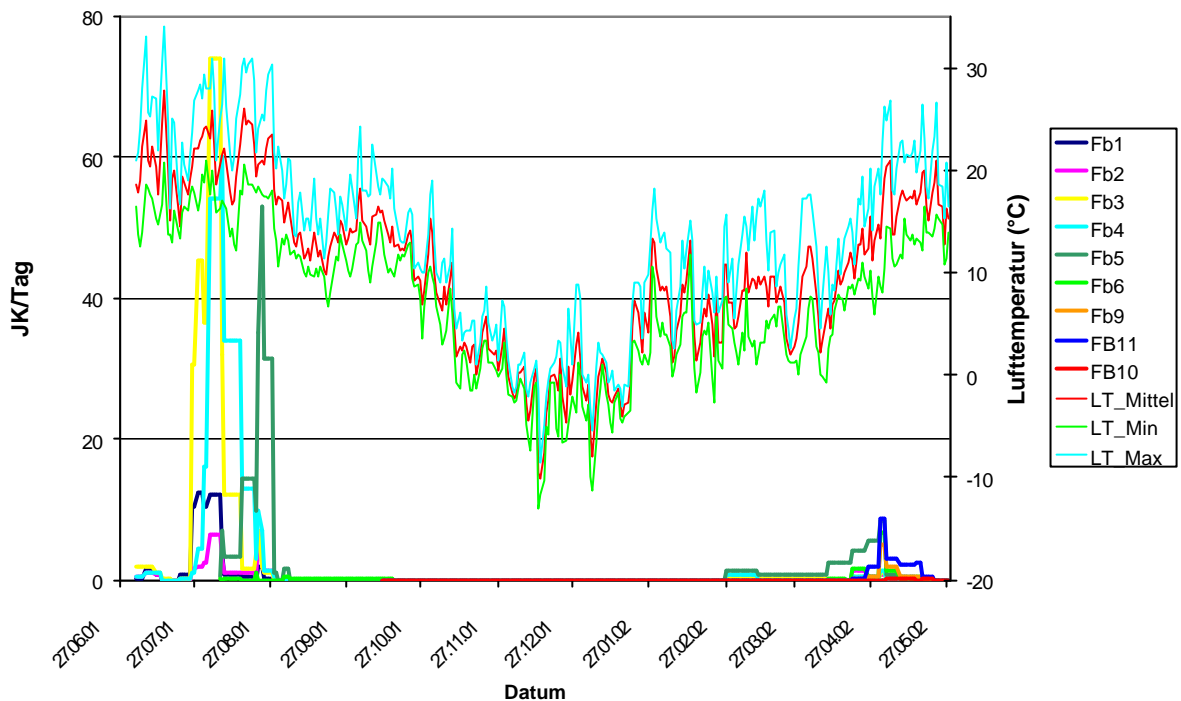


Abb. 10: Schlupfverlauf der Brutstämme aus dem Untersuchungsjahr 2001 (Fangbaumbezeichnung: siehe Tab. 9; LT_Mittel/_Min/_Max: Tagesmittel (-Minimum;-Maximum) der Lufttemperatur; JK/Tag: Anzahl der geschlüpften Jungkäfer/Tag).

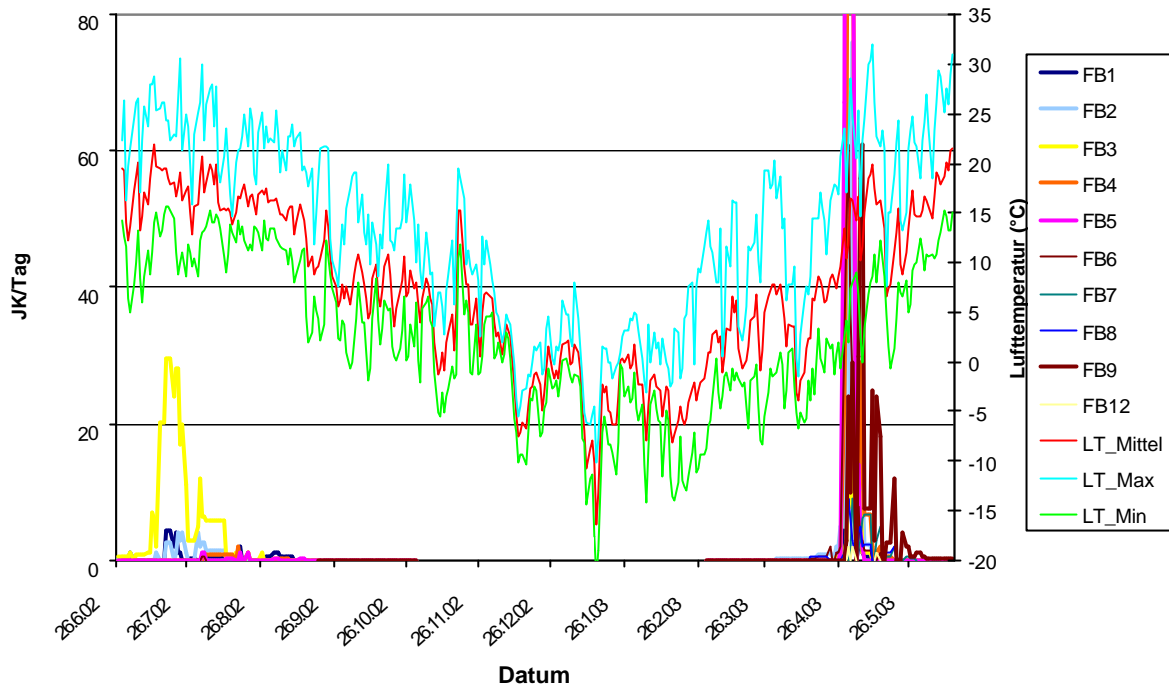


Abb. 11: Schlupfverlauf der Brutstämme aus dem Untersuchungsjahr 2002 (Fangbaumbezeichnung: siehe Tab. 9; LT_Mittel/_Min/_Max: Tagesmittel (-Minimum;-Maximum) der Lufttemperatur; JK/Tag: Anzahl der geschlüpften Jungkäfer/Tag).

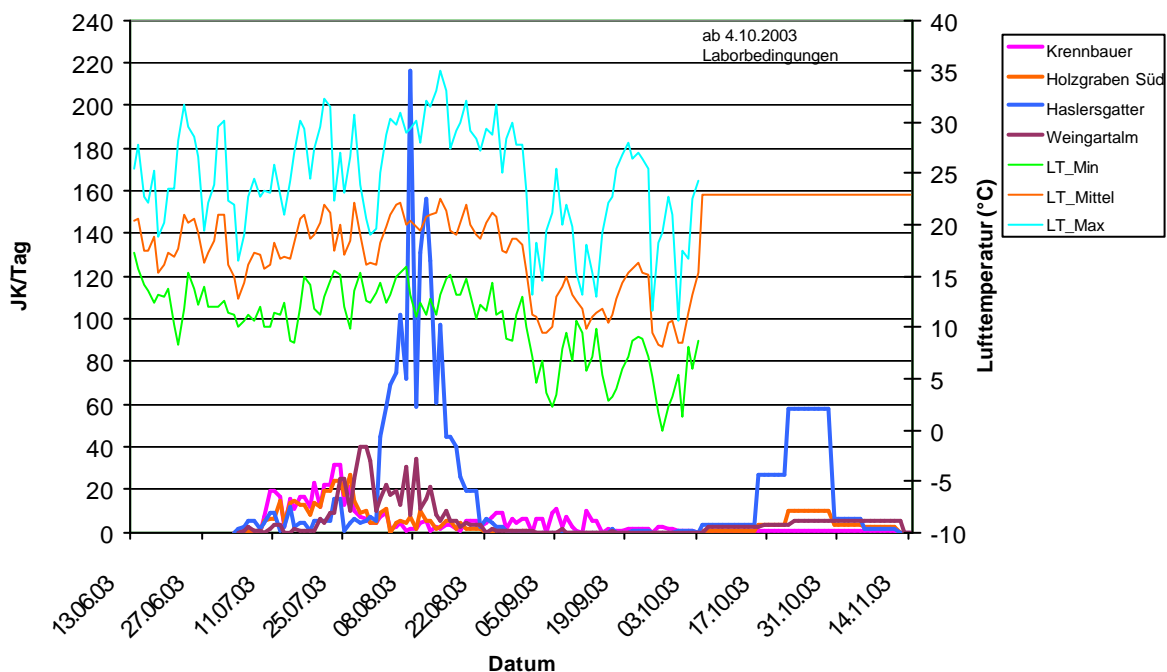
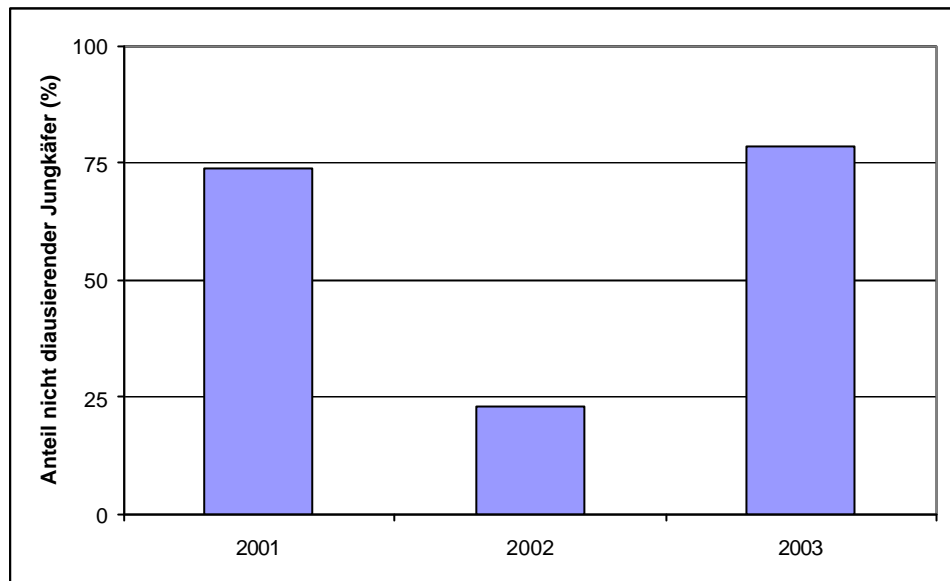
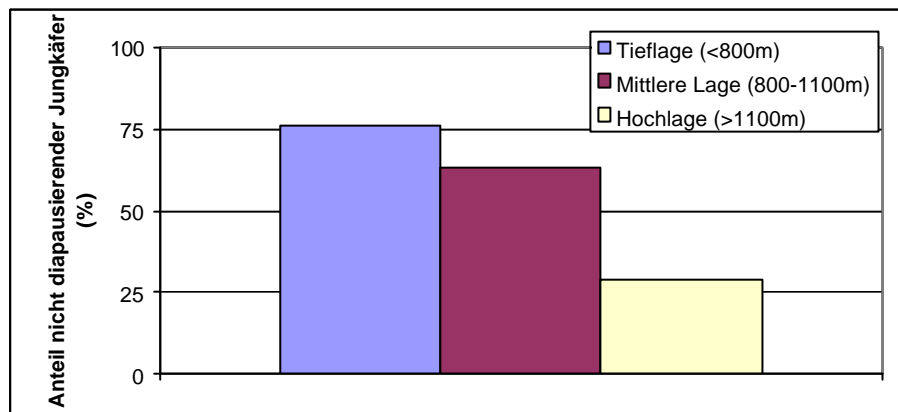


Abb. 12: Schlupfverlauf der Brutstämme aus dem Untersuchungsjahr 2003 (Fangbaumbezeichnung: siehe Tab. 9; LT_Mittel/_Min/_Max: Tagesmittel (-Minimum;-Maximum) der Lufttemperatur; JK/Tag: Anzahl der geschlüpften Jungkäfer/Tag).

A:



B:



C:

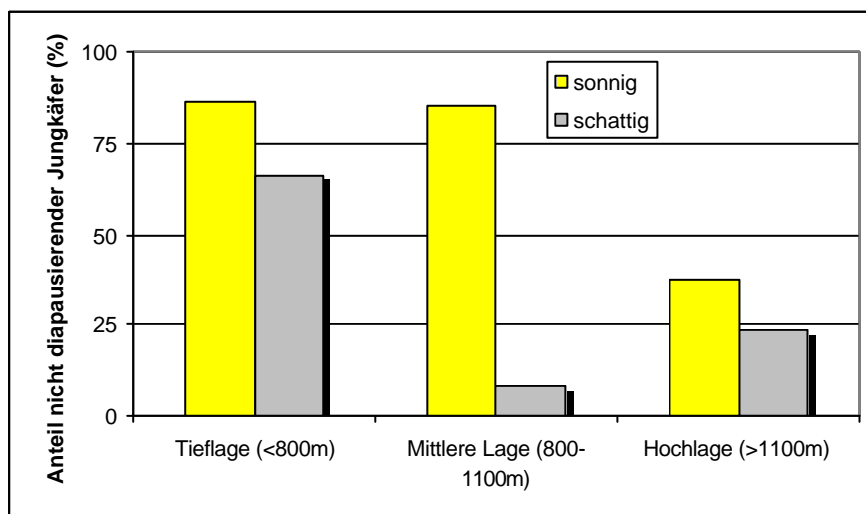


Abb. 13: Relativer Anteil nicht diapausierender Jungkäfer der 1. Generation getrennt nach A: Jahren, B: Höhenlage und C: Exposition.

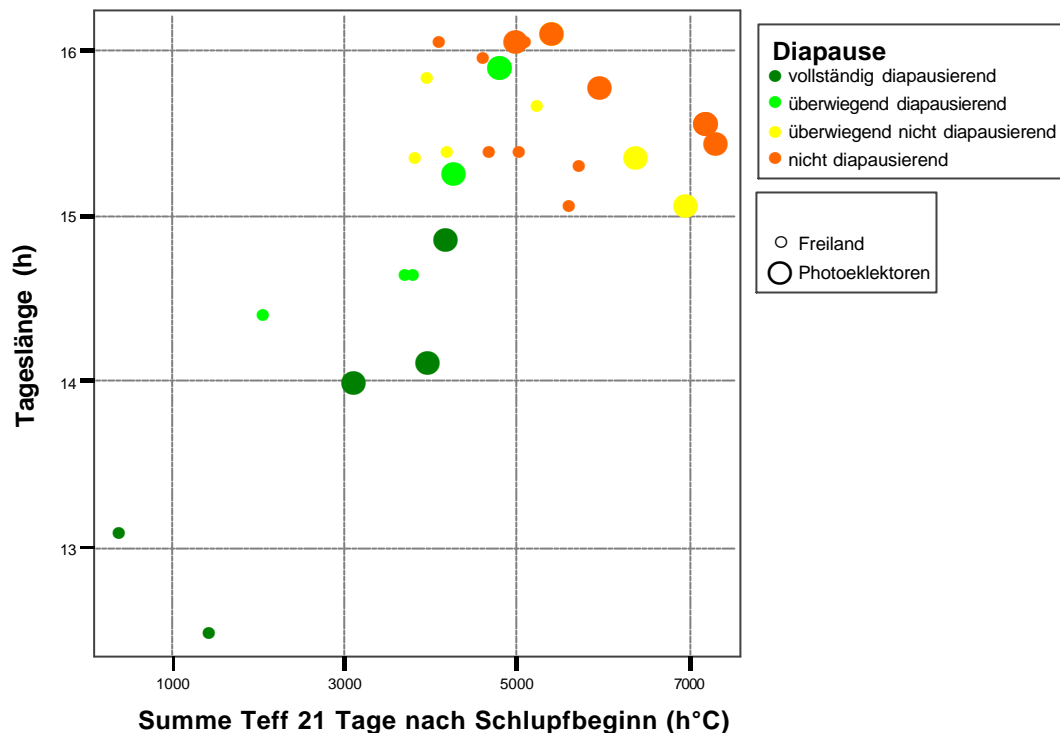


Abb. 14: Zusammenhang zwischen der Tageslänge, der effektiven Rindentemperatursumme 21 Tage nach Vollendung der Jungkäferentwicklung und dem Diapauseverhalten der Jungkäfer bei den Brutstämmen in Photoelektoren und bei belassenen Stammstücken des jeweiligen Fangbaumstandorts im Freiland.

3.2 Topoklimamodell

Ein wesentlicher Baustein zur Abschätzung der standortsbedingten Prädisposition für Borkenkäferbefall und zur Risikozonierung stellt die Kenntnis der für die Entwicklung relevanten Temperaturen beliebiger Punkte im Gelände dar. Im komplexen alpinen Terrain wird das Temperaturfeld der bodennahen Luftschichten wesentlich von Eigenschaften der Topographie, wie Exposition, Hangneigung und absoluter Höhe bestimmt (Scheifinger, 1998). Ein Großteil der Variabilität der Temperatur kann schon allein durch die Höhenabhängigkeit erklärt werden. Ausnahmen ergeben sich dabei jedoch für Witterungssituationen mit geringer Durchmischung der Luftschichten, vor allem bei starker nächtlicher Ausstrahlung, lokalen Zirkulationssystemen und Inversionen in den Wintermonaten. Für den Zeitraum, der für die Entwicklung und Aktivität von Borkenkäfern relevant ist (April bis Oktober), kann aber davon ausgegangen werden, dass eine lineare Abhängigkeit der Temperatur von der Seehöhe die Variabilität der Temperaturen (Tagesmittelwert, -

maxima) im Gelände ausreichend genau definiert. Die Datenbasis für die Interpolation der Temperaturen im Gelände bilden die Temperaturdaten des Stationsnetzes im Nationalpark.

3.2.1 Validierung des Einstrahlungsmodels

Als zusätzlicher Faktor zur Erklärung der räumlichen Variabilität der Lufttemperatur wird die potentielle Sonneneinstrahlung herangezogen. Diese ist aus Daten des digitalen Geländemodells und astronomisch-trigonometrischen Gegebenheiten abgeleitet und wird anhand der gemessenen Sonneneinstrahlung einer regionalen Referenzstation relativiert. Damit werden Faktoren wie Exposition, Hangneigung, Horizontüberhöhung, Abschattung und Bewölkung sowie die temporäre, jahreszeitliche und geographische Veränderung des Sonnenstandes berücksichtigt.

Neben der Abschirmung durch die Topographie muss insbesondere für die Berechnung der Rindentemperaturen die Überschirmung durch die Vegetation berücksichtigt werden. Zur genauen Abschätzung der Überschirmungsverhältnisse beim jeweiligen Fangbaum wurden „hemisphärische Aufnahmen“ angefertigt und mit dem Programm HEMIVIEW ausgewertet. Der so ermittelte „global site factor“ (GSF) gibt den Prozentsatz der gesamten, den Waldboden erreichenden Globalstrahlung für den Standort im jeweiligen Monat an. Der GSF nimmt mit zunehmender Überschirmung exponentiell ab (Abb. 15).

$$GSF = ((US-10)^2)/100$$

GSF: global site factor (% Strahlungsintensität)

US:.....Überschirmung in Zehntel

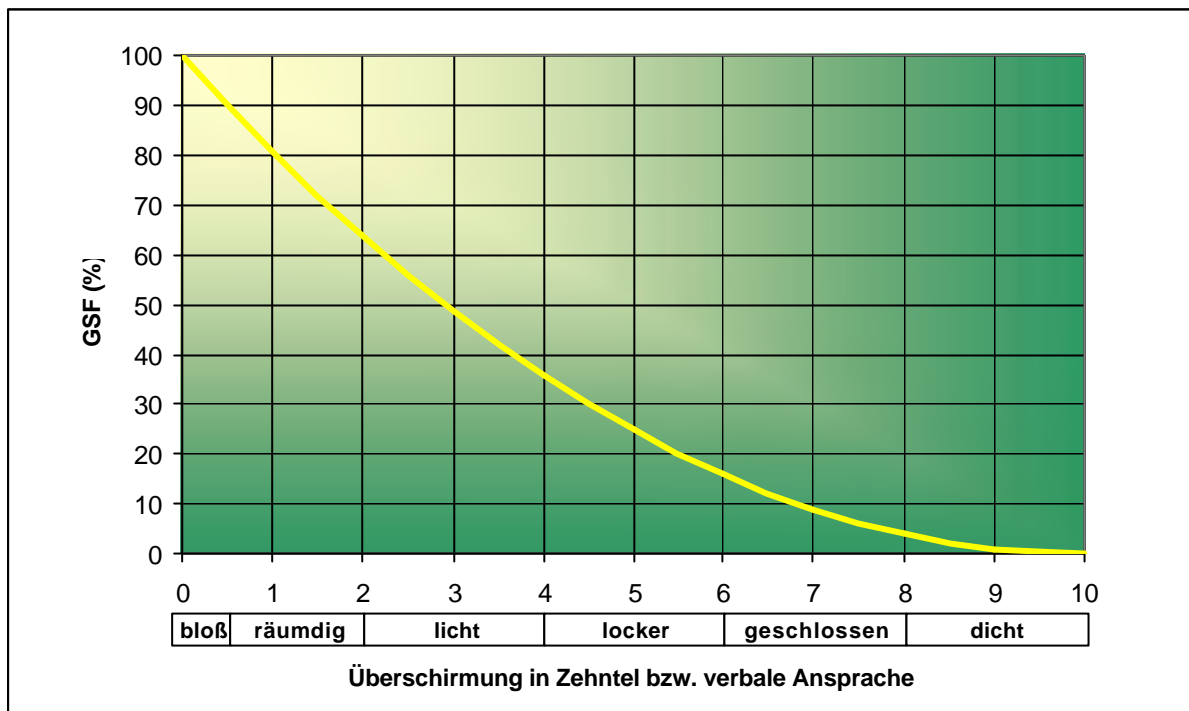


Abb. 15: Zusammenhang zwischen Überschirmung (in Zehntel) und GSF (%) (nach Pennerstorfer, 2000).

Der GSF inkludiert sowohl die Überschirmung durch die Topographie, als auch die zusätzliche bzw. ausschließliche Überschirmung durch die Vegetation:

$$GSF = SF_{topo} + SF_{veg} = ((US_{veg} + US_{topo}) - 10)^2$$

GSF: global site factor (% Strahlungsintensität)

SF_{topo} : Faktor für die topographisch bedingte Abschirmung (%)

SF_{veg} : Faktor für die zusätzliche Abschirmung durch die Vegetation (%)

US_{veg} : Überschirmung durch die Vegetation in Zehntel

US_{topo} : Überschirmung durch topographische Gegebenheiten (in Zehntel)

Für die Berechnung der Rindentemperaturen und zur Verifizierung des Modells zur Berechnung der effektiven Rindentemperatursumme (siehe 3.2.3) wurden die täglichen Einstrahlungsmesswerte der Referenzstation mit dem monatlichen GSF des jeweiligen Fangbaumstandortes reduziert.

$$SI_{red}(x_i)_i = SI(ref)_i * GSF(x_i)_m$$

GSF(x_i)_m : "global site factor" am Fangbaumstandort x_i im Monat m

Mit Hilfe der im Rahmen von Waldinventuren herkömmlichen Ansprache der Überschirmung anhand des Kronenschlussgrades oder Bestockungsgrades können die jahreszeitlich und topographisch sehr variablen Einstrahlungsverhältnisse nur unzureichend beschrieben werden. Die Reduktion der Einstrahlung mittels des herkömmlichen Kronenschlussgrades kann nur bei fehlender oder geringer topographischer Abschirmung (Kuppenlagen, südexponierte Oberhangstandorte) für eine hinreichend genaue Einschätzung der Einstrahlung herangezogen werden. Fallweise sich überlappende Überschirmung durch Vegetation und Topographie führt bei simpler Kombination zu einer gravierenden Unterschätzung der Einstrahlung in gebirgigen Lagen insbesondere bei nördlich exponierten Standorten.

Jahreszeitlich sich verändernde Überschirmungsverhältnisse durch die Vegetation finden bei Verwendung des Kronenschlussgrades als Maßzahl für die Überschirmung keine Berücksichtigung (Abb. 16). Zur Minimierung dieser Fehleinschätzungen kann bei der Berechnung der Einstrahlungsverhältnisse im Bestand (SIred) die relativen Sonneneinstrahlungswerte entsprechend den jeweils maximalen Überschirmungsverhältnissen durch die Vegetation (Kronenschlussgrad) oder durch die topographische Abschirmung (SFtopo) reduziert werden:

$$\text{SI Model: } \text{SIred}(x_i)_i = \text{Maximum aus: } \text{SI}(\text{ref})_i * ((\text{USks}(x_i) - 10)^2/100) \\ \text{oder } \text{SI}(\text{ref})_i * (\text{SFtopo}(x_i)_m/100)$$

SIred(x_i): durch Überschirmung reduzierte Sonneneinstrahlung am Standort x_i für Tag i

USks(x_i): Überschirmung durch die Vegetation (Kronenschlussgrad) am Standort x_i (in Zehntel)

SFtopo (x_i)_m : Faktor für topographische Abschirmung (%) am Standort x_i im Monat m

Damit entspricht die modellierte Einstrahlung (SI_Model) in den Monaten Mai bis Juli der mittels GSF berechneten Einstrahlung (SI Hemiview) (Abb. 17), in den übrigen Monaten wird die Einstrahlung eher überschätzt. Beispielsweise zeigte sich für den nordostexponierten Standort Krennbauer, Fangbaum Nr. 1, 2002, dass durch die Kombination von Überschirmung durch den Bestand und topographischer Abschirmung (SI Model2) in den Monaten Mai bis Juli die Einstrahlungsverhältnisse im Vergleich zur berechneten Einstrahlung mittels GSF (Abb. 16-17) deutlich unterschätzt wird.

$$\text{SI Model2: } \text{SIred}(x_i)_i = ((\text{SIpot}(x_i)_m / \text{SIpot}(\text{ref})_m) * \text{SI}(\text{ref})_i) * ((\text{USks}(x_i) - 10)^2/100) \\ = \text{SI}(\text{ref})_i * (\text{SFtopo}(x_i)_m/100) * ((\text{USks}(x_i) - 10)^2/100)$$

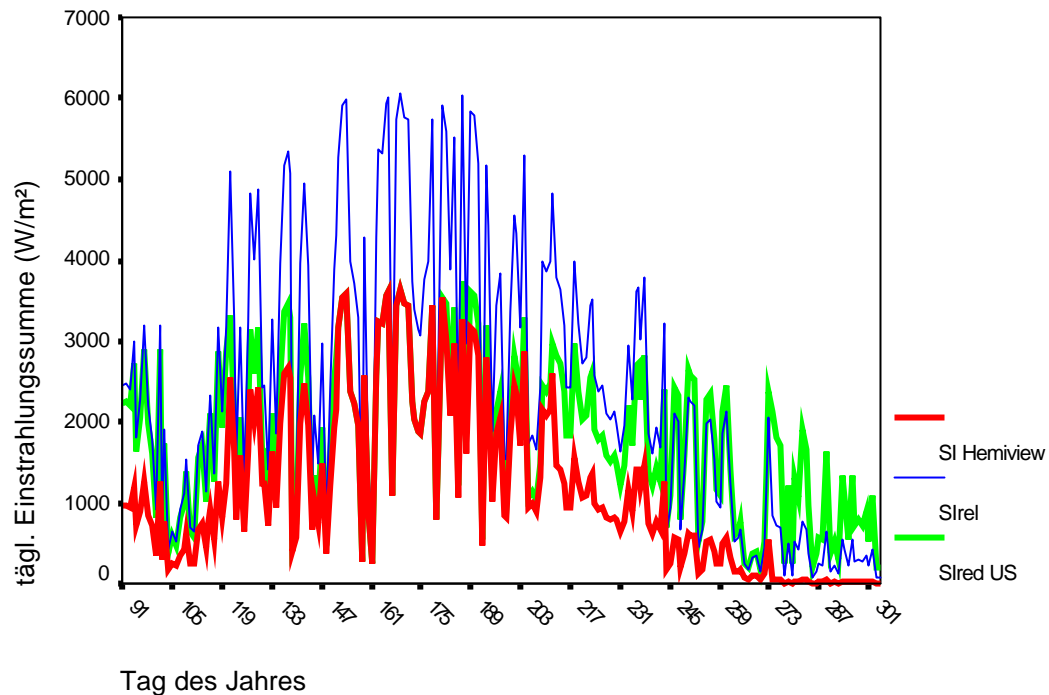


Abb. 16: Modellierte Einstrahlung für den Zeitraum vom 1. April bis 31. Oktober 2002 am Standort Krennbauer (Fangbaum 1) (SI Hemiview: mittels GSF reduzierte Einstrahlung; SIrel: reduzierte Einstrahlung durch Topographie; SIred US: mittels Kronenschlussgrad reduzierte Einstrahlung).

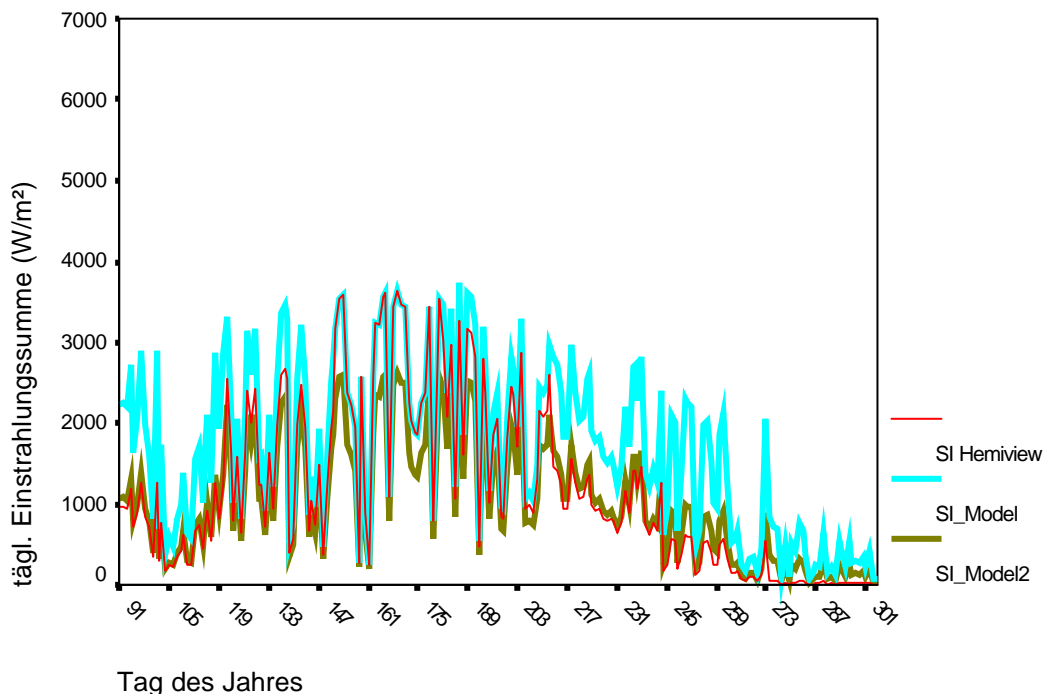


Abb. 17: Modellierte Einstrahlung für den Zeitraum vom 1. April bis 31. Oktober 2002 am Standort Krennbauer (Fangbaum 1) (SI Hemiview: mittels GSF reduzierte Einstrahlung; SI_Model: reduzierte Einstrahlung aus maximaler Überschirmung durch Topographie oder Kronenschlußgrad; SI_Model2: mittels Topographie und Kronenschlussgrad reduzierte Einstrahlung).

Für die Verifizierung des Einstrahlungsmodells wurde im Untersuchungsjahr 2003 am Standort Weingartalm (Seehöhe: 1200, südexponierter Mittelhang, lichter Fichtenaltholzbestand) die Einstrahlung im Zeitraum vom 3.7. - 30.9.2003 gemessen und mit den modellierten Einstrahlungswerten verglichen. Dieser Standort zeichnet sich durch eine geringe topographische Abschirmung und eine jahreszeitlich sehr variable Überschirmung durch die Vegetation (Zunahme des GSF in den Monaten mit niedrigem Sonnenstand durch Untersonnung) aus (Abb. 18). Die mittels GSF reduzierte Sonneneinstrahlung (Slred Hemiview) zeigt im Vergleich zu den tatsächlich bei diesem Standort gemessenen Einstrahlungswerten eine relativ gute Übereinstimmung (Abb. 19). Größere Abweichungen treten offensichtlich nur dann auf, wenn die lokalen Bewölkungsverhältnisse von der Bewölkungssituation bei der Referenzstation stark abweichen. Die Reduktion der Sonneneinstrahlung mittels geschätzter Überschirmung durch den Bestand allein (Slred US) führt insbesondere bei niedrigerem Sonnenstand zu einer deutliche Unterschätzung der Einstrahlung an diesem Standort (Abb. 19).

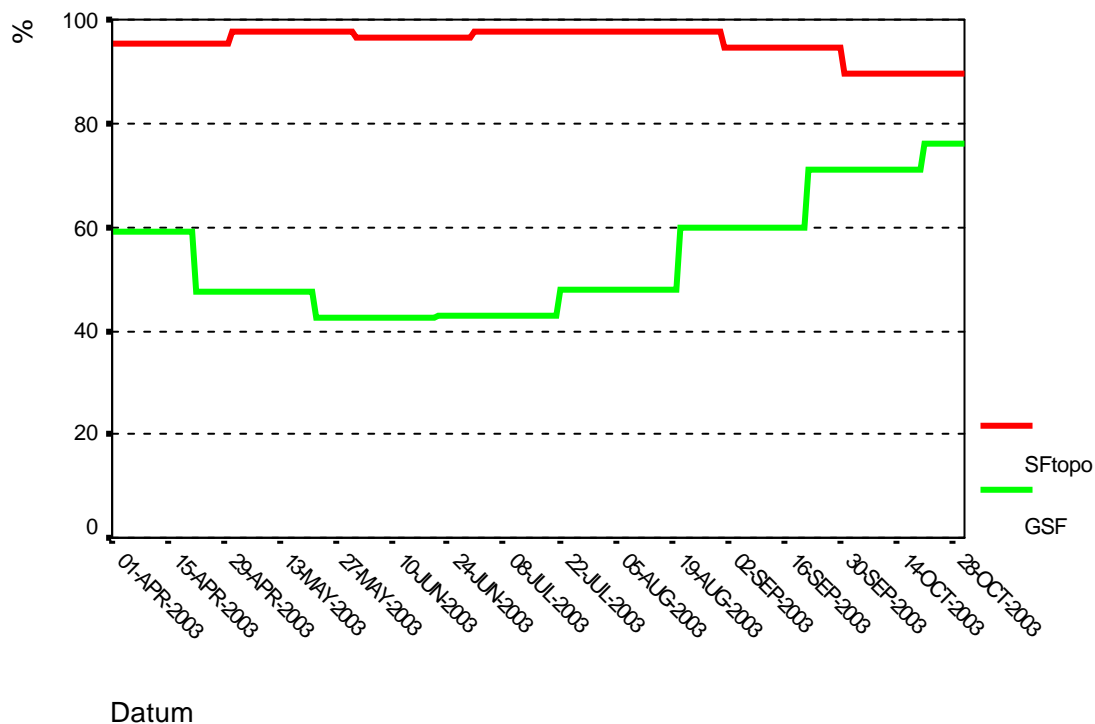


Abb. 18: Veränderung des „global site factors“ (GSF) und der Abschirmung durch die Topographie (SFtopo) am Standort Weingartalm von April bis Oktober.

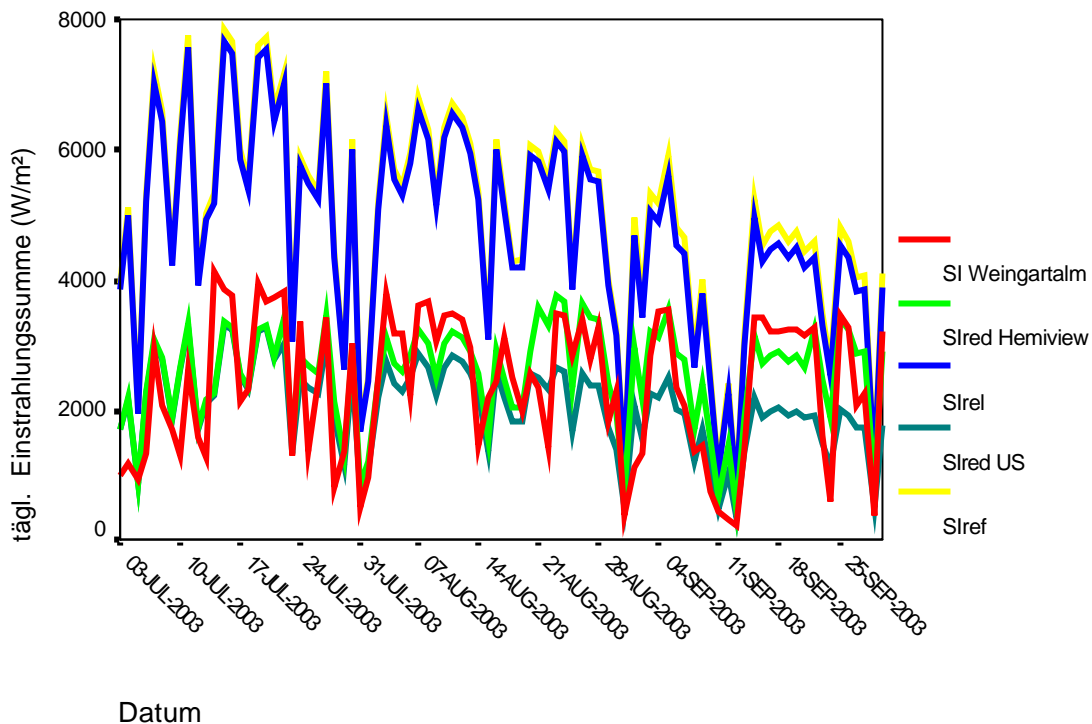


Abb: 19: Gemessene und modellierte tägliche Einstrahlung am Standort Weingartalm (SI Weingartalm: gemessene Einstrahlung; Slred Hemiview: mittels monatlichem GSF reduzierte Einstrahlung; Slred: durch topographische Gegebenheiten reduzierte Einstrahlung; Slred US: mittels Kronenschlussgrad reduzierte Einstrahlung; Slref: gemessene Einstrahlung bei der Referenzstation).

Zur Verifizierung des Modells zur Berechnung der effektiven Rindentemperatursumme (siehe 3.2.3) wurden daher die täglichen Einstrahlungsmesswerte der Referenzstation mit dem monatlichen GSF-Wertes des jeweiligen Fangbaumstandortes reduziert.

$$Slred(x)_i = SI(ref)_i * GSF(x)_m$$

$GSF(x)_m$: "global site factor" am Fangbaumstandort x_i im Monat m

Für die weitere Modellierung der Kambialtemperaturen wurde nur die Überschirmung durch die Topographie berücksichtigt, da für die Risikobewertung an sich die ungünstigste Einstrahlungssituation (maximale Einstrahlung auf der Freifläche bzw. im oberen Kronenbereich bei stehenden Bäumen) von Belang ist.

3.2.2 Modellierung der Lufttemperatur

Zur Interpolation der für die Modellierung der Borkenkäferphänologie relevanten Lufttemperaturparameter (Tagesmittelwert: Berechnung der minimalen Entwicklungsmöglichkeit; Tagesmaximum: Indikator für Schwärmbeginn und Dispersion) wurden durch tägliche Regressionsanalysen für den Zeitraum April bis Oktober Koeffizienten für die Abhängigkeit der Temperatur von Seehöhe und Einstrahlung ermittelt. Die so berechneten Temperaturwerte zeigen mit den tatsächlich gemessenen Temperaturen der Stationen sehr enge Beziehungen (Tab. 18, Abb. 20-22).

Tab. 18: Regressionskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen gemessenen und geschätzten Lufttemperaturparametern, getrennt nach Stationen und Jahren.

Station	Kennung	Regressionskoeffizient R ²					
		Tagesmittel 2003	Tagesmittel 2002	Tagesmittel 2001	Tagesmaximum 2003	Tagesmaximum 2002	Tagesmaximum 2001
Brauneben	BE	0,993	0,985	0,978	0,986	0,978	0,978
Ebenforstalm	EA	0,990	0,979	0,988	0,991	0,978	0,987
Feichtaualm	FA	0,995	0,997	0,998	0,994	0,995	0,998
Hengstpass	HP	0,992	0,987	0,989	0,993	0,988	0,988
Kogleralm	KO	0,993	0,980	0,976	0,988	0,977	0,980
Mitterweng	MW	0,995	0,995	0,991	0,994	0,994	0,990
Rettenbach	RB	0,975	0,969	0,972	0,987	0,982	0,982
Rotwagmauer	RW	0,995	0,990	0,992	0,993	0,985	0,990
Saubachgut	SA	0,997	0,996	0,996	0,996	0,992	0,992
Schoberstein	SH		0,995	0,996		0,988	0,988
Wurbauer	WU	0,995	0,994	0,990	0,997	0,995	0,991
Zaglbaueralm	ZA	0,995	0,994	0,996	0,993	0,991	0,989

Die Güte des Schätzverfahrens zur Interpolation der Temperatur wurde anhand der Lufttemperaturmessungen bei den Fangbäumen geprüft, die nicht in den Regressionsmodellen verwendet wurden. Als Leistungsparameter für die Modellvalidierung ist neben dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE= root mean square error), der relative mittlere Fehler (RPME = relative percentage mean error) und damit die relative Abweichung der geschätzten Temperatursumme für einen gegebenen Zeitraum in Hinblick auf die Entwicklungsmodellierung von besonderer Bedeutung.

Einzelne Fangbaumstandorte werden zwar durch das angewandte Schätzverfahren deutlich unterschätzt (Tagesmittel für 1. Fangbaum 2002, Krennbauer bzw. Krennbauer 2003); die geschätzten Tagesmaxima der Standorte Tiefeling und Messerer werden überschätzt, beim Standort Weingartalm 2002 unterschätzt (Tab. 19). Insgesamt jedoch zeigte sich für die geschätzten Tagesmittelwerte ein mittlerer

quadratischer Fehler von $\pm 1,26$ °C; für das Tagesmaximum beträgt der RMSE im Mittel $\pm 2,06$ °C. Die aus den geschätzten Temperaturwerten berechneten Temperatursummen ergaben im Gesamtdurchschnitt eine gute Reproduzierung der tatsächlich beobachteten Temperatursummen (Tagesmittel: 99,23%; Tagesmaximum: 99,13%).

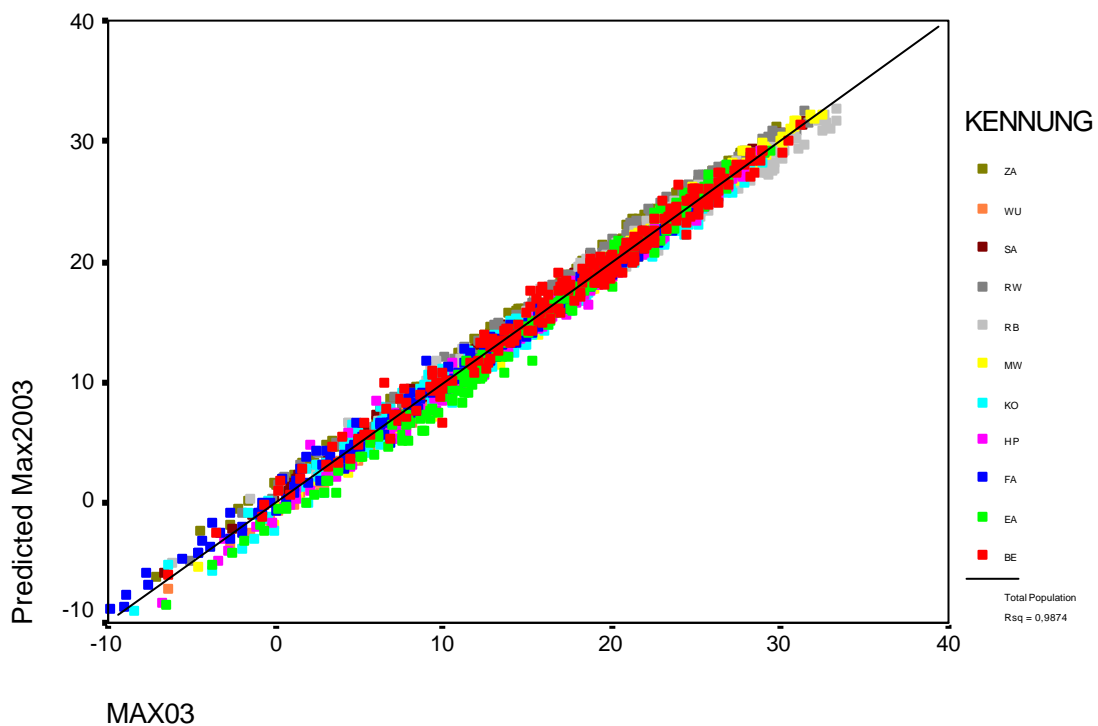
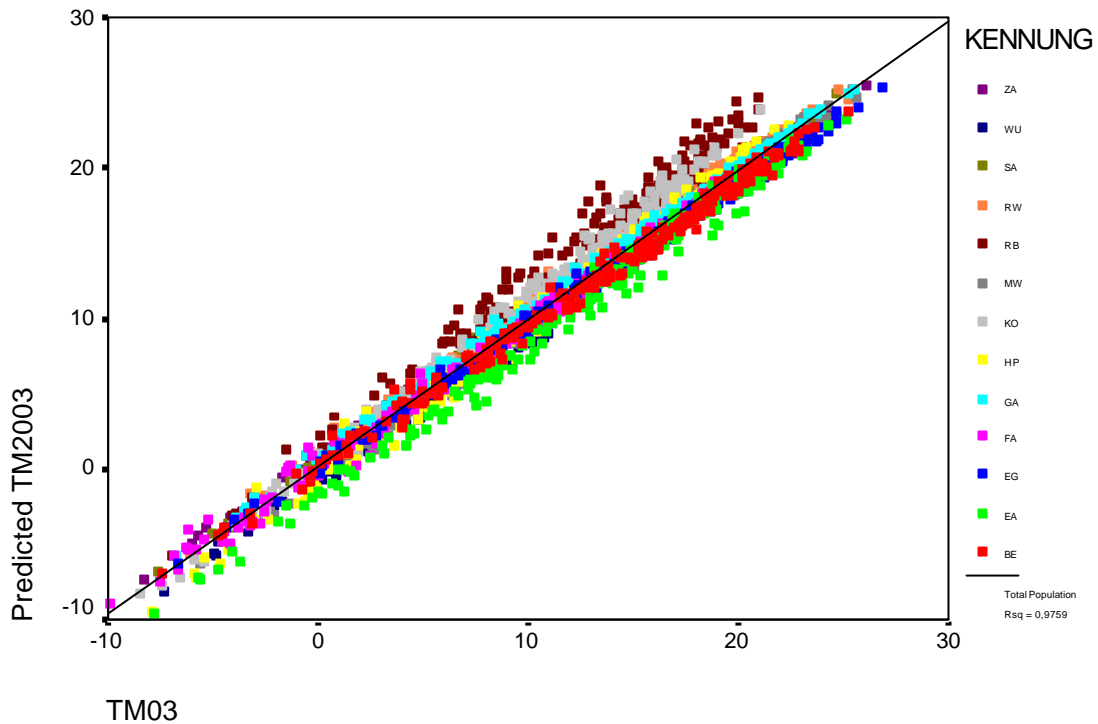


Abb. 20: Zusammenhang zwischen geschätztem und tatsächlich gemessenem Lufttemperaturtagesmittel bzw. -maxima der Stationen im Nationalpark Kalkalpen für den Zeitraum April bis Oktober 2003 (TM03; MAX03: gemessene Tagesmittelwerte bzw. -maxima der Stationen; Predicted TM2003; Predicted Max2003: geschätzte Tagesmittelwerte bzw. -maxima 2003; Kennung: Stationskennung (siehe Tab. 18)).

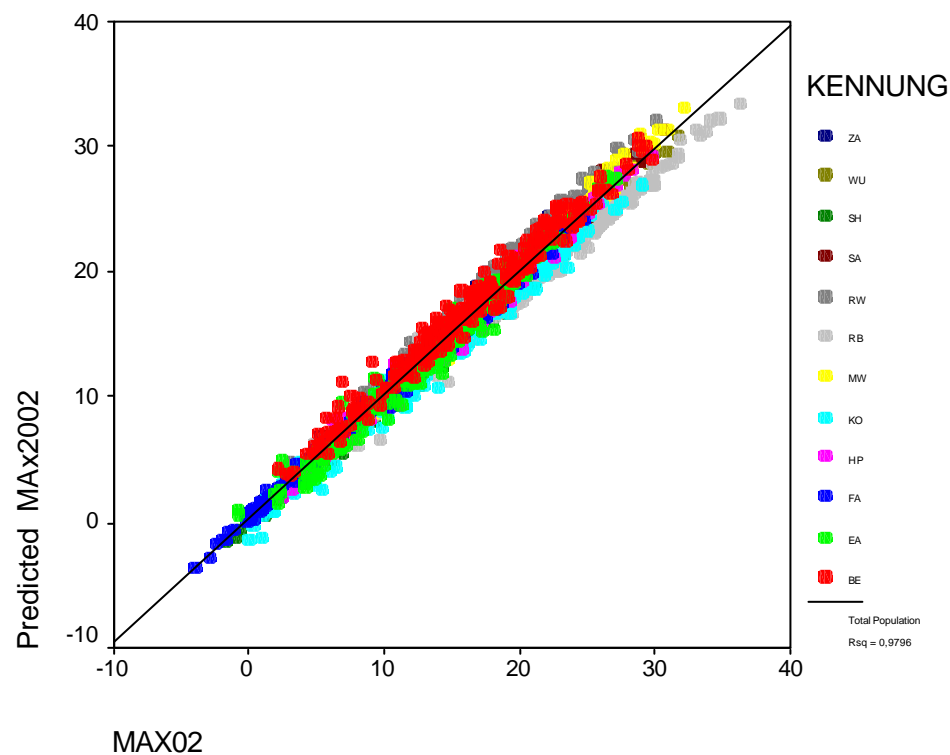
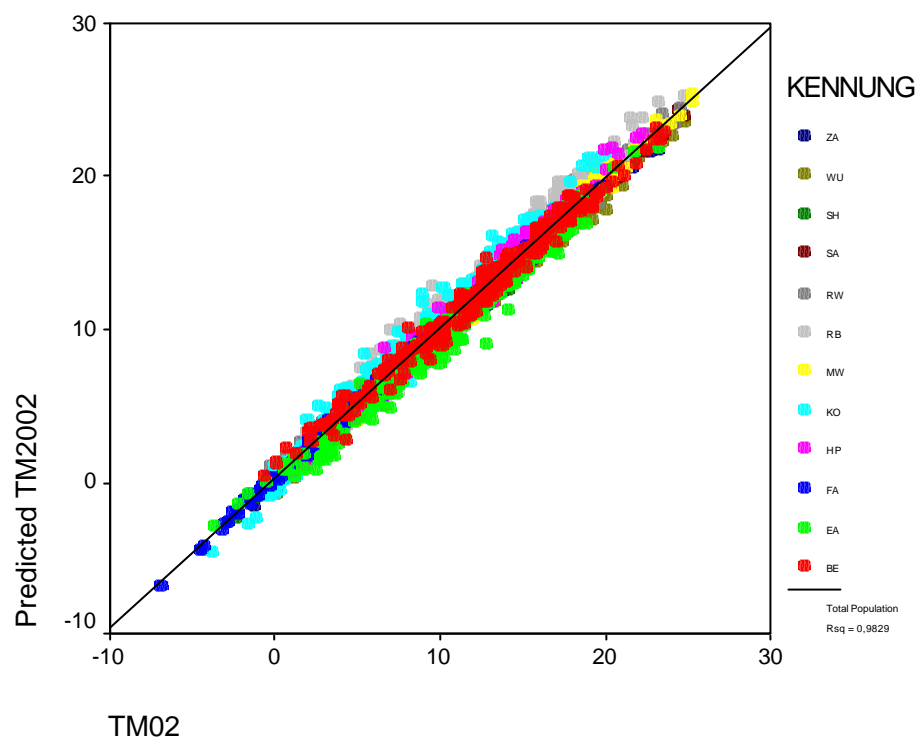


Abb. 21: Zusammenhang zwischen geschätztem und tatsächlich gemessenem Lufttemperaturtagesmittel bzw. -maxima der Stationen im Nationalpark Kalkalpen für den Zeitraum April bis Oktober 2002 (TM02; MAX02: gemessene Tagesmittelwerte bzw. -maxima der Stationen; Predicted TM2002; Predicted Max2002: geschätzte Tagesmittelwerte bzw. -maxima 2002; Kennung: Stationskennung (siehe Tab. 18)).

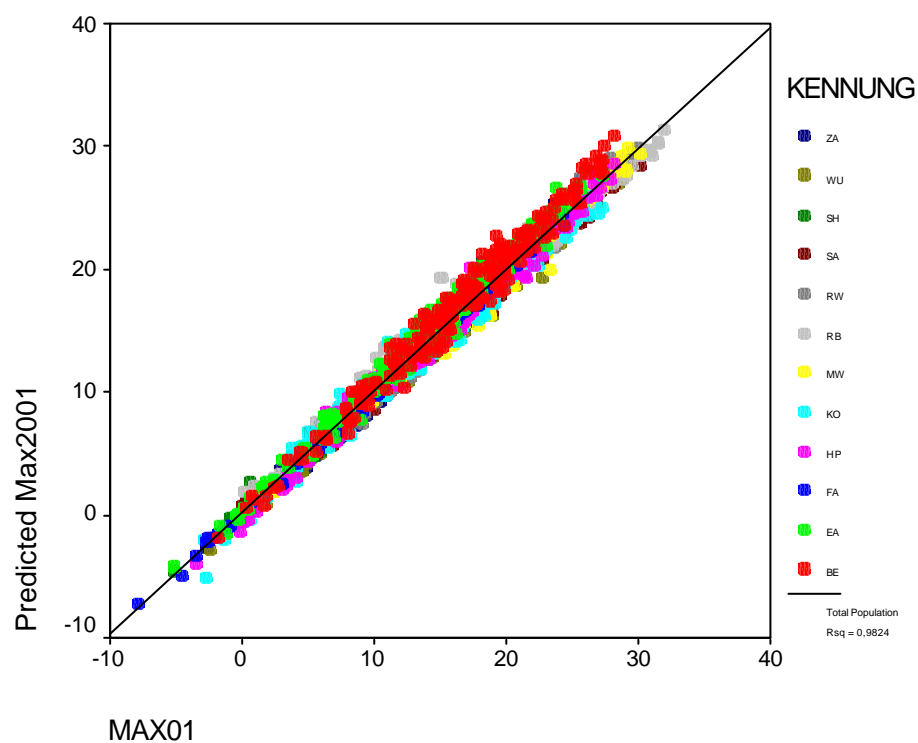
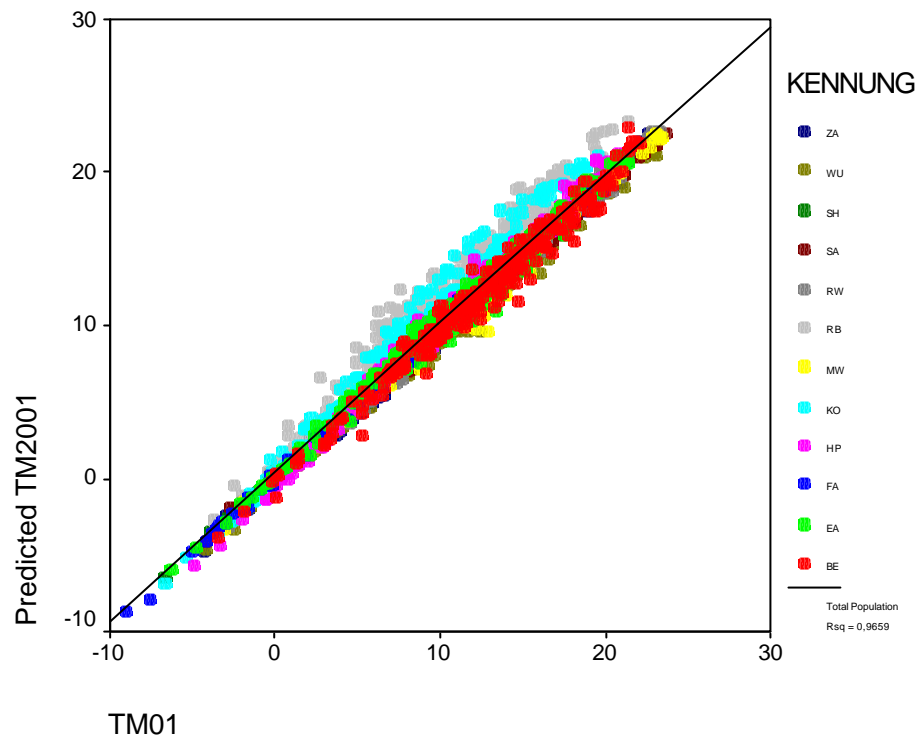


Abb. 22 : Zusammenhang zwischen geschätztem und tatsächlich gemessenem Lufttemperaturtagesmittel bzw. -maxima der Stationen im Nationalpark Kalkalpen für den Zeitraum April bis Oktober 2001 (TM01; MAX01: gemessene Tagesmittelwerte bzw. -maxima der Stationen; Predicted TM2001; Predicted Max2001: geschätzte Tagesmittelwerte bzw. -maxima 2001; Kennung: Stationskennung (siehe Tab. 18)).

Tab. 19: Validierung des Modells zur Interpolation von Lufttemperaturparametern anhand der Fangbaumstandorte (RMSE: root mean square error; RPME: relative percent mean error; TSpred/TSreal: Verhältnis der geschätzten Temperatursumme zur gemessenen Temperatursumme; Gesamtmittel: Mittelwert von TSpred/TSreal je Untersuchungsjahr; Grand Mean: Gesamtmittel für RMSE und TSpred/TSreal für alle Fangbaumstandorte).

Fangbäume 2003									Gesamtmittel
	KR03	HO03	HAS03	WIE03					
Tagesmittel 2003									
RMSE (°C)	3,14	1,40	0,98	1,25					
RPME (%)	-17,90	7,52	5,85	7,95					
Tspred/Tsreal (%)	82,10	107,52	105,85	107,95					100,86
Tagesmaximum 2003									
RMSE (°C)	4,70	1,54	0,94	1,21					
RPME (%)	-18,05	-3,24	2,29	3,40					
Tspred/Tsreal (%)	81,95	96,76	102,29	103,40					96,10
Fangbäume 2002									
	KR1	KR2	HO1	HO2	HO3	MEH	HAS	WEI	
Tagesmittel 2002									
RMSE (°C)	3,53	1,33	0,57	1,53	1,17	0,77	0,72	0,67	
RPME (%)	-21,21	2,48	0,61	-9,94	-8,02	3,77	3,03	1,23	
TSpred/TSreal (%)	78,79	102,48	100,61	90,06	91,98	103,77	103,03	101,23	96,49
Tagesmaximum 2002									
RMSE (°C)	3,29	2,42	1,13	1,74	1,51	1,37	0,83	2,98	
RPME (%)	-8,99	5,58	-1,66	-5,50	-0,72	1,78	1,36	-12,62	
TSpred/TSreal (%)	91,01	105,58	98,34	94,50	99,28	101,78	101,36	87,38	97,40
Fangbäume 2001									
	MES	BOD	ZAG	EBF	BL1	BL2	TIE		
Tagesmittel 2001									
RMSE (°C)	1,96	1,45	0,58	0,79	0,53	0,59	1,00		
RPME (%)	1,09	8,53	-2,71	2,17	-1,56	-0,94	3,39		
TSpred/TSreal (%)	101,09	108,53	97,29	102,17	98,44	99,06	103,39	101,43	
Tagesmaximum 2001									
RMSE (°C)	4,24	2,21	1,39	2,27	1,46	1,31	2,52		
RPME (%)	12,85	5,47	-4,25	-7,89	-4,54	5,15	13,10		
TSpred/TSreal (%)	112,85	105,47	95,75	92,11	95,46	105,15	113,10	102,84	
									Grand Mean
RMSE (°C) Tagesmittel							1,26		
RMSE (°C) Tagesmaximum							2,06		
TSpred/TSreal (%) Tagesmittel							99,23		
TSpred/TSreal (%) Tagesmaximum							99,13		

KR03: Krennbauer 2003	HAS: Haslersgatter 2002
HO03: Holzgraben Süd 2003	WEI: Weingartalm 2002
HAS03: Haslersgatter 2003	MES: Messerer
WEI03: Weingartalm 2003	BOD: Bodinggraben
KR1: Krennbauer (1. Fangbaum 2002)	ZAG: Zaglbaueralm
KR2: Krennbauer (2. Fangbaum 2002)	EBF: Ebenforstalm
HO1: Holzgraben Südseite 2002	BL1: Blumaueralm(1. Fangbaum)
HO2: Holzgraben Nordseite (1. Fangbaum 2002)	BL2: Blumaueralm (2. Fangbaum)
HO3: Holzgraben Nordseite (2. Fangbaum 2002)	TIE: Tiefling
MEH: Mehlboden 2002	

3.2.3 Modellierung der Rindentemperatur

Da für Berechnung der effektiven täglichen Rindentemperatursumme nach dem nichtlinearen Gesamtentwicklungsmodells für beliebige Geländepunkte keine Stundenwerte zur Verfügung stehen, wurde die effektive tägliche Rindentemperatursumme anhand der Zusammenhänge zwischen dem Lufttemperaturtagesmittel (-maxima) und dem Tagesmittel (-maxima) der Rindentemperatur in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung berechnet.

Das Tagesmittel der Rindentemperatur kann somit anhand des Tagesmittels der Lufttemperatur und der mittels „global site factor“ reduzierten Sonneneinstrahlung durch folgende Regressionsgleichung berechnet werden:

$$SI_{red}(x_i)_i = SI(ref)_i * GSF(x_i)_m$$

$$RT_Mittel(x_i)_i = -0,173 + 0,0008518 * SI_{red}(x_i)_i + 1,054 * LT(x_i)_i \quad (R^2 = 0,961)$$

$RT_Mittel(x_i)_i$: Schätzwert des Rindentemperaturtagesmittelwerts am Ort x_i für Tag i

$SI_{red}(x_i)_i$: mittels Überschildung reduzierte, relative Sonneneinstrahlung am Ort x_i für Tag i

$LT(x_i)_i$: Tagesmittel der Lufttemperatur am Ort x_i für Tag i

$GSF(x_i)_m$: „global site factor“ am Ort x_i im Monat m

$SI(ref)_i$: gemessene Sonneneinstrahlung bei Referenzstation für Tag i

Das Rindentemperaturmaximum ergibt sich aus:

$$RT_Max(x_i)_i = 1,656 + 0,002955 * SI_{red}(x_i)_i + 0,534 * LT_max(x_i)_i + 0,01884 * (LT_max(x_i)_i)^2 \\ (R^2 = 0,851)$$

$RT_Max(x_i)_i$: Schätzwert des Rindentemperaturtagesmaximums am Ort x_i für Tag i

$SI_{red}(x_i)_i$: mittels Überschildung reduzierte, relative Sonneneinstrahlung am Ort x_i für Tag i

$LT_max(x_i)_i$: Tagesmaximum der Lufttemperatur am Ort x_i für Tag i

Für Rindentemperaturmaxima unterhalb von $T_{opt} \leq 30,4^\circ\text{C}$ ergibt sich die effektive tägliche Rindentemperatursumme (in Stundengraden) mit:

$$RTsum_eff(x_i)_i = (RT_Mittel(x_i)_i - 8,3) * 24$$

Da bei Rindentemperaturen oberhalb des Temperaturoptimums ($T_{opt} = 30,4^\circ\text{C}$) die effektive Rindentemperatur abnimmt, muss bei der Schätzung der Rindentemperatursumme anhand des Rindentemperaturmittelwerts für

Rindentemperaturmaxima $>30,4^{\circ}\text{C}$ ein Wert abgezogen werden, der sich aus der Differenz der linear modellierten und der nichtlinear modellierten Rindentemperatursumme ergibt, und mittels Rindentemperaturmaximum geschätzt wird (Abb. 23):

$$\text{Diff_RTsum}(x_i)_i = -310,667 + 9,603 \cdot \text{RT_Max}(x_i)_i \quad (R^2=0,844)$$

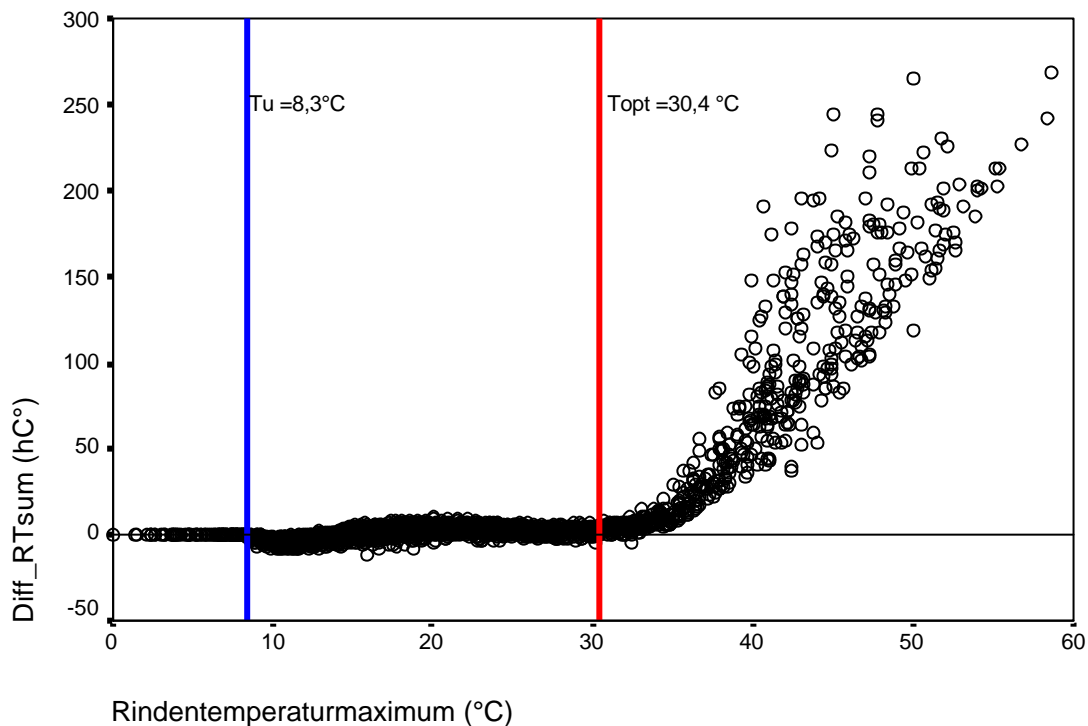


Abb. 23: Abhängigkeit der Differenz zwischen linear und nichtlinear berechneter Rindentemperatursumme (Diff_RTsum) von den gemessenen Rindentemperaturmaxima.

Für $\text{RT_Max}(x_i)_i > T_{opt} = 30,4^{\circ}\text{C}$ und $\text{Diff_RTsum}(x_i)_i > 0$ gilt:

$$\text{RTsum_eff}(x_i)_i = \text{RTsum}(x_i)_i - \text{Diff_RTsum}(x_i)_i$$

$$\text{RTsum_eff}(x_i)_i = 0 \quad \text{wenn } \text{RTsum_eff}(x_i)_i < 0$$

$\text{Diff_RTsum}(x_i)_i$: Differenz zwischen linear und nichtlinear berechneter effektiver Rindentemperatursumme am Ort x_i für Tag i

$\text{RTsum_eff}(x_i)_i$: Schätzwert der effektiven Rindentemperatursumme am Ort x_i für Tag i

Mit diesem Model kann die effektive tägliche Rindentemperatursumme mit $R^2=0,9104$ und einem mittleren absoluten Fehler von $\pm 21,59 \text{ h}^\circ\text{C}$ (Minimum: $0 \text{ h}^\circ\text{C}$; Maximum: $115,34 \text{ h}^\circ\text{C}$) geschätzt werden (Abb. 24).

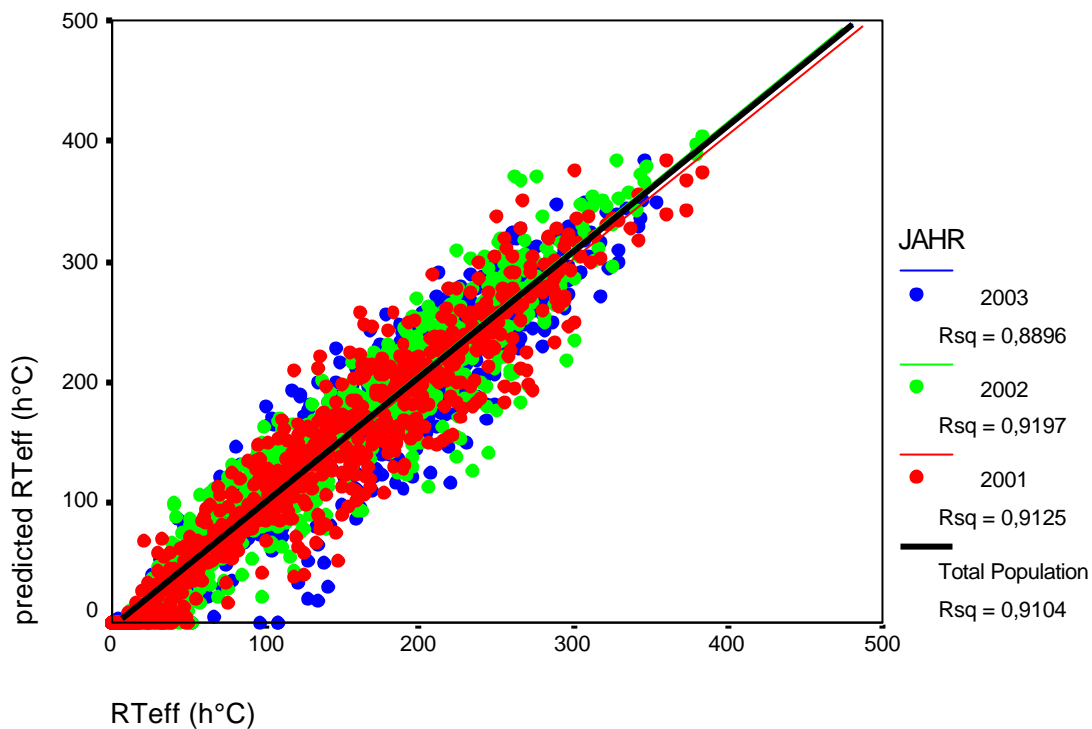


Abb. 24: Zusammenhang zwischen tatsächlich gemessener täglicher effektiver Rindentemperatursumme (RT_{eff}) und modellierter Rindentemperatursumme (predicted RT_{eff}).

Für eine Bewertung dieses Modells wurden für die Fangbaumstandorte die effektiven Rindentemperatursummen für den gesamten Beobachtungszeitraum aufsummiert und mit den tatsächlich aufgetretenen Rindentemperatursummen verglichen. Dabei ergab sich ein sehr straffer Zusammenhang zwischen modellierten Rindentemperatursummen und gemessenen Rindentemperatursummen ($R^2=0,9671$) (Abb. 25). Die Relation zwischen geschätzter und gemessener Temperatursumme beträgt für alle Fangbaumstandorte im Mittel $101,28 \% \pm 9,55 \%$ (Tab. 20).

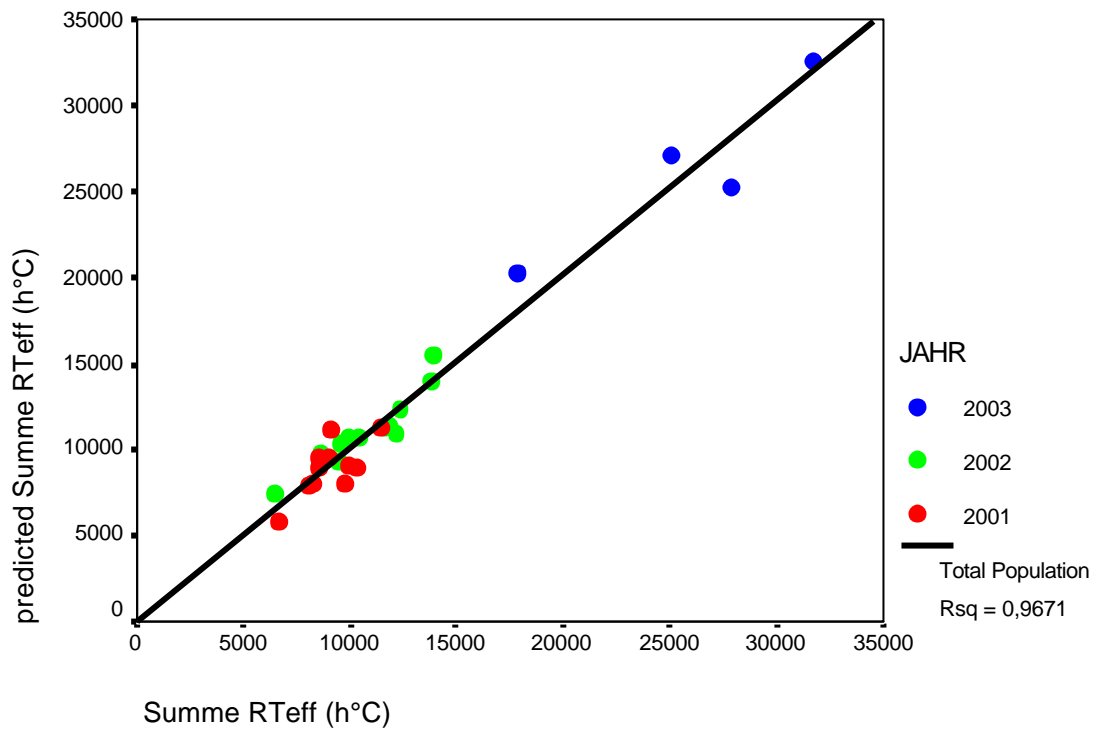


Abb. 25: Zusammenhang zwischen tatsächlich aufgetretener Rindentemperatursumme (Summe RTeff) und modellierter Rindentemperatursummen (predicted Summe RTeff) je Fangbaumstandort, getrennt nach Jahren.

Tab. 20: Relation der geschätzten zur gemessenen Rindentemperatursumme (%),
getrennt nach Fangbaumstandorten.

Jahr	Fangbaumserie	Standort	TSpred/TSreal (%)
2001	1	Messerer	104,45
		Bodinggraben	86,62
		Zaglbaueralm	121,91
		Ebenforstalm	88,24
		Blumaueralm	97,85
		Tiefling	96,92
	2	Messerer	105,82
		Bodinggraben	91,52
		Zaglbaueralm	83,08
		Blumaueralm	111,49
		Ebenforstalm	97,18
2002	1	Krennbauer	110,71
		Holzgraben Nord	96,83
		Holzgraben Süd	101,01
		Mehlboden	99,85
		Haslersgatter	112,25
		Weingartalm	98,41
	2	Krennbauer	96,22
		Holzgraben Nord	107,09
		Holzgraben Süd	89,16
		Mehlboden	101,92
		Haslersgatter	114,25
		Weingartalm	107,28
2003		Krennbauer	102,64
		Holzgraben Süd	90,63
		Haslersgatter	112,95
		Weingartalm	108,32
		Mittelwert	101,28
		Stabw.	9,55
		Maximum	121,91
		Minimum	83,08

3.2.4 Niederschlag

Der im Nordstau der Alpen gelegene Nationalpark Kalkalpen zeichnet sich generell durch hohe Jahresniederschlagsmengen aus. Im Durchschnitt (berechnet anhand der Niederschlagsmessungen der Stationen im Nationalpark von 1996 bis 2003) erreicht die Niederschlagssumme in den Monaten Mai bis Oktober mehr als 1000 mm (Tab. 21) und liegt damit deutlich über den für die Prädisposition von Fichtenbeständen kritischen Wert von 360 mm Niederschlag (Schwertfeger, 1955; Netherer, 2003).

Tab. 21: Durchschnittliche Niederschlagsmenge und Monatsmittel der Niederschlagssumme in den Jahren 1996 – 2003.

Monat	durchschnittlicher Niederschlag (mm)	Monatsmittel des Niederschlags (mm)							
		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Mai	120,6	-	165,3	117,4	118,0	149,6	-	42,5	124,7
Juni	166,3	-	136,2	195,4	155,8	101,6	245,6	170,1	114,6
Juli	209,2	-	385,8	277,0	214,0	176,3	151,2	166,5	204,4
August	193,3	179,7	133,7	137,4	195,2	118,8	186,5	444,7	99,7
September	203,2	357,0	99,7	270,6	105,1	190,1	294,8	184,9	178,3
Oktober	140,4	249,4	177,5	167,2	71,4	119,9	57,9	193,2	149,9
Summe	1033,0								

Die Niederschlagsverhältnisse unterliegen jedoch einer hohen zeitlichen als auch räumlichen Variabilität. Die Niederschlagswerte der Sommermonate, insbesondere extreme Minima bzw. Abweichungen vom langjährigen Durchschnitt, sind aussagekräftige Indikatoren der Prädisposition von Fichtenbeständen gegenüber *Ips typographus*. Die geringen Niederschläge im Jahr 2000 sowie hohe Niederschlagsdefizite im Mai 2002 und im Jahr 2003 weisen auf eine generell hohe Prädisposition der Fichte für Buchdruckerbefall im Nationalpark infolge Trockenstress hin und tragen wesentlich zur derzeit angespannten Borkenkäferbefallssituation bei (Abb. 26).

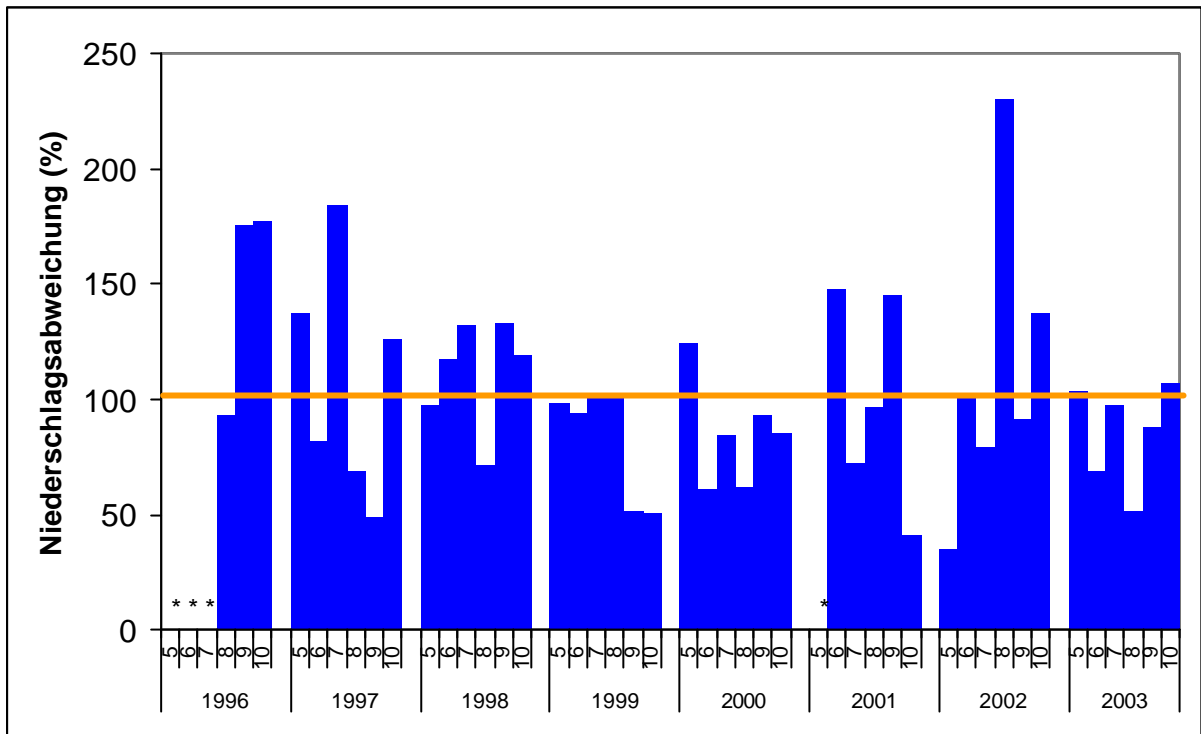


Abb. 26: Monatliche Niederschlagsabweichungen (Durchschnittswerte aller Messstationen) im Nationalpark Kalkalpen in den Jahren 1996 – 2003 (*: fehlende bzw. unvollständige Messreihen).

3.3 Prädispositionabschätzung

3.3.1 Borkenkäferphänologiemodell und Vermehrungspotential

Die Ergebnisse der Borkenkäferentwicklungsmodellierung (Befallsbeginn, Anzahl an Generationen) die einen wesentlichen Baustein für die Abschätzung der standörtlichen Prädisposition für Buchdruckerbefall darstellen, sind für die Jahre 2000 bis 2003 im Anhang kartographisch dargestellt.

Die Modellierung der potentiellen Borkenkäferentwicklung erfolgte für alle Rasterpunkte (Rasterabstand 300 m; n=17548) für die letzten vier Jahre (2000 bis 2003) anhand der Topoklimamodelle zur Berechnung der Lufttemperaturmittelwerte, -maxima und der effektiven, täglichen Rindentemperatursumme. Als Ausgangsparameter für die Klimamodellierung wurde dabei für jede Rasterzelle die jeweils maximale potentielle Einstrahlung und die minimale Seehöhe gewählt. Das Borkenkäferphänologiemodell umfasst dabei folgende Berechnungsschritte:

- Berechnung des Schwärm-(Befalls-)beginn:

JD_{Beginn} wenn $LT_{\text{max}} > 16,5^{\circ}\text{C}$ und $(LT_{\text{max}} - 8,3) \geq 140$ (siehe 3.2.1)

- Berechnung der laufenden effektiven Rindentemperatursumme ($RT_{\text{sum_eff}}$ in Tagesgraden) relativ zur notwendigen Summe für die Gesamtentwicklung (=557 Tagesgrade)

wenn $JD \geq JD_{\text{Beginn}}$

$T_{\text{sum}} = ((RT_{\text{sum_eff}})/557)$

- Beginn der Anlage von Geschwisterbruten und Berechnung der Summe der effektiven Rindentemperatur für die Entwicklung der Geschwisterbrut:

$JD_{\text{Geschwisterbrut}}$ wenn $T_{\text{sum}} > 0,5$ und $LT_{\text{max}} > 16,5^{\circ}\text{C}$ und Tageslänge $\geq 14,5$ h

wenn $JD \geq JD_{\text{Geschwisterbrut}}$

$T_{\text{sum}_{\text{Geschwister}}} = ((RT_{\text{sum_eff}})/557)$

- Beginn der Folgegenerationen F_x ($F_{2..2.\text{Generation}}$; $F_{3..3.\text{Generation}}$) und Berechnung der Summe der effektiven Rindentemperatur für die Entwicklung der Folgegenerationen:

JD_{Fx} wenn $T_{sum} > 1$ und $LT_{max} > 16,5^{\circ}C$ und Tageslänge $\geq 14,5$ h

wenn $JD \geq JD_{Fx}$

$T_{sum_{Fx}} = ((? RT_{sum_eff})/557)$

Bei der Anlage der Geschwisterbrut und von Folgegenerationen werden somit auch die Tageslänge sowie ein Schwärmtemperaturschwellenwert berücksichtigt. Für jedes Jahr und für jede Rasterzelle erhält man damit am Ende des Berechnungszeitraum (jeweils 31. Oktober) eine entsprechende Endsumme der laufend aufsummierten effektiven Rindentemperatur für jede begonnene Borkenkäfergeneration. Ist dieser Endwert $\geq 0,6$ (mehr als 60% der für die Gesamtentwicklung notwendigen Temperatursumme wurde erreicht) hat die jeweilige Generation das überwinterrungsfähige Jungkäferstadium erreicht. Bei Werten $< 0,6$ (Jungkäferstadium wird nicht erreicht) wird diese Generation als nicht überwinterrungsfähig eingestuft und bei der Ermittlung der Gesamtanzahl an möglichen Generationen nicht berücksichtigt.

Sowohl der Befallsbeginn im Frühjahr als auch die potentielle Anzahl an Generationen zeigte dabei sehr große Unterschiede zwischen den Jahren. Während 2001 und 2002 der Befallsbeginn nur in tieferen Lagen (< 600 m) bereits Ende April stattfand, trat zu diesem Zeitpunkt der erste Befall in den Jahren 2000 und 2003 bis in mittlere Höhenlagen ein. In den Jahren 2000 bis 2002 war der Schwärmbeginn in den höheren Lagen erst Mitte bis Ende Mai, im Jahr 2003 dagegen schon Anfang Mai. Entsprechend unterschiedlich war auch die Entwicklung des Buchdruckers. Unter günstigsten Voraussetzungen (Freifläche) wurden im Jahr 2001 fast im gesamten Gebiet 2 Generationen erreicht. In den Jahren 2000 und 2002 wurden dagegen nur in den tieferen Lagen mehr als 2 Generationen erreicht. Im Jahr 2003 wurden in tiefen Lagen sogar 3 Generationen, in mittleren Lagen 2 Generationen und Geschwisterbruten erfolgreich angelegt.

Für die Prädispositionsabschätzung anhand des Prädispositionsschlüssels wurde der Mittelwert des thermalen Kennwertes für die potentielle Anzahl an Generationen der letzten 4 Jahre (2000-2003) verwendet. Die Bewertung der potentiellen Anzahl an Generationen in diesem Prädispositionsschlüssel folgt der theoretischen Anzahl an möglichen Nachkommen je Weibchen und abgeschlossener Generation (Abb. 27).

Bei einem Vermehrungsfaktor von 1:50 und einem Geschlechterverhältnis von 1?:1? ergibt sich bereits dann, wenn sich die Geschwisterbrut bis zum Jungkäferstadium entwickelt hat (thermaler Kennwert $= 1,1$), eine Verdoppelung der theoretisch möglichen Nachkommen und entsprechend doppelt so hoch wird das daraus resultierende Gefährdungspotential bewertet (Abb. 29; Tab. 22). Der

Ausbildung von Geschwisterbruten kommt daher in relativ kühlen Klimaten bzw. in Gebirgslagen bei der Entstehung von Borkenkäferepidemien eine besondere Bedeutung zu. Wird eine oder mehrere Folgegenerationen erfolgreich abgeschlossen, steigt die Anzahl der möglichen Nachkommen exponentiell an (Abb. 27). Der Anteil der Nachkommen aus Geschwisterbruten ist dann aber im Verhältnis zu den Nachkommen aus Filialgenerationen (F2, F3....) entsprechend gering.

In Abb. 29 ist der Zusammenhang zwischen der effektiven Rindentemperatursumme, die der maximalen Entwicklung ohne Bestandesüberschirmung (sonnexponierte Stammseite) entspricht, und der effektiven Lufttemperatursumme (= minimale Entwicklung bei maximaler Überschirmung bzw. Entwicklung an der Stammunterseite bei liegenden Bäumen und an der nordexponierten Stammseite bei stehenden Bäumen) und die daraus resultierende Gefährdungseinschätzung, die sich an der maximal möglichen Entwicklung orientiert, dargestellt. Sowohl im unteren als auch im oberen Temperaturbereich nähert sich die Kurve der effektiven Lufttemperatursumme der maximal möglichen effektiven Rindentemperatursumme an. Je nach den lokal vorhandenen Überschirmungsverhältnissen liegt die mögliche Entwicklung im sektoralen Ausschnitt zwischen den beiden Kurven. Beträgt die relative Summe der effektiven Rindentemperatur weniger als 0,6, so besteht keine Gefährdung, weil der Buchdrucker unter diesen Verhältnissen selbst unter günstigsten Voraussetzungen seine Jugendentwicklung nicht abschließen kann. Bei Werten zwischen 0,6 und 1,1 (geringe Gefährdung) wird im günstigsten Fall eine Generation erfolgreich abgeschlossen, im ungünstigsten Fall kann die Jugendentwicklung nicht abgeschlossen werden. Erst im Bereich mit mittlerer Gefährdung (F1-Generation und Geschwisterbrut können sich maximal erfolgreich entwickeln) kann der Buchdrucker selbst bei voller Überschirmung die Jugendentwicklung erfolgreich absolvieren. Erreicht die relative Summe der effektiven Rindentemperatur bereits Werte zwischen 1,6 und 2,6 (F2-Generation entwickelt sich zum Jungkäfer), kann selbst unter ungünstigsten Voraussetzungen eine Generation bzw. eine Generation und eine Geschwisterbrut erreicht werden (hohe Gefährdung). Im Bereich sehr hoher Gefährdung können bereits ohne Überschirmung 3 Generationen absolviert werden, selbst bei voller Überschirmung werden im Minimum 2 Generationen erreicht.

thermale Kennwerte

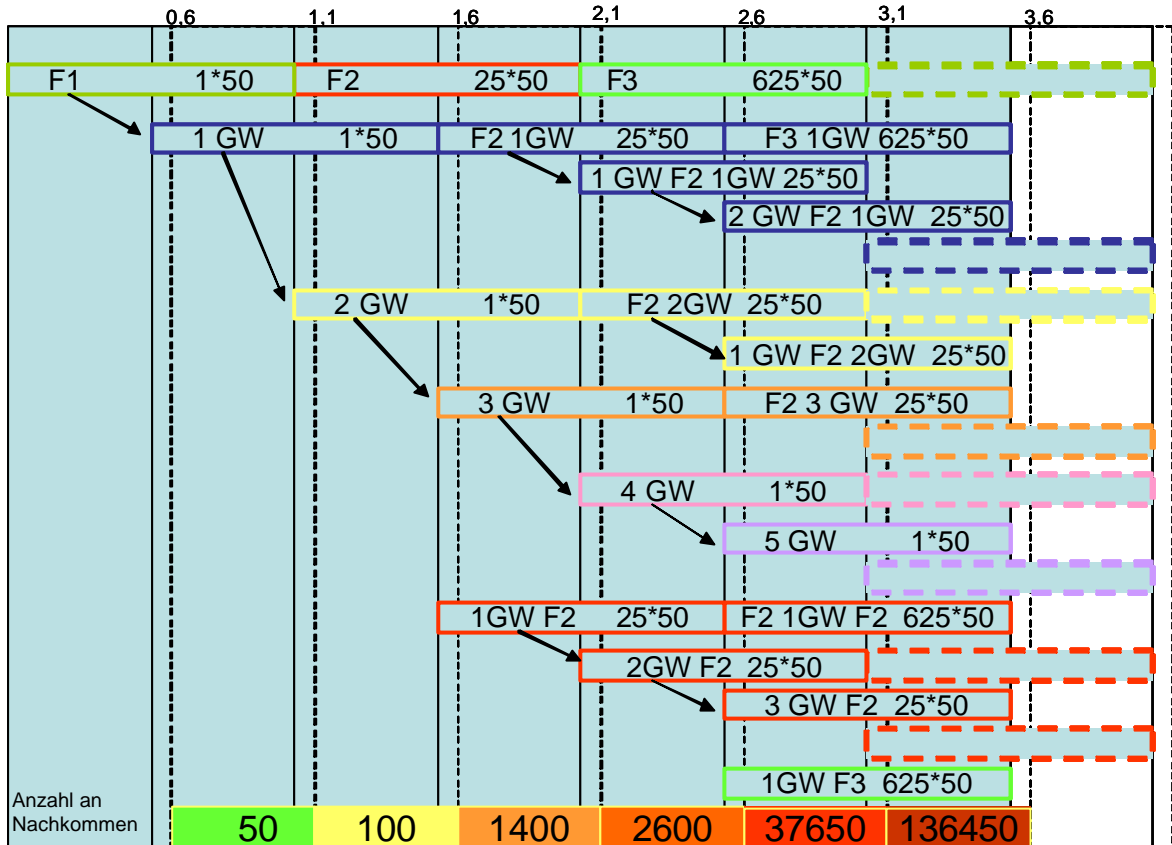


Abb. 27: Theoretische Abfolge von Generationen und mögliche Anzahl an Nachkommen von *Ips typographus* bei einem Vermehrungsfaktor von 1:50 und einem Geschlechterverhältnis von 1:1 (F1: 1. Generation, F2: 2. Generation, F3: 3. Generation, GW: Geschwisterbrut; thermale Kennwerte: Summe der effektiven Rindentemperatur in Relation zur notwendigen Summe für die Gesamtentwicklung (= 557 Tagesgrade)).

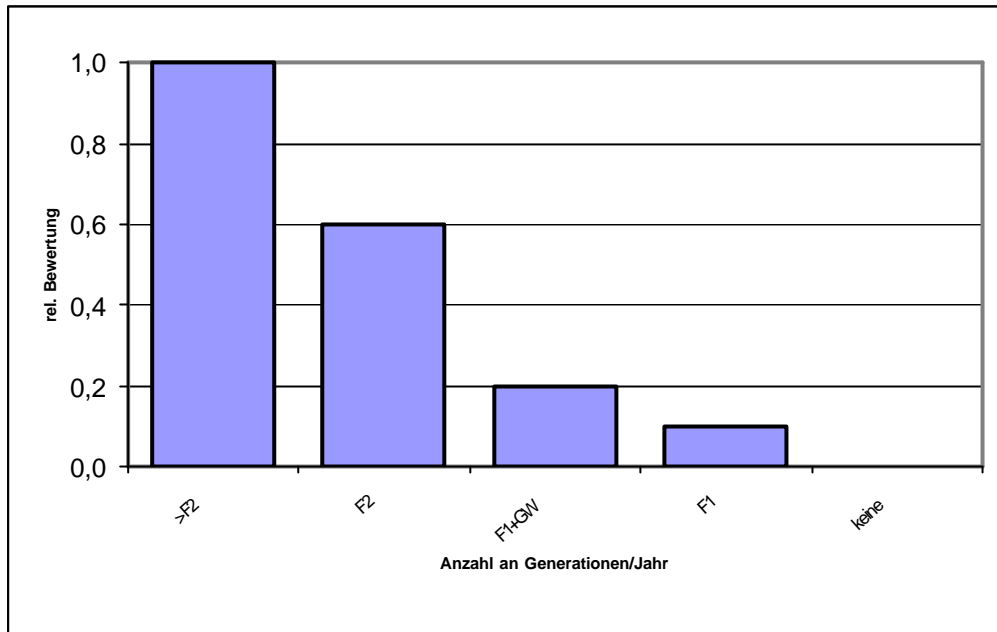


Abb. 28: Relative Bewertung der potentiellen Anzahl an Generationen zur Prädispositionsabschätzung (F1: 1 Generation; F1+GW: 1 Generation und 1 Geschwisterbrut; F2: 2 Generationen; >F2: mehr als 2 Generationen).

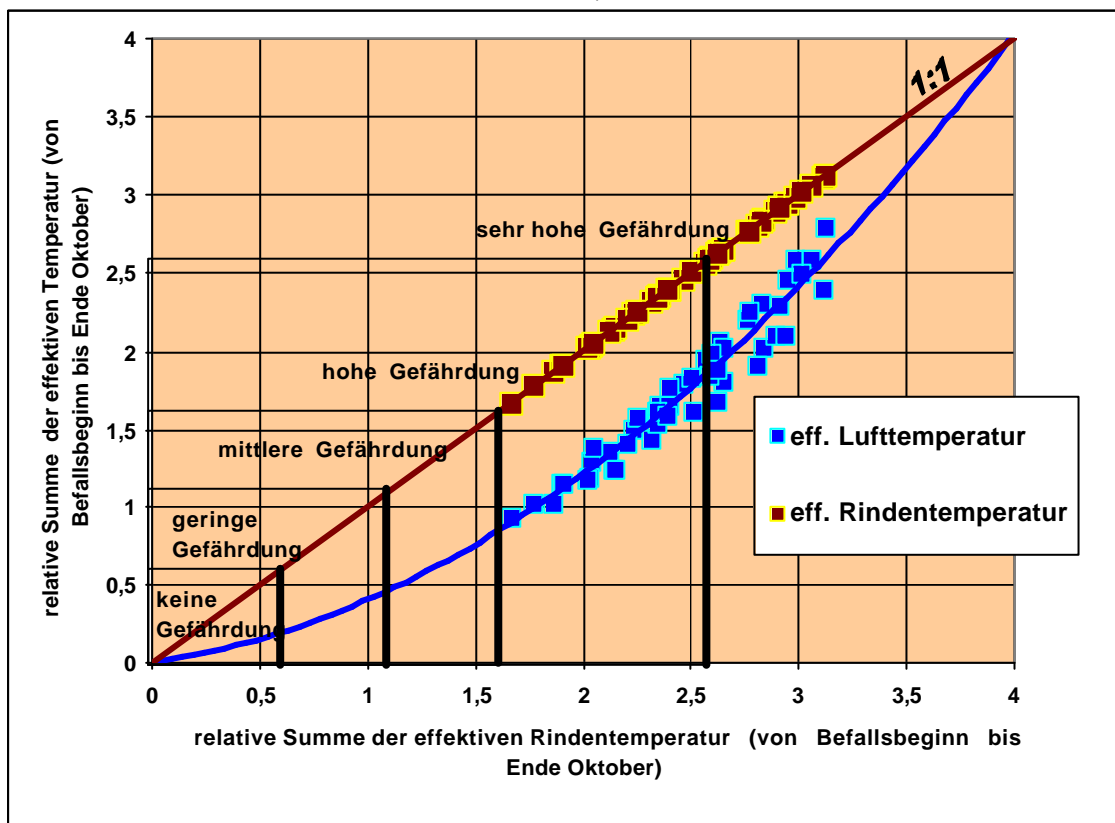


Abb. 29: Zusammenhang zwischen der relativen, effektiven Rindentemperatursumme und der relativen, effektiven Lufttemperatursumme berechnet im Zeitraum von Befallsbeginn bis Ende Oktober anhand der Klimamessdaten von 2000 bis 2003 der Klimamessstationen des Nationalparks und Bewertung des daraus resultierenden Gefährdungspotentials.

Das Vermehrungspotentiell des Buchdruckers im Gebiet des Nationalparks wird generell als hoch eingestuft, weil in den vergangenen Jahren die Witterungsbedingungen im günstigsten Fall (Freifläche) die Absolvierung von 2 Generationen ermöglichten. In den tiefer gelegenen Tallagen (zB. Windischgastener Becken), im östlichen Bereich des Hintergebirges und an exponierten, tiefer gelegenen Standorten entlang der Südseite des Sengsengebirges wird das Vermehrungspotential als sehr hoch eingestuft, da fallweise mehr als 2 Generationen/Jahr auftraten. Geringe bzw. mittlere Vermehrungspotentiale (durchschnittlich nur 1 Generation und Geschwisterbrut) traten nur in den Hochlagen (>1500 m) und lokal in topographisch bedingt, extrem schattigen Bereichen (zB. Nordabhang des Sengsengebirges und des Größtenberges, Nordhang im Hinteren Rettenbachtal, Nordseite Sonntagsmauer, Nordabhang Hieflerstützen) auf.

Neben den thermischen Bedingungen und der Tageslänge, die entscheidend für das Schwärmen und für die Entwicklung der Käfer sind, wäre für die Abschätzung der Gefährdung auf Grund des Vermehrungspotentials auch die quantitative Kenntnis des Bruterfolges (Nachkommen pro Weibchen) und damit des Populationswachstums von besonderer Bedeutung. In Abhängigkeit von der Nahrungsqualität der Fichtenrinde, intra- und interspezifische Konkurrenz, Wintermortalität und Mortalität durch Antagonisten (Räuber, Parasiten, Pathogene) und der physiologischen bzw. genetischen Kondition und Fitness der Parentalkäfer zeigt der Bruterfolg eine hohe Variabilität. An den entnommen Brutstämmen konnte eine Schwankungsbreite von effektiv keine Nachkommen pro Weibchen (z.B. durch hohe Mortalität bei der Überwinterung bei den Fangbäumen Holzgraben Nord und Weingartalm in Jahr 2002 bzw. durch extrem hohe Brutdichte beim Fangbaum Bodinggraben 2001) und bis zu 36 Nachkommen pro Weibchen (Fangbaum Haslersgatter 2003) festgestellt werden (Tab. 22).

Tab. 22: Brutdichte und Bruterfolg des Buchdruckers an den entnommenen Brutstämmen (JK: Anzahl geschlüpfter Jungkäfer).

Jahr	Serie	Fangbaum-Standort	Anzahl Muttergänge	Muttergänge/dm ² Rindenfläche	JK	JK/Weibchen
2001	1	Messerer	43	1,43	174	4,05
2001	1	Bodinggraben	158	5,54	105	0,66
2001	1	Zaglbaueralm	97	3,06	819	8,44
2001	1	Ebenforstalm	52	1,82	752	14,46
2001	1	Blumaueralm	59	1,94	498	8,44
2001	1	Tiefling	14	0,59	52	3,71
2001	2	Zaglbaueralm	7	0,18	33	4,71
2001	2	Blumaueralm	1	0,03	4	4,00
2001	2	Ebenforstalm	34	0,95	75	2,21
2002	1	Krennbauer	54	1,82	121	2,24
2002	1	Holzgraben Nord	33	1,22	328	9,94
2002	1	Holzgraben Süd	52	1,66	458	8,81
2002	1	Mehlboden	44	2,23	529	12,02
2002	1	Haslersgatter	25	0,77	900	36,00
2002	1	Weingartalm	82	3,26	236	2,88
2002	2	Krennbauer	21	0,64	56	2,67
2002	2	Holzgraben Nord	61	1,44	51	0,84
2002	2	Holzgraben Süd	69	1,82	343	4,97
2002	2	Weingartalm	9	0,24	5	0,56
2003	1	Krennbauer	108	1,87	607	5,62
2003	1	Holzgraben Süd	83	1,41	534	6,43
2003	1	Haslersgatter	263	3,38	2310	8,78
2003	1	Weingartalm	188	2,50	689	3,66

3.3.2 Naturrauminventur

Für 1495 Probepunkte der Naturrauminventur wurde anhand der erhobenen Daten und den Ergebnissen der Borkenkäferentwicklungsmodellierung die Prädisposition für Sturm, Schneebruch und Borkenkäferbefall berechnet. In Tab. 23 sind die dafür verwendeten Indikatoren bzw. Subkriterien und deren Gewichtung und Parametrisierung nach Führer und Nopp (2001) bzw. Netherer (2002) dargestellt.

Für die bestandesbezogene Prädispositionsabschätzung für Schnee-, bzw. Sturmschaden und insbesondere für Borkenkäferbefall müssen die anhand des Schlüssels ermittelten Prädispositionen für Jungbestände (Jungwuchs bis Stangenholz) anhand des Bestandesalter bzw. Bestandesentwicklungsklasse angepasst werden (Abb. 30). Die in Tab. 23 angeführten „knock-out“-Kriterien müssen danach zusätzlich berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Prädispositionsabschätzungen anhand der Naturrauminventurdaten sind im Anhang dargestellt.

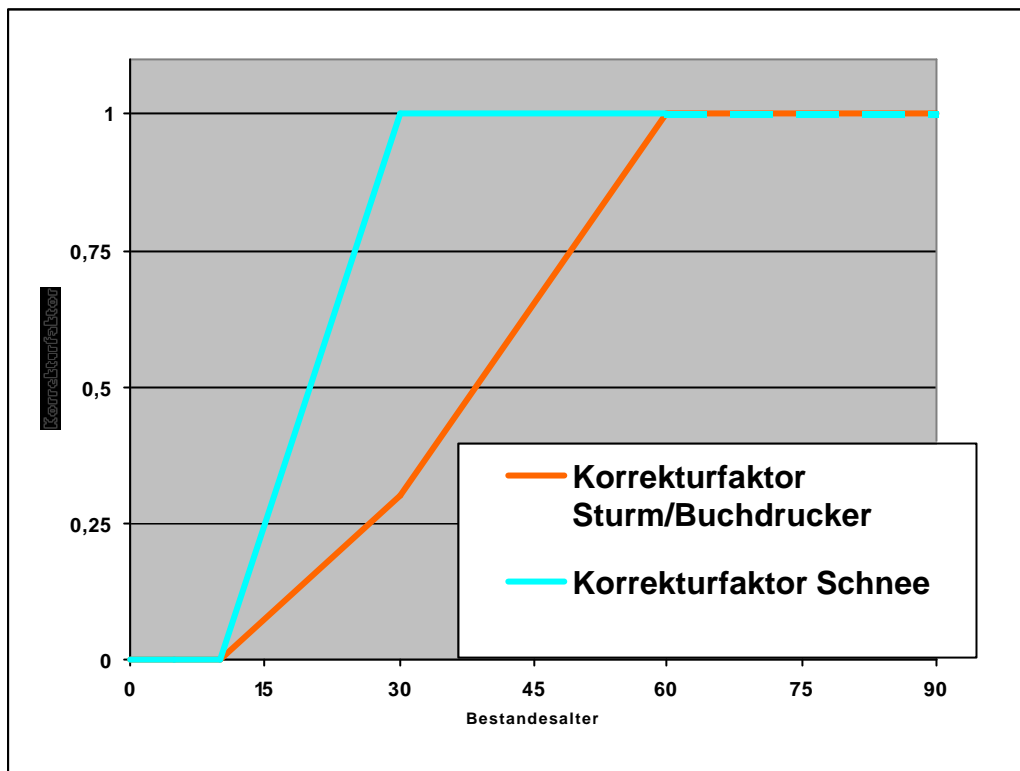


Abb. 30: Korrekturfaktoren für die Prädispositionsabschätzung in Jungbeständen (Alter <60 Jahre bzw. Jungwuchs bis Stangenholzalter).

Tab. 23: Kriterien zur Prädispositionsabschätzung für Borkenkäferbefall, Sturm- und Schneeschaden anhand der Naturrauminventur (nach Führer und Nopp, 2001, Netherer, 2003).

***Ips typographus* - Bestand**

Gewichtung der Subkriterien

	qualitativ	Gewichtung	Relation
Fichtenanteil	sehr hoch	5	1,00
Alter(sstruktur)	sehr hoch	5	1,00
Bestandesschluss	mittel	2	0,40
Soziologische Stammklasse	hoch	3	0,60
Prädisposition ggü Wind	hoch	4	0,80
Prädisposition ggü Schneebruch	gering	1	0,20

Fichtenanteil in Prozent	Präd.pkte.	Pkt(0_1)	Fuzzy Set
>70	12	1,00	1,00
50-70	10	0,83	0,83
25-49	6	0,50	0,50
10-25	2	0,17	0,17
1-10	1	0,08	0,08
keine Fichte	KO	KO	

Alter

a) für gleichaltrige Bestände in Jahren:

< 60	2	0,20	0,20
60-79	6	0,60	0,60
80-100	9	0,90	0,90
>100	10	1,00	1,00

a) für ungleichaltrige Bestände in Wuchsklassen, Dominanz von:

Bestandesteilen im Jungwuchs- bis Dickungsalter	2	0,20	0,20
Stangenholzalter	6	0,60	0,60
Baumholzalter	9	0,90	0,90
alte und überalte Bestandesteile	10	1,00	1,00

Kronenschlussgrad - Bestandesdichte

gedrängt, dicht	>0,8	4	0,40	0,16
geschlossen	0,6-0,8	1	0,10	0,04
locker	0,4-0,59	7	0,70	0,28
licht, räumdig	<0,4	10	1,00	0,40

Soziologische Stammklasse

überwiegen (vor)herrscher Individuen	10	1,00	0,60
geringer Anteil an (vor)herrschernden Fichten	0	0,00	0,00

Prädisposition ggü Wind

keine bis sehr geringe Prädisposition	0	0,00	0,00
geringe Prädisposition	3	0,25	0,20
mittlere Prädisposition	6	0,50	0,40
hohe Prädisposition	9	0,75	0,60
sehr hohe Prädisposition	12	1,00	0,80

Prädisposition ggü Schneebruch

keine bis sehr geringe Prädisposition	0	0,00	0,00
geringe Prädisposition	3	0,25	0,05
mittlere Prädisposition	6	0,50	0,10
hohe Prädisposition	9	0,75	0,15
sehr hohe Prädisposition	12	1,00	0,20

***Ips typographus* - Standort**

Gewichtung der Subkriterien	qualitativ	Gewichtung	Relation
Generationsentwicklung	sehr hoch	5	1,00
Niederschlagsverhältnisse	hoch	3	0,60
Geländemorphologie	mittel	2	0,40
Wasserhaushalt	hoch	4	0,80
Bodentyp	mittel	2	0,40
Gründigkeit	gering	1	0,20
Bodenskelettanteil	gering	1	0,20
Prädisposition ggü Wind	sehr hoch	5	1,00
Prädisposition ggü Schneebruch	gering	1	0,20
Generationsentwicklung	Präd.pkte.	Pkt(0_1)	Fuzzy Set
> 2 Generationen möglich	10	1,00	1,00
2 Generationen	6	0,6	0,6
1 Generation und Geschwisterbruten	2	0,2	0,2
1 Generation	1	0,1	0,1
keine Generationsentwicklung	0	0,0	0,0
Niederschlagsverhältnisse			
<360 mm	5	1,00	0,60
>=360 mm	0	0,00	0,00
Geländemorphologie			
Kuppe/ Plateau/ Kammlage	10	1,00	0,40
Ober- und Mittelhang	7	0,70	0,28
Unterhang/ Tal- oder Muldenlage	1	0,10	0,04
Wasserhaushalt			
trocken	10	1,00	0,80
mäßig trocken	8	0,80	0,64
mäßig frisch	4	0,40	0,32
(sehr) frisch	0	0,00	0,00
feucht	4	0,40	0,32
nass	6	0,60	0,48
sonst.	0	0,00	0,00
Bodentyp			
(Pseudo)Vergleyung vorhanden	5	1,00	0,40
Gründigkeit des Bodens			
gering	5	1,00	0,20
mittel bis hoch	0	0,00	0,00
Bodenskelettanteil			
gering	0	0,00	0,00
mittel bis hoch	5	1,00	0,20
Prädisposition ggü Wind			
keine bis sehr geringe Prädisposition	0	0,00	0,00
geringe Prädisposition	3	0,25	0,25
mittlere Prädisposition	6	0,50	0,50
hohe Prädisposition	9	0,75	0,75
sehr hohe Prädisposition	12	1,00	1,00
Prädisposition ggü Schneebruch			
keine bis sehr geringe Prädisposition	0	0,00	0,00
geringe Prädisposition	3	0,25	0,05
mittlere Prädisposition	6	0,50	0,10
hohe Prädisposition	9	0,75	0,15
sehr hohe Prädisposition	12	1,00	0,20

Sturm Bestand

Gewichtung der berücksichtigten Subkriterien

	Gewichtung	Relation
Fichtenanteil	3	0,60
Laubholzanteil	3	0,60
Anteile Lă, Kie, Ta	3	0,60
Bestandesoberhöhe	5	1,00
Schlussgrad	4	0,80
Stammwunden	2	0,40

Fichtenanteil in %	Präd.pkte.	Pkt(0_1)	Fuzzy Set
>=90	10	1,00	0,60
<90	0	0,00	0,00
Laubholzanteil in %			
<30	10	1,00	0,60
>=30	-5	0,00	0,00
Anteile Lă, Kie, Ta			
<30	15	1,00	0,60
>=30	0	0,00	0,00
Bestandesoberhöhe in m			
<=10	0	0,00	0,00
11-15	3	0,20	0,20
16-20	6	0,40	0,40
21-25	9	0,60	0,60
26-30	12	0,80	0,80
>30	15	1,00	1,00
Kronenschlussgrad - Bestandesdichte			
dicht >0.8	4	0,33	0,27
geschlossen 0.6-0.8	0	0,00	0,00
locker 0.4-0.59	4	0,33	0,27
licht 0.2-0.39	8	0,67	0,53
räumdig/ gruppig <0.2	12	1,00	0,80
Stammwunden vorhanden			
keine	0	0,00	0,00
gering	7	0,64	0,25
mittel	9	0,82	0,33
stark	11	1,00	0,40

Sturm Standort

Gewichtung der berücksichtigten Subkriterien

	Gewichtung	Relation
(Pseudo)Vergleyung	5	1,00
Podsol, podsolige Bodentypen	2	0,40
Grobanteil V% (eckig-kantig)	2	0,40
Neigung	2	0,40
Geländemorphologie	5	1,00
Moorrand / hydromorpher Humus	5	KO
Ah-Horizont Mächtigkeit	1	0,20
Bodenverdichtung	1	0,20
anstehender Fels	1	0,20

	Präd.Pkt.	Pkte(0_1)	Fuzzy Set
Moorrand / hydromorpher Humus			
vorhanden	K.O.	K.O.	
nicht vorhanden	0	0,00	0,00
Ah-Horizont Mächtigkeit			
<=10 cm	10	1,00	0,20
11-25 cm	5	0,50	0,10
>25 cm	0	0,00	0,00
Bodenverdichtung			
vorhanden	10	1,00	0,20
nicht vorhanden	0	0,00	0,00
anstehender Fels			
vorhanden	10	1,00	0,20
nicht vorhanden	0	0,00	0,00
(Pseudo)Vergleyung			
vorhanden	10	1,00	1,00
nicht vorhanden	0	0,00	0,00
Podsol, podsolige Bodentypen			
vorhanden	10	1,00	0,40
nicht vorhanden	0	0,00	0,00
Grobanteil V% (eckig-kantig)			
0-10	0	0,00	0,00
11-20	4	0,40	0,16
21-40	6	0,60	0,24
41-80	8	0,80	0,32
>80	10	1,00	0,40
Geländeneigung in Prozent			
0-3	12	1,00	0,40
4-9	10	0,83	0,33
10-17	8	0,67	0,27
18-36	6	0,50	0,20
37-58	4	0,33	0,13
59-100	2	0,17	0,07
>100	2	0,17	0,07

>Sturm Standort Fortsetzung<

Geländemorphologie (Windrichtung „WR“ = NW)

Verebnung, Ebene; Plateau		50	1,00	1,00
Mulde, Wanne		50	1,00	1,00
Senke, Rinne, Graben quer zur WR		0	0,00	0,00
Senke, Rinne, Graben parallel zur WR		24	0,48	0,48
Hanglage, Tal quer zur WR	Oberhang	48	0,96	0,96
	Mittelhang	32	0,64	0,64
	Unterhang	16	0,32	0,32
Hanglage, Tal parallel zur WR	Oberhang	16	0,32	0,32
	Mittelhang	48	0,96	0,96
	Unterhang	16	0,32	0,32
Hanglage, Tal schräg zur WR	Oberhang	40	0,80	0,80
	Mittelhang	48	0,96	0,96
	Unterhang	16	0,32	0,32
Kuppe, Rücken, Nase etc.		50	1,00	1,00
Lee- alle Lagen außer Ebene etc.		0	0,00	0,00
Sonstiges		0	0,00	0,00

Schnee Bestand

Gewichtung der Subkriterien

	Gewichtung	Relation
Fi u/o Kie-. Anteil	3	0,75
Bestandesklasse	2	0,50
Schlußgrad	2	0,50
Grundflächenhaltung	2	0,50
H/D- Wert	4	1,00
Stammwunden	2	0,50

	Präd.pkte.	Pkt(0_1)	Fuzzy Set
Anteil Fichte u/o Kiefer in %			
>=90	15	1,00	0,75
70-89	8	0,53	0,40
50-69	6	0,40	0,30
40-49	4	0,27	0,20
<40	2	0,13	0,10
Bestandesklasse			
Jungwuchs	2	0,20	0,10
Dickung	10	1,00	0,50
Stangenholz	10	1,00	0,50
Baumholz	6	0,60	0,30
Schlussgrad			
gedrängt	4	0,40	0,20
geschlossen	2	0,20	0,10
locker	0	0,00	0,00
licht	4	0,40	0,20
lückig	10	1,00	0,50
Grundflächenhaltung			
G/ha < 1.6*Oberhöhe	0	0,00	0,00
G/ha > 1.6*Oberhöhe	10	1,00	0,50
H/D- Wert			
Oberhöhe < 10m: <60	0	0,00	0,00
Oberhöhe < 10m: 60-80	5	0,50	0,50
Oberhöhe < 10m: >80	10	1,00	1,00
Oberhöhe >= 10m: <70	0	0,00	0,00
Oberhöhe >= 10m: 70-90	5	0,50	0,50
Oberhöhe >= 10m: >90	10	1,00	1,00
Stammwunden			
keine	0	0,00	0,00
gering	2	0,20	0,10
mäßig	6	0,60	0,30
stark	10	1,00	0,50

Schnee Standort

Gewichtung der Subkriterien

	Gewichtung	Relation
Seehöhe	3	1,00
Windexposition	2	0,67
Geländemorphologie	1	0,33
Geländeneigung	2	0,67
Wasserhaushalt	1	0,33

Seehöhe in m ü NN	Präd.pkte.	Pkt(0_1)	Fuzzy Set
<=400	4	0,40	0,40
401-600	10	1,00	1,00
601-800	10	1,00	1,00
801-1000	8	0,80	0,80
1001-1400	6	0,60	0,60
>1400	4	0,40	0,40
Windexposition			
Luvlage	0	0,00	0,00
Leelage	10	1,00	0,67
Sonstiges	2	0,20	0,13
Geländemorphologie			
Hang	10	1,00	0,33
Mulde oder Senke	10	1,00	0,33
Sonstiges	2	0,20	0,07
Geländeneigung in %			
0-5	10	1,00	0,67
6-20	5	0,50	0,33
21-40	0	0,00	0,00
41-60	5	0,50	0,33
>60	10	1,00	0,67
Wasserhaushalt			
nass	10	1,00	0,33
feucht	8	0,80	0,27
sehr frisch	6	0,60	0,20
mäßig frisch	4	0,40	0,13
mäßig trocken	2	0,20	0,07
trocken	0	0,00	0,00
Sonstiges	0	0,00	0,00

3.3.3 Operatdaten ÖBF

Für Waldbestände im Besitz der Österreichischen Bundesforste AG wurde anhand der verfügbaren Operatdaten eine entsprechend vereinfachte Abschätzung der Prädisposition für jede Unterabteilungsteilfläche unter der in Tab. 23 dargestellten Bewertungen berechnet (Tab 24). Als Datenbasis dienten dabei zur Beschreibung der Bestandeseigenschaften die Baumartenanteile, Bestandesalter und Bestockungsgrad, von standortsbezogenen Daten wurden Angaben zum Wasserhaushalt entsprechend der Klassifikation im Rahmen der Naturrauminventur adaptiert. Sonstige topographische Standortparameter wurden aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet.

Tab. 24: Verwendete Kriterien zur Prädispositionsabschätzung für Borkenkäferbefall, Sturm- und Schneeschaden für ÖBF-Waldflächen.

Sturm Bestand
Fichtenanteil
Laubholzanteil
Anteil Lärche, Kiefer, Tanne
Bestandesalter (Ersatz für Bestandesoberhöhe)
Kronenschlussgrad (Bestockungsgrad)
Sturm Standort
Geländeneigung
Bonität (Ertragsklasse)
Geländemorphologie
Schnee Standort
Seehöhe
Windexposition
Geländemorphologie
Neigung
Bonität
Wasserhaushalt
Schnee Bestand
Anteil Fichte u/o Kiefer
Bestandesentwicklungs-kategorie (Bestandesalter)
Schlußgrad (Bestockungsgrad)
<i>Ips typographus</i> Standort
Generationsentwicklung
Niederschlagsverhältnisse
Geländemorphologie
Wasserhaushalt
Prädisposition Wind
Prädisposition Schnee
<i>Ips typographus</i> Bestand
Fichtenanteil
Alter
Bestandesdichte
Prädisposition Wind
Prädisposition Schnee

3.3.4 Satellitenbildinterpretation

Die objektbezogene Auswertung des Satellitenbildes ergab neben der Trennung von Nichtwald- und Waldflächen eine Einteilung der Waldflächen in 3 Klassen. Im Vordergrund stand dabei das Erkennen von für Buchdruckerbefall besonders gefährdeter, fichtenreicher Altbestände (Fichtenanteil = 50%; Bestandesalter = 60 Jahre). Die Verschneidung dieser Klassifikation mit Operatdaten ergab für Altbestände (Alter = 60 Jahre) eine deutliche Trennung zwischen fichtenreichen Beständen, Mischbeständen und laubholzreichen Beständen (Abb. 31). Jüngere Bestände konnten jedoch hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung nicht eindeutig zugeordnet werden (Abb. 31). Sowohl fichtenreiche Jungbestände (54%) als auch jüngere Nadelholzmischbestände (50%) wurden zum Großteil der Klasse „Laubholz dominant“ zugeteilt. Ebenso wurden 75% der als Laubholzbestände ausgewiesenen Waldflächen der Klasse „Laubholz dominant“ zugeordnet (Tab. 25). Die Klasse „Fichte dominant“ umfasst 84% fichtenreiche Bestände (Fichtenanteil = 50%). 70,9 % der Bestände in dieser Klasse sind älter als 60 Jahre. Ältere Nadelholzmischbestände wurden überwiegend (43%) zu der Klasse „Fichte dominant“ eingefügt. Laubholzreichere Mischbestände finden sich zu 60% in der Klasse „Laubholz dominant“ (Tab.25). Mit Latschen bestockte Nichtwaldflächen können von Fichtenbeständen anhand des Satellitenbildes nicht differenziert werden. Dies spielt im Bereich des Nationalparks keine wesentliche Rolle, da solche Flächen anhand der Angaben im Operat als Nichtwald identifiziert wurden. Als Fichtenbestände klassifizierte Flächen in alpinen Hochlagen außerhalb des Nationalparks, die nicht im Besitz der ÖBF sind, müssen aber durchwegs als mit Latschen bestockte Flächen angesehen werden.

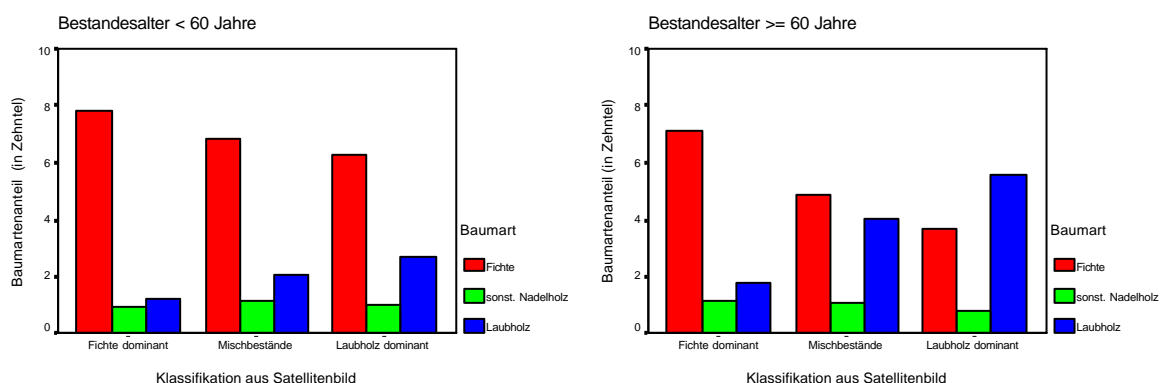


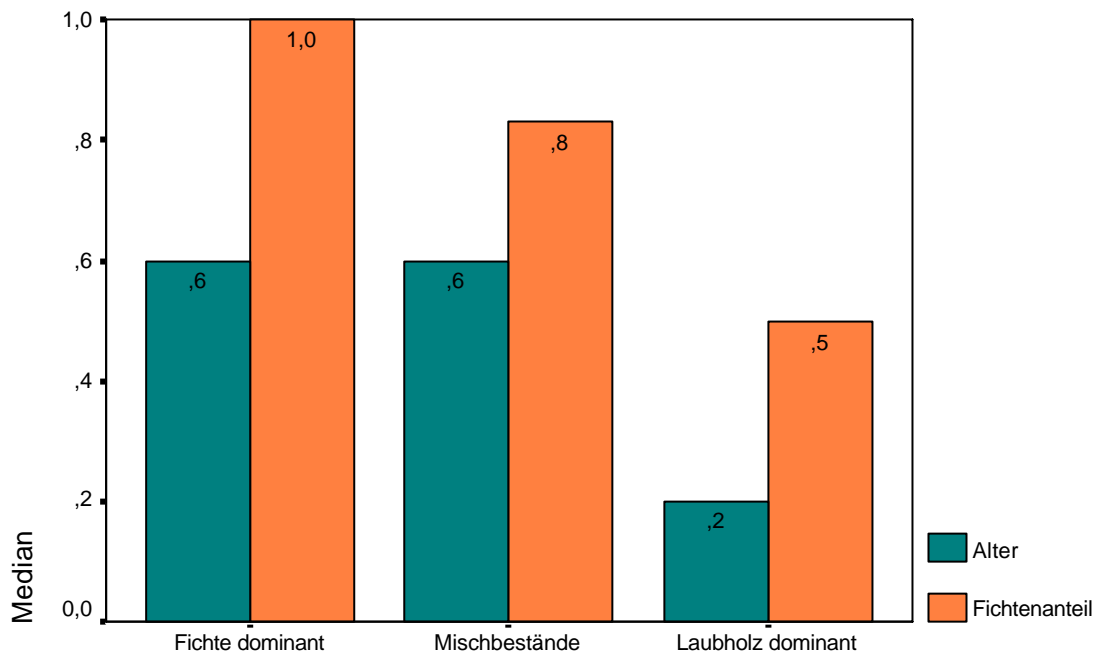
Abb. 31: Mittelwerte der Baumartenanteile (in Zehntel) getrennt nach Alter für die Klassifikation anhand der Satelliteninterpretation.

Tab. 25: Zuordnung der anhand von Operatdaten klassifizierten Bestandestypen (Fichtenbestände: =50% Fichtenanteil; NHmischbestände: =50% Nadelholzanteil; Laubholzbestände: = 50% Laubholzanteil; LH-NHbestände: Mischbestände aus Laubholz und Nadelholz mit Baumartenanteilen jeweils <50%) zu den Klassen aus der Satellitenbildinterpretation (Anteile innerhalb der Bestandesklassen in Prozent) getrennt nach Bestandesalter und Gesamt.

Relative Anteile innerhalb der Bestandesklassen (%)						
Klassifikation aus Satellitenbild	Bestandesklassen anhand von ÖBF-Operatdaten					
	Bestandes-alter	Fichten-bestände	NHmisch-bestände	Laubholz-bestände	LH-NH-bestände	Summe
Fichte dominant	<60	33,07	30,77	12,38	12,50	29,24
Mischbestände		12,71	19,23	10,35	11,88	12,47
Laubholz dominant		54,22	50,00	77,26	75,63	58,29
Summe		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Fichte dominant	=60	58,64	49,35	13,06	27,43	39,71
Mischbestände		12,47	15,58	12,90	21,52	13,15
Laubholz dominant		28,89	35,06	74,04	51,05	47,14
Summe		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Fichte dominant	Gesamt	45,23	43,10	12,91	21,41	35,20
Mischbestände		12,59	16,81	12,34	17,63	12,86
Laubholz dominant		42,18	40,09	74,75	60,96	51,94
Summe		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Relative Anteile innerhalb der Klassen aus Satellitenbildinterpretation (%)						
Klassifikation aus Satellitenbild	Bestandesklassen anhand von ÖBF-Operatdaten					
	Bestandes-alter	Fichten-bestände	NH-bestände	Laubholz-bestände	LH-NH-bestände	Summe
Fichte dominant	<60	90,07	2,15	5,99	1,79	100
	=60	80,58	3,78	12,40	3,24	100
	Gesamt	83,97	3,20	10,11	2,72	100
Mischbestände	<60	81,13	3,14	11,74	3,98	100
	=60	51,73	3,61	36,99	7,67	100
	Gesamt	64,01	3,42	26,44	6,13	100
Laubholz dominant	<60	74,07	1,75	18,75	5,43	100
	=60	33,43	2,27	59,23	5,08	100
	Gesamt	53,07	2,02	39,67	5,25	100

Die Klassifikation aus der Satellitenbildinterpretation wurde anhand entsprechender Operatdaten und deren bestandesbezogener Prädispositionseinschätzung für Buchdruckerbefall bezüglich Bestandesalter und Fichtenanteil bewertet (Abb.32). Standortbezogene Indikatoren wurden anhand des digitalen Geländemodells abgeleitet (Tab. 26).



Klassifikation aus Satellitenbildinterpretation

Abb. 32: Bestandesbezogene Bewertung der anhand der Satellitenbildinterpretation klassifizierten Bestände für die Prädisposition für Buchdruckerbefall.

Tab. 26: Verwendete Kriterien zur Prädispositionsabschätzung für Borkenkäferbefall, Sturm- und Schneeschaden für die, anhand der Satellitenbildinterpretation klassifizierten Waldflächen.

Sturm Standort	
	Geländeneigung
	Geländemorphologie
Schnee Standort	
	Seehöhe
	Windexposition
	Geländemorphologie
	Neigung
<i>Ips typographus</i> Standort	
	Generationsentwicklung
	Niederschlagsverhältnisse
	Geländemorphologie
	Prädisposition Sturm
	Prädisposition Schnee
<i>Ips typographus</i> Bestand	
	Fichtenanteil
	Alter

3.3.5 Bewertung und Verifikation der Prädispositionsabschätzung

Einer strikten Trennung standörtlicher und bestandesbezogener Prädispositionsindikation folgend, sind im Anhang die jeweiligen Prädispositionsklassen für Sturmschäden, Schneebruch und Buchdruckerbefall für die Probeflächen der Naturrauminventur, für die Waldflächen der ÖBF-Forstverwaltungen Molln, Steyr und Reichraming sowie für Flächen außerhalb des Nationalparks (auf Basis der Satellitenbildinterpretation) dargestellt.

Die Prädisposition für Sturm- und Schneeschäden ist ein wesentliches Subkriterium zur Beurteilung der Anfälligkeit für Borkenkäferbefall. Die Abschätzung der standortsbezogenen Prädisposition für Schnee- als auch Sturmschäden anhand des vorliegenden Schätzsystems verdeutlicht die unterschiedlichen Charakteren dieser beiden Schadfaktoren. Während hohe standörtliche Schneeschadensanfälligkeit für tiefergelegene (< 800 m Seehöhe), windabgewandte Lagen ausgewiesen wird, tritt hohe standortsbezogene Sturmschadensanfälligkeit insbesondere an windexponierten höheren Hang- und Kuppenlagen sowie Geländeverebnungen und pseudevergleyten bzw. vernässten Standorten auf. Die standörtliche Prädisposition von Waldflächen im Nationalpark für Sturm- als auch Schneeschäden wird überwiegend als hoch eingestuft (Tab. 27).

Hinsichtlich der bestandesbezogenen Prädisposition für Sturm- und Schneeschäden ergibt sich für Bestände im Nationalpark eine überwiegend mittlere, respektive geringe Gefährdung (Tab. 27). Sehr hohe bestandesbedingte Sturm- und Schneeschadensanfälligkeit tritt im Bereich des Nationalparks nur punktuell auf. Als besonders prädisponiert für Schnee- und Sturmschäden sind die Waldflächen östlich des Großen Bachs (ÖBF FV Steyr) anzusehen, da hier für ein sehr weitläufiges zusammenhängendes Waldgebiet sowohl eine hohe bis sehr hohe standörtliche als auch bestandesbezogene Anfälligkeit für Schnee- und Sturmschäden ausgewiesen wird.

Die relativ geringen Unterschiede hinsichtlich der Einschätzung des Vermehrungspotentials des Buchdruckers im Nationalpark sowie hohe standörtliche Sturmschadensprädisposition in höheren, exponierten Lagen einerseits und hohe Schneeschadensanfälligkeit der tieferen Lagen andererseits, führen im Gebiet des Nationalparks zu einer insgesamt wenig differenzierten standortsbezogenen Prädisposition für Buchdruckerbefall. Weite Teile des Nationalparks und der ÖBF-Waldflächen weisen überwiegend mittlere bis hohe Prädisposition bei gleichzeitig geringer Schwankungsbreite (nur Klassen von geringer bis hoher Prädisposition) auf.

Standörtlich hohe Prädisposition für Borkenkäferbefall ergeben sich insbesondere für thermal begünstigte, südlich exponierte Bereiche (Südseite des Sengsengebirges) bzw. tiefer gelegene, exponierte Standorte im Hintergebirge und Bodinggraben. Für Flächen außerhalb des Nationalparks bzw. der ÖBF-Waldflächen, für die keine Angaben zum Wasserhaushalt bzw. zur Bonität verfügbar waren, wird die standortsbezogene Prädisposition vergleichsweise höher eingeschätzt. Hierbei ergeben sich sehr hohe standörtliche Prädispositionen für Buchdruckerbefall nur für tiefer gelegene Standorte mit sehr hohem Vermehrungspotential und gleichzeitig hoher Sturm- bzw. Schneeschadensprädisposition.

Hohe bis sehr hohe bestandesbezogene Gefährdungsmomente für Buchdruckerbefall im Gebiet des Nationalparks ergeben sich für besonders fichtenreiche, lichte Altbestände. Größere, flächig zusammenhängende Bereiche mit hoher bis sehr hoher bestandesbezogener Prädisposition für Buchdruckerbefall treten im Gebiet des Nationalparks entlang der Südseite des Sengsengebirges und des Größtenberges, im Bereich Feichtau bis Hochsattel, sowie im Bereich Ebenforst auf. Das Hintergebirge ist in weiten Teilen eher geprägt durch eine höhere Strukturierung mit stetigem Wechsel unterschiedlicher Prädisposition. Größere, räumlich arrondierte Waldgebiete mit überwiegend sehr geringer bis mittlerer bestandesbezogener Prädisposition mit nur einzelnen „Fichtenfenstern“ treten im Bereich Bodinggraben, Weißenbachtal - Nordabhang Zöbelboden, Hintere Saigerin und im südöstlichen Bereich des Hintergebirges auf. Insgesamt werden anhand der Bestandeseigenschaften 19 % der Waldflächen im Nationalpark als sehr hoch, 32,8 % der Waldfläche als hoch prädisponiert für Borkenkäferbefall eingestuft.

Darüber hinaus sind die dem Nationalpark angrenzenden Waldflächen, insbesondere die Bereiche östlich des Hintergebirges (FV Steyr), der westliche Teil im Raum Ebenforst, Gebiete nördlich des Nationalparks (Vorderreuterstein, Ramsauer Größtenberg, Brauneben-Spitzberg, Windberg) und viele Flächen entlang der Südgrenze des Nationalparks, fichtendominierte Wälder mit entsprechend hoher bis sehr hoher, bestandesbedingter Gefährdung für Borkenkäferbefall. Für solche Bestände ist im Falle einer Borkenkäfergradation auf Grund des hohen Fichtenanteils mit einem flächigen Absterben zu rechnen. Bei Beständen mit mittlerer Gefährdung würde dagegen die Bestandesstruktur durch das Absterben befallener Fichten im Wesentlichen nicht gefährdet sein, da der Fichtenanteil in dieser Prädispositionsklasse im Mittel nur 2-3 Zehntel beträgt (Tab. 28). Bestände mit mittlerer Prädisposition könnten jedoch bei der Befallsausbreitung Brücken zwischen fichtendominierten, sehr hoch prädisponierten Waldflächen („Fichtenfenster“) darstellen. Bestände mit sehr geringer bis geringer Prädisposition stellen keine Gefahr für das Entstehen von Buchdruckergradationen dar. Die Klasse „sehr gering“

umfasst jedoch neben Nichtwaldflächen, Laubholzreinbeständen bzw. laubholzdominierten Beständen und mit sonstigen Nadelholzbaumarten (Lärche, Kiefer, Tanne) bestockte Flächen auch fichtenreiche Jungbestände (Baumalter <60 bzw. Jungwuchs, Dickungs- und Stangenholzbestände), die derzeit zwar kein oder nur ein geringes Risiko für Buchdruckerbefall darstellen, mittel- bis langfristig sich jedoch zu hoch bis sehr hoch prädisponierten Beständen entwickeln könnten. Der hohe durchschnittliche Fichtenanteil in dieser Klasse (63,3 %) weist auf diesen Umstand hin (Tab. 28). 62,5 % der Waldflächen im Nationalpark, die als gering bis sehr gering gefährdeten eingestuft werden und jünger als 60 Jahre sind, weisen einen Fichtenanteil von mehr als 5 Zehntel auf. Diese Jungbestände sind zwar aktuell für *Ips typographus* nicht befallstauglich, fichtenreiche Bestände im Dickungs- und Stangenholzalter sind jedoch für den Befall durch den Kupferstecher, *Pityogenes chalcographus* gefährdet.

Tab. 27: Relative Verteilung der Waldflächen im Nationalpark Kalkalpen über die unterschiedlichen Prädispositionsklassen für Buchdruckerbefall, Sturm- und Schneeschaden, getrennt für Standort und Bestand.

Klassen	Prädisposition					
	Buchdrucker		Sturm		Schneebruch	
	Bestand	Standort	Bestand	Standort	Bestand	Standort
sehr gering	18,1 [*]	0,0	15,1	0,0	17,4	0,0
gering	2,1	0,6	5,4	2,8	51,5	0,1
mittel	28,0	47,9	57,2	10,2	19,4	31,6
hoch	32,8	51,5	20,4	74,1	10,6	64,5
sehr hoch	19,0	0,0	1,8	12,9	1,1	3,8

(* davon 4,0 % Bestände ohne Fichte)

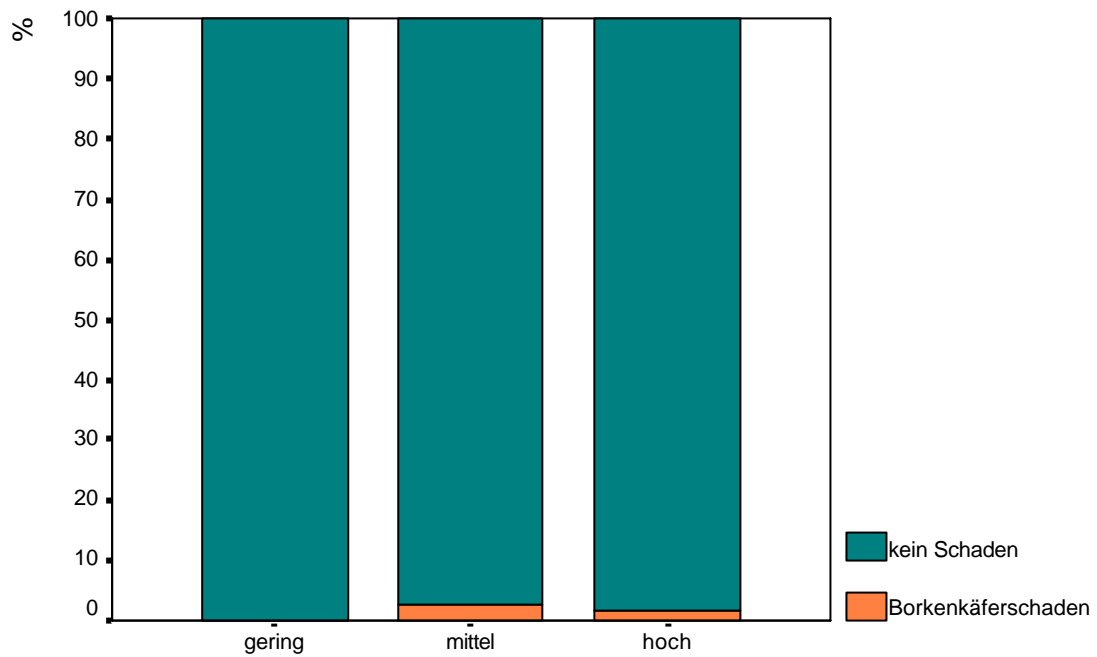
Tab. 28: Charakterisierung der standorts- und bestandesbezogenen Prädispositionsklassen für Buchdruckerbefall anhand der zur Prädispositionsabschätzung verwendeten Indikatoren auf Basis der Naturrauminventurdaten des Nationalparks Kalkalpen.

Prädisposition Buchdruckerbefall Bestand		Fichten- anteil	Baum- alter	Bestandes - dichte	Anteil vorherrschender /herrschender Fichten	Präd. Sturm	Präd. Schnee
Klassen		%	Jahre	%	%	Klasse	Klasse
sehr gering	Mittelwert	63,3	31,5	58,8	45,4	gering	gering
	± Stabw..	34,6	15,4	32,1	34,2		
gering	Mittelwert	12,0	101,6	71,8	15,2	gering	gering
	± Stabw.	10,0	54,0	19,3	20,8		
mittel	Mittelwert	26,3	142,1	71,2	31,2	gering	gering
	± Stabw.	15,9	49,4	22,3	29,2		
hoch	Mittelwert	67,8	133,0	65,7	57,6	mittel	gering
	± Stabw.	26,2	52,9	23,8	28,2		
sehr hoch	Mittelwert	86,9	166,3	32,0	77,5	hoch	gering
	± Stabw.	16,1	67,6	21,1	27,7		

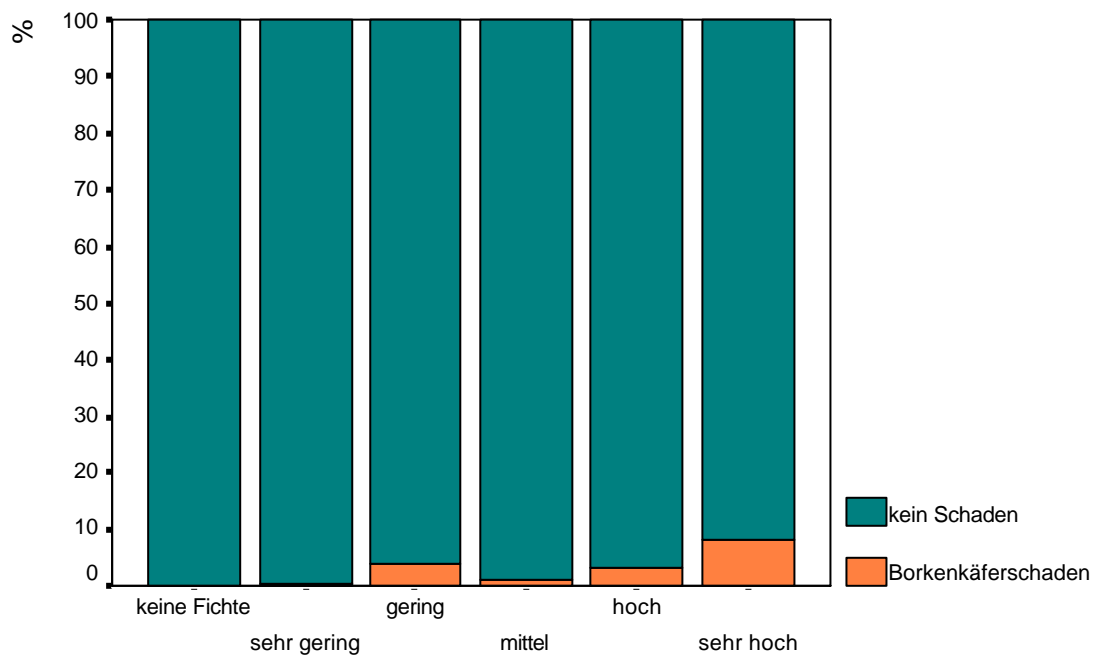
Prädisposition Buchdruckerbefall Standort		Generationen	Gelände- morphologie	Boden- wasser- regime	(pseudo)ver- gleyt	Ah- Horizont- mächtigkeit (cm)	Skelett- anteil (%)	Präd. Sturm	Präd. Schnee
Klassen					Median	Mittelwert ± Stabw.	Mittelwert ± Stabw.	Klasse	Klasse
gering		1 Gen. bis 2 Gen.+ Geschw.	indifferent	mäßig trocken- sehr frisch	nicht vorhanden	16,5	25,3		
						± 11,3	± 21,6	gering	hoch
mittel		1 Gen. bis 2 Gen.+ Geschw.	indifferent	trocken- naß	nicht vorhanden	13,5	31,7		
						± 10,5	± 24,3	gering	hoch
hoch		2 Gen. +Geschw.	überwiegend Oberhang /Kuppe /Plateau/ Kammlagen	trocken – frisch	vorhanden	7,5	36,0		
						± 6,2	± 22,8	mittel	hoch

Grundsätzliche Voraussetzung für eine Verifizierung der vorgenommenen Prädispositionsabschätzungen anhand eingetretener Schädigungen ist insbesondere bei sehr destruktiven Störfaktoren, dass das zu Grunde liegende Datenmaterial über den geschädigten Bestand den Zustand zum Zeitpunkt des Schadenseintritts wiedergibt. Die Verifizierung der Gefährdungsklassifikation erfolgte daher anhand der Befallsdaten und des Schadholzaufkommens im Nationalpark in den Jahren 2000 bis 2002. Generell ist dabei mit einer Zunahme der relativen Häufigkeit geschädigter Flächen mit zunehmender Gefährdung auszugehen. Die Verifikation anhand geschädigter Bestände im Nationalpark zeigt erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme der relativen Häufigkeit von Flächen mit Sturm-, Schneeschaden bzw. Borkenkäferbefall mit zunehmender standorts- bzw. bestandesbezogener Prädisposition (Abb. 33-35) und bestätigt damit die Plausibilität bzw. Trennschärfe

der vorgenommenen Gefährdungsklassifikationen. Allein der relativ hohe Anteil von Flächen mit Borkenkäferbefall in der Klasse mit geringer, bestandesbezogener Prädisposition entspricht nicht den Erwartungen. Dies könnte damit zusammenhängen, dass auch bei geringer Prädisposition eine Schädigung eintreten kann, wenn sich der Schadfaktor auf äußerst hohem Niveau bewegt (bspw. Stürme mit Orkanstärke, lokal hohe Populationsdichte des Buchdruckers). Ist der Schadfaktor zufällig nicht vorhanden, kann selbst bei sehr hoher Prädisposition kein Schaden eintreten. Das Auftreten eines Schadens ist daher nicht immer unmittelbar Folge einer hohen Prädisposition, obwohl die Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Prädisposition steigt. Die absolute Häufigkeit der Flächen über die Prädispositionsklassen beeinflusst selbst auch das Ergebnis der Verifikation anhand der relativen Häufigkeit geschädigter und nichtgeschädigter Bestände innerhalb der Prädispositionsklassen. Gemessen an der Gesamtanzahl der Flächen im Nationalpark haben die Bestände mit geringer Bestandesgefährdung für Buchdrucker nur einen sehr geringen Anteil von 2,1% (Tab. 27). Betrachtet man nur die geschädigten Flächen und deren Verteilung über die Prädispositionsklassen, ergibt sich für die bestandesbezogene Prädisposition für Buchdruckerbefall eine idealtypische, rechtsschiefe Verteilung (Abb. 36).

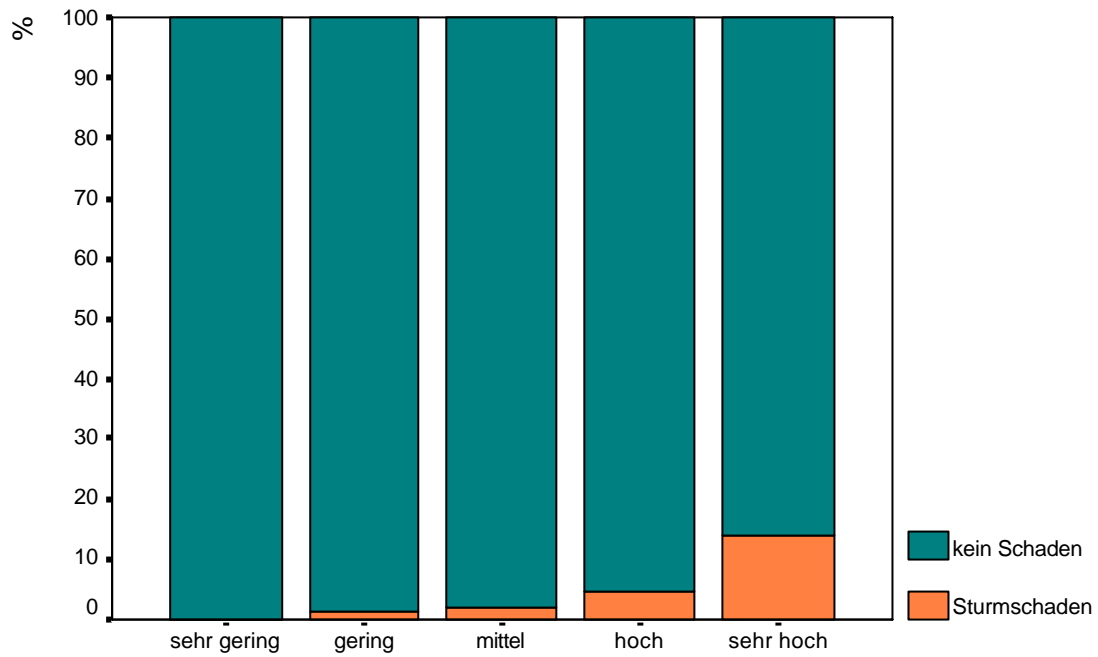


Prädisposition Buchdruckerbefall Standort

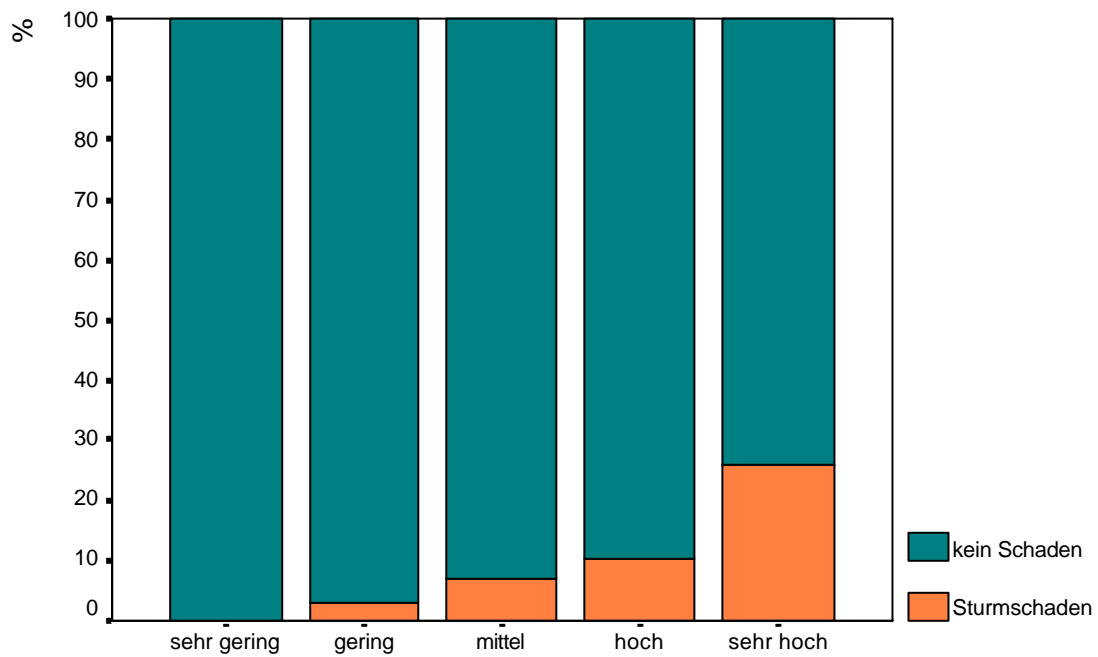


Prädisposition Buchdruckerbefall Bestand

Abb. 33: Relative Anteile von Flächen mit Borkenkäferbefall in den Jahren 2000 – 2003 im Nationalpark innerhalb der Prädispositionsklassen, getrennt für Standort und Bestand.

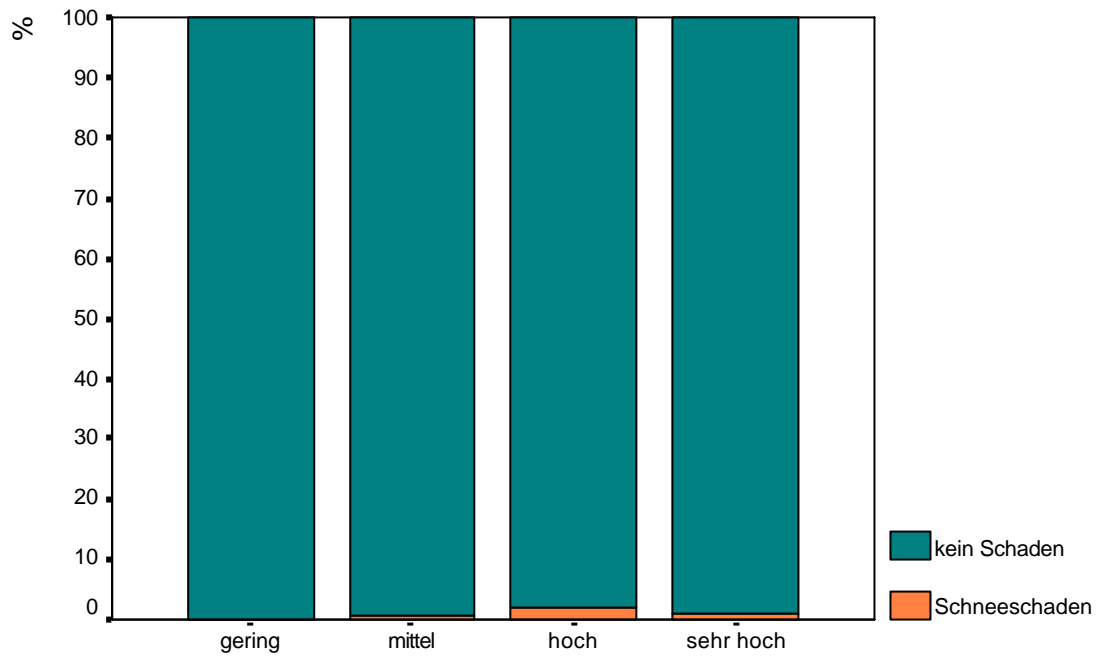


Prädisposition Sturmschäden Standort

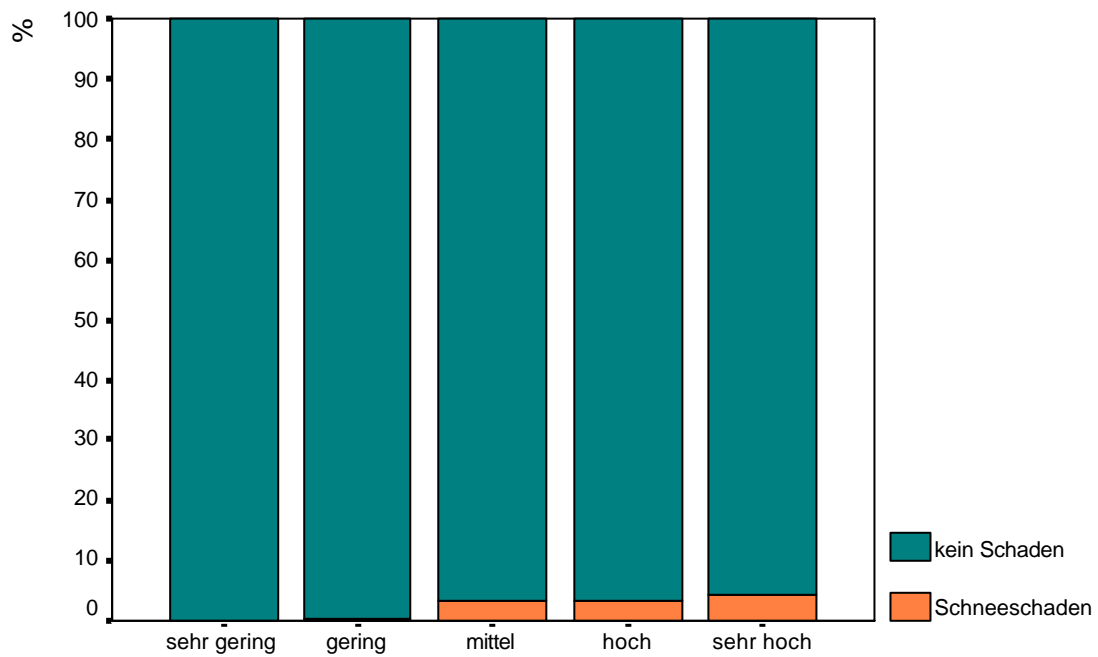


Prädisposition Sturmschäden Bestand

Abb. 34: Relative Anteile von Flächen mit Sturmschäden in den Jahren 2000 – 2003 im Nationalpark innerhalb der Prädispositionsklassen, getrennt für Standort und Bestand.



Prädisposition Schneebruch Standort



Prädisposition Schneebruch Bestand

Abb. 35: Relative Anteile von Flächen mit Schneeschaten in den Jahren 2000 – 2003 im Nationalpark innerhalb der Prädispositionsclassen, getrennt für Standort und Bestand.

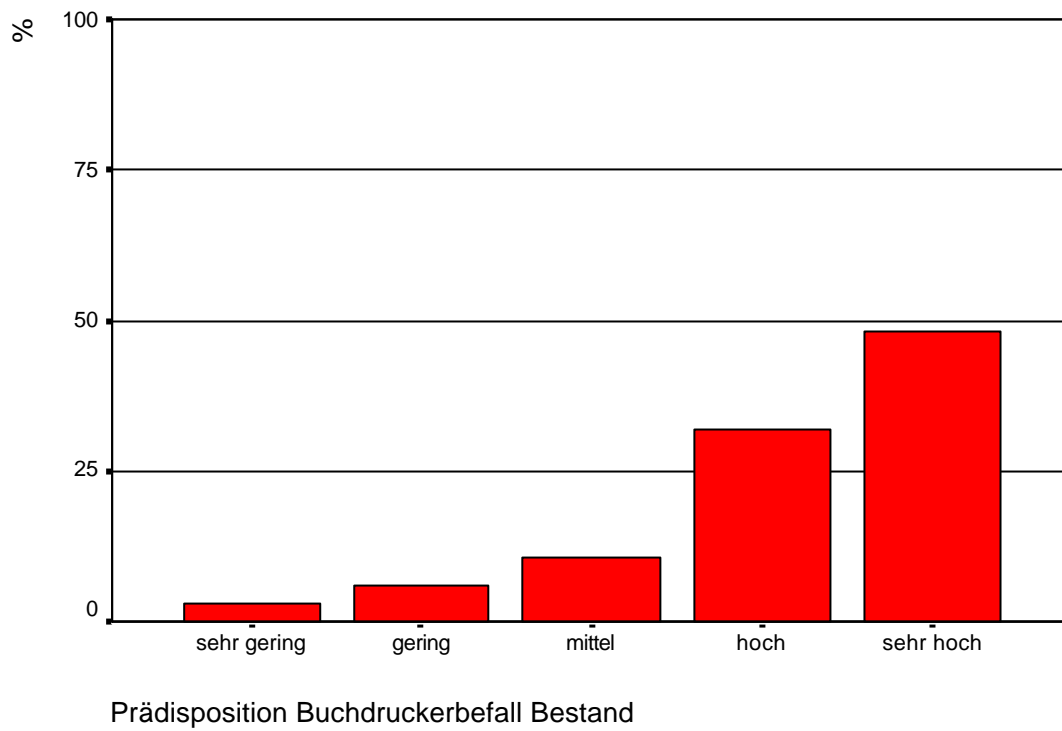


Abb. 36: Anzahl befallener Bestände innerhalb der Prädispositionsklassen, relativ zur Gesamtanzahl befallener Bestände (n=66).

4 Diskussion

4.1 Modellierung der Borkenkäferphänologie

Die thermalen Bedingungen sind neben dem Nahrungsangebot der bestimmende Faktor für die Entwicklung des Buchdruckers. Massenvermehrungen von *Ips typographus* werden begünstigt, wenn standörtliche Gegebenheiten und Witterungsverlauf eine rasche und möglichst verlustfreie Entwicklung ermöglichen. Dabei wird das Wachstumspotential der Käferpopulation von der Anzahl der in einer Vegetationsperiode möglichen Generationen und diese wiederum von den zur Wirkung kommenden effektiven Temperaturen unmittelbar beeinflusst (Führer und Coeln, 1998). Für die in der Rinde sich entwickelnde Borkenkäferbrut sind die Rindentemperaturen des Stammes liegender bzw. stehender Fichten relevant, wobei hier in Abhängigkeit von der direkten Sonneneinstrahlung und den lokalen Überschirmungsverhältnissen Temperaturen auftreten können, die das Niveau der Lufttemperatur weit übersteigen. Für die Entwicklung der Brut in der Rinde ist jedoch nicht der gesamte Bereich der möglichen Rindentemperaturen nutzbar. Die Entwicklungsrate wird sowohl im unteren als auch im oberen Temperaturbereich limitiert und nimmt nicht linear mit steigender Temperatur zu (Bentz *et al.*, 1991; Bolstad *et al.*, 1997; Wermelinger und Seifert, 1998; 1999; Logan und Bentz, 1999). Die Erstellung eines nichtlinearen Modells zur Simulation der Brutentwicklung auf Basis der von Wermelinger und Seifert (1998) ermittelten Kenndaten erbrachte im Vergleich zu allen Vorgängermodellen (Führer und Coeln, 1998; Netherer, 2003) eine signifikante Verbesserung der Präzision der Entwicklungsprognose. Die Gesamtentwicklung von Buchdruckerbruten, die noch in derselben Vegetationsperiode ihre Entwicklung vollenden, kann mit diesem Modell mit einer mittleren relativen Abweichung von der notwendigen Temperatursumme von nur 3,9%, die Entwicklungsdauer mit einer Abweichung von nur 1,5 Tagen prognostiziert werden. In mehr als 80% der Fälle kann mit diesem Modell für jeden Zeitpunkt das tatsächlich auftretende Entwicklungsstadium vorausgesagt werden, womit auch eine fundierte Einschätzung des möglichen Entwicklungsstandes am Ende der Vegetationszeit vorgenommen werden kann. Das Erreichen des Jungkäferstadiums bei sich sehr langsam entwickelnden oder sehr spät begonnenen Bruten wird als Kriterium für ein erfolgreiche Überwinterung herangezogen, da die präimaginalen Stadien aufgrund ihrer hohen Sensibilität gegenüber tiefen Temperaturen und Feuchte einer hohen Wintermortalität unterliegen (Faccoli, 2002; Netherer, 2003). Die Modellierung der Brutentwicklung geht von der am jeweiligen Standort maximalen Einstrahlung aus, die auf Freiflächen (nach Windwurf) bzw. auch bei stehenden Bäumen im oberen Kronenbereich relevant ist.

Die Modellierung des Schwärmbeginns im Frühjahr orientiert sich an einem auch durch viele andere Untersuchungen (insb. Lobinger, 1994) bestätigten Temperaturschwellenwertes (Tagesmaximum der Lufttemperatur mindestens 16,5 °C) für den Flug von *Ips typographus* sowie einer notwendigen Akklimatisierung der überwinternden Käfer (Zumr, 1982; Wegensteiner und Führer, 1991). Die Flugintensität im Frühjahr ist sehr stark von wechselnden Witterungsbedingungen beeinflusst. Das Schwärmen kann durch kühle bzw. regnerische Perioden in mehreren Etappen erfolgen (Zumr, 1982). Die Modellierung des Entwicklungsbeginns geht vom jeweils ungünstigsten Fall aus, also dem Zeitpunkt, zu dem die erste stärkere Schwärmphase der überwinternden Käfer zu einem Befall von befallstauglichen Fichten führt. Im Modell kann dieser Zeitpunkt mit einer Genauigkeit von $\pm 1,3$ Tagen bestimmt werden.

Nach der Anlage der ersten Brut im Frühsommer können die Parentalkäfer die Brut wieder verlassen und am selben Wirtsbaum (sofern nicht bereits vollständig besiedelt) oder neuen Bäumen eine oder mehrere sogenannte „Geschwisterbruten“ anlegen (Martinek, 1957; Thalenhorst, 1958). Eigenen Untersuchungen und Ergebnissen von Harding und Ravn (1985) zufolge, beginnen die Parentalkäfer in der Regel ihr Brutsystem zu einem Zeitpunkt zu verlassen, bei dem sich die Brut schon im Larvenstadium befindet. Auslösende Faktoren für dieses Verhalten dürften die für jede Brutfamilie limitierten Raum- und Nahrungsressourcen (Anderbrandt *et al.*, 1985) und die temporär im Befallsverlauf sich verschlechternde Nahrungs- und Habitatqualität der Rinde sein. Vereinzelt waren jedoch selbst dann noch Parentalkäfer in den Bruten zu finden, wenn sich bereits die ersten Jungkäfer vollständig entwickelt hatten und schlüpften. Im Modell wird die durchschnittliche relative Temperatursumme, bei der die Parentalkäfer an den untersuchten Fangbäumen ihre Bruten verließen, zur Berechnung des frühesten Zeitpunkts der Anlage einer Geschwisterbrut verwendet.

Erlauben die thermalen Bedingungen die Anlage von weiteren Folgegenerationen in derselben Vegetationsperiode (Geschwisterbruten bzw. Anlage einer 2. oder sogar 3. Generation), wirkt die hohe Wintermortalität präimaginaler Stadien von zu spät begonnenen Bruten bei *Ips typographus* extrem limitierend auf das Populationswachstum. Das Auftreten einer fakultativen, von äußeren Faktoren induzierten Diapause bei *Ips typographus* kann daher als Anpassung an ungünstige klimatische Bedingungen angesehen werden, die das Risiko von hohen Winterverlusten weitestgehend minimiert. Das Ausschlüpfen der Jungkäfer wird von der Tageslänge determiniert (Schopf, 1985, 1989). In Übereinstimmung mit

Ergebnissen von Doležal und Sehnal (2002) zeigte sich, dass im Untersuchungsgebiet der Buchdrucker bereits bei einer Tageslängen von weniger als 15 Stunden, weitgehend unabhängig vom weiteren Witterungs- und Temperaturverlauf, diapausiert. Das Ausschlüpfen der Käfer und die Anlage einer Folgegeneration erfolgt daher nur dann, wenn die Entwicklung der Brut und die Reifung der Jungkäfer noch bei Tageslängen von mehr als 15 Stunden abgeschlossen werden kann. Dies kann auch die von Jahr zu Jahr stark unterschiedlichen Anteile an diapausierenden Jungkäfern aus vergleichbarer Höhenlage und Exposition erklären, weil die jährlich schwankenden Witterungsbedingungen den früheren oder späteren Abschluss der Brutentwicklung und damit das Diapauseverhalten determinieren. Eine obligate Diapause des Buchdruckers wird nur für finnische Populationen beschrieben (Annala, 1969). Ob mitteleuropäische Herkünfte aus hochmontanen bis subalpinen Lagen auch eine obligate Reproduktionsdiapause durchführen, ist in Frage zu stellen. Offenbar kann bei günstigen Klimabedingungen (früher Schwärmbeginn, hohe Sommertemperaturen) zumindest von einem Teil der Population selbst in den Hochlagen mehr als nur eine Generation anlegt und diese bis zum Wintereinbruch erfolgreich abgeschlossen werden. Vergangene und gegenwärtige Massenvermehrungen des Buchdruckers in den Hochlagen und in Gebieten mit grundsätzlich rauem, kühlem Klimacharakter (Wild, 1953; Schopf und Köhler, 1995; Foster, 1993; Turcani und Novotny, 1999; Grodzki, 1999, Heurich *et al.*, 2001) können dadurch erklärt werden, dass fakultativ diapausierende, multivoltine Buchdruckerpopulationen sehr rasch durch die Anlage von Folgegenerationen auf günstige Temperaturbedingungen reagieren und ihre Populationsdichte erhöhen. Zudem ist neben der Lufttemperatur, die mit steigender Seehöhe generell abnimmt, die einstrahlungsbedingt höhere Rindentemperatur für die Entwicklung der Buchdruckerbruten in den Hochlagen von außerordentlicher Bedeutung.

Die Zunahme der Temperaturen im alpinen Raum als Folge der globalen Erwärmung und die Häufung von extremen Witterungskonstellationen in den letzten Jahren stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Auftreten von großräumigen Massenvermehrungen des Buchdruckers (Schopf, 1997; Kromp-Kolb, 2001; 2003). Im Bereich des Nationalparks traten in den letzten Jahren (2000-2003) erhebliche Abweichungen der Monatsmitteltemperaturen vom langjährigen Durchschnitt während der Vegetationszeit auf (Abb.37).

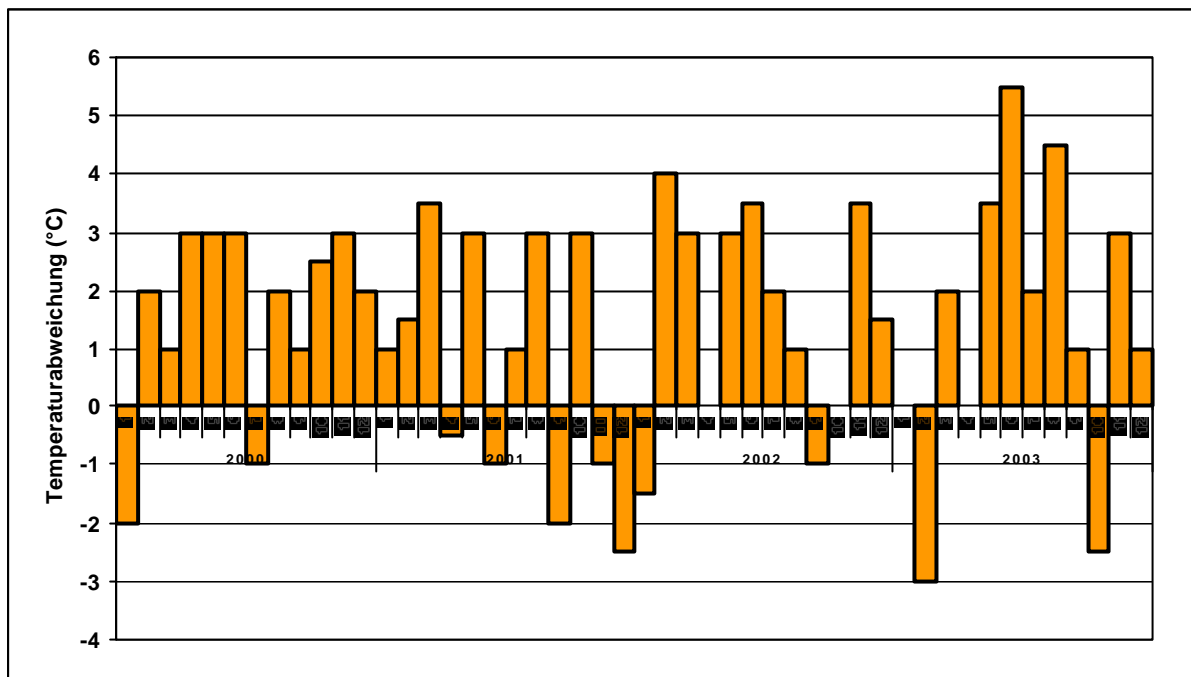


Abb. 37: Abweichungen der Monatsmittelwerte vom langjährigen Durchschnitt im Raum Nationalpark in den Jahren 2000 - 2003 (Datenquelle: <http://www.zamg.at>).

Insbesondere die asymmetrische Temperaturänderung im alpinen Raum mit stärker angestiegenen Tagesmaxima in größeren Höhenlagen (ZAMG, 2003) erhöht die Anzahl an potentiellen Schwärmtagen des Buchdruckers in montanen bis subalpinen Lagen erheblich und trägt hier zu einer rasanten Zunahme des Schadauftretens bei. Die anhand einer Simulationsstudie festgestellten Auswirkungen verschiedener Klimaänderungsszenarien auf den österreichischen Wald (Lexer *et al.*, 2002), insbesondere die prognostizierte hohe Baummortalität in Lagen unter 900 m Seehöhe sowie die graduelle Verschiebung der Baumartenanteile zugunsten von Laubholz, könnten durch Borkenkäferepidemien verstärkt und Veränderungen im Waldzustand beschleunigt werden. Eine geregelte Fichtenwirtschaft könnte damit bis in tiefmontane Lagen (bis 1150m Seehöhe) unmöglich werden. Vermehrte Borkenkäferschäden in den Hochlagen könnten die Schutzfunktion hochmontaner bis subalpiner Fichtenwälder entscheidend beeinträchtigen. Andererseits könnten auf Grund der generell hohen Variabilität des Klimas und der unsicheren Prognose künftiger Niederschlagsverhältnisse kühle, niederschlagsreiche Jahre insbesondere in den höheren Lagen zu einem raschen Zusammenbruch von Massenvermehrungen des Buchdruckers beitragen (Merker, 1952; Bakke, 1983).

Limitiert wird das temperaturabhängige Vermehrungspotential des Buchdruckers aber auch durch die Photoperiode. Doležal und Sehnal (2002) schränken den Reproduktionszyklus des Buchdruckers auf eine Tageslänge von mehr als 15

Stunden ein. Das entspricht in Mitteleuropa einem Zeitfenster von etwa Mitte April bis Mitte August. Der Buchdrucker kann demnach eine durch die Klimaerwärmung bedingte Verlängerung der Vegetationszeit nicht im vollen Umfang nutzen. Dem Zusammenspiel von Photoperiode, Temperatur- und Lichtreizen sowie Feuchte- bzw. Niederschlagsverhältnissen kommt bei der Induktion der Imaginaldiapause neben physiologisch-genetisch bedingten Populationseigenschaften eine besondere Rolle zu. Dies sollte, auch in Hinblick auf die möglichen Auswirkungen der Klimaerwärmung auf das Auftreten von *Ips typographus*, Gegenstand künftiger Forschungsvorhaben sein. Im gegenwärtigen Modell wird eine Tageslänge von 15 Stunden als limitierender Faktor für die Anlage von potentiellen Geschwister- und Filialgenerationen berücksichtigt.

Die erstellten Prognosemodelle für den Schwärm- und Befallsbeginn, für den Beginn der Anlage von Geschwister- und Folgebruten und für die Brutentwicklung sind zentrale Bausteine für die Simulation der potentiell möglichen Anzahl an Generationen. Das Vermehrungspotential des Buchdruckers wird anhand der durchschnittlichen potentiellen Anzahl an Generationen der letzten Jahre in weiten Teilen des Nationalparks als „hoch“ eingeschätzt. In tieferen Lagen des Nationalparks, aber insbesondere in den tiefergelegenen Standorten im Umfeld des Nationalparks, wird das Vermehrungspotential als „sehr hoch“ eingestuft. Die thermalen Gegebenheiten erlauben in diesen Bereichen vielfach die Ausbildung von 2-3 Generationen. Bereiche mit „mittlerer bis geringer Gefährdung“ treten großflächig nur in den höheren Lagen des Sengsengebirges, des Größtenbergs und der Gebirgsstöcke im Umfeld sowie kleinstandörtlich in besonders schattigen, nordexponierten Lagen auf. Dies verdeutlicht, dass nicht mehr nur die Fichtenbestände in den Tieflagen einem hohen Borkenkäfergradationsrisiko ausgesetzt sind, sondern dass auch die ehemals „sicheren“ hochmontanen bis subalpinen Fichtenwälder nunmehr mit einem hohen Aggressionspotential des Buchdruckers konfrontiert sind.

4.2 Prädisposition

Anhand der erarbeiteten Prädispositionsschlüssel wird versucht, die in der Literatur beschriebenen Zusammenhänge zwischen biotischen und abiotischen Schadauslösern und deren Zielorganismen (Bäume bzw. Waldbestände) ursachengerecht über eine entsprechende Zusammenstellung geeigneter Parameter wiederzugeben und durch die Vernetzung der einzelnen Prädispositionssysteme (Schnee – Sturm – Borkenkäfer) untereinander und mit den Ergebnissen der Borkenkäferentwicklungsmodellierung eine Abschätzung der potentiellen Gefährdung

für Borkenkäferbefall für den Nationalpark Kalkalpen vorzunehmen. Detaillierte Darstellungen bezüglich der Herleitung der Prädispositionsschlüssel und der Diskussion der gewählten Subkriterien und Indikatoren sind den Arbeiten von Wiefler (1998), Nopp (1999), Nopp *et al.* (2000), Führer und Nopp (2001) und Netherer (2003) zu entnehmen. Ein ähnliches Bewertungssystem, das Kriterien wie Baumalter und Laubholzanteil berücksichtigt, wird im Nationalpark Bayerischer Wald zur Abschätzung von potentiellen Gefährdungen für Buchdruckerbefall verwendet (Nüsslein, 1997; Faißt, 1999) und in Anlehnung an dieses in der Schweiz (neben anderen Kriterien) zur Entscheidungsfindung bei der Behandlung großer Windwurfflächen genutzt (BUWAL, 2000). Statistische Modelle zur Abschätzung der Borkenkäferbefallsdisposition (Negro, 1998; Shore *et al.*, 1999; Dutilleul *et al.*, 2000; Perkins und Reynolds, 2003) können zwar kausale Zusammenhänge aufzeigen, haben vielfach jedoch nur eine eingeschränkte räumliche und zeitliche Gültigkeit. Reynolds und Holsten (1994, 1996) verbinden statistische Modelle und empirisches Wissen zu einem Expertensystem zur Abschätzung der Befallsdisposition gegenüber *Dendroctonus rufipennis*, wobei - basierend auf dem bestehenden Wissen - entscheidende Faktoren (zB. Windwürfe, Bestandeszusammensetzung) entsprechend bewertet werden.

Die für den Nationalpark Kalkalpen dargestellten Prädispositionsabschätzungen geben die zum jetzigen Zeitpunkt bestehenden potentiellen Gefährdungen der Bestände und Standorte wieder. Mit steigender Prädisposition nimmt die Schadenswahrscheinlichkeit zu. Viele der relevanten Einflussfaktoren unterliegen aber einer hohen zeitlichen und räumlichen Dynamik und interagieren untereinander.

Das Eintreten eines Schadens selbst kann prädispositionssteigernden als auch senkenden Charakter haben. Zum Beispiel nimmt die Sturmschadensanfälligkeit nach einem Sturmereignis im Restbestand zu, dagegen sinkt die Schneebruchanfälligkeit nach Wipfelbruch aufgrund nunmehr günstigerer H/D-Werte. Insbesondere beeinflusst die jährlich schwankende Witterungssituation (Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung) nicht nur die Ausbreitung und Entwicklung der Käfer, sondern auch die Abwehrmechanismen und damit die aktuelle Befallsdisposition der Wirtsbäume. Die Prädisposition bezieht sich auf die gegebenen Eigenschaften des Standorts bzw. des Bestandes unabhängig von der Populationsdichte des Buchdruckers. Die Quantifizierung des Befallsrisikos setzt dagegen eine Evaluierung der Populationsdichte voraus. Neben den thermischen Bedingungen für die Ermittlung der Generationenzahl wäre für die Abschätzung der Populationsdichte auch die quantitative Kenntnis des Bruterfolges (Nachkommen pro Weibchen) und damit des Populationswachstums von besonderer Bedeutung. Die

Untersuchungen an Fangbäumen im Nationalpark zeigten hinsichtlich des Bruterfolgs eine extrem hohe Variabilität. In Abhängigkeit von der Nahrungsqualität der Fichtenrinde (Baier, 1996), Brutdichte (intraspezifische Konkurrenz) (Anderbrandt *et al.*, 1985), Konkurrenz mit anderen Arten (Kupferstecher, Bockkäfer), Wintermortalität (Faccoli, 2002) und Mortalität durch Antagonisten (Gjörffy, 1941; Nierhaus-Wunderwald, 1993; Wermelinger und Epper, 2002), Dispersionsverlusten sowie der physiologischen bzw. genetischen Kondition und Fitness der Parentalkäfer (Aggressivität) variiert das Populationswachstum des Buchdruckers sehr stark. Mit Ausnahme der Wintermortalität, die anhand der Brutentwicklungsmodellierung abgeschätzt wird (Erreichen des Jungkäferstadiums bis Ende Oktober als Limit für eine erfolgreiche Überwinterung der Brut), finden die meisten der oben genannten Faktoren im derzeit bestehenden Modell zur Abschätzung der Gefährdung für Buchdruckerbefall keine oder nur ungenügende Berücksichtigung. Dies ist der Fall, weil deren zeitliche Dynamik und räumliche, quantitative Wirksamkeit schwer darstellbar ist, keine Daten darüber verfügbar sind bzw. deren Einfluss auf das Entstehen von Buchdruckergradationen unklar bzw. nur lokal von Bedeutung ist. Viele dieser Einflussfaktoren können aber im Rahmen einer Bewertung vor Ort zur Gefährdungseinschätzung Berücksichtigung finden (vgl. BUWAL, 2000). Die Einbindung von Klimadaten in Verbindung mit bestehenden Prädispositionsabschätzungen in Form von „online“-Bewertungssystemen könnte eine Beurteilung der aktuellen Borkenkäferentwicklung und -befallsgefährdung ermöglichen. Eine dynamische Modellierung der Borkenkäferentwicklung in Verbindung mit Waldwachstumssimulatoren könnte die interaktive Dynamik von Insekten und Baumbestand und die daraus resultierende Waldentwicklung simulieren (vgl. Beukema *et al.*, 1997). Die Effekte des Klimawandels auf die Borkenkäferpopulationsdynamik und deren Auswirkungen auf die Waldentwicklung könnten damit besser abgeschätzt werden. Die entsprechende Parametrisierung eines solchen dynamischen Modells für *Ips typographus* sollte Gegenstand künftiger Forschungsvorhaben sein.

Die im Rahmen dieses Projekts vorgenommene Prädispositionsabschätzung und deren räumliche Darstellung ermöglicht aber die Einschätzung einer grundsätzlichen, standorts- und bestandesbedingten Gefährdung. Die Prädispositionsabschätzung ergab in Folge der hohen standörtlichen Prädisposition für Windwurf bzw. Schneebruch, dem hohen, klimatisch bedingten Vermehrungspotential des Buchdruckers und der gebietsweise hohen bis sehr hohen Prädisposition der Bestände ein hoch einzustufendes Gradationspotential im als auch außerhalb des Nationalparks. Auf Grund der Grenznähe von hoch bis sehr hoch prädisponierter, großflächig zusammenhängender Fichtenwaldbereiche (z.B. Südseite

Sengsengebirge, Feichtau-Hochsattel, Ebenforst) ist eine Beeinflussung angrenzender Waldgebiet im Falle einer Borkenkäfergradation im Nationalpark als sehr wahrscheinlich anzunehmen.

Grundsätzlich sind, entsprechend den IUCN-Kriterien, im Nationalpark keine forstlichen Eingriffe und Maßnahmen vorzunehmen. In Naturwäldern sind Störungen wie Sturmwurf und Borkenkäferkalamitäten ein ganz wesentlicher Bestandteil der natürlichen Waldentwicklung und geben Anstoß zur Erneuerung von Waldbeständen (Lorimer und Frelich, 1994). Die Begriffe „Schaden“ bzw. „Schädling“ entspringen einer anthropozentrischen Sichtweise. Der mit der natürlichen Dynamik von Fichtenwäldern verbundene, flächige Zerfall führt in Mitteleuropa zu Konflikten mit verschiedenen gesellschaftlichen Anforderungen an den Wald und ökonomischen Zielsetzungen.

Im Naturwald kann es in Abhängigkeit von prädisponierenden Faktoren im Falle einer Kalamität prinzipiell zu zwei unterschiedlichen Ereignisverläufen kommen:

1. Die Populationsdichte von *Ips typographus* steigt kurz nach einem Kalamitätsereignis (Windwurf, Schneebruchereignis) an, ebbt aber bald aufgrund ungünstiger Habitatbedingungen und dem raschen Wirksamwerden natürlicher Regelmechanismen ab.
2. Ein Kalamitätsereignis löst den Anstieg der Buchdruckerpopulationsdichte aus, aufgrund förderlicher bestandesstruktureller Gegebenheiten kommt es immer wieder zu Neubefall und der epidemische Zustand bleibt über Jahre erhalten (z.B. Nationalpark Bayerischer Wald).

Schutzgebiete bzw. „Urwälder“ mit großen Differenzen bezüglich Baumartenzusammensetzung, Alters- und Bestandesstruktur, sehr heterogenen Strukturen und hoher Diversität (z.B. Urwald Rothwald) bieten für den Buchdrucker, selbst bei größeren Windwurfereignissen, nur ein zeitlich wie räumlich sehr eingeschränktes Habitat (Spörk, 1992). Schadereignisse und Befall durch den Buchdrucker kann die Strukturen und die Funktionalität des Ökosystems nicht gefährden, das zyklische Auftreten von Borkenkäferbefall selbst beeinflusst wiederum auch die Populationsdichte von Antagonisten und kann die vielfach signifikant höhere Dichte und Artenvielfalt von Antagonisten in „Urwäldern“ erklären (Spörk, 1992; Scherzinger, 1996; Weslien und Schroeder, 1999).

Letzterer Fall führt jedoch zu einer kontinuierlichen Ausweitung der Befallsflächen und wird in großflächigen, wenig strukturierten Fichtenwaldökosystemen im Wesentlichen nur durch die Befallsdisposition der Bestände und durch

Witterungsfaktoren limitiert (Sanders, 1987; Schwenke, 1996; Wermelinger *et al.*, 1999; Heurich *et al.*, 2001; Jakuš *et al.*, 2002). Die Bedeutung des Antagonistenkomplexes als Regulationsfaktor wird allgemein als nicht sehr hoch eingeschätzt (Nierhaus-Wunderwald, 1993; Schwenke, 1996; Lawson *et al.*, 1997; Weslien und Schroeder, 1999; Heurich *et al.*, 2001).

Nach Wichmann und Ravn (2001) kann eine Buchdruckerpopulation neue Befallsherde bis zu 500 m Distanz vom alten Brutplatz etablieren. Passive Verfrachtung mit dem Wind und Überflüge vom Brutplatz in andere, auch räumlich voneinander getrennten Waldflächen dürften die Regel sein (Sanders, 1987; Zumr, 1992; Duelli *et al.*, 1997; Byers, 2000). Die Dispersion führt zwar zu einer Ausdünnung der Population, sie wird aber auch von der Attraktivität (Primärattraktion anhand optischer Kriterien und wirtsbaumbürtiger Duftstoffe) befallstauglicher Bäume bzw. Bestände gelenkt. Uniforme Bestände, die großflächig prädisponierende Eigenschaften aufweisen, begünstigen deshalb großräumige Gradationen (Bakke, 1983; Vité, 1984; Berryman, 1988).

Im Gegensatz zum unbewirtschafteten Naturwald wird durch sanitäre, forstliche Eingriffe im bewirtschafteten Wald (Entzug von bruttauglichem Material, Entnahme des befallenen Holzes, Abfangen der Käfer) versucht, diesen Expansionsprozess zu unterbinden, Folgebefall und die Ausbreitung der Buchdruckergradation zu vermindern. Die „Saubere Waldwirtschaft“ umfasst dabei alle präventiven und kurativen Maßnahmen, die im bewirtschafteten Wald helfen, Borkenkäfergradationen zu vermeiden. Die Unterlassung waldhygienischer Maßnahmen stellt einen wesentlichen, prädisponierenden Faktor für Massenvermehrungen des Buchdruckers dar (Bakke, 1983; Eidmann, 1992).

Relativierend müssen mögliche nachteilige Effekte forstlicher Eingriffe angeführt werden. Eingriffe in das Bestandesgefüge können auch zu einer Destabilisierung und erhöhten Anfälligkeit für Windwurf und zu einer Verbesserung des Mikroklimas für den Buchdrucker führen. Beschädigungen des verbleibenden Bestands, Wurzelschäden und Bodenverdichtung und in Folge verstärktes Auftreten von Stamm- und Wurzelkrankheiten vermindern die Bestandesvitalität weiter (Nebeker und Hodges, 1983). Durch das Entfernen von mit Borkenkäfern befallenen Bäumen im Zuge von Bekämpfungsmaßnahmen werden gleichzeitig auch deren natürlichen Feinde entfernt (Vité, 1975), besonders fatal sind Beifänge von Antagonisten in Pheromonfallen. Dem Belassen des vom Buchdrucker bereits verlassenen Brutmaterials kommt daher bei der Förderung von wenig spezialisierten räuberischen, parasitischen und pathogenen Arten eine wichtige Rolle zu, da viele

dieser Organismen eine asynchrone Entwicklung im Vergleich zum Buchdrucker haben (Wermelinger *et al.*, 2002).

Stehendbefall nach Windwurfkatastrophen in Fichtenwäldern kann zwar durch Waldschutzmaßnahmen kaum verhindert werden, aber selbst unter desaströsen Bedingungen können zeitgerecht, umsichtig durchgeführte kurative Maßnahmen den weiteren Befallsverlauf entscheidend beeinflussen (Forster *et al.*, 2002).

Die Prädispositionsabschätzungen für die Wälder des Nationalparks und seiner Umgebung kann als Entscheidungshilfe für das Nationalparkmanagement bei der räumlichen Planung, bei der Prioritätenreihung und Umsetzung von Maßnahmen des präventiven Waldumbaus und des kurativen Waldschutzes Anwendung finden. Anhand der Prädispositionsabschätzung können unter anderem für den Waldumbau und für kurative Waldschutzmaßnahmen folgende Schlüsse abgeleitet werden:

- Flächen mit geringer standörtlicher Prädisposition schließen Maßnahmen *a priori* aus.
- Flächen mit sehr geringer bis mittlerer bestandesbedingter und mittlerer bis hoher standörtlicher Prädisposition schließen Maßnahmen aus, sofern es sich nicht um standortsfremde, fichtenreiche jüngere Waldflächen handelt, die sich mittel- bis langfristig zu hoch prädisponierten Beständen entwickeln könnten (präventiver Waldumbau).
- Bei Flächen mit hoher bis sehr hoher bestandesbedingter Gefährdung und mittlerem bis hohem Prädispositionsniveau von Standortsseite können Maßnahmen unterbleiben, sofern es sich um grenzferne Bereiche oder um kleine, isolierte, von Beständen sehr geringer bis mittlerer Prädisposition weitgehend umschlossenen Waldflächen handelt. Maßnahmen können auch dann unterbleiben, wenn keine unmittelbare Gefährdung von Waldflächen ausserhalb des Nationalparks besteht.
- Bei großflächig zusammenhängenden Waldbeständen hoher bis sehr hoher bestandesbedingter Gefährdung und mittlerem bis hohem standörtlichem Prädispositionsniveau im grenznahen Bereich wäre mit geeigneten Maßnahmen Schäden vorzubeugen und ein intensives Monitoring zu betreiben. Im Schadensfall wären adäquate Maßnahmen zu treffen, die eine unkontrollierte Ausbreitung von Borkenkäferbefall verhindern, sofern nicht gewichtige Gründe des Naturschutzes, der Sicherheit, der arbeitstechnischen Machbarkeit und Zumutbarkeit entgegen sprechen.

Kalamitäten, hervorgerufen durch extreme Witterungserscheinungen, betreffen vielfach große Regionen, großflächige Gradationen des Buchdruckers können auch die Summe lokaler Epidemien sein. Die Auswirkungen des Klimawandels stellen die Fichtenforstwirtschaft, aber auch die nachhaltige Entwicklung hochmontaner bis subalpiner Schutzwaldbestände zunehmend in Frage, wobei viele kausale Zusammenhänge und biologisch-ökologische Wirkungsmechanismen sowie deren Konsequenzen für den Waldschutz schwer abschätzbar sind (Führer, 1993; 2000). Es ist zu erwarten, dass die Aufwendungen finanzieller und personeller Ressourcen für kurative Waldschutzmaßnahmen in Folge der Auswirkungen des Klimawandels exponentiell zunehmen werden. Daher sind präventive Maßnahmen zur Schadensvermeidung, die sich an ökologischen Zielvorgaben zur nachhaltigen Erhaltung der Stabilität und Funktionalität von Waldökosystem orientieren, in verstärktem Maß in den Vordergrund zu stellen sind. Die Ergebnisse dieses Projekts unterstreichen den dringenden Forschungs- und Handlungsbedarf in diesen Fragen.

Zusammenfassung

Borkenkäfermassenvermehrungen sind ein wesentlicher Störungsfaktor in der natürlichen Entwicklung und Dynamik von fichtenreichen Waldökosystemen. Der Buchdrucker, *Ips typographus*, kann großräumige Massenvermehrungen durchführen, wobei auch vital erscheinende Bäume und Bestände durch Massenaggregation großflächig zum Absterben gebracht werden können. Kalamitäten, wie Windwurf und Schneebruch, sind häufig auslösende Faktoren für Massenvermehrungen des Buchdruckers, wobei im bewirtschafteten Wald durch Waldschutzmaßnahmen versucht wird, diese natürliche Populationsdynamik des Käfers weitgehend zu unterbinden. Schutzgebiete mit hohem Fichtenwaldanteil, in denen keine Kontrollmaßnahmen durchgeführt werden, stellen daher besonders in kleinstrukturierten Landschaften Mitteleuropas prinzipiell eine Gefahr für Massenvermehrungen von Forstschädlingen dar, die auch auf angrenzende, benachbarte Waldgebiete übergreifen können.

Ziel dieses Projekts war daher die Entwicklung und Anwendung von Monitoring-, und Risikoschätzsystemen zur Darstellung der für Buchdruckerbefall potentiell gefährdeten Standorte und Bestände im Bereich des Nationalparks Kalkalpen als Entscheidungshilfe für die Herleitung von für den Nationalpark adäquaten Managementstrategien.

Die direkte Abhängigkeit der Entwicklung des Buchdruckers von der Temperatur ermöglicht die Erstellung eines Modells zur Überwachung und Abschätzung der potentiellen Generationsentwicklung im Gelände. Anhand der Messdaten des Nationalparks wurde ein Topoklimamodell erstellt, mit dem sowohl der Schwärmbeginn im Frühjahr, der Zeitpunkt der Anlage von Geschwister- und Filialgenerationen als auch die Brutentwicklung berechnet werden können. Für die Brutentwicklung sind insbesondere die Rindentemperaturen relevant, die in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung modelliert wurden. Die Kenntnis der Temperatursummen, die für die Vollendung der Entwicklung einzelner Stadien bzw. der Gesamtentwicklung des Buchdruckers notwendig sind, ermöglicht eine präzise Abschätzung der Entwicklung. Dabei ist die Entwicklung der Brut in der Rinde im unteren als auch im oberen Temperaturbereich limitiert (Entwicklungsnullpunkte) und nimmt nicht linear mit steigender Temperatur zu. Ein wesentlicher begrenzender Faktor für die Vermehrung des Buchdruckers ist die Tageslänge, da die Reproduktionsphase des Buchdruckers auf Tageslängen von mehr als 15 Stunden, d.h. auf einen Zeitraum von Mitte April bis Mitte August eingeschränkt ist. Die Modellierung und Bewertung der potentiell möglichen

Generationen ergab für den Nationalpark und seiner Umgebung ein hohes bis sehr hohes Vermehrungspotential des Buchdruckers, wobei selbst in höheren Lagen aufgrund der warmen Witterungsbedingungen in den letzten Jahren Geschwisterbruten und mitunter auch zwei Generationen erfolgreich abgeschlossen werden können.

Das wissensbasierte Schätzsystem zur Herleitung der Prädisposition von Waldstandorten und Beständen gegenüber *Ips typographus* basiert auf der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit von Befall durch die Konstellation verschiedenster Umweltfaktoren beeinflusst wird. Neben dem Vermehrungspotential des Buchdruckers werden auch standörtliche und bestandesbezogene Faktoren, wie Niederschlagsverhältnisse, Bodenwasserhaushalt, Skelettgehalt, Bodengründigkeit, Geomorphologie, Fichtenanteil, Bestandesalter (Entwicklungsphase), Bestandesdichte und Bestandesstruktur sowie die Prädisposition für Sturm- und Schneeschäden herangezogen und ursachengerecht gewichtet. In Folge der hohen standörtlichen Prädisposition für Windwurf bzw. Schneebruch, dem hohen, klimatisch bedingten Vermehrungspotential des Buchdruckers und der gebietsweise hohen bis sehr hohen Prädisposition der Bestände besteht sowohl im als auch außerhalb des Nationalparks ein stark einzustufendes Gradationspotential. Auf Grund der Nähe gefährdeter, großflächig zusammenhängender, fichtenreicher Altbestände ist, im Falle einer Borkenkäfergradation im Randbereich des Nationalparks, eine Beeinflussung angrenzender Waldgebiet außerhalb des Nationalparks als sehr wahrscheinlich anzunehmen.

Die Bewertung und räumliche Darstellung der Prädisposition für Borkenkäferbefall und für Sturm- und Schneeschäden als auslösende Störungsfaktoren stellt eine wesentliche Entscheidungshilfe für das Nationalparkmanagement bei der räumlichen Planung, bei der Prioritätenreihung und Umsetzung von Maßnahmen des präventiven Waldumbaus und des kurativen Waldschutzes dar. Das entwickelte Modell eröffnet einen breiten Anwendungsbereich in der forstlichen Praxis, z.B. für das Monitoring der Borkenkäferentwicklung, für die Festlegung von realisierbaren Bewirtschaftungszielen im Rahmen der waldbaulichen Planung, für die Änderung oder Adaptierung von Forstschutzmaßnahmen. Aus wissenschaftlicher Sicht ermöglicht die retrospektive Betrachtung der Populationsentwicklung sowie die Eingabe von Szenarien ein tieferes Verständnis multikausaler Ursachenkomplexe für das Entstehen und den Verlauf der Ausbreitung von Borkenkäferkalamitäten sowie eine fundierte Abschätzung zukünftiger Entwicklungen und Wirkungsmechanismen.

Abstract

Bark beetle epidemics are important biotic disturbances within the natural development and dynamics of spruce-dominated forest ecosystems. The European spruce beetle, *Ips typographus*, can kill otherwise unstressed trees in mass attacks; outbreaks of this insect are responsible for tree death at landscape-level. Abiotic disturbances, such as wind and snow breakage, can trigger bark beetle epidemics; in managed forests, however, protective measures control the bark beetle populations. In unmanaged reserves with spruce-dominated, old growth forests, where no human intervention is allowed, epidemics of bark beetles may create a hazard as such large populations may spread to neighbouring managed forests.

The objectives of this study were to develop models for monitoring generation development and bark beetle phenology and to evaluate a knowledge-based system for risk assessment of bark beetle outbreaks as a basic, GIS-supported tool for bark beetle management and decision making at Kalkalpen National Park.

The development of bark beetles is directly temperature-dependent. Based on climatic recordings at Kalkalpen National Park, a topoclimatic model has been established, which is used for prognosis of spring swarming, start of sister broods and filial generations and for estimating brood development. Most important for brood development is the temperature of the bark, which depends on air temperature as well as direct solar irradiation. Brood development can be estimated using upper and lower temperature thresholds and a nonlinear function for calculation of effective temperatures and heat sums, which are necessary for successful development. The reproductive phase of *Ips typographus* is limited by a minimum day length of 15 hours. Thus, reproduction is restricted to the period from mid April to mid August. Modelling and classification of bark beetle phenology showed a high potential reproduction rate within and outside of the Kalkalpen National Park. The high reproductive rate, due to successful establishment of sister broods and occasional occurrence of a second generation even at high elevations is related to favourable weather conditions during the last years, early onset of swarming, and high bark temperatures affected by insulation.

The knowledge-based system for classification of outbreak risks synthesizes our current understanding of factors controlling bark beetle populations. The system is based on the concept, that site- and stand specific characteristics determine the probability of infestation; a relative importance is assigned to each factor driving outbreaks. The risk assessment revealed a high risk of bark beetle infestation,

related to high site-specific susceptibility to storm damage and snow breakage as well as high reproductive potential of *Ips typographus* and regionally clustered old-growth spruce stands. Most of the highly and extremely susceptible spruce stands are located near the boundaries of the national park. Therefore, it is very probable, that outbreaks within the national park create hazards for neighbouring managed forests.

The classification and spatial analysis of the susceptibility to storm damage, snow breakage and bark beetle infestation will be a valuable tool for decision making in forest protection and regional planning of the national park. Risk assessment and modelling of bark beetle phenology can also be used by foresters for insect monitoring and for silvicultural decision making and stand management. Applications like retrospective analysis of population dynamics as well as drawing of scenarios are possibilities for a better understanding of complex ecological interactions involved in bark beetle outbreaks.

Danksagung

Die Arbeiten im Rahmen dieses Projekts wurden dankenswerterweise vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie vom Nationalpark Kalkalpen finanziell unterstützt. Dank gebührt den Österreichischen Bundesforsten für die geleistete materielle und personelle Unterstützung ebenso wie den wissenschaftlichen Partnern, dem Institut für Fernerkundung (Universität für Bodenkultur Wien) für die Bereitstellung der Satellitenbilddaten und Leopold Riedl vom Institut für Regionalplanung (TU Wien).

5 Literatur

- Anderbrant, O., Schlyter, F., Birgersson, G., 1985. Intraspecific competition affecting parents and offspring in the bark beetle *Ips typographus*. *Oikos*, 45, 89-98.
- Annala E., 1969. Influence of temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae). *Ann. Zool. Fennici* 6, 161-208.
- Baier, P., 1996. Auswirkungen von Vitalität und Brutbaumqualität der europäischen Fichte, *Picea abies*, auf die Entwicklung der Borkenkäfer-Art *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae). *Entomol. Gener.* 21 (1/2), 27-35.
- Bakke, A., 1983. Host tree and bark beetle interaction during a mass outbreak of *Ips typographus* in Norway. *Z. ang. Ent.*, 96, 118-125.
- Bentz, B., Logan, J., Amman, G., 1991. Temperature-dependent development of the Mountain Pine beetle (Col., Scol.) and simulation of its phenology. *Can. Ent.*, 123, 1083-1094.
- Berryman, A.A., 1986. Forest insects. Principles and practice of population management. Plenum Press, New York and London. 279 S.
- Beukema, S.J., Greenough, J.A., Robinson, D.C.E., Kurz, W.E., Smith, E.L., Eav, B.B., 1997. The Westwide Pine Beetle Model: A Spatially-Explicit Contagion Model. <http://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/>.
- Bolstad, P.V., Bentz, B.J., Logan, J.A., 1997: Modelling micro-habitat temperature for *Dendroctonus ponderosae* (Coleoptera: Scolytidae). *Ecol. Modell.*, 94, 287-297.
- BUWAL, 2000. Entscheidungshilfe bei Sturmschäden im Wald. Bundesamt f. Umwelt, Wald und Landschaft. <http://www.buwat.ch>.
- Byres, J.A., 2000. Wind-aided dispersal of simulated bark beetles flying through forests. *Ecol. Modell.*, 125, 231-243.
- Dolezal, P., Sehna, F., 2003. Imaginal diapause in the bark beetle *Ips typographus*. In: McManus, M.L. & Liebhold, A.M. (ed.) Proceedings: Ecology, Survey and Management of Forest Insects. USDA Forest Service, Northeastern Research Station, GTR-NE 311, 127.
- Dutilleul, P., Nef, L., Frigon, D., 2000. Assessment of site characteristics as predictors of the vulnerability of Norway spruce (*Picea abies* Karst.) stands to attack by *Ips typographus* L. (Col., Scol.). *J. Appl. Ent.* 124; 1-5.
- Duelli, P., Zaradnik, M., Knizek, M., Kalinova, B., 1997. Migration in spruce bark beetles (*Ips typographus* L.) and the efficiency of pheromone traps. *J. Appl. Ent.*, 121, 297-303.
- Eidmann, H.H. 1992. Impact of bark beetles on forests and forestry. *J. Appl. Ent.* 114, S. 193-200.
- Faccoli, M., 2002. Winter mortality in sub-corticulous populations of *Ips typographus* (Col.:Scol.) and its parasitoids in the south-eastern Alps. *J. Pest. Sciences*, 75, 3, 57-88.
- Forster, B., Meier, F., Gall, R., 2002. Bark beetle management after a mass attack – some swiss experiences. In: McManus, M.L. & Liebhold, A.M. (ed.): Ecology, Survey and Management of Forest Insects. USDA Forest Service, Northeastern Research Station, GTR-NE 311, 10-15.

- Franklin, A.J., Debruyne, C., Grégoire, J.C., 2000. Recapture of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) with attractants of low release rates: localized dispersion and environmental influences. *Agr.For.Ent.*, 2, 259-270.
- Führer E., 1993. Borkenkäfer-Kalamitäten im Lichte des forstwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsprinzips. Dimensionen d. Nachhaltigkeit; XX. Tagung Fachgruppe Wald- u. Holzwissenschaften, Univ. f. Bodenkultur, Wien; S.62-69
- Führer, E., 2000. Forest functions, ecosystem stability and management. In: Pathways to the wise management of forests in Europe. *Forest Ecol. and Man.*, Special Issue
- Führer E. und Coeln, M., 1998. Thermoenergetisches Modell zur Fernüberwachung der Borkenkäferentwicklung. *AFZ/Der Wald* 2, 59-62.
- Führer, E., Nopp, U., 2001. Ursachen, Vorbeugung und Sanierung von Waldschäden. *Facultas, Vienna*, 514p.
- Faißt, G., 1999. GIS-supported analysis of the bark beetle (*Ips typographus*) calamity in the National Park "Bayerischer Wald". *Proceedings: Remote Sensing and Forest Monitoring*, June 1999, Rogow, Polen. <http://www.rogow99.sggw.waw.pl>.
- Forster, B., 1993. Entwicklung der Borkenkäfersituation in den Schweizer Sturmschadensgebieten. *Schweizerische Zeitung f. Forstwesen*, S. 767-776.
- Grodzki, W., 1999. Phytosanitary situation in Polish mountain forests in 1998 and forecast for 1999. *Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe. Proceedings of the second workshop of the IUFRO Working Party 7.03.10, April 20-23, Sion- Chateauneuf, Switzerland.*
- Györfi, J., 1941. Insektenfeinde der Borkenkäfer Ungarns. *Erdészeti Kisérletek* 43, S.32-50
- Harding, S., Ravn, H., 1985. Seasonal activity of *Ips typographus* in Denmark. *J. Appl. Ent.* 99, 123-131.
- Heurich, M., Reinelt, A., Fahse, L., 2001. Die Buchdruckermassenvermehrung im Nationalpark Bayerischer Wald. In: Heurich, M. (ed.): *Waldentwicklung im Bergwald nach Windwurf und Borkenkäferbefall. Nationalpark Bayerischer Wald Wissenschaftliche Reihe*, 14, 9-48.
- Jakuš, R., Grodzki, W., Ježík, M., Jachym, M., 2002. Definition of Spatial Patterns of Bark Beetle *Ips typographus* (L.) Outbreak Spreading in Tatra Mountains (Central Europe), Using GIS. In: McManus, M.L. & Liebhold, A.M. (ed.): *Ecology, Survey and Management of Forest Insects. USDA Forest Service, Northeastern Research Station, GTR-NE 311*, 25-32.
- Kromp-Kolb, H., 2001. Was wir über den Klimawandel wissen. *Wissenschaft&Umwelt* 2001, Interdisziplinär Nr.4, 3-10.
- Kromp-Kolb, H., 2003. Auswirkungen des Klimawandels auf die Tierwelt – derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich. *Projektendbericht. Institut für Meteorologie und Physik, BOKU Wien*, S.141.
- Lactin, D.J., Holliday, N.J., Johnson, D.L., Craigen, R., 1995. Improved Rate Model of Temperature-Dependent Development by Arthropodes. *Env. Ent.*, 24, 1, 68-75.

- Lawson, S.A., Furuta, K., Katagiri, K., 1997. Effect of natural enemy exclusion on mortality of *Ips typographus japonicus* Nijima (Col. Scol.) in Hokkaido, Japan. J. Appl. Ent. 121, 89-98.
- Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheifinger, H., Matulla, Ch., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., Englisch, M., (2002). The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climate change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. For. Ecol. Manage., 162, 53-72.
- Lobinger G., 1994. Die Lufttemperatur als limitierender Faktor für die Schwärmaktivität zweier rindenbrütender Borkenkäferarten, *Ips typographus* L. und *Pityogenes chalcographus* L. Anz. Schädlingsskde., 14-17.
- Logan, J.A., Wollkind, D.J., Hoyt, S.C., Tanigoshi, L.K., 1976. An Analytic Model for description of Temperature Dependent Rate Phenomena in Arthropods. Env. Ent., 5, 6, 1133-1140.
- Logan, J., Bentz, B., 1999. Model analysis of Mountain Pine Beetle (Col., Scol.) seasonality. Env. Ent., 28, 924-934.
- Lorimer, C.G., und Frelich, L.E., 1994. Natural Disturbance Regimes in Old-Growth Northern Hardwoods. Journal of Forestry, 33-38.
- Martinek, V., 1957. Zur Frage der sogenannten Geschwisterbrut beim Fichtenborkenkäfer (*Ips typographus* L.) in Gebirgs- und Hügellgebieten. Sammlung der CSSR Akad.-Landwirtsch. Wissenschaften, Abt. Forstwesen, 3, 10, 721-722.
- Merker, E., 1952. Das Wetter der Jahre 1949-1950 und sein Einfluß auf die Massenvermehrung des großen Fichtenborkenkäfers in Südbaden. AFJZ 123, 213-233, 124, 1-22.
- Nebeker T.E., J.D. Hodges. 1983. Influence of forestry practises on host susceptibility to bark beetles. Z. Ang. Ent. 96, S.194-208.
- Negron, J.F., 1998. Probability of infestation and extend of mortality associated with the Douglas-fir beetle in the Colorado Front Range. For.Ecol.Manage. 107, 71-85.
- Netherer, S., Pennerstorfer, S., Kalasek, R., Riedl, L., 2002. Spatial Analysis in Forest Protection Using the Visual Modelling Tool MapModels. In: Pillmann, W.; Tochtermann, K. (ed.) Environmental Communication in the Information Society EnviroInfo Vienna 2002, University of Technology Vienna, 574-581.
- Netherer, S., 2003. Modelling of bark beetle development and of site- and stand-related predisposition to *Ips typographus* (L.) (Coleoptera; Scolytidae). A contribution to risk assessment. Diss., Univ. f. Bodenkultur Wien, S. 98.
- Nierhaus-Wunderwald, D., 1993. Die natürlichen Gegenspieler der Borkenkäfer. Wald und Holz 1, 8-14.
- Nopp, U., 1999: Erarbeitung von Identifikationsschlüsseln der Prädisposition fichtenreicher Bestände gegenüber verschiedenen abiotischen und biotischen Schadauslösern. Diss., Univ. BOKU Wien, S. 356.
- Nopp, U., Netherer, S., Führer, E., 2000. Bestimmungsschlüssel für die Schadensprädisposition fichtenreicher Bestände gegenüber verschiedenen

- biotischen und abiotischen Schadfaktoren. In: Müller, F. (Hrsg.). Berichte der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 111, 85-93.
- Nüsslein, S., 1997. Totholzflächen und Waldstrukturdaten im Nationalpark Bayerischer Wald 1996/1997. Bayerische Landesanstalt f. Wald- und Forstwirtschaft. Freising. S.18.
- Pennerstorfer J., 2000. Forstentomologisches Monitoring im Quellschutzgebiet der Stadt Wien. <http://www.iff.boku.ac.at/thermomod> .
- Perkins, D.L., Roberts, D.W., 2003. Predictive models of whitebark pine mortality from mountain pine beetle. For.Ecol.Manage. 174, 495-510.
- Reynolds, K.M., Holsten, E.H., 1994. Relative importance of risk factors for spruce beetle. Can.J.For.Res., 24, 2089-2095.
- Reynolds, K.M., Holsten, E.H., 1996. Classification of spruce beetle hazard in Lutz and Sitky spruce stands on the Kenai Peninsula, Alaska. For.Ecol.Manage., 84, 251-262.
- Riedl, L., Kalasek, R., 1998. MapModels- Programmieren mit Datenflussgraphen. In: Strobl, Dollinger (ed.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 1998, 279-288.
- Russo, J.M., Liebhold, A.M., Kelley, J.G.W., 1993. Mesoscale Weather Data as Input to a Gypsy Moth (Lepidoptera: Lymantriidae) Phenology Model. J.Econ.Ent. 86, 9, 838-844.
- Sanders, W., 1987. Untersuchung über die Aktivitätsdichte des Buchdruckers *Ips typographus* in Laubwäldern und in offener Landschaft. J. Appl. Ent., 103, 240-249.
- Scheifinger, X., 1998. FIW-Synopse: Meteorologie. Institut für Meteorologie und Physik. Univ. f. Bodenkultur Wien.
- Scherzinger, W. 1996. Naturschutz im Wald - Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung. Verlag Eugen Ulmer und Co., Stuttgart (Hohenheim). 447 S.
- Schopf, A., 1985. Zum Einfluß der Photoperiode auf die Entwicklung und Kälteresistenz des Buchdruckers *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae). Anz.Schädlingskde.. 69, 11-15.
- Schopf, A., 1989. Die Wirkung der Photoperiode auf die Induktion der Imaginaldiapause von *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). J. Appl. Entomol. 107, 275-288.
- Schopf, A., 1997. Möglicher Einfluß einer Klimaänderung auf das Schädlingsauftreten von Forstinsekten. In: Klimaänderung – Mögliche Einflüsse auf den Wald und waldbauliche Anpassungsstrategien. Österr. Forstverein, Wien, S. 25-34.
- Schopf, R., Köhler, U., 1995. Untersuchungen zur Populationsdynamik der Fichtenborkenkäfer im Nationalpark Bayerischer Wald. Nationalpark Bayer. Wald - 25 Jahre auf dem Weg zum Naturwald, Nationalparkverwaltung Bayer. Wald, S.88-111
- Schwertfeger, F., 1955. Pathogenese der Borkenkäferepidemie 1946-1950 in NW-Deutschland. Schriften d. forstl. Fakultät Göttingen 13/14. 135 S.

- Schwenke, W. 1996. Grundzüge des Massenwechsels und der Bekämpfung des Großen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* L. (Col. Scolytidae). Anz. Schädlingsskde., 69, 11-15.
- Shore, T., Safranyik, L., Riel, W., 1999. Evaluation of factors affecting tree and stand susceptibility to the Douglas-fir beetle (Col., Scol.). Can. Ent. 131, 831-839.
- Spörk, C.J. 1992. Borkenkäfersituation nach Windwurf, Vergleich zwischen Urwald und Wirtschaftswald. Dipl. Arb. Universität f. Bodenkultur Wien. 119 S.
- SPSS Inc., 1990. SPSS/PC + Manuals for the IBM PC/XT/AT and PS/2. SPSS Inc., Chicago, Illinois.
- Speight, M.R., Wainhouse, D. 1989. Ecology and management of forest insects. Clarendon Press, Oxford. 374 S.
- Thalenhorst, W., 1958. Grundzüge der Populationsdynamik des großen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* L. Schriften d. forstl. Fakultät Göttingen.
- Turcani, M., Novotny, J., 1999. Bark beetles as injurious factor in protected areas of the Slovak Republic. Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe, Proceedings of the first workshop of the IUFRO W P 7.03.10, April 21-24 1998, Polen.
- Vité, J.P., 1975. Möglichkeiten und Grenzen der Pheromonanwendung in der Borkenkäferbekämpfung. Z. ang. Ent. 77, 325-329.
- Wegensteiner, R., Führer, E., 1991. Zur höhenabhängigen Aktivitätsdynamik einiger Nadelholzborkenkäfer. Anz. Schädlingsskde. 64, 25-34.
- Wermelinger, B., Epper, C., 2002. Entwicklung von natürlichen Feinden in Befallsherden des Buchdruckers (*Ips typographus*) mit und ohne Bekämpfungsmaßnahmen. <http://www.wsl.ch>.
- Wermelinger, B., Epper, C., Schneider Mathis, D., 2002. Das Erbe des Borkenkäfers. Warum tote Käferbäume stehen lassen? Wald und Holz, 4, 39-42.
- Wermelinger, B., Seifert, M., 1998. Analysis of temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col. Scol.). J. Appl. Ent. 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.
- Wermelinger, B., Obrist, M.K., Duelli, P., Forster, B., 1999. Development of the bark beetle (Scolytidae) fauna in windthrow areas in Switzerland. Mitt. Schweiz. Ent. Ges., 72, 209-290.
- Weslien, J. und Schroeder, L.M., 1999. Population levels of bark beetles and associated insects in managed and unmanaged spruce stands. For. Ecol. Manage., 115, 267-275.
- Wichmann, L., Ravn, H.P., 2001. The spread of *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Scolytidae) attacks following heavy windthrow in Denmark, analysed using GIS. For. Ecol. Manag., 148, 31-39.
- Wiefler R., 1998. Erarbeitung eines Bewertungsschlüssels zur Einschätzung der Prädisposition von Standorten und Beständen gegenüber *Ips typographus*. Diplomarbeit, Univ. f. Bodenkultur, Wien.

- Wild, M., 1953. Die Entwicklung des großen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* L. im Hochschwarzwald (1000-1200 ü. M.) und ihre Abhängigkeit vom Klima 1947-1950. Bericht Naturforsch. Ges. Freiburg 43, 2, 12-176.
- Willmann H., 1951. Studien über die durch den großen Fichtenborkenkäfer im Forstamt Oderhaus / Harz von 1943-1949 hervorgerufene Kalamität. Dissertation, Universität Freiburg.
- ZAMG, 2003. Die 1990er Jahre: Änderung der Lufttemperatur gegenüber 1961 – 1990. <http://www.zamg.at>.
- Zumr, V., 1982. The data for the prognosis of the spring swarming of main species of bark beetles (Coleoptera, Scolytidae) on the spruce (*Picea excelsa* L.). J. Appl. Ent. 93, 305-320.
- Zumr, V., 1992: Dispersal of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae) in spruce woods. J. Appl. Ent., 114, 348 – 352.

ANHANG

Karthographische Darstellungen

1. Borkenkäferentwicklung und Phänologie

potentieller Beginn der Entwicklung im Jahr 2000

potentieller Beginn der Entwicklung im Jahr 2001

potentieller Beginn der Entwicklung im Jahr 2002

potentieller Beginn der Entwicklung im Jahr 2003

potentielle Generationen im Jahr 2000

potentielle Generationen im Jahr 2001

potentielle Generationen im Jahr 2002

potentielle Generationen im Jahr 2003

mittleres Vermehrungspotential des Buchdruckers

2. Prädispositionsabschätzung

Prädisposition Sturm Standort (Naturrauminventur)

Prädisposition Sturm Standort (Gesamt)

Prädisposition Sturm Bestand (Naturrauminventur)

Prädisposition Sturm Bestand (ÖBF)

Prädisposition Schnee Standort (Naturrauminventur)

Prädisposition Schnee Standort (Gesamt)

Prädisposition Schnee Bestand (Naturrauminventur)

Prädisposition Schnee Bestand (ÖBF)

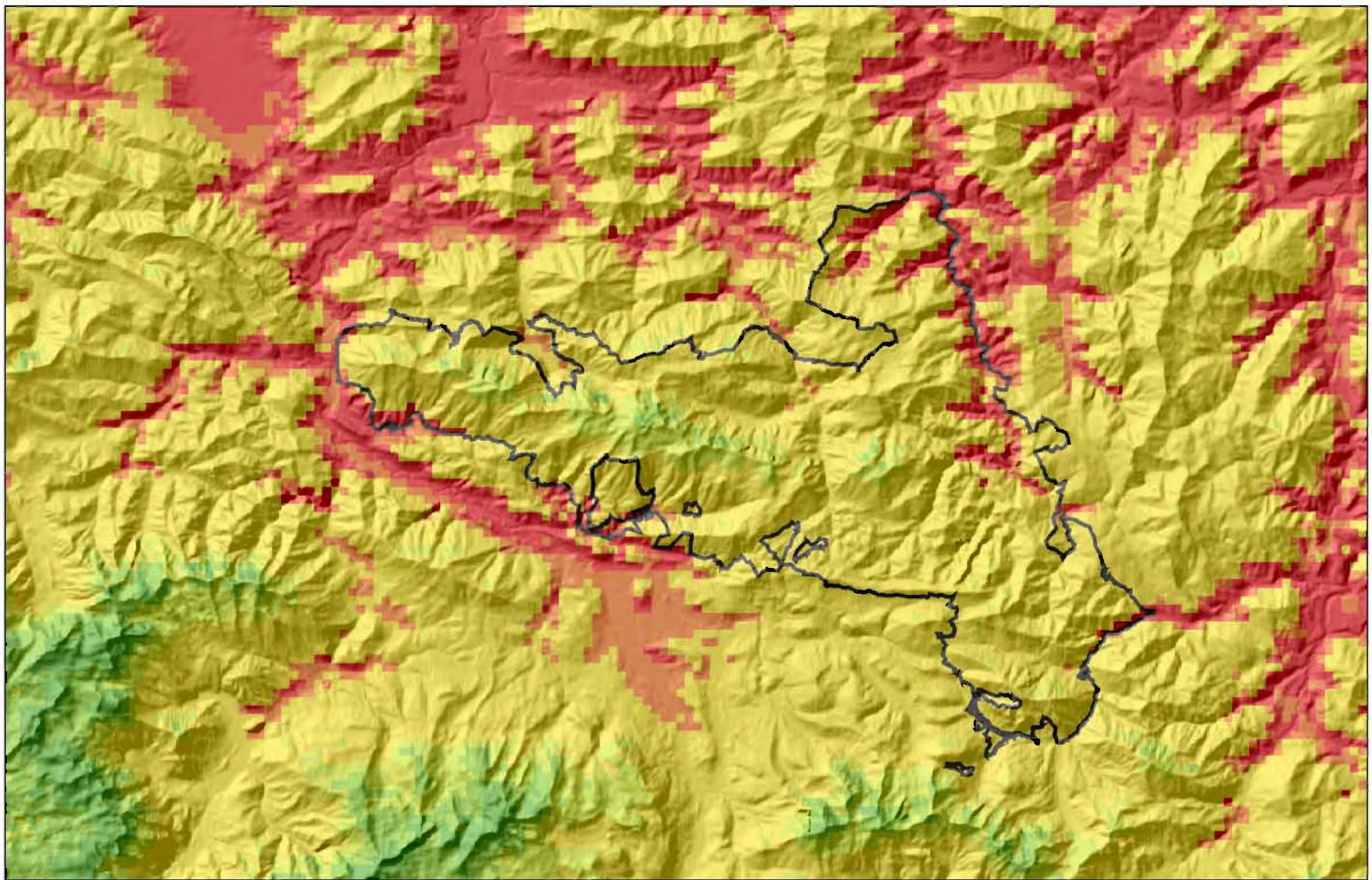
Prädisposition Buchdrucker Standort (Naturrauminventur)

Prädisposition Buchdrucker Standort (Gesamt)

Prädisposition Buchdrucker Bestand (Naturrauminventur)

Prädisposition Buchdrucker Bestand (ÖBF)

Prädisposition Buchdrucker Bestand (Gesamt)

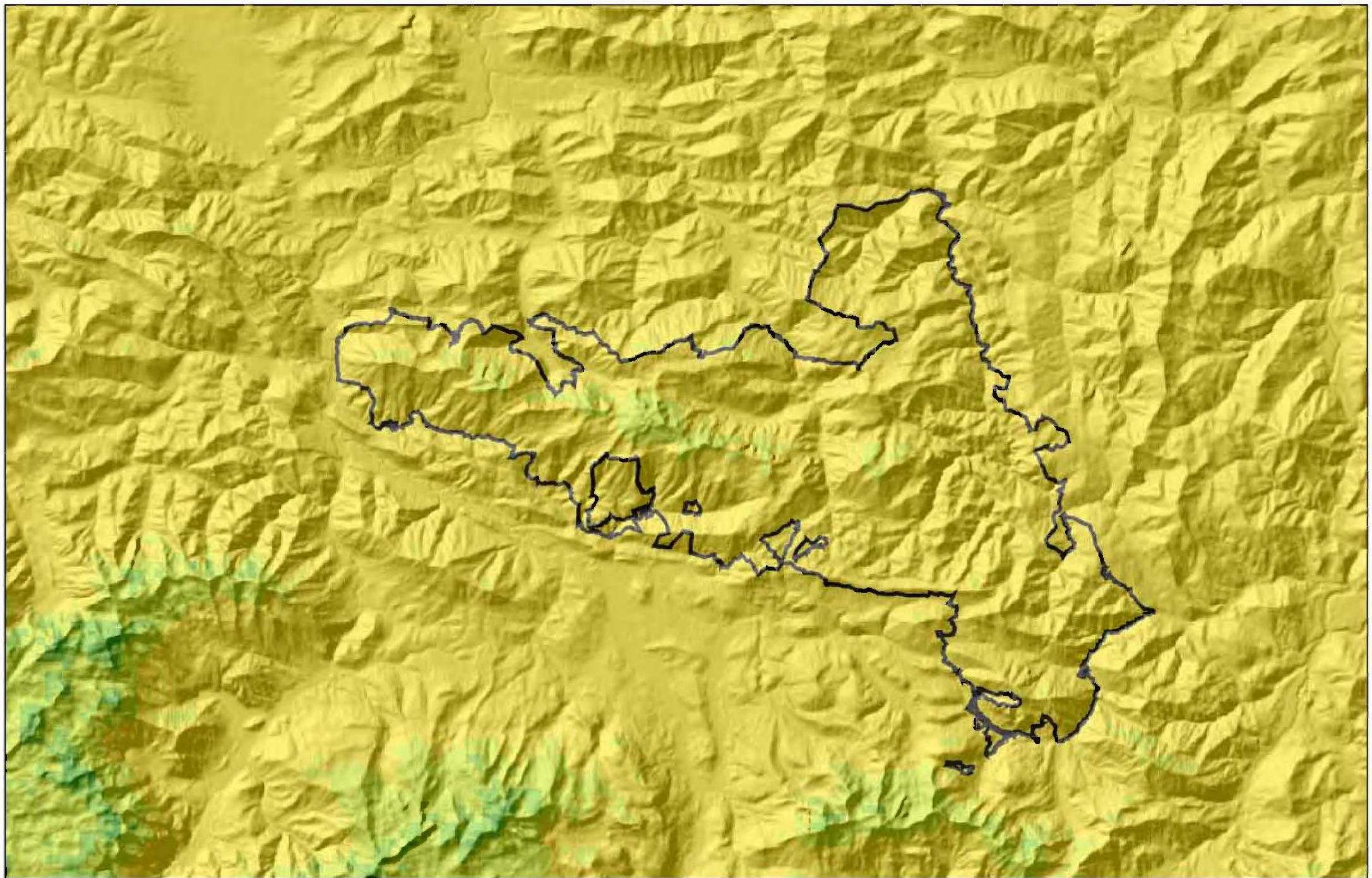


Potentielle Generationen 2000

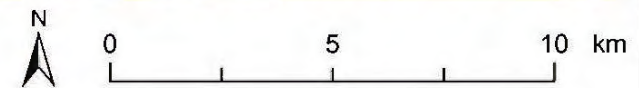
- | | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| keine Generationen | 2 Generationen |
| 1 Generation | 2 Generationen + Geschwisterbruten |
| 1 Generation + Geschwisterbrut | 3 Generationen |

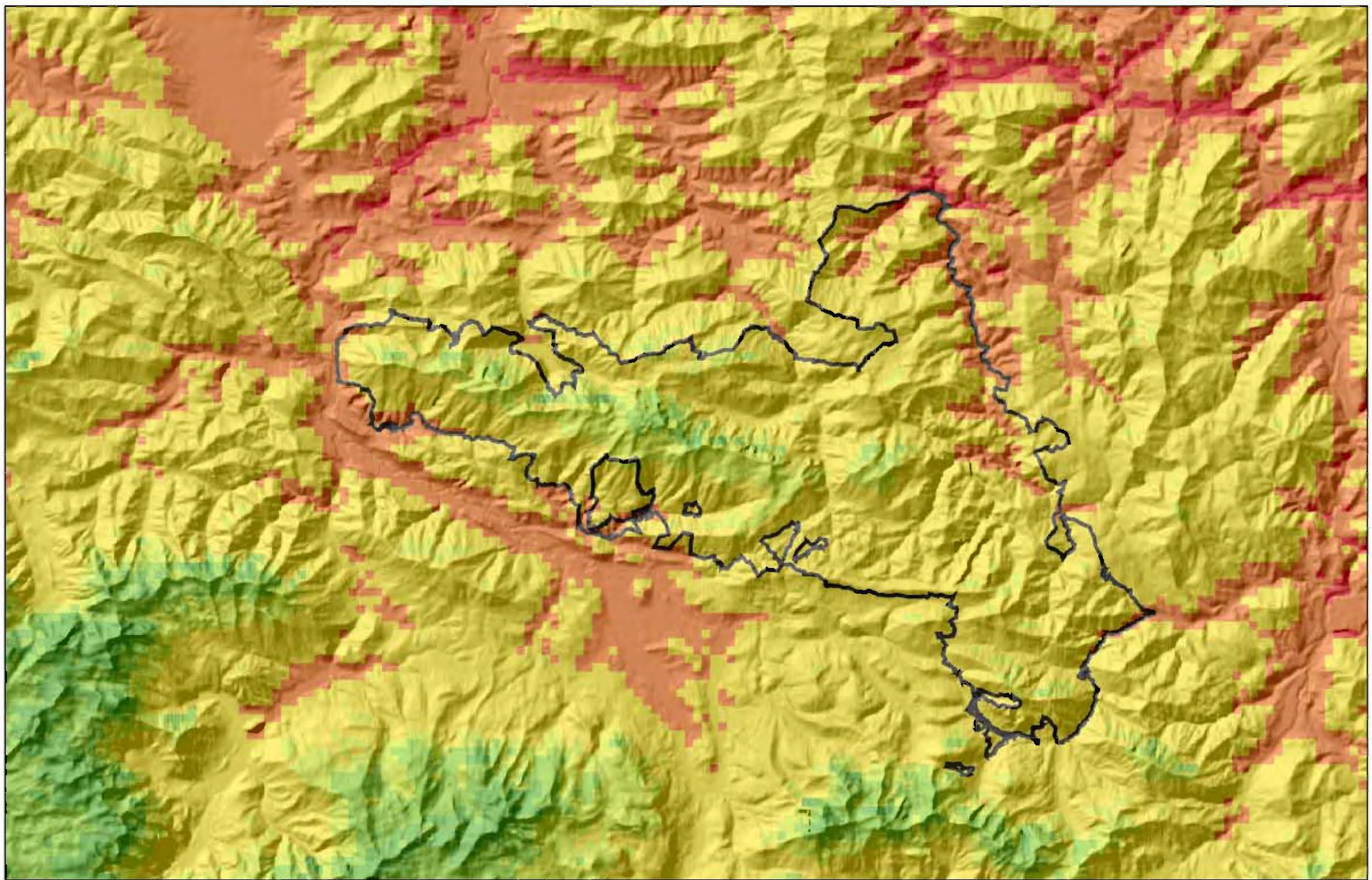


0 5 10 km

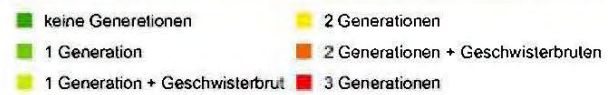


Potentielle Generationen 2001

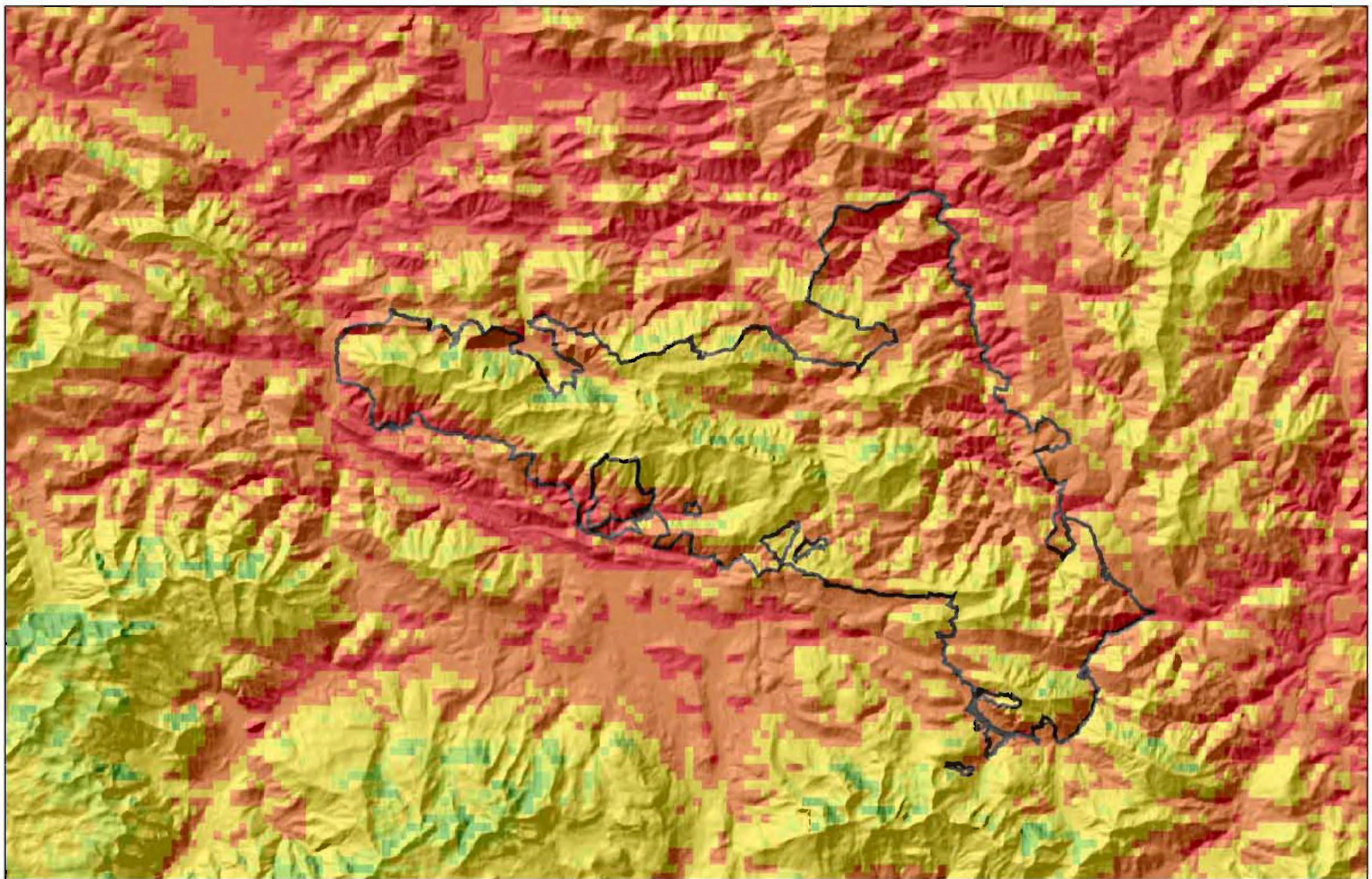




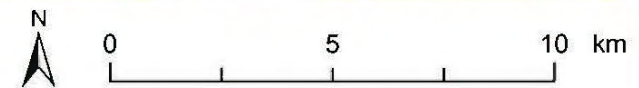
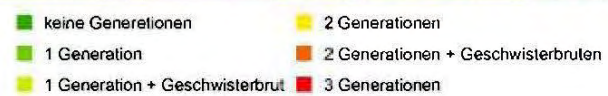
Potentielle Generationen 2002



0 5 10 km

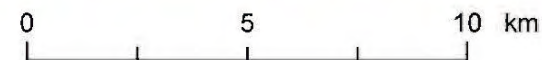


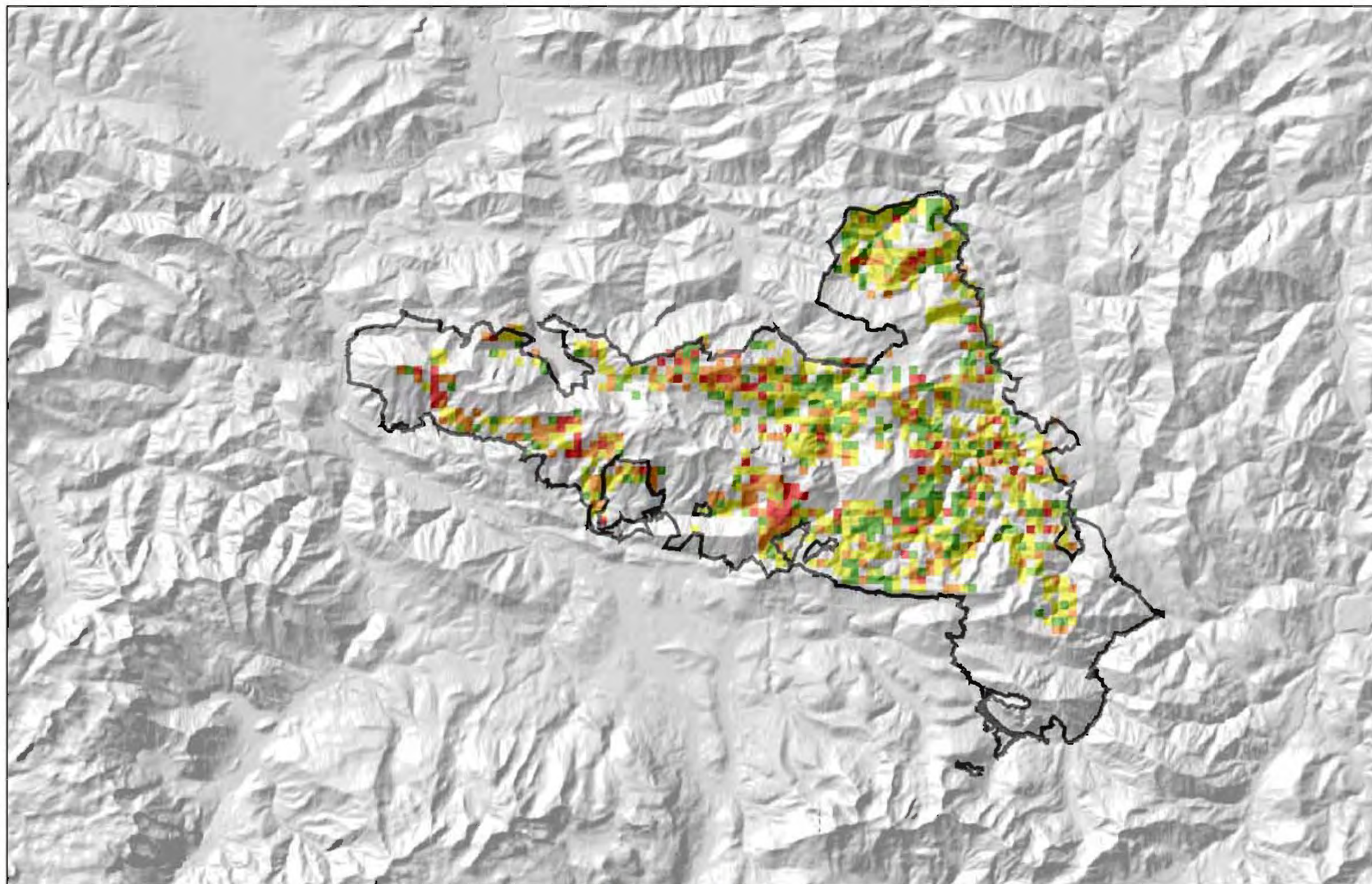
Potentielle Generationen 2003





Prädisposition ggü. Buchdrucker
Bestand (Gesamt)

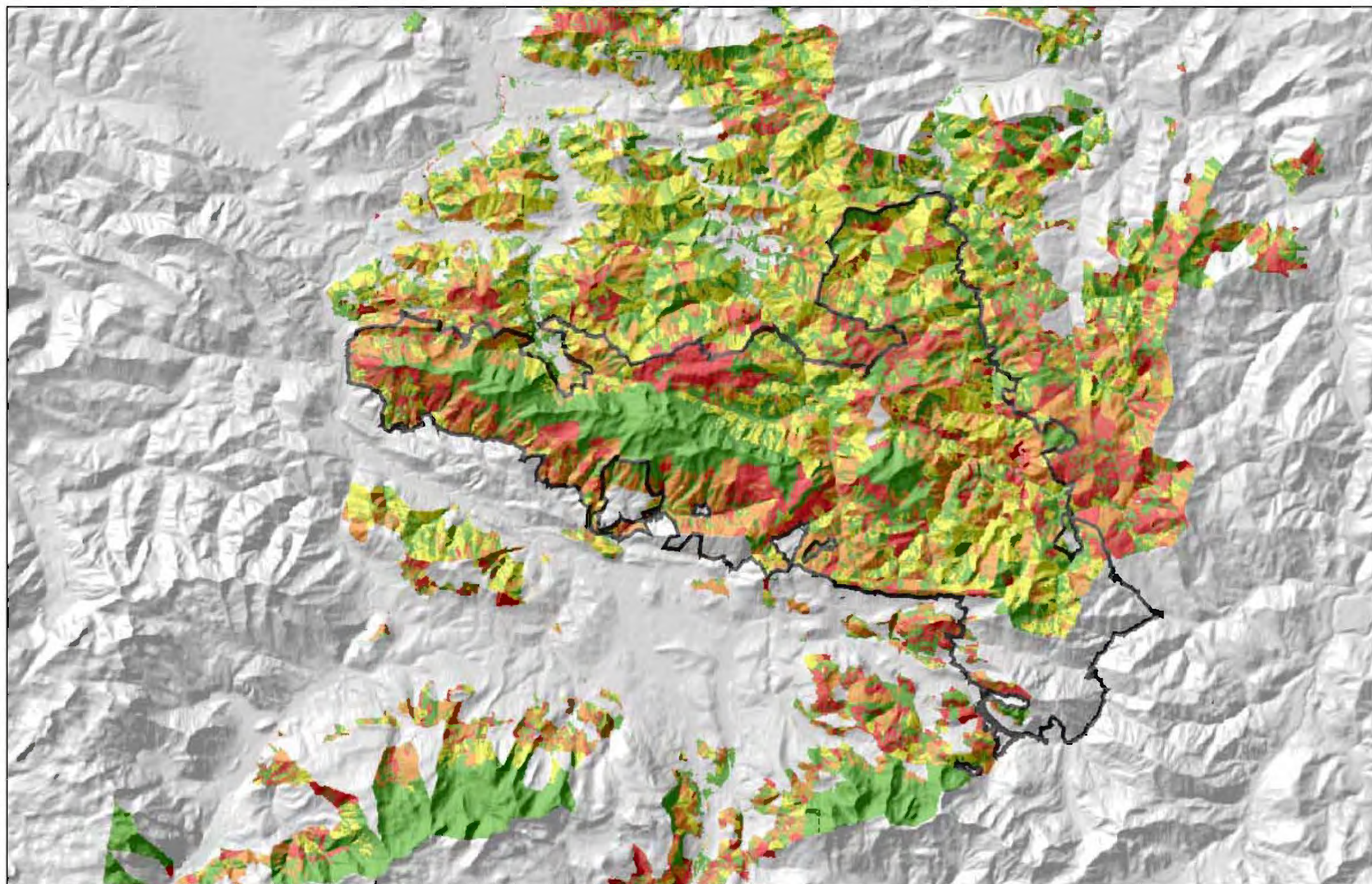




Prädisposition ggü. Buchdrucker
Bestand (Naturrauminventur)



0 5 10 km

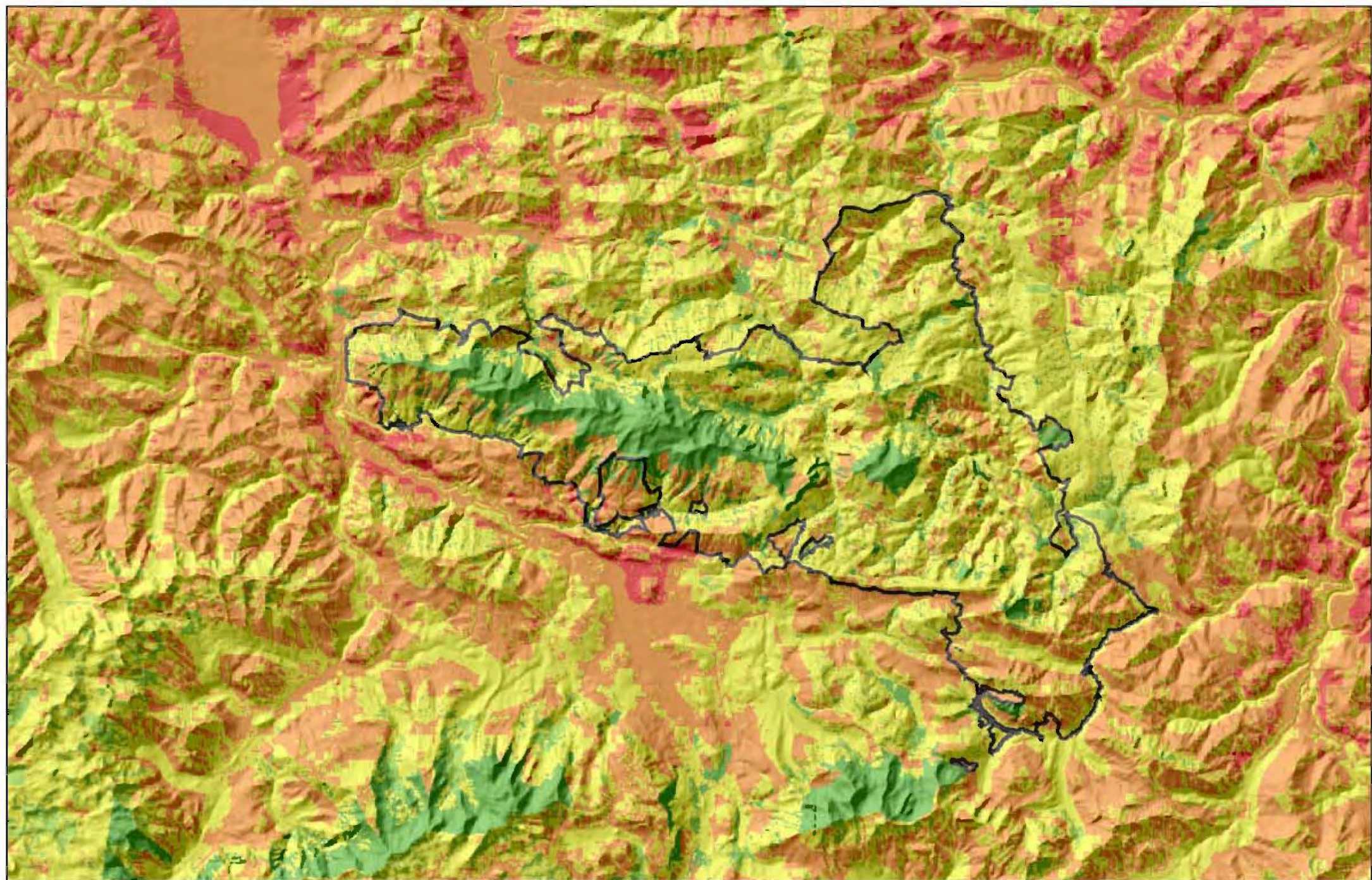


Prädisposition ggü. Buchdrucker
Bestand (ÖBF)

sehr gering	hoch
gering	sehr hoch
mittel	



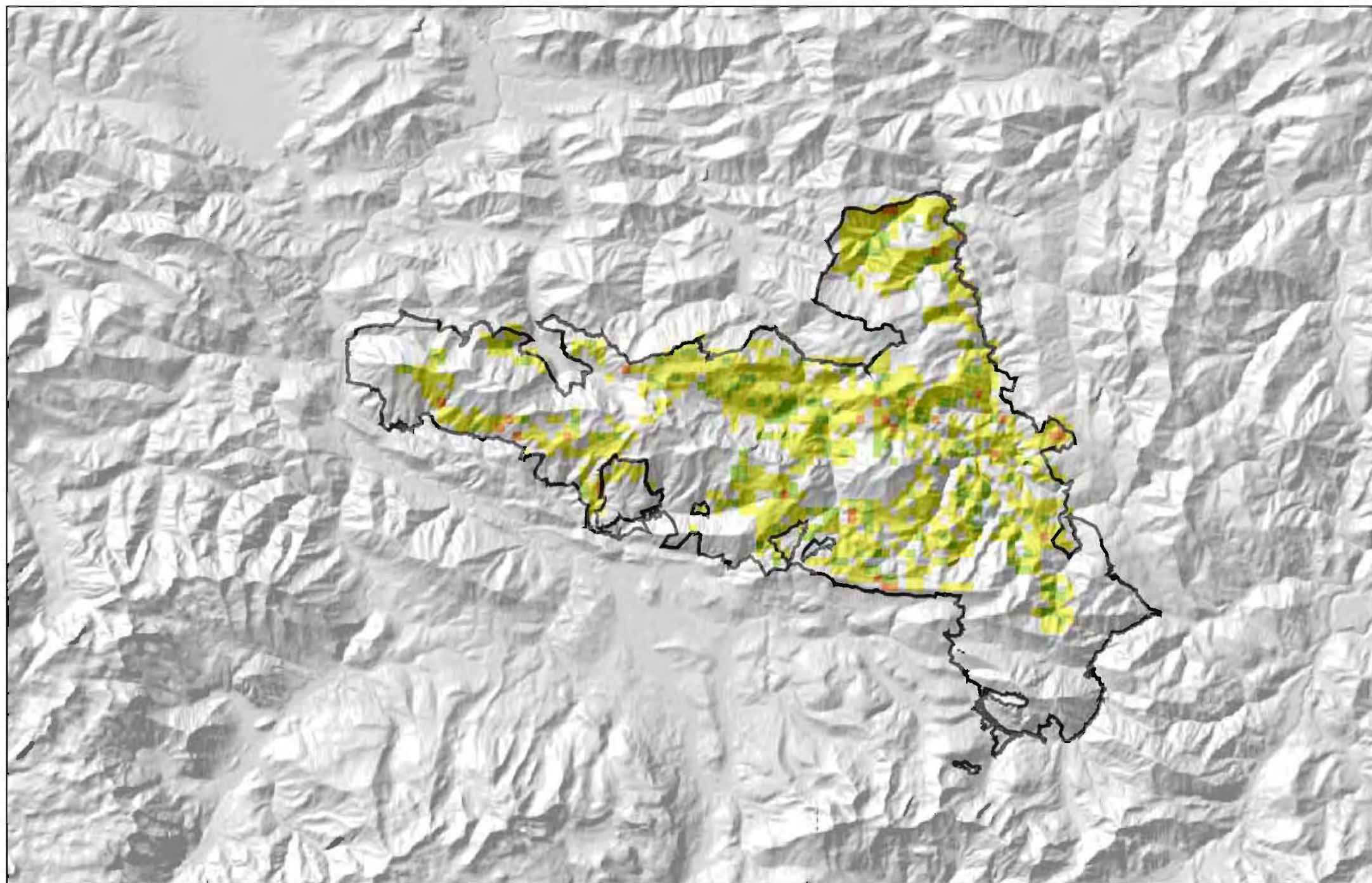
0 5 10 km



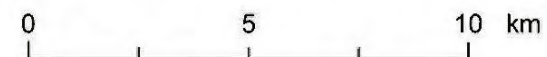
Prädisposition ggü. Buchdrucker
Standort (Gesamt)

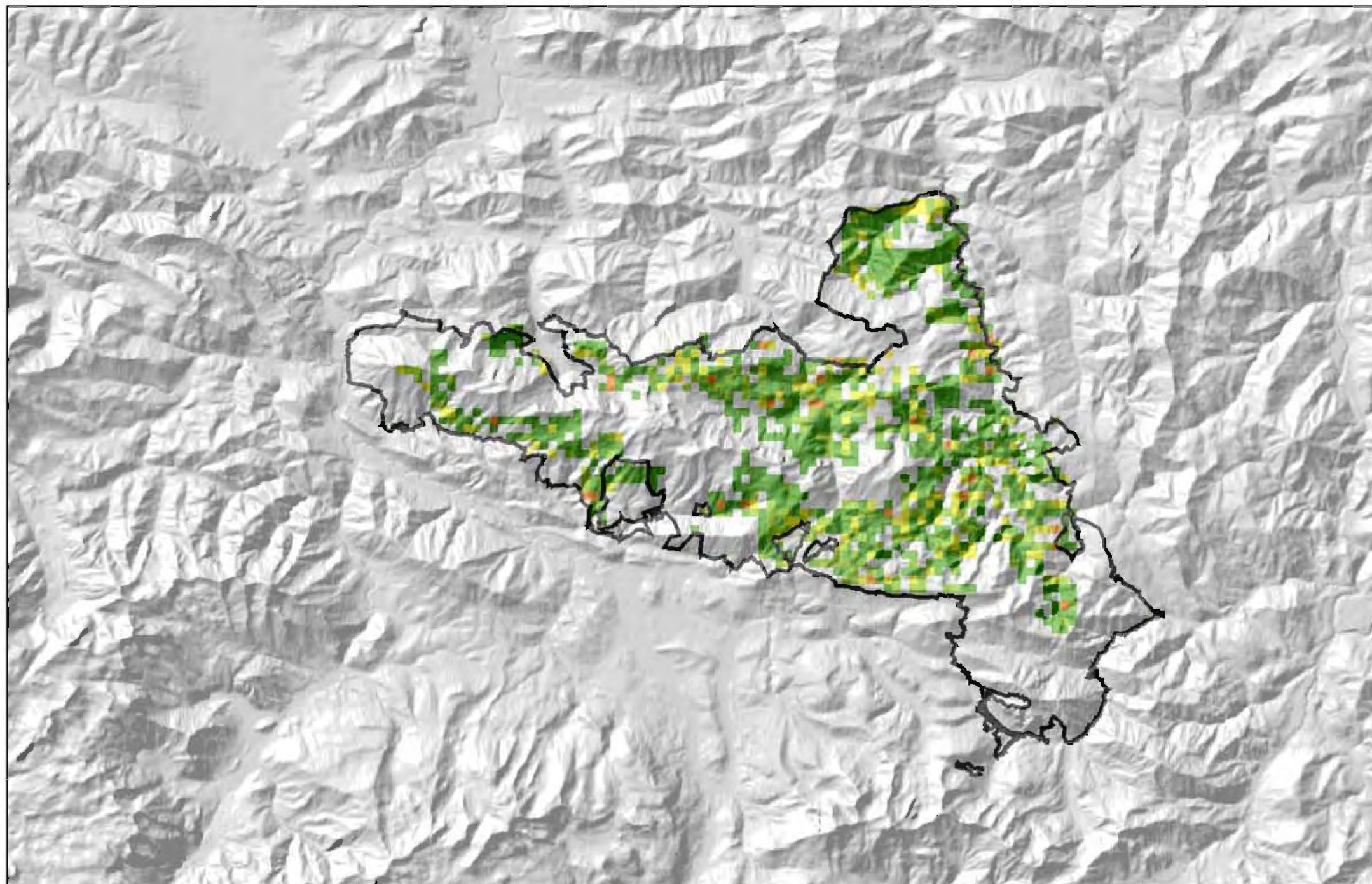
sehr gering	hoch
gering	sehr hoch
mittel	

N
0 5 10 km

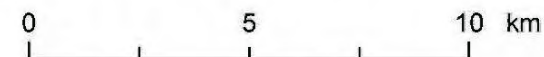


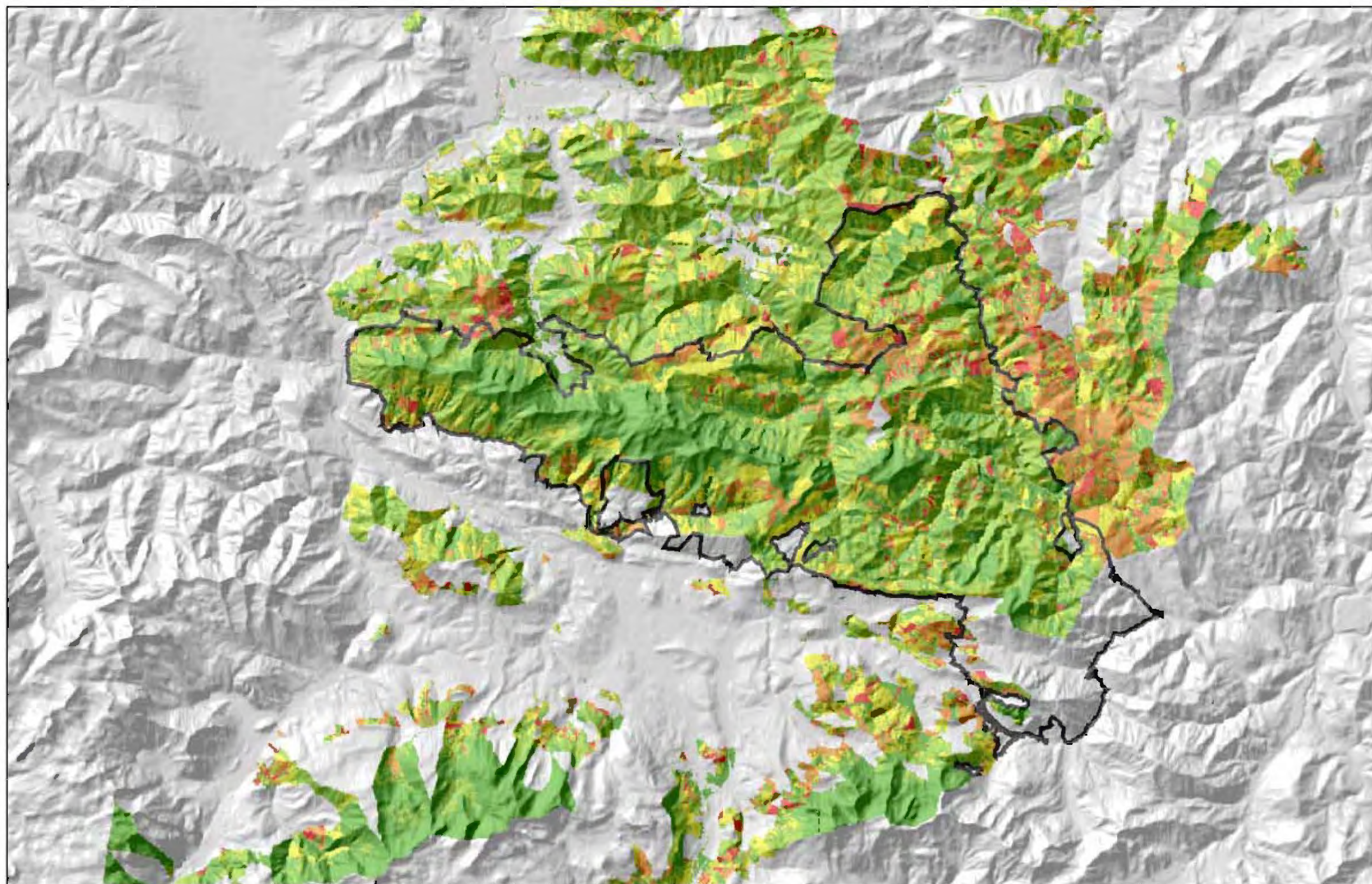
Prädisposition ggü. Buchdrucker
Standort (Naturrauminventur)



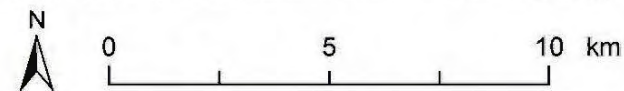


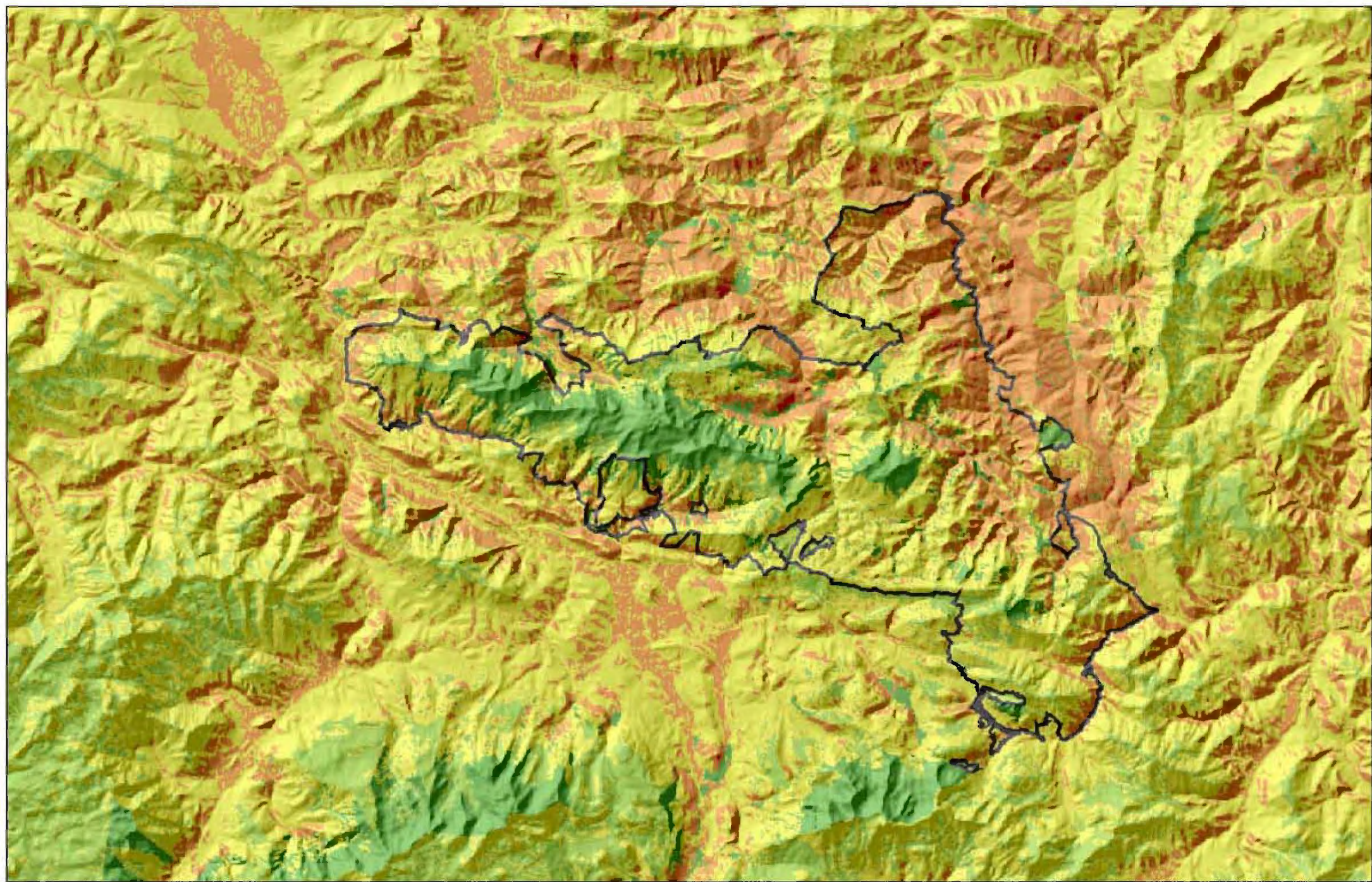
Prädisposition ggü. Schnee
Bestand (Naturrauminventur)





Prädisposition ggü. Schnee
Bestand (ÖBF)



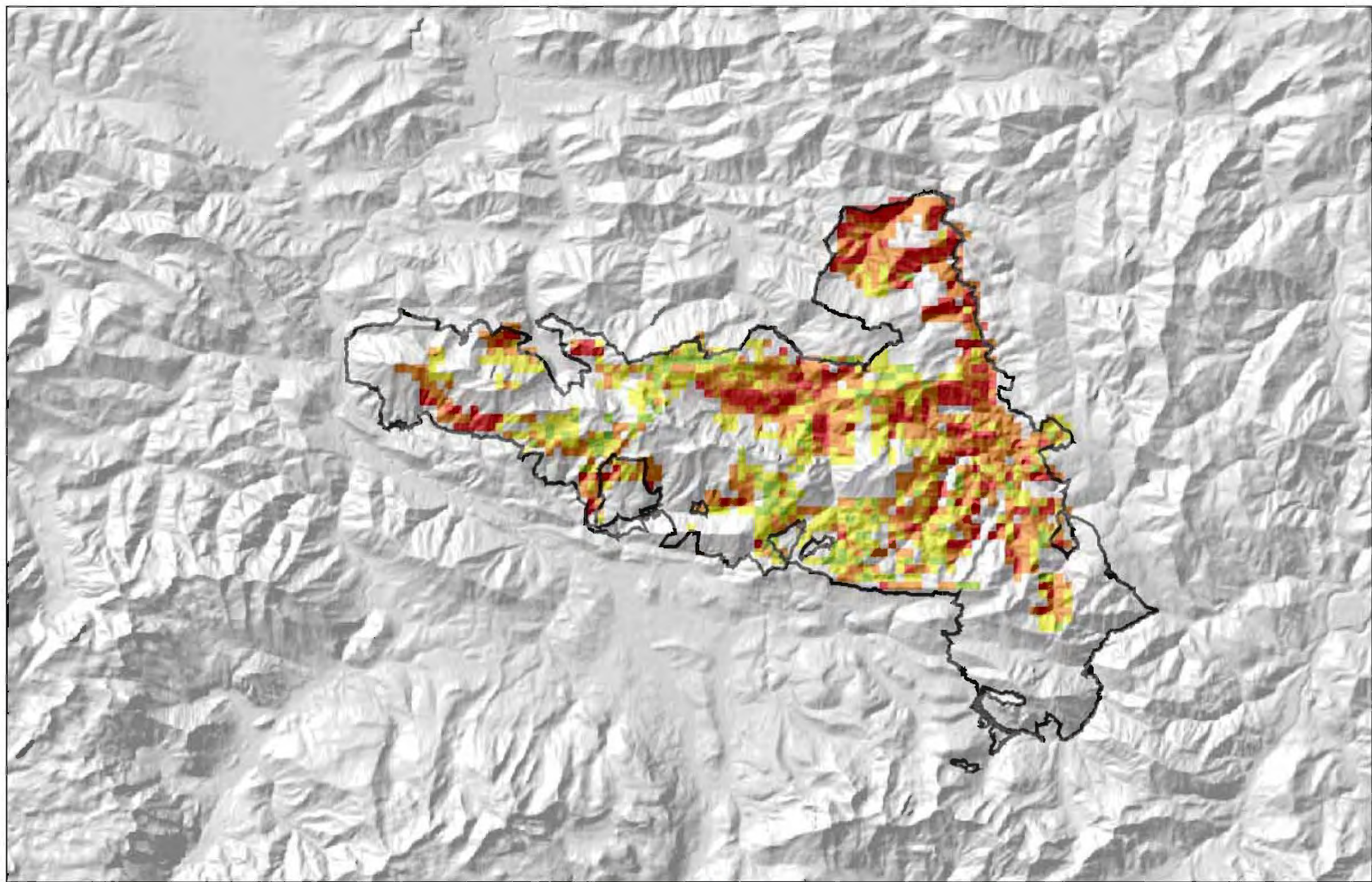


Prädisposition ggü. Schnee
Standort (Gesamt)

sehr gering	hoch
gering	sehr hoch
mittel	



0 5 10 km

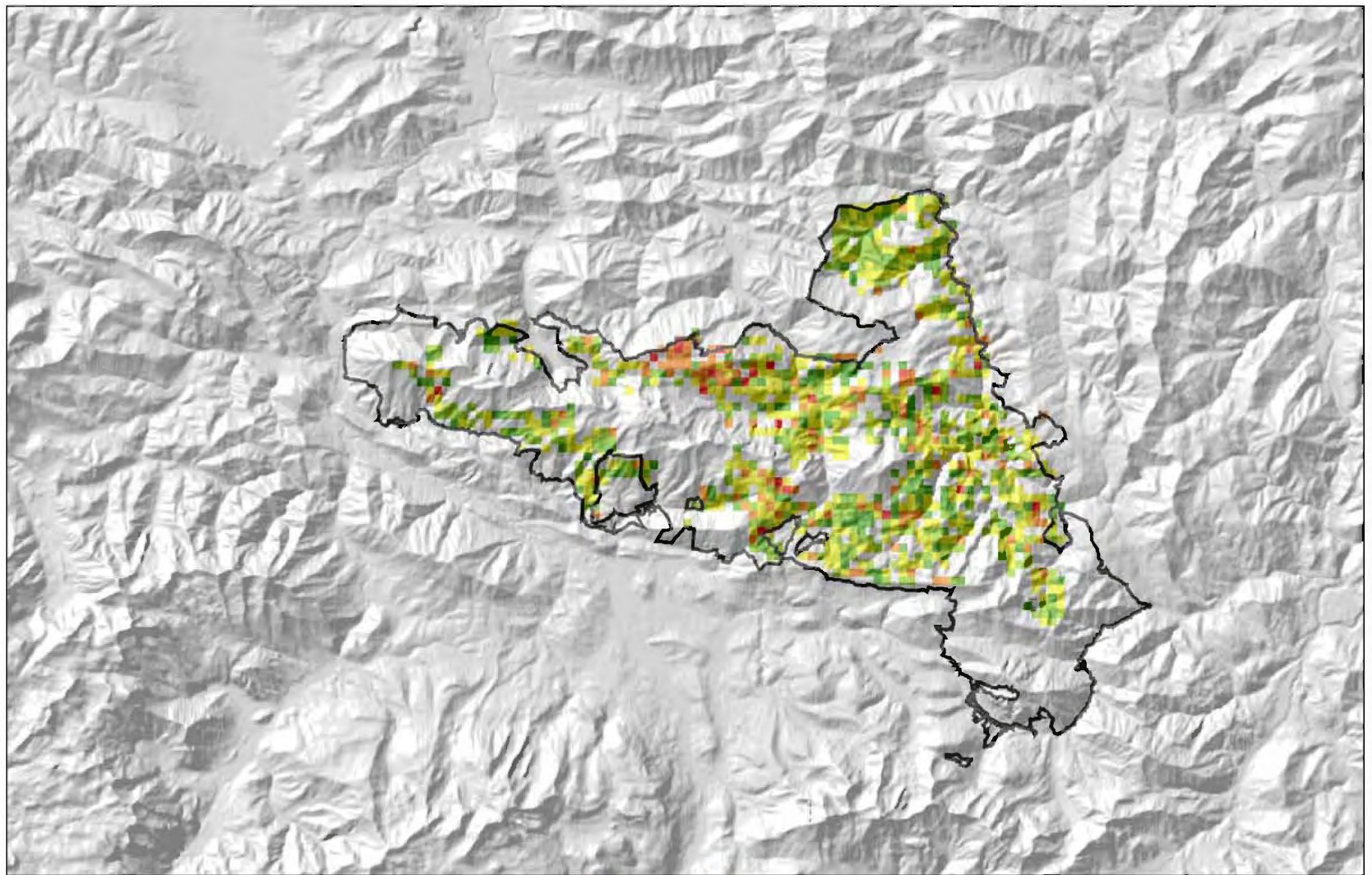


Prädisposition ggü. Schnee
Standort (Naturrauminventur)

■ sehr gering	■ hoch
■ gering	■ sehr hoch
■ mittel	



0 5 10 km

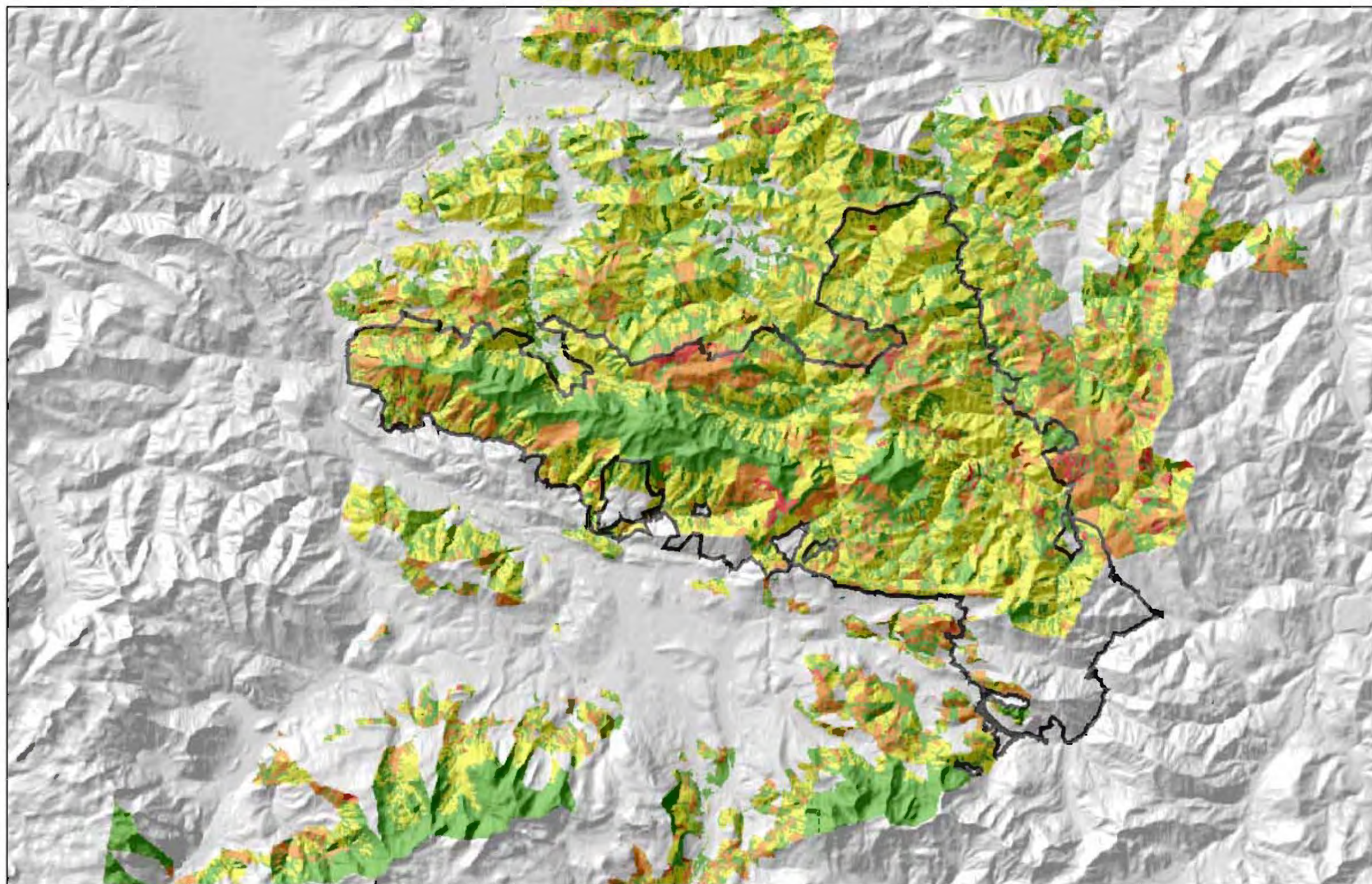


Prädisposition ggü. Sturm
Bestand (Naturrauminventur)

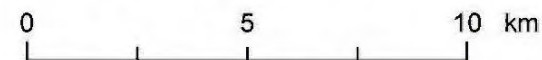
sehr gering	hoch
gering	sehr hoch
mittel	



0 5 10 km



Prädisposition ggü. Sturm
Bestand (ÖBF)



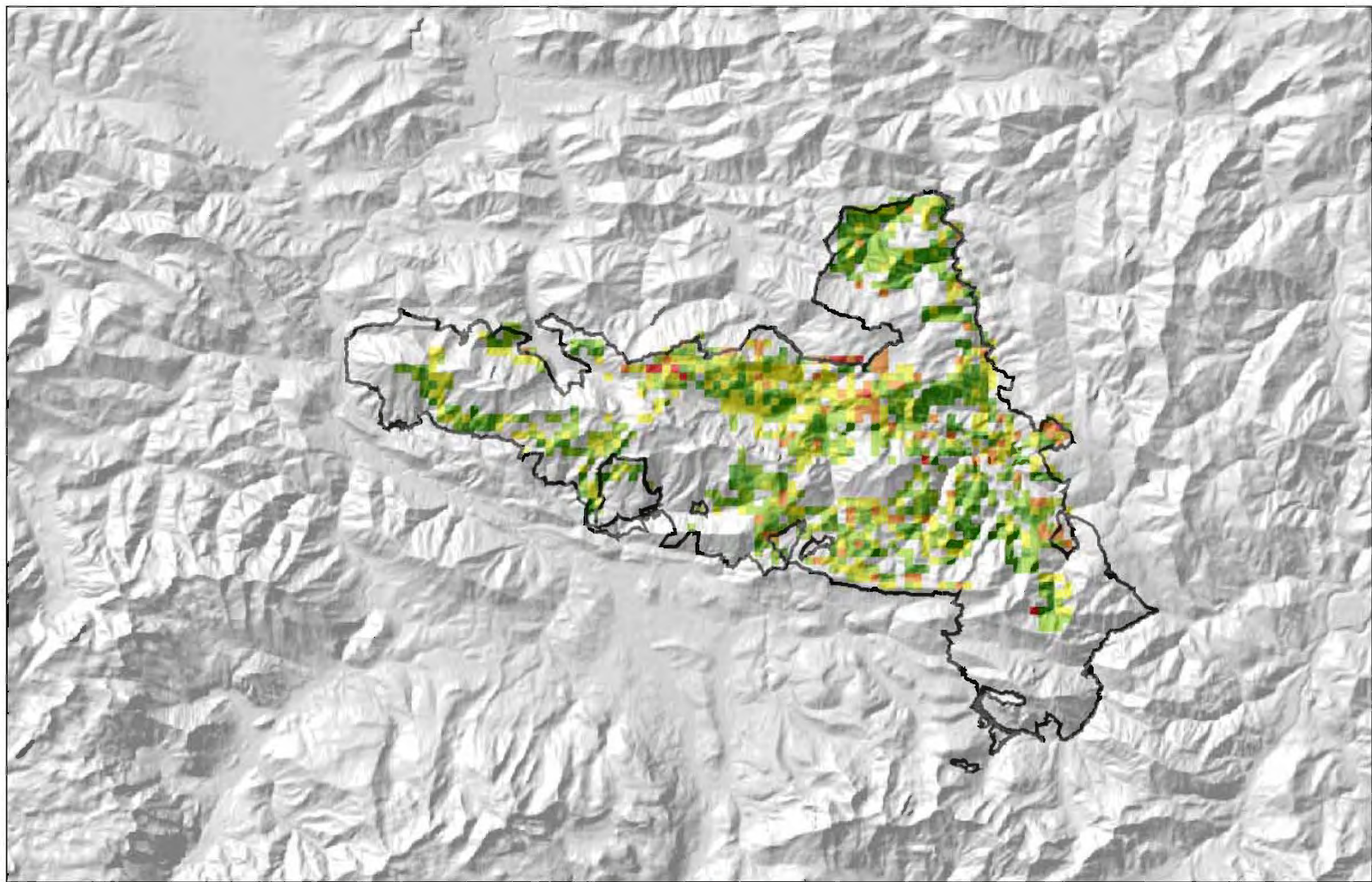


Prädisposition ggü. Sturm
Standort (Gesamt)

sehr gering	hoch
gering	sehr hoch
mittel	



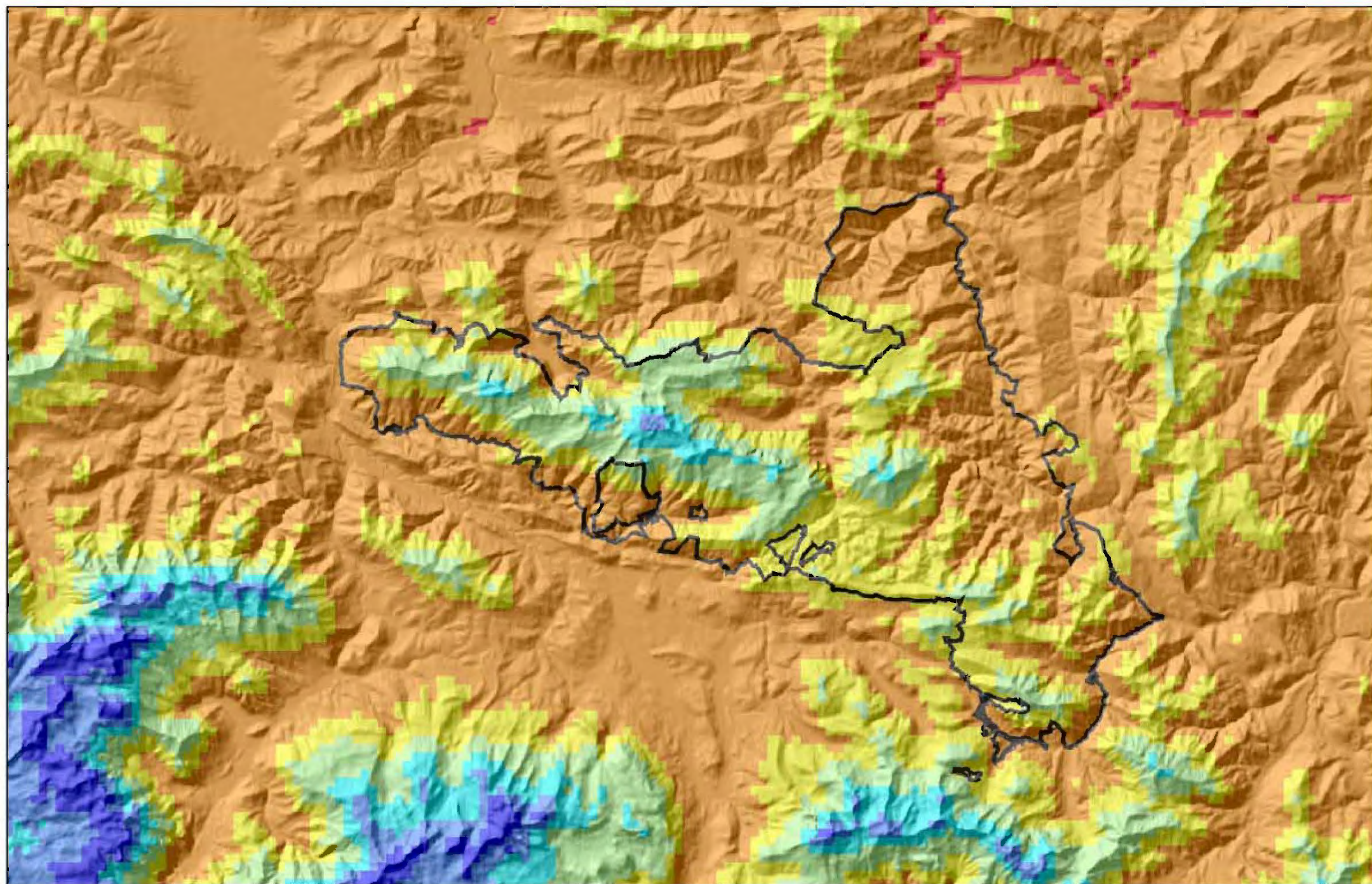
0 5 10 km



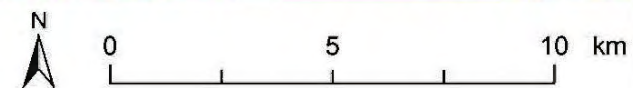
Prädisposition ggü. Sturm
Standort (Naturrauminventur)

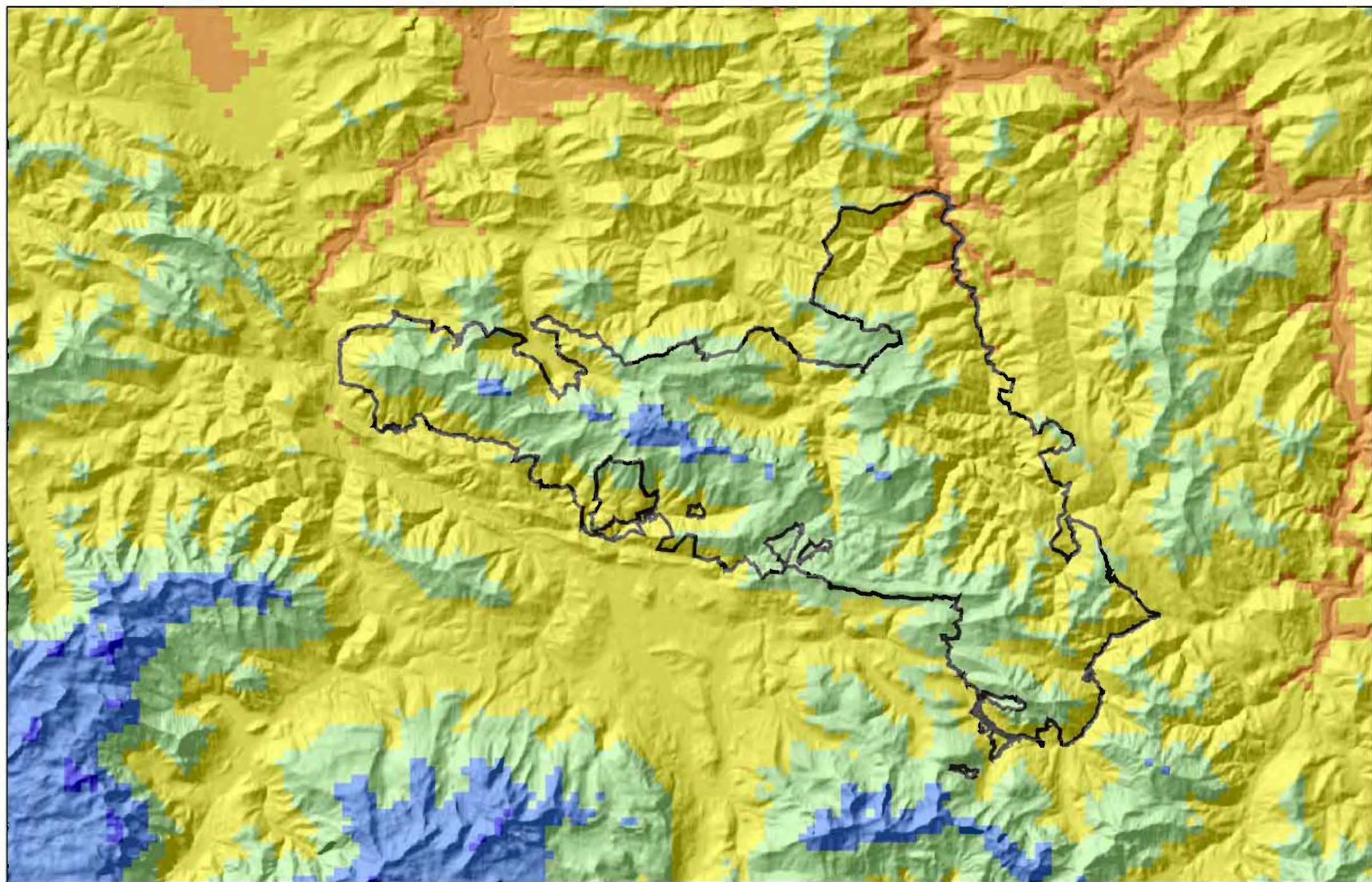


0 5 10 km



Potentieller Beginn der Entwicklung 2000



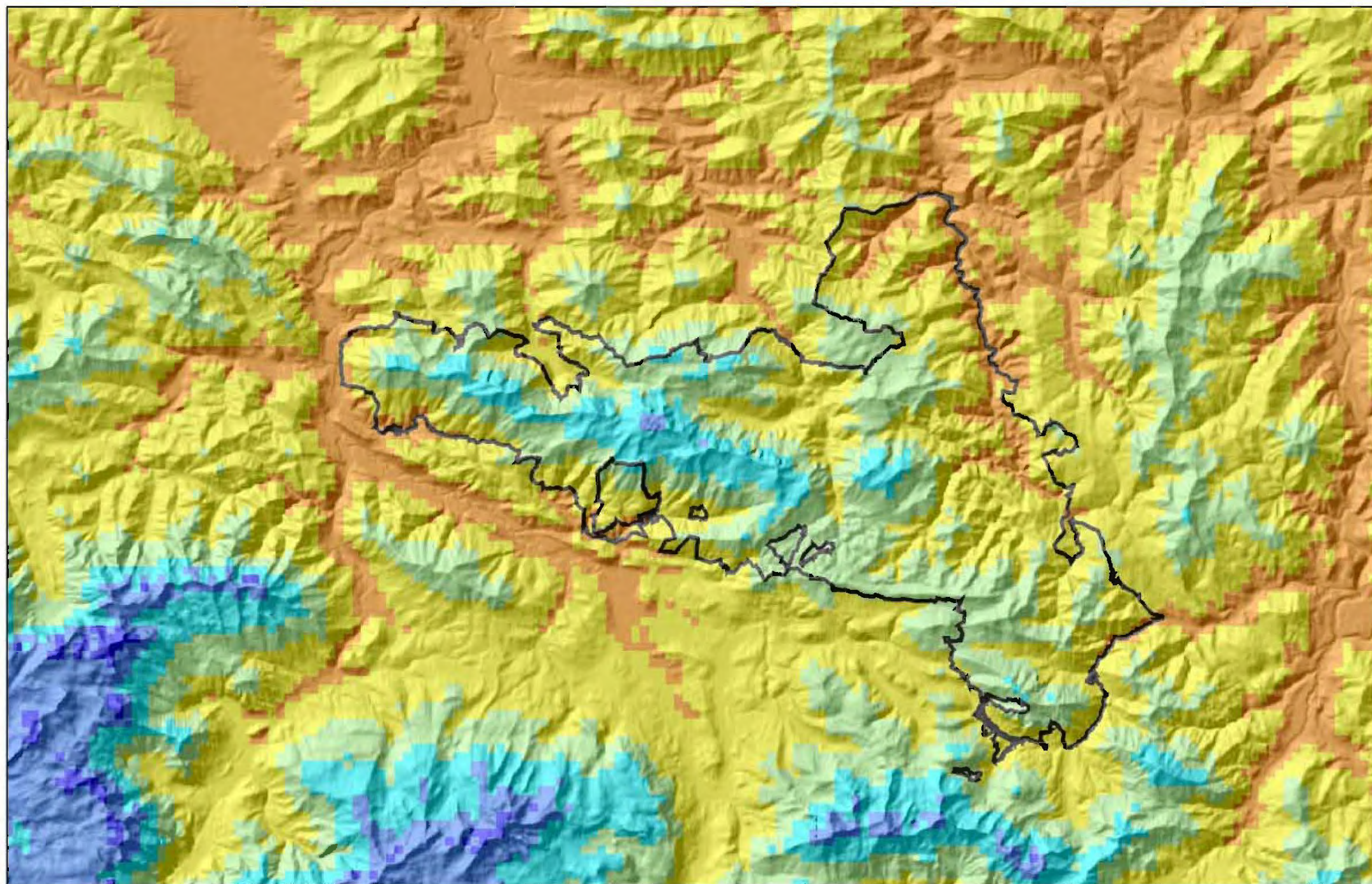


Potentieller Beginn der Entwicklung 2001

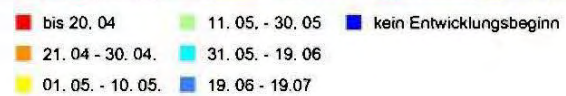
■ bis 20. 04 ■ 11. 05. - 30. 05 ■ kein Entwicklungsbeginn
■ 21. 04 - 30. 04. ■ 31. 05. - 19. 06 ■ 19. 06 - 19. 07
■ 01. 05. - 10. 05.



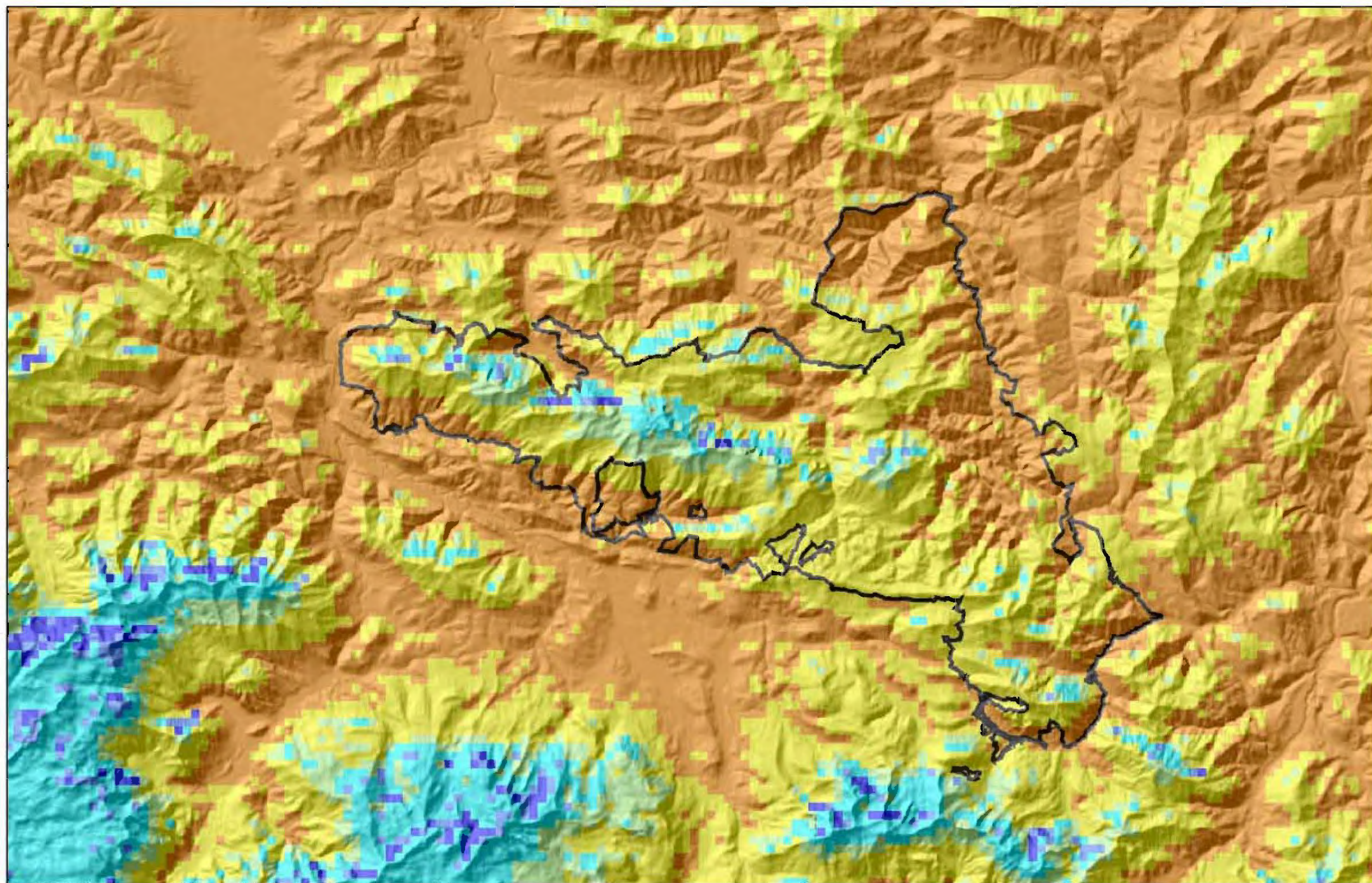
0 5 10 km



Potentieller Beginn der Entwicklung 2002



0 5 10 km

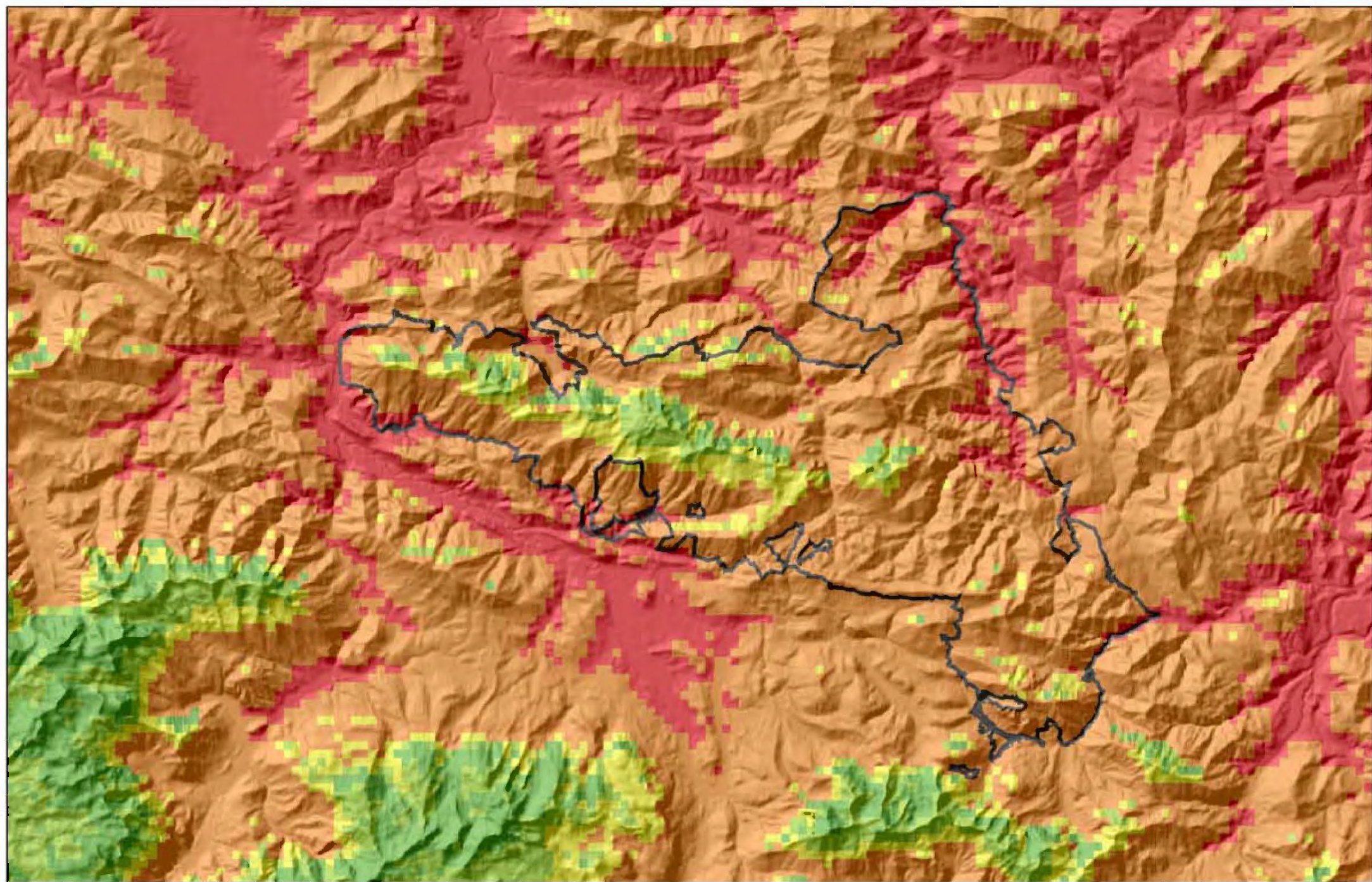


Potentieller Beginn der Entwicklung 2003

■ bis 20. 04	■ 11. 05. - 30. 05	■ kein Entwicklungsbeginn
■ 21. 04 - 30. 04.	■ 31. 05. - 19. 06	
■ 01. 05. - 10. 05.	■ 19. 06 - 19. 07	



0 5 10 km



Mittleres Vermehrungspotential
des Buchdruckers

■ sehr gering	■ hoch
■ gering	■ sehr hoch
■ mittel	

N
0 5 10 km