

# StartClim2015.D

## Sicherung der Schutzfunktionalität österreichischer Wälder im Klimawandel

### ProForClim

Institut für Waldbau  
Universität für Bodenkultur Wien



Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Irauschek, F., Rammer, W., Langner, A., Lexer, M.J. (2016): Sicherung der Schutzfunktionalität österreichischer Wälder im Klimawandel. Endbericht von StartClim2015.D in StartClim2015: Weitere Beiträge zur Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie, Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBF, Land Oberösterreich

Wien, im Juni 2016

StartClim2015.D

Teilprojekt von StartClim2015

Projektleitung von StartClim2015:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

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

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

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

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> -----	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>D-1 Hintergrund &amp; Motivation</b> -----	<b>6</b>
<b>D-2 Zielsetzung</b> -----	<b>7</b>
<b>D-3 Analysekonzept</b> -----	<b>8</b>
<b>D-3.1 Überblick</b> -----	<b>8</b>
<b>D-3.2 Interviews mit Schutzwaldreferenten</b> -----	<b>9</b>
<b>D-3.3 Repräsentative Waldtypen</b> -----	<b>9</b>
<b>D-3.4 Klima</b> -----	<b>13</b>
<b>D-3.5 Bewirtschaftungs-Szenarios</b> -----	<b>13</b>
<b>D-3.6 Indikatoren</b> -----	<b>14</b>
<b>D-3.7 Simulationsszenarien</b> -----	<b>18</b>
<b>D-4 Ergebnisse</b> -----	<b>19</b>
<b>D-4.1 Interviews mit Schutzwaldreferenten</b> -----	<b>19</b>
<b>D-4.2 Schutzwirksamkeit ausgewählter Waldtypen</b> -----	<b>24</b>
<b>5 Schlussfolgerungen</b> -----	<b>39</b>
<b>6 Synthese der Projekte D und C</b> -----	<b>41</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b> -----	<b>43</b>
<b>8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b> -----	<b>44</b>

## Kurzfassung

Für ausgewählte österreichische Waldtypen wurden Modellberechnungen über die zukünftige Bestandesentwicklung für einen Zeitraum von 100 Jahren (2000-2100) durchgeführt. Insbesondere sollte geklärt werden, ob und in welchem Ausmaß der Wald künftig vor Lawinen, Hangrutschungen und Steinschlag schützen kann. Dazu wurden 6 Bewirtschaftungskonzepte (keine aktive Bewirtschaftung, keine aktive Bewirtschaftung, keine aktive Bewirtschaftung, Saum- und Saumschirmschlag, Schlitz und Lochhiebe jeweils in hoher & niedriger Intensität), unter Klimawandelbedingungen untersucht. Für jede Bewirtschaftungsform wurde zusätzlich in der Simulation getestet, wie sich Störungen durch Borkenkäferbefall und Wildverbiss auswirken. Um die unterschiedlichen waldökologischen Bedingungen im österreichischen Wald zu erfassen wurden insgesamt 15 Regionen und jeweils bis zu 5 Höhenzonen mit jeweils gut und gering wüchsigen Standorten untersucht.

Der zum Vergleich berechnete Fall ohne Waldbewirtschaftungsmaßnahmen führt in den meisten Fällen dazu, dass der Wald zwar Holzvorrat aufbaut, er aber wenig strukturiert und ziemlich dicht ist. Im Klimawandel nehmen Borkenkäferschäden in fichtenreichen Waldtypen stark zu, insbesondere in den mittel- und hochmontanen Lagen. Wird kein Wildverbiß unterstellt, nimmt die Zahl der sich verjüngenden Baumarten zu. Die Schutzwirkung des Waldes kann bei schlagweisem Bewirtschaftungskonzept nicht kontinuierlich aufrecht erhalten werden, während die beiden untersuchten Schutzwaldkonzepte sowohl bei hoher als auch niedrigerer Nutzungsintensität dauerhaft ausreichenden Schutz bieten.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die Erwartung, dass in fichtenreichen Waldtypen im Klimawandel Störungen entscheidend dafür sein werden, ob der Wald seiner Schutzfunktion dauerhaft gerecht wird. Mittel- bis langfristig bewirkt dauerhaft hoher Verbissdruck geringere Baumartenvielfalt und mangelnde Waldverjüngung. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Anfälligkeit für Borkenkäferschäden und die Resilienz der Wälder aus.

Schutzwaldreferenten der Bundesländer nannten in Interviews am häufigsten Störungen wie Sturm, Borkenkäferbefall, und Wildverbiss als negative Einflussfaktoren, Fachpersonal sowie die Bewirtschaftung als entscheidend dafür, ob der Wald langfristig seine Schutzfunktion aufrecht erhalten können. Dabei wurden sowohl positive als auch negative Auswirkungen von aktiver Bewirtschaftung genannt. Letzteres deutet darauf hin, dass sowohl in Bezug auf waldbauliches Know How als auch in Bezug auf Förderrichtlinien vor allem im Seilgelände erheblicher Verbesserungsbedarf besteht.

## Abstract

For a set of representative Austrian forest types scenario simulations were performed to explore the likely future range of stand development trajectories under climate change conditions until 2100. Of particular interest was the development of protective services against rockfall, snow avalanches and landslides. In total six management regimes were analysed (no management, strip and strip-shelterwood, slit and patch cut systems in low and high intensity variants each). For each management regime scenarios with combinations of bark beetle disturbances and browsing by game species were tested as well. To capture the ecological conditions in Austrian forests 15 regions and up to five elevational zones were considered. In each region and zone poor and rich site types were defined as well.

Without management standing stock increases in most stand types and ageclass stands develop into homogeneous and dense stands. Under climate change conditions damages by bark beetles increase strongly, particularly in montane spruce stands. Also in the lower sub-alpine zone bark beetle damages occur in a warmer climate. The strip and strip-shelterwood management approach can not maintain the protective effect permanently. Slit as well as patch cut systems can sustain sufficient levels of protection.

Overall, the results confirm that under climate change conditions disturbances will be the decisive factor for ecosystem service provisioning in spruce dominated forests. High browsing pressure results in lower tree species diversity and lack of regeneration in general in the future stands. This has negative implications for susceptibility to bark beetle infestations and for the resilience of forests.

Protection forest experts rated storms, bark beetles and browsing as most influential for insufficient protective effect of forests. Management was considered as important, affecting protective services negatively as well as positively. This points out that there is demand for silvicultural know how in managing protection forests.

## D-1 Hintergrund & Motivation

Waldökosysteme sind, unter anderem aufgrund ihrer Langlebigkeit und ihres langsamen Reaktionsvermögens, besonders stark durch einen möglichen Klimawandel betroffen. Die erwarteten Veränderungen stellen potentiell eine gravierende Änderung der Umweltbedingungen für Waldökosysteme dar, insbesondere was die Geschwindigkeit der Änderungen betrifft.

In Österreich ist auf etwa 31% der Waldfläche die Schutzwirkung von Wald in Bezug auf gravitative Naturgefahren (Lawinen, Steinschlag, Hangrutschung, Muren und Erosion) die prioritäre Waldleistung (Niese 2011).

Schutzwirkung ist vor allem von Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur (Baumdimensionen, Stammzahl, Lückengröße und Verteilung, Überschirmung) bestimmt. Von den Waldökosystemprozessen Wachstum, Verjüngung und Baummortalität ist vor allem die Mortalität entscheidend für kurzfristig und schlagartig eintretenden Funktionsverlust. (e.g., Wimberly and Spies 2001, Lexer et al. 2002). Während Wachstums- und Verjüngungsprozesse in Gebirgswäldern von einer Erwärmung tendenziell begünstigt werden, wird das Gefährdungspotential für Schutzwirkung durch höhere schubweise Mortalitätsereignisse im Klimawandel deutlich ansteigen. In Österreichs Schutzwäldern sind Störungsregime, die von Sturm und Borkenkäfern bestimmt werden, das relevanteste Beispiel, insbesondere in von Fichte dominierten Waldflächen. Das konnte kürzlich von Pasztor et al. (2014a, b) anhand empirischer Daten modellmäßig beschrieben und quantifiziert werden. Für Schutzwälder zusätzlich bedeutsamer Störungseinfluss ist selektiver Verbiss an Jungpflanzen von Mischbaumarten (Tanne, Buche, Ahorn, Esche, etc.). Diese Baumarten sind jedoch für an den Klimawandel angepasste, die Resilienz erhöhende Waldbewirtschaftungsstrategien besonders wichtig.

Die Behandlung von Schutzwäldern (i.e., keine Bewirtschaftung, unterschiedliche eher extensive Waldbaukonzepte, etc.) hat ihrerseits Einfluss auf Störungsanfälligkeit und Resilienz von Waldbeständen.

Für österreichische Schutzwälder gibt es derzeit trotz hoher gesellschaftlicher Relevanz keine Risikoabschätzung der Funktionserfüllung unter Klimawandelbedingungen, die dem state-of-the-art der wesentlichen Methodenelemente entspricht (Waldsimulation inkl. Störungsregime aus interagierenden Störfaktoren, Langfristeffekte von Verbiss, Berücksichtigung von Waldbewirtschaftungsmaßnahmen, aussagekräftige Indikatoren für Schutzwirkung gegenüber gravitativen Naturgefahren).

## D-2 Zielsetzung

Das allgemeine Ziel von ProForClim ist es, für österreichische Waldtypen flächenrepräsentativ Risikoprofile für Funktionsverlust bzw. -einschränkung (Schutz vor Lawinenanrissen, Steinschlag, Hangrutschung, Erosion) unter transienten Klimawandelbedingungen und einer Reihe weiterer Szenarioparameter (z.B. Störungen, Auswirkungen unterschiedlicher Waldbehandlung) zu erstellen.

Der methodische Ansatz zur Umsetzung ist eine simulationsbasierte Szenarioanalyse. Dies bedingt folgende Unterziele:

- (1) Bereitstellung des dynamischen Waldökosystemmodells PICUS
- (2) Aufbereitung einer Datenbasis für (i) repräsentative Waldtypen, (ii) historischem Klima und (iii) transiente Klimawandelszenarios, (iv) aktuelle und alternative Bewirtschaftungskonzepte für Schutzwälder.
- (3) Definition von aussagekräftigen Indikatoren für Waldzustand und Funktionserfüllung
- (4) Indikatorbasierte Risikoanalyse und Erstellung von Risikoprofilen für die analysierten Schutzwaldtypen, die über Wuchsgebiets- und Höhenstufenbezug lokal verortbar sind.
- (5) Einholung der Meinung von Fachexperten der Landesforstdirektionen
- (6) Erstellung von Fact-Sheets zu ausgewählten Waldtypen

## D-3 Analysekonzept

### D-3.1 Überblick

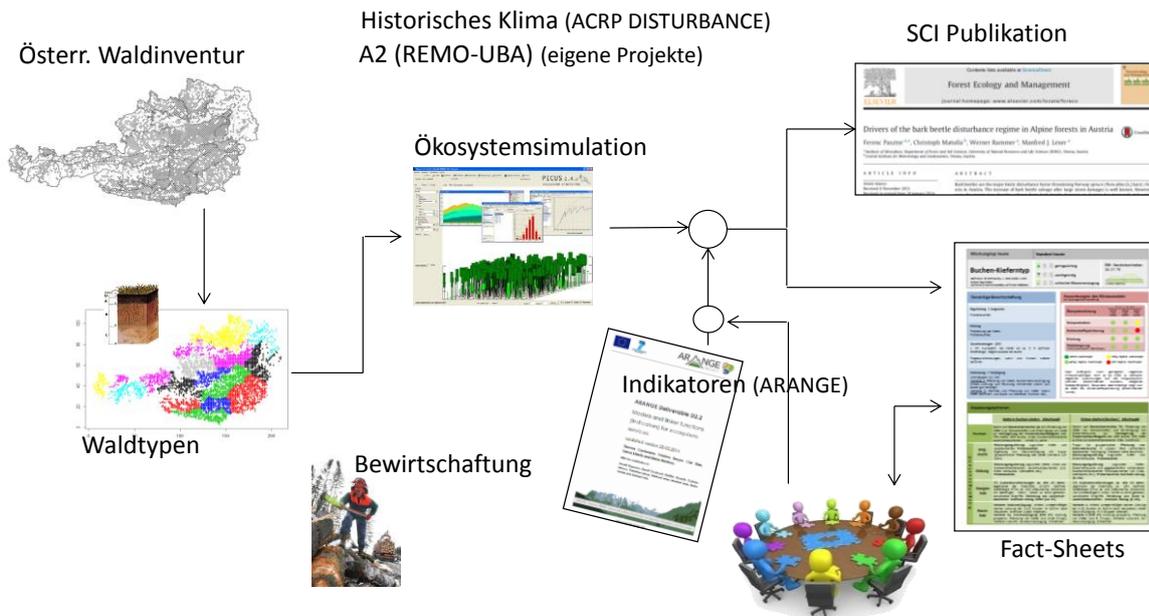
Der methodische Ansatz zur Umsetzung der Studie ist die simulationsbasierte Szenarioanalyse. Nachfolgend werden die wesentlichen Methoden, Tools und die verwendeten Daten kurz beschrieben (siehe auch Abbildung D-3.1-1).

- (1) Waldökosystemmodell PICUS v1.51: Dies ist ein vom Antragsteller seit über 15 Jahren fortlaufend entwickeltes dynamisches Hybridmodell, das in zahlreichen Evaluierungsstudien getestet (u.a. Seidl et al. 2005, Didion et al. 2009) und in Impact- und Anpassungsanalysen erfolgreich eingesetzt wurde (Lexer et al. 2002, Seidl et al. 2011, Maroschek et al. 2015, Irauschek et al. 2016). Die hier zum Einsatz kommende weiter verbesserte Modellversion inkludiert die neuen Störungsmodule von Pasztor et al. (2014a,b). PICUS v1.51 benötigt Klimadaten als Treiber die Temperatur, Globalstrahlung, Dampfdruckdefizit, Niederschlag und einen Sturmproxy auf Tagesbasis umfassen.

Modelloutput sind auf Einzelbaumdaten und von diesen abgeleitete Indikatoren für eine Vielzahl an Ökosystemleistungen. Für gegenständliche Studie kommen Indikatoren für die Schutzwirkung gegen Lawinen, Steinschlag, Hangrutschung und Erosion zum Einsatz, die kürzlich im EU FP7 Projekt ARANGE entwickelt und getestet wurden ([www.arange-project.eu/](http://www.arange-project.eu/), Maroschek et al. 2015)

- (2) Repräsentative Schutzwaldtypen: Basierend auf Daten der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) werden Waldtypen definiert. Zusätzlich erfolgt eine Stratifizierung in Wuchsregionen und Höhenstufen je Region. Anhand von Durchmesserverteilungen, Höhenkurven und qualitativen Deskriptoren der ÖWI werden Initialzustände unterschiedlicher Entwicklungsstadien (i.e. Altersklassen, Entwicklungsphasen) aller Typen für die Simulation generiert.
- (3) Klimadaten: Für die Simulation der Schutzwaldentwicklung werden ein Basisklimadatensatz des historischen Klimas sowie transiente Klimawandelszenarios verwendet. Der Basisklimadatensatz liegt verfügbar aus dem ACRP-Projekt DISTURBANCE auf allen ÖWI-Erhebungspunkten vor. Basierend auf der Periode 1961-90 wurde eine trendbereinigte 100-Jahres-Zeitreihe generiert. Aus Vorprojekten vorhandene Klimawandelszenarios sind A1B (T +3.8°, P +-0), A2 (T +3.7°, P +4.0%), B1 (T +2.5°, P +4.8%); Änderungen bezogen auf 1961-90, basierend auf REMO/UBA (Jacob et al., 2008). Diese Datensätze wurden fehlerkorrigiert (Formayer, unpublished). Mindestens eines dieser drei Szenarios wird in ProForClim verwendet. Es wird angestrebt, ein neueres auf RCP8.5 beruhendes verfügbares Szenario zu verwenden. Um das Sturmschadens-Modul aus Pasztor et al. (2014,b) anwenden zu können, wird ein aussagekräftiger und konsistent hergestellter Sturmindikator benötigt. Derzeit ist es kaum möglich, diese Anforderungen für ganz Österreich zu erfüllen.
- (4) Simulationsexperimente: Für jede Simulationseinheit werden 100-Jahres-Simulationen unter allen Szenariokombinationen (Klima, Bewirtschaftung, Störungen) durchgeführt und entsprechender Modelloutput für die Analysen zur Verfügung gestellt.
- (5) Risikoanalyse: Für 3 Zeitpunkte von 2010-2100 (e.g. 2030, 2050, 2095) wird auf Basis der von PICUS-Outputs abgeleiteten Schutzwirkungsindikatoren eine Risikoabschätzung in Bezug auf Funktionsminderung bzw. -verlust (Schutz vor Lawine, Steinschlag, Erosion und Hangrutschung) durchgeführt.

- (6) Zur Absicherung der Akzeptanz des Analysekonzeptes und insbesondere der Schlüsselemente (Waldtypen, Indikatoren) werden relevante Stakeholder konsultiert.
- (7) Erstellung von Fact-Sheets: Für alle analysierten Schutzwaldtypen wird ein Fact-Sheet erstellt, in dem Gefährdungsprofile für Verlust/Minderung der Schutzwirksamkeit dargestellt und mögliche sinnvolle pro-aktive Waldbewirtschaftungsmaßnahmen beschrieben werden.



**Abb. 3.1-1.** Überblick über das Analysekonzept von ProForClim. Erläuterungen im Text.

### D-3.2 Interviews mit Schutzwaldreferenten

Mit den Schutzwaldreferenten von 7 Landesforstdirektionen wurden strukturierte Telefon-Interviews geführt. Dazu wurden den Interviewpartnern Unterlagen (Auswahllisten, etc.) zeitgerecht vor dem vereinbarten Interviewtermin zugesendet. Während des Interviews wurden begleitet vom Interviewer die vorstrukturierten Fragen vom Interviewten beantwortet. Der Interviewleitfaden findet sich im Anhang.

### D-3.3 Repräsentative Waldtypen

In ProForClim wird nicht die gesamte österreichische Waldfläche zur Gänze simuliert. Es werden ausgehend von den Informationen der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) repräsentative Bestandes- und Standorttypen ausgeschieden. Dies erfolgt in mehreren Schritten.

- (1) Regionen: Österreich wird für diese Arbeit in 15 Regionen gegliedert (Abbildung D-3.3-1). Dabei werden politische Bezirke (jeweils zur Gänze) in Regionseinheiten zusammengefasst, die vor allem auf den Wuchsgebieten (Kilian et al. 1994) basieren.
- (2) Höhenzonen: Innerhalb jeder Region wird noch in Höhenzonen unterschieden (die sich wiederum an den Vegetationsstufen in Kilian et al. (1994)).
- (3) Waldtypen: Es werden a priori die wichtigsten österreichischen Baumarten-Mischungstypen definiert basierend auf Expertise und Erfahrungen aus Vorprojekten,

angelehnt an eine ähnliche Klassifikation, die von der ÖWI benutzt wird (siehe Abbildung D-3.3-2). Häufige Mischungstypen werden wiederum regionalisiert, d.h. dass derselbe Mischungstyp in Bezug auf Baumartenanteile als eigene regionale Entität mehrfach vorkommen kann (z.B. Alpen/ Voralpen- und Beckenlagen), andere sind entweder ohnehin nur regional vorhanden (z.B. eichendominierte Waldtypen), oder nicht häufig genug (kieferndominierte Waldtypen). Innerhalb häufiger Waldtypen wird noch einmal in hohe und niedrige Bonität/Wüchsigkeit unterschieden, um in sich möglichst homogene Bestandestypen-Gruppen zu erreichen.

- (4) Die je Waldtyp verfügbaren ÖWI-Punkte werden sodann noch nach Alter in 20 Jahre breite Altersklassen stratifiziert. Um den Simulationsaufwand zu verringern, wurden die Bestandestypen jeweils durch die Altersklasse 2 (0-20 Jahre), die Altersklasse 5 (60-80) und die Altersklasse 8 (>120 Jahre) repräsentiert.
- (5) Es werden ebenfalls a priori einfache Standortstypen unterschieden, die sich im Wesentlichen aus Bodentyp/Grundgestein und einer groben Gründigkeitsklassifizierung laut ÖWI ergeben. Die vier unterschiedenen Standortstypen sind: S1 (silikatisch, gute Wüchsigkeit), S2 (silikatisch, schlechte Wüchsigkeit), K1 (karbonatisch, gute Wüchsigkeit) und K2 (karbonatisch, schlechte Wüchsigkeit).

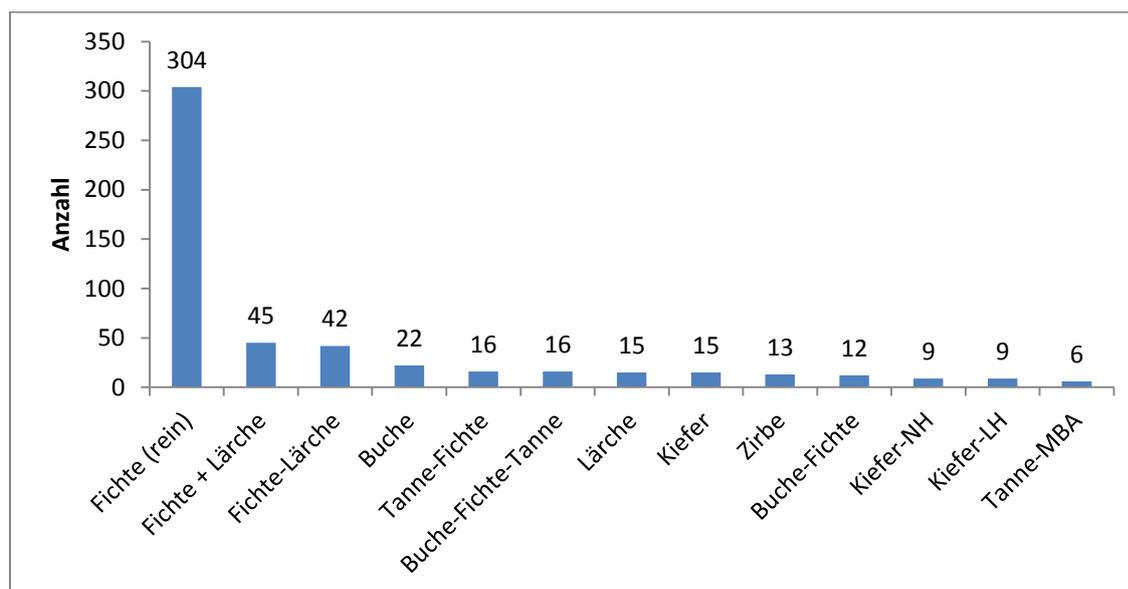


**Abb. D-3.3-1.** Verwendete Regionsgliederung. 1 = Bruck an der Leitha, Gänserndorf, Hollabrunn, Korneuburg, Mistelbach, Tulln; 2 = Baden, Mödling, Neunkirchen, Wiener Neustadt, Wiener Neustadt(Land), Wien-Umgebung, Wien, Eisenstadt, Eisenstadt-Umgebung, Mattersburg, Neusiedl am See, Oberpullendorf; 3 = Waidhofen an der Ybbs, Amstetten, Lilienfeld, Sankt Pölten, Sankt Pölten(Land), Scheibbs, Linz, Linz-Land, Braunau am Inn, Grieskirchen, Ried im Innkreis, Wels-Land, Steyr-Land; 4 = Gmünd, Horn, Krems an der Donau, Krems(Land), Melk, Waidhofen an der Thaya, Zwettl, Eferding, Freistadt, Perg, Rohrbach, Schärding, Urfahr-Umgebung; 5 = Graz, Graz-Umgebung, Deutschlandsberg, Voitsberg, Weiz, Fürstenfeld-Hartberg, Güssing, Jennersdorf, Oberwart, Leibnitz, Südoststeiermark; 6 = Leoben, Murtal, Bruck-Mürzzuschlag, Murau; 7 = Liezen; 8 = Gmunden, Kirchdorf an der Krems, Vöcklabruck, Salzburg, Salzburg-Umgebung, Hallein; 9 = Sankt Veit an der Glan, Wolfsberg, Feldkirchen; 10 = Klagenfurt, Klagenfurt Land, Villach, Villach Land, Hermagor, Völkermarkt; 11 = Spittal an der Drau, Lienz; 12 = Tamsweg, Zell am See, Sankt Johann im Pongau; 13 = Kitzbühel, Kufstein, Reutte, Schwaz; 14 = Imst, Innsbruck, Innsbruck-Land, Landeck; 15 = Bludenz, Bregenz, Dornbirn, Feldkirch.

Für diese Studie wurden die 13 wichtigsten Bestandestypen mit besonderer Berücksichtigung von Schutzwaldstandorten ausgewählt, die in Summe 54% der Waldinventurpunkte repräsentieren.

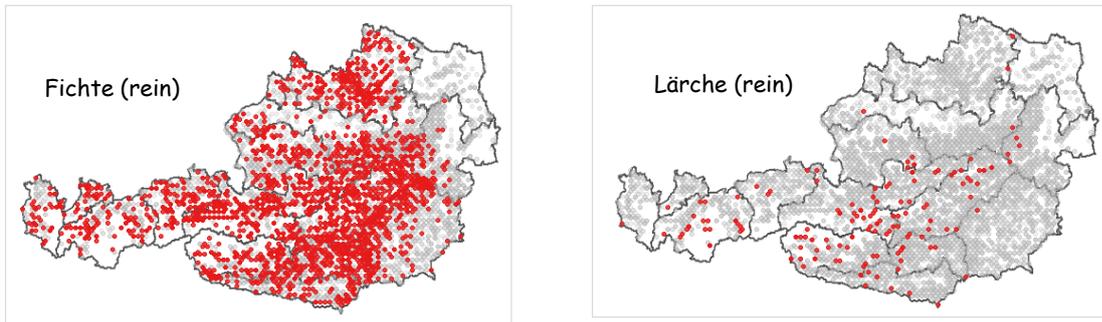
**Tabelle D-3.3-1.** Ausgewählte repräsentative Schutzwaldtypen und deren repräsentierte Punkte der ÖWI. PA= Picea Abies, LH= Laubholz, LD: Larix decidua, PC: Pinus cembra, FS: Fagus sylvatica, AA: Abies alba, PS: Pinus sylvestris

Bestandestyp	Definition nach Grundflächenanteil	repräsentierte Waldfläche ( $\Sigma$ 54% der Gesamtwaldfläche)
Fichte (rein)	PA $\geq$ 0.9 & LH=0	30%
Fichte & Lärche	PA $\geq$ 0.8 & LD $\geq$ 0.1	4%
Fichte-Lärche	PA $\geq$ 0.5 & LD $\geq$ 0.2 & (PA+LD $\geq$ 0.9)	6%
Lärche	LD $\geq$ 0.9	2%
Zirbe	PC $\geq$ 0.5	1%
Buche	FS $\geq$ 0.9	3%
Buche-Fichte	FS $\geq$ 0.5 & PA $\geq$ 0.3	2%
Buche-Fichte-Tanne	FS $\geq$ 0.5 & FS+PA+AA > 0.8	2%
Tanne-Fichte	AA $\geq$ 0.5 & AA+PA $\geq$ 0.9	1%
Tanne-MBA	AA $\geq$ 0.5	1%
Kiefer	PS $\geq$ 0.9	2%
Kiefer-NH	PS $\geq$ 0.5 & LH<0.1	1%
Kiefer-LH	PS $\geq$ 0.5 & PS+LH $\geq$ 0.9	1%



**Abb. D-3.3-2.** Anzahl der Simulationseinheiten je Waldtyp.  $N = f(\text{Region} \times \text{Höhenzone} \times \text{Standortstyp} \times \text{Altersklasse})$

In **Abbildung D-3.3-3** wird das Vorkommen von zwei unterschiedlichen Waldtypen auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur dargestellt.



**Abb. D-3.3-3.** Verteilung von zwei ausgewählten Waldtypen auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur.

### D-3.4 Klima

Das als historisches Klima bezeichnete Basisszenario beruht auf der Messperiode 1961-1990 und wurde vom Stationsnetz der ZAMG auf die Erhebungspunkte der österreichischen Waldinventur interpoliert. Als Klimaänderungsszenario wurde in ProForClim das A2 Szenario aus Jacob et al. (2008) verwendet. Neuere Klimawandelszenarios basierend auf den RCP Emissionsszenarios waren für ProForClim noch nicht verfügbar. **Tabelle D-3.4-1** zeigt für die Regionen (Bezug mittelmontane Höhenstufe) Mittelwerte für ausgewählte Klimaparameter.

**Tabelle D-3.4-1.** Historisches Klima und Klimaänderungsszenario in den 15 Regionen für die Höhenstufe Mittelmontan. NS=mittlerer Jahresniederschlag. NS Sommer = mittlerer Niederschlag April-September. Temp= Jahresmitteltemperatur.  $\emptyset$  =Mittelwert der Regionen. Regionwerte sind Mittelwerte der Simulationseinheiten

Region	historisches Klima			A2 2050-2060			A2 2090-2100		
	NS [mm]	NS Sommer [mm]	Temp [°C]	NS [mm]	NS Sommer [mm]	Temp [°C]	NS [mm]	NS Sommer [mm]	Temp [°C]
1+2	1080	650	6.5	1090	650	8.2	1170	680	10.4
3	1510	840	6.5	1500	850	8.1	1530	840	10.3
4	780	480	5.9	880	520	7.5	860	500	9.6
5	920	610	7.0	920	600	8.8	950	610	11.1
6	1070	680	5.6	1060	680	7.4	1130	710	9.6
7	1250	740	6.0	1240	740	7.7	1270	730	10.0
8	1600	930	6.4	1590	920	8.1	1600	880	10.3
9	920	630	5.5	910	640	7.4	950	640	9.7
10	1360	790	5.5	1360	810	7.4	1340	730	10.0
11	1100	680	5.4	1100	700	7.5	1090	680	10.1
12	1210	750	5.6	1200	740	7.4	1190	700	9.7
13	1310	820	6.1	1300	800	7.9	1260	720	10.1
14	850	550	5.7	840	540	7.7	820	490	10.3
15	1950	1130	7.1	1960	1140	9.0	1830	940	11.2
$\emptyset$	1208	734	6.1	1211	738	7.9	1214	704	10.2

### D-3.5 Bewirtschaftungs-Szenarios

Die in ProForClim getesteten Bewirtschaftungsszenarios decken eine große Bandbreite an (i) derzeit praktizierten oder (ii) empfohlenen Waldbaukonzepten zur Schutzwaldbewirtschaftung ab. Zusätzlich wurde als Referenz ein Szenario ohne aktive Bewirtschaftungseingriffe simuliert. Tabelle D-3.5-1 listet alle Bewirtschaftungsszenarios auf. AM1 repräsentiert aktuell häufig angewendete Waldbaukonzepte. In von einer Nadelbaumart dominierten Waldtypen werden in AM1(a) Saumschläge mit hauptsächlich Kunstverjüngung zur Bestandesverjüngung angewendet. AM1(b) stellt eine Modifikation dar und setzt stärker auf Naturverjüngung durch Vorlichten auf etwa einer Baumlänge und etwa 10-15 Jahre danach Räumung des Restbestandes sowie Ergänzung der Naturverjüngung durch Pflanzung. AM1(b) kommt hauptsächlich in Mischbeständen zur Anwendung. Sowohl in AM1(a) als auch AM1(b) ist in der Stangenholzphase eine eher spät angesetzte Auslesedurchforstung vorgesehen.

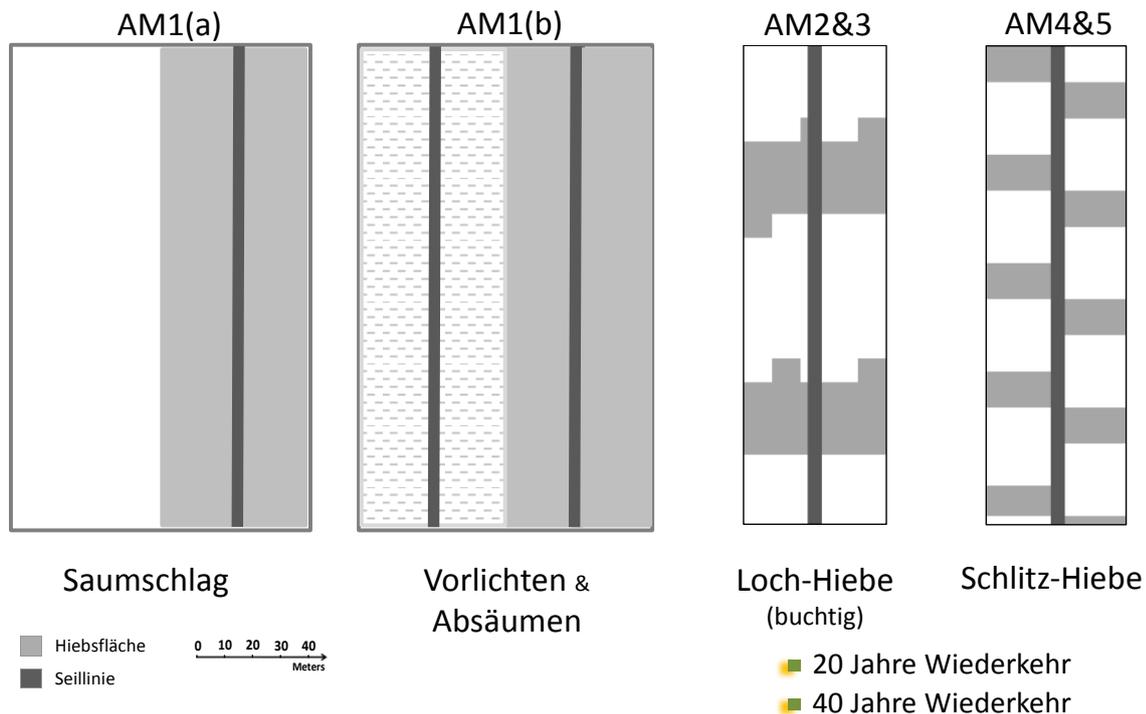
Daneben werden als alternative Waldbaukonzepte zur Bestandesverjüngung buchtige Lücken von etwa 1500 m<sup>2</sup> Größe (AM2, AM3) und schlitzförmige Bestandesöffnungen (AM4, AM5) simuliert. Beide Konzepte werden in einer extensiveren (virtueller Umtrieb 250 Jahre)

und einer intensiveren (virtueller Umtrieb 150 Jahre) Variante umgesetzt. Dies hat zur Folge, dass in den intensiven Varianten (AM3, AM5) ca., alle 20 Jahre ein Eingriff stattfindet, in der extensiven Variante (AM2, AM4) ca. alle 30-40 Jahre.

Die Verjüngungs- bzw. Nutzungsverfahren sind schematisch in Abbildung D-3.5-1 dargestellt.

**Tabelle D-3.5-1.** In ProForClim simulierte Bewirtschaftungsszenarios.

Management Abkürzung	Management Gruppe	Beschreibung	Umtriebszeit
AM1	AM1	Saumschlagverfahren (a) oder Vorlichten & Räumen (b) je nach Waldtyp	120-140
AM2	LOW	Lochhiebe (50 x 30-40m) entlang Seiltrasse	250
AM3	HIGH	Lochhiebe (50 x 30-40m) entlang Seiltrasse	150
AM4	LOW	Schlitzhiebe (30 x 10m) entlang Seiltrasse	250
AM5	HIGH	Schlitzhiebe (30 x 10m) entlang Seiltrasse	150
NOM	NOM	Keine Nutzung	-



**Abb. D-3.5-1.** Schematische Darstellung der Hiebsformen zur Bestandesverjüngung in den Bewirtschaftungsszenarios.

### D-3.6 Indikatoren

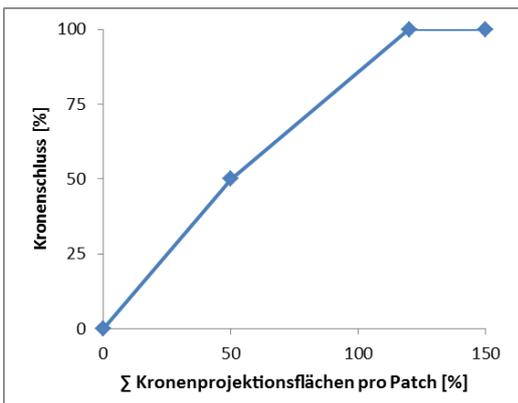
Schutzwirkung ist vor allem von Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur (Baumdimensionen, Stammzahl, Lückengröße und Verteilung, Überschildung) bestimmt. Von den Waldökosystemprozessen Wachstum, Verjüngung und Baum mortalität ist vor allem die Mor-

talität entscheidend für kurzfristig und schlagartig eintretenden Funktionsverlust. (e.g., Wimberly and Spies 2001, Lexer et al. 2002).

Für gegenständliche Studie kommen Indikatoren für die Schutzwirkung gegen Lawinen, Steinschlag, Hangrutschung und Erosion zum Einsatz (Tabelle D-3.6-1), die kürzlich im EU FP7 Projekt ARANGE entwickelt und getestet wurden ([www.arange-project.eu/](http://www.arange-project.eu/), Maroschek et al. 2014)

**Tabelle D-3.6-1.** In ProForClim verwendete Indikatoren zur Beschreibung der Schutzfunktionalität von Waldtypen.

Akronym	Beschreibung
<b>BA</b>	Stammquerschnittsfläche aller Bäume in 130cm Höhe (Grundfläche), [ <b>m<sup>2</sup>/ha</b> ]
<b>BHD</b>	Mittlerer Durchmesser der Bäume in 130cm Höhe (BHD); [ <b>cm</b> ]
<b>DSP</b>	<p><i>Baumartendiversität berechnet als "True Diversity" nach Jost (2006) für alle Bäume ab 5cm BHD. Der Index integriert die Artenanzahl und Häufigkeit der Baumarten gleichermaßen. „True Diversity“ ist gleich der Artenhäufigkeit wenn alle Arten gleich häufig vorkommen.</i></p> $DSP = \exp(H)$ $H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)$ <p><i>Wobei S die Anzahl der Baumarten ist und p<sub>i</sub> der relative Grundflächenanteil einer Art(i).</i></p>
<b>DSI</b>	<p>Strukturdiversität berechnet als Mittelwert der Shannon Entropie Indices angewandt auf die Grundfläche jeweils in Höhenklassen und Durchmesserklassen. Für die Durchmesserklassen wird eine Klassenbreite von 5cm bei einem minimalen BHD von 5cm und für die Höhenklassen eine Klassenbreite von 2m ab 4m Höhe verwendet.</p> $DSI = \frac{H_{DBH} + H_H}{2}$ $H_{DBH} = -\sum_{m=1}^{N_{DBH}} p_m \ln(p_m)$ $H_H = -\sum_{n=1}^{N_H} p_n \ln(p_n)$ <p><i>Wobei N<sub>DBH</sub> die Anzahl der 5cm Durchmesserklassen, N<sub>H</sub> die Anzahl der 2m Höhenklassen, p<sub>m</sub> der relative Grundflächenanteil innerhalb einer Durchmesserklasse und p<sub>n</sub> der relative Grundflächenanteil innerhalb einer Höhenklasse ist.</i></p>

<b>Canopycover</b>	<p>Kronenschlussgrad: Anteil der durch Bäume mit mehr als 5cm BHD übershirmten Bestandesfläche in Prozent.</p>  <p>Im PICUS Modell wurde je Bestand eine Fläche von 2ha simuliert, die sich wiederum in Simulationspatches von je 10x10 Meter aufgliedert. Die nebenstehende Grafik zeigt die Ableitung des Kronenschlußgrades aus der Summe der Kronenprojektionsflächen der einzelnen Bäume je Simulationspatch. Auf Bestandesebene (2ha) wird der Kronenschluß dann als Mittel der Patches errechnet.</p>
--------------------	---

<b>LPI</b>	<p>Landslide protection index: Schutzindex Erosion und Rutschung. Formel basierend auf dem Kronenschlussgrad.</p> <p><b>(1) schlecht:</b> Canopycover &lt; 30%</p> <p><b>(2) mittel:</b> 30% ≤ Canopycover &lt; 60%</p> <p><b>(3) gut:</b> Canopycover ≥ 60%</p>
<b>API</b>	<p>Avalanche protection index: Schutz vor Lawinanriss. Basierend auf Frehner et al. (2005) und Gauquelin &amp; Courbaud (2006). Der Index variiert zwischen 0 und 1, wobei 1 einen wirksamen Lawinenschutz darstellt. Die Hangneigung wurde mit 40% für alle Bestände angenommen.</p> <p>Für immergrüne Bestände gilt:</p> $API = \min \left[ \frac{G}{(0.2901 * \overline{DBH} + 1.494) \times (0.1333 * s - 3)}; 1 \right]$ <p>Für sommergrüne Bestände (inkl. Lärche) und Mischbestände (&lt;70% immergrün) :</p> $API = \min \left[ \frac{G}{(0.2901 * \overline{DBH} + 1.494) \times (0.1333 * s - 3)}; 1 \right]$ <p>Wobei G die Grundfläche[m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>], <math>\overline{DBH}</math> der Mitteldurchmesser für Bäume größer 5cm [cm] und s der Hangneigung in Prozent entspricht.</p>
<b>RPI</b>	<p>Rockfall Protection Index: Steinschlagschutz. Formel basierend auf dem Programm Rockfornet veröffentlicht von Berger and Dorren (2007) (<a href="http://www.ecorisq.org/rockfor-net-en">http://www.ecorisq.org/rockfor-net-en</a>). Der minimale Durchmesser wurde modifiziert, um den Index für ungleichaltrige Wälder anwenden zu können. RPI variiert zwischen 0 und 0.99. Bei einem RPI von 0.99 werden 99% aller Steine des entsprechenden Durchmessers gestoppt bezogen auf 250m Hanglänge.</p>
<b>BBgen</b>	Anzahl der potentiell voll entwickelten Borkenkäfergenerationen ( <i>Ips typographus</i> L.) pro Jahr; [n]
<b>BBvol</b>	Schadholz durch Borkenkäferbefall ( <i>Ips typographus</i> L.) in [Vfm ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ]
<b>MAT</b>	mittlere Jahrestemperatur in Grad Celsius [°]
<b>PJ</b>	Jährliche Niederschlagssumme [mm]
<b>Psom</b>	Jährliche Niederschlagssumme im Sommerhalbjahr (April – September) [mm]

<b>Verjüngung (0-5cm BHD)</b>	Stammzahl pro Hektar in der BHD-Klasse von 0 bis 5cm
-----------------------------------	--

### D-3.7 Simulationsszenarien

Insgesamt wurden für jede Simulationseinheit 24 Szenariokombinationen über jeweils 100 Jahre (2000-2100) simuliert (Tabelle D-3.7-1). Das RCP8.5 Klimaänderungsszenario konnte im Rahmen der kurzen Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden.

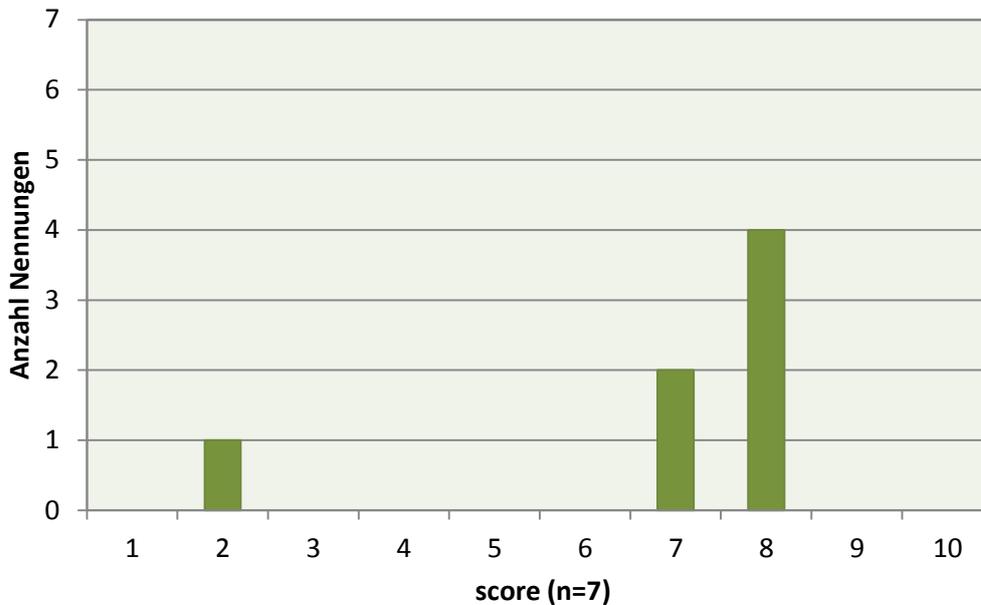
**Tabelle D-3.7-1.** Durchgeführte Szenariosimulationen für alle Simulationseinheiten. 1 = Störungsfaktor berücksichtigt, 0 = Störungsfaktor nicht berücksichtigt.

Klima-szenario	Störungen		Bewirtschaftungsszenarios					
	Borkenkäfer	Verbiss	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	NOM
Historisches Klima	1	1	X	X	X	X	X	X
	0	1	X	X	X	X	X	X
	0	0	X	X	X	X	X	X
	1	1	X	X	X	X	X	X
Klimaände-rungsszenario A2	1	1	X	X	X	X	X	X
	0	1	X	X	X	X	X	X
	0	0	X	X	X	X	X	X
	1	1	X	X	X	X	X	X

## D-4 Ergebnisse

### D-4.1 Interviews mit Schutzwaldreferenten

Von den sieben interviewten Schutzwaldreferenten der LFDs mit alpinem Schutzwald gaben immerhin 6 von 7 an, sich intensiv mit dem Thema Klimawandel beschäftigt zu haben (Abb. D-4.1-1).



**Abb. D-4.1-1.** Wie weit haben Sie sich bisher mit dem Thema Klimawandel und Schutzwald auseinandergesetzt? 1 = überhaupt nicht; 10 = sehr intensiv.

Die Informationsquellen sind vielfältig. Auffallend, dass interne Quellen offenbar keine Rolle spielen (Abb. D-4.1-2).

Die Schwankungsbreite in den Nennungen zu den wichtigsten Waldtypen im Schutzwald ist hoch, es zeichnet sich jedoch ab, dass Fichten-, Fichtenmischbestände und Buchen- und Buchenmischbestände die relativ häufigsten Waldtypen im Schutzwald der 7 befassten Landesforstdirektionen sind (Abb. D-4.1-3). Wird nach den aus Sicht der Schutzwirkung wichtigsten Waldtypen gefragt, kommen nicht ganz überraschend zusätzlich Kiefern- und Kiefern-mischbestände hinzu (Abb. D-4.1-4).

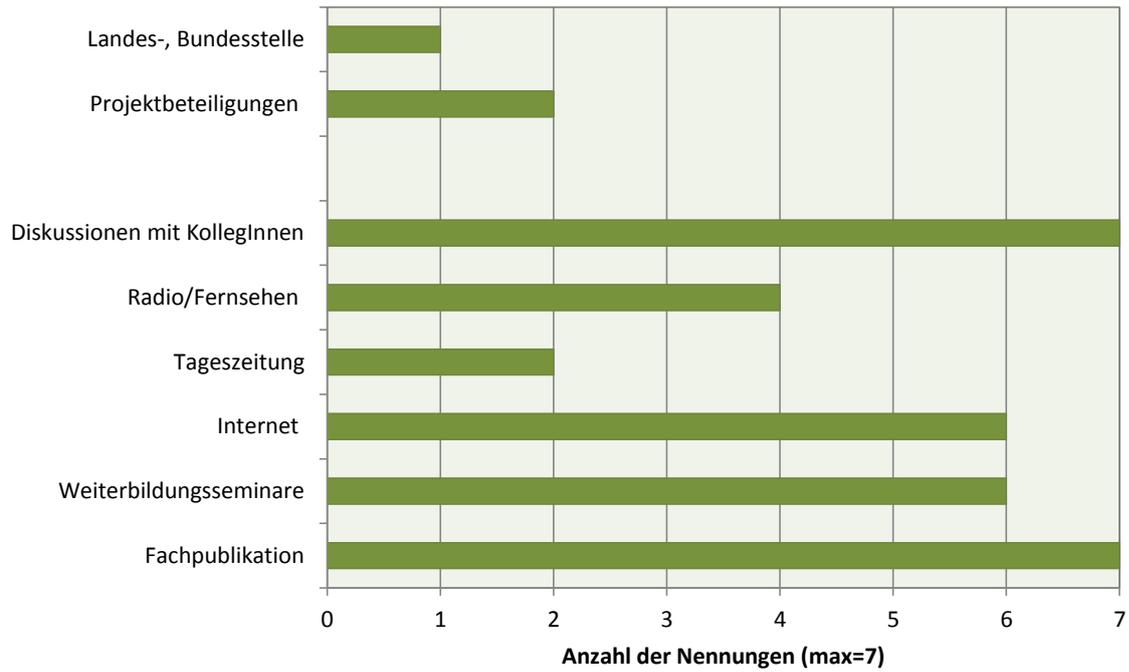


Abb. D-4.1-2. Was sind ihre bevorzugten Informationsquellen? Mehrfachnennungen möglich.

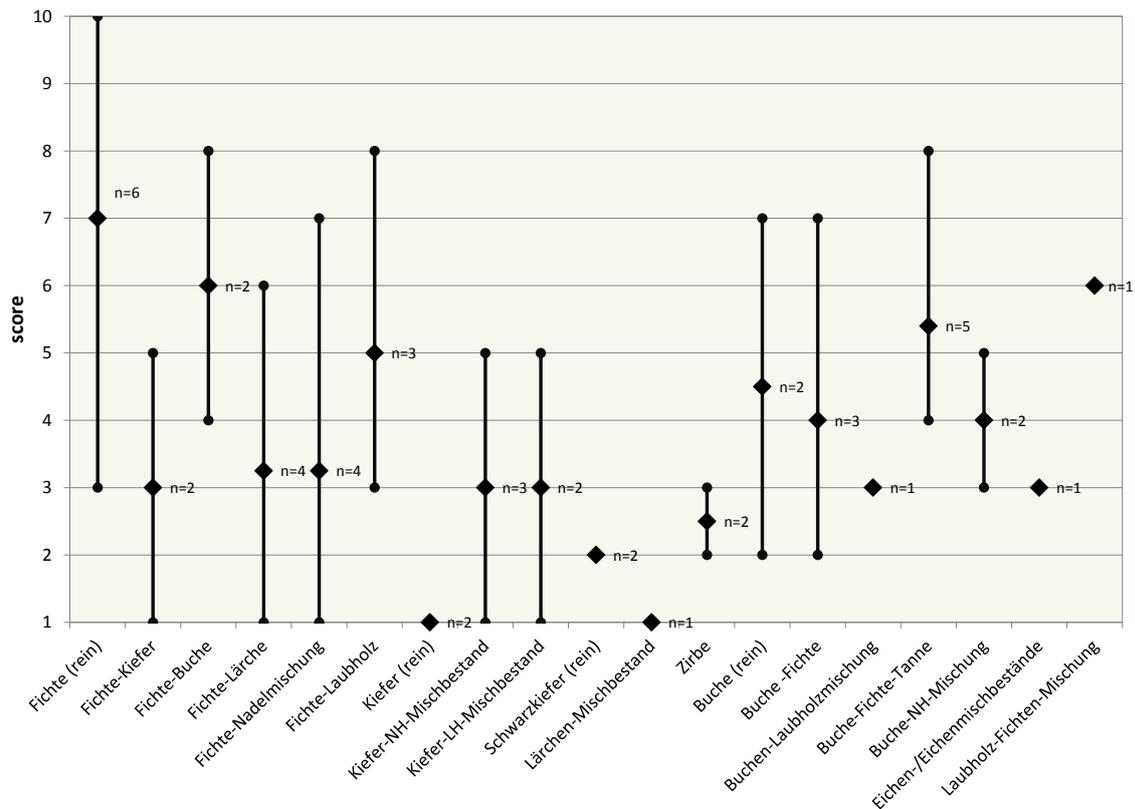
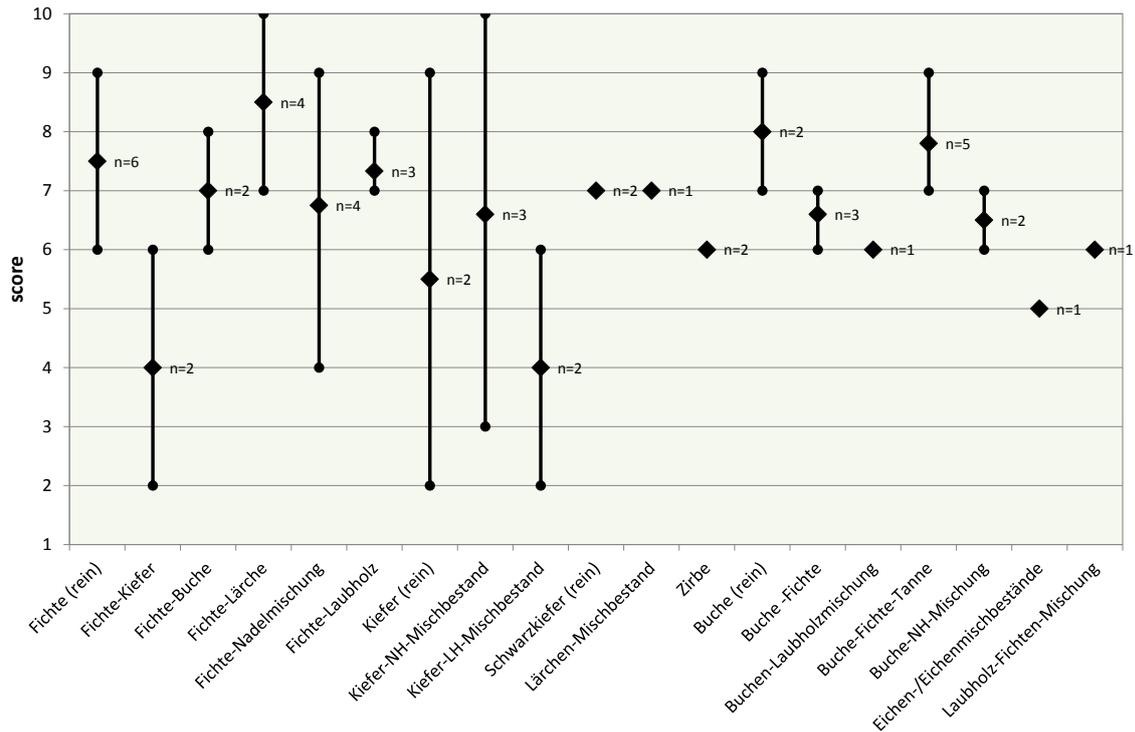
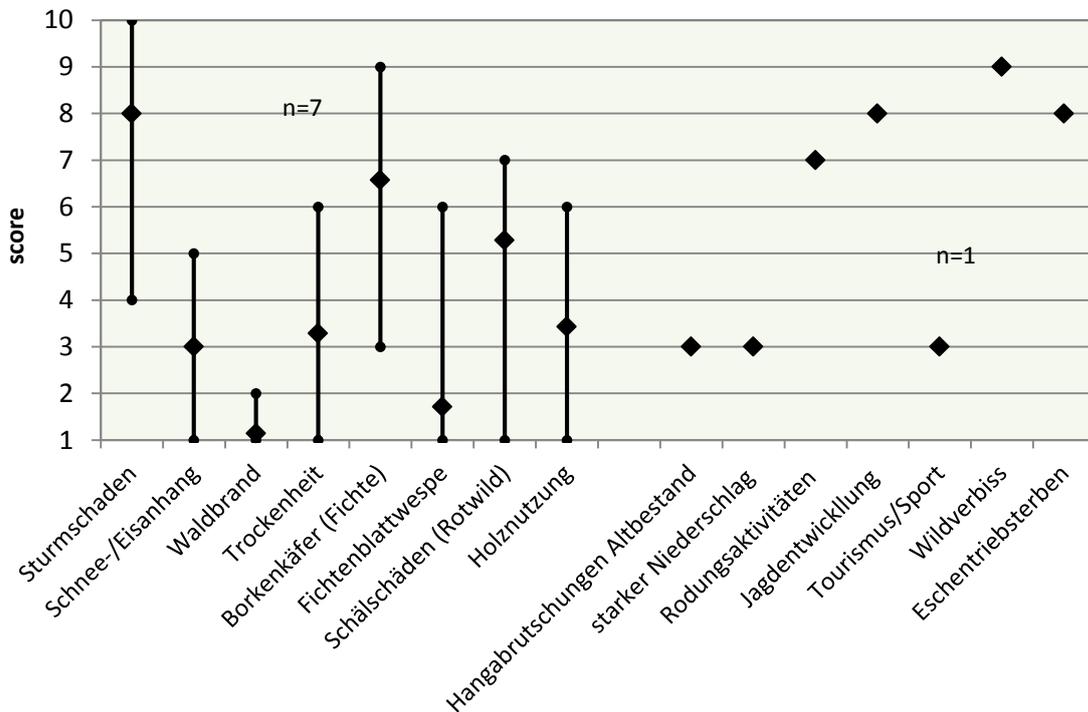


Abb. D-4.1-3. Nennen Sie die für Ihr Bundesland häufigsten Waldtypen im Schutzwald (nur qualitative Einschätzung erforderlich: 1 = sehr gering, 10 = sehr häufig).



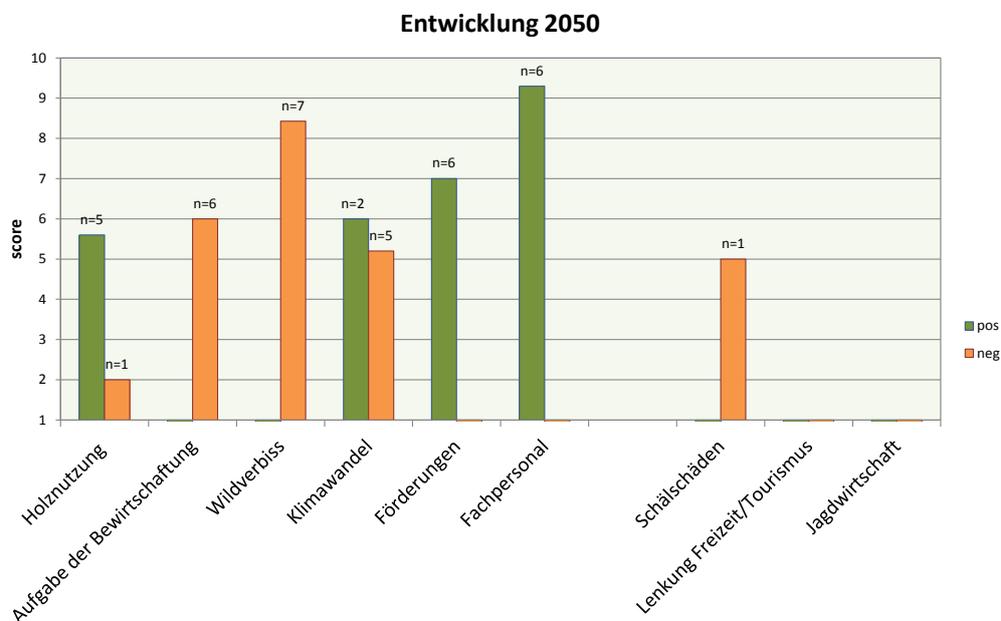
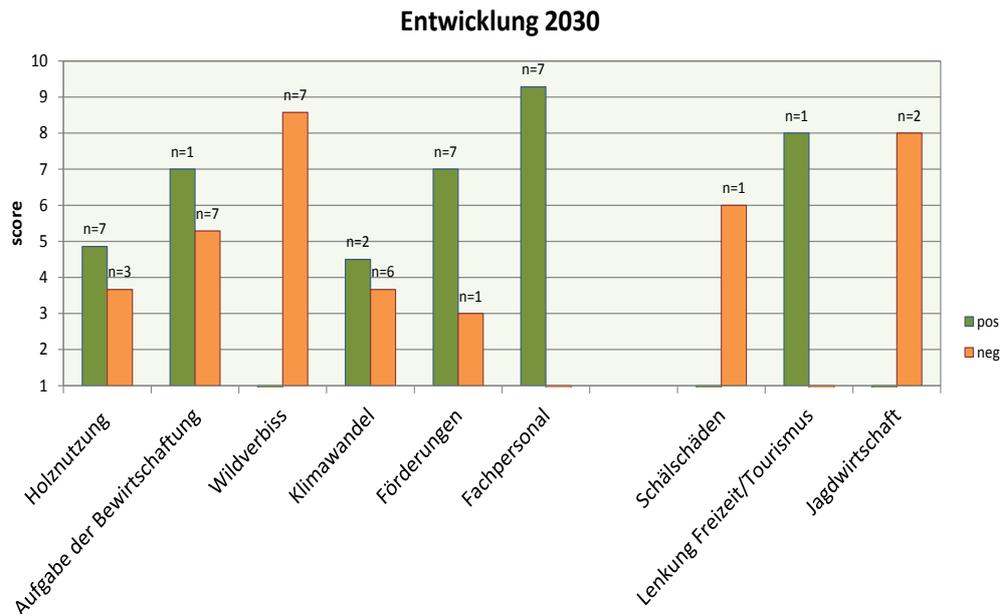
**Abb. D-4.1-4.** Nennen Sie die für Ihr Bundesland wichtigsten Waldtypen im Schutzwald und geben Sie deren Relevanz in Bezug auf die Schutzfunktion an. (1 = überhaupt nicht relevant, 10 = sehr relevant).

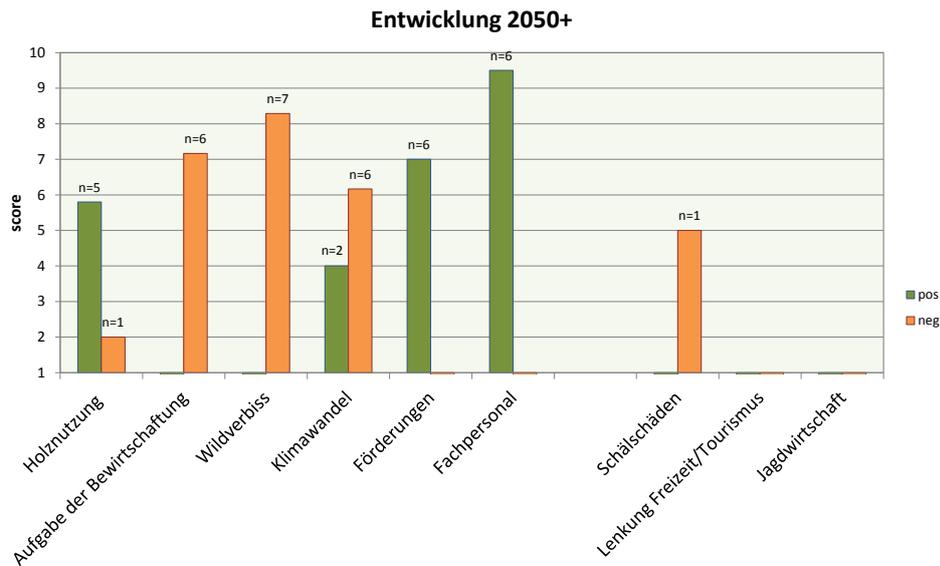


**Abb. D-4.1-5.** Wesentliche negative Einflussfaktoren auf die Schutzwirkung des Waldes in ihrem Bundesland in den vergangenen 10-15 Jahren und schätzen Sie deren Relevanz ein. (1 = überhaupt nicht relevant, 10 = sehr relevant).

Die bisher (vergangene 15 Jahre) am öftesten als negativ für die Schutzwirkung genannten Einflussfaktoren sind Sturm und Borkenkäferschäden (Abb. D-4.1-5). Schältschäden sind ebenfalls häufig als wichtig genannt. Überraschend ist, dass Verbisschäden durch Wildarten nur einmal als hoch wichtig aufscheinen. Abb. D-4.1-6 zeigt in 2 Zeithorizonten die erwart-

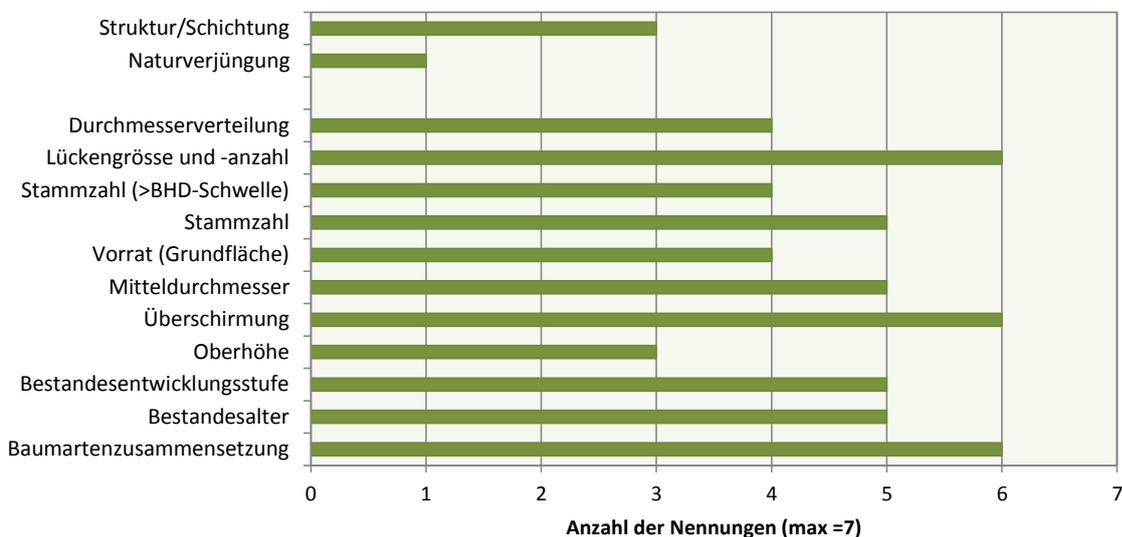
tete zukünftige Entwicklung in Bezug auf positive und negative Einflüsse auf die Schutzwirkung der Wälder. Einhellig als positive werden Fachpersonal und Lenkungsmaßnahmen in Freizeitnutzung/Tourismus gesehen. Eindeutig als zukünftig negativ einwirkend scheinen Wildverbiss, Schälschäden und Jagdwirtschaft allgemein auf. Interessantes Ergebnis ist, dass Holznutzung sowohl als negativ als auch positiv gesehen wird, ähnlich wie der Aspekt „Aufgabe der Bewirtschaftung“. Langfristig wird die Holznutzung deutlich positiver für die Schutzwirkung der Wälder angesehen. Aufgabe der Bewirtschaftung wird langfristig als negativ für Schutzwirkung angesehen. Diese Ergebnisse sind aufschlussreich und bedürfen einer weiterführenden Behandlung.



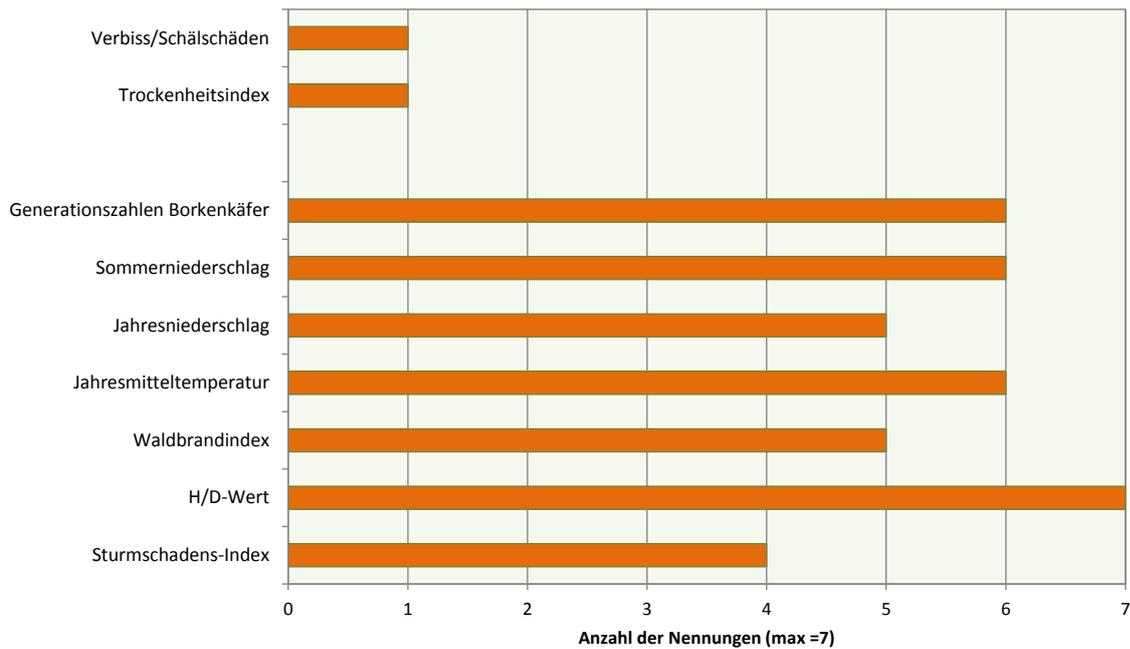


**Abb. D-4.1-6.** Faktoren, die Ihrer Meinung nach die zukünftige Entwicklung der Schutzwirkung (2030, 2050, langfristig 2050+) in Ihrem Bundesland beeinflussen werden und deren Relevanz. (1 = überhaupt nicht relevant, 10 = sehr relevant).

Die im Interview angebotenen Indikatoren zur Beurteilung der Schutzwirksamkeit wurden i.a. alle mit großer Übereinstimmung als sinnvoll angesehen. Überraschend ist, dass Struktur/Schichtung und Naturverjüngung nur 2- bzw. 3-mal genannt wurden. Offenbar liegt das Augenmerk auf der aktuellen Schutzwirksamkeit und weniger auf der Einschätzung, wie sich diese in Zukunft entwickeln könnte.



**Abb. D-4.1-7.** Welche Merkmale (Indikatoren) schätzen Sie als sinnvoll ein, um die Schutzwirksamkeit eines Bestandes (i.e. einer Waldfläche) gegen gravitative Naturgefahren zu beurteilen?



**Abb. D-4.1-8.** Welche Merkmale (Indikatoren) schätzen Sie als sinnvoll ein, um das zukünftige Risiko des Verlustes der Schutzwirksamkeit eines Bestandes (i.e. einer Waldfläche) in Bezug auf gravitative Naturgefahren zu beurteilen?

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich bei der Frage nach Indikatoren für das Risiko des Funktionsverlustes (Abb. D-4.1-8). Insgesamt scheint in Bezug auf diesen Aspekt ein relativ undifferenziertes Meinungsbild zu bestehen.

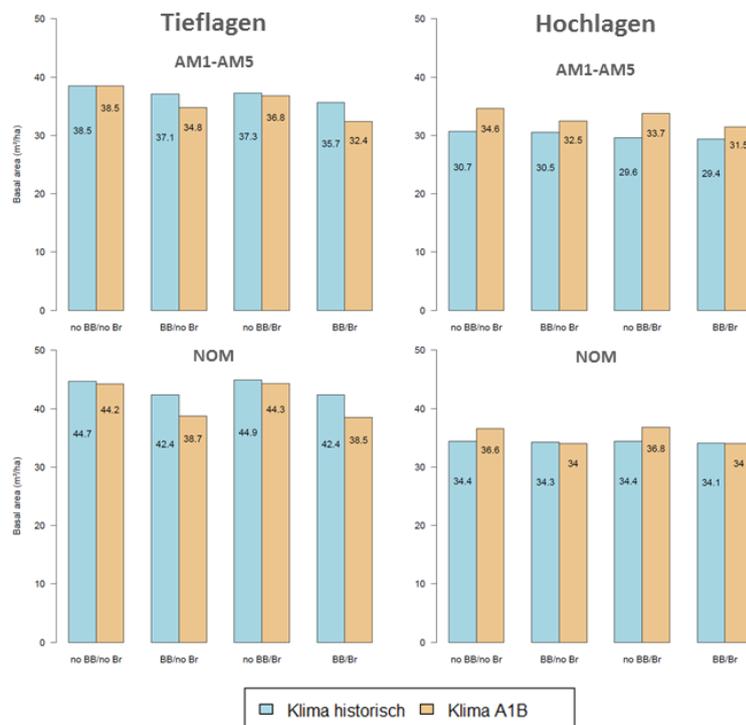
## D-4.2 Schutzwirksamkeit ausgewählter Waldtypen

### D-4.2.1 Überblick – Hochlagen/Tieflagen

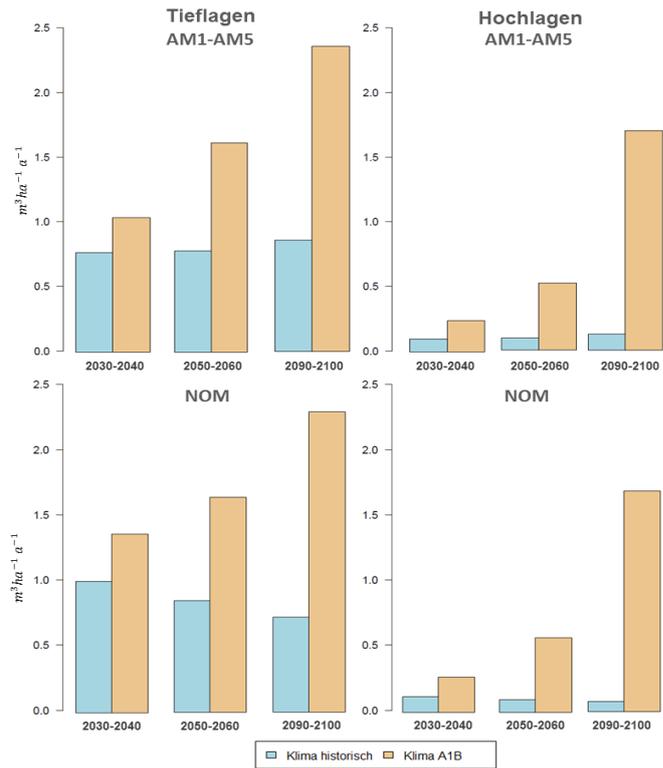
Im Zeithorizont bis zur Periode 2090-2100 zeigen sich unterschiedliche Reaktionsmuster auf die veränderten Bedingungen durch den Klimawandel in den verschiedenen Höhenstufen. Im Folgenden wird deshalb zwischen den Tieflagen (Höhenstufen Kollin bis Mittelmontan), die je nach Region bis etwa 1100m Seehöhe reicht, und den Hochlagen (Hochmontan bis Hochsubalpin) unterschieden. In den Tieflagen kommt es im Klimawandel ohne Störungen (Szenario noBB/noBr) zu keinen größeren Änderungen in der prognostizierten Grundfläche, da sich positive und negative Wuchseffekte im Mittel ausgleichen. Berücksichtigt man allerdings die vermehrt auftretenden Borkenkäferschäden wird die resultierende Grundfläche um 3.5m<sup>2</sup>/ha oder 9% reduziert (Abb. D-4.2.1-1). In den Hochlagen hingegen profitiert der Schutzwald vom Temperaturanstieg und würde bei gleichbleibender Bewirtschaftung ohne Störungen um 13% mehr Grundfläche aufbauen. Die Zunahme der Borkenkäferschäden ist in den Hochlagen, speziell wenn man den Zeithorizont 2090-2100 betrachtet, noch stärker ausgeprägt (Abb. D-4.2.1-2), da die Bestände aufgrund der hohen Fichtenanteile eine höhere Prädisposition aufweisen. Dadurch wird der positive Klimaeffekt um etwa ein Drittel reduziert.

Im Klimawandel tritt durch die Zunahme der Temperatur langfristig eine Änderung der Baumartenzusammensetzung ein. Darüber hinaus ist in vielen Fällen durch die jahrhundertelange Bewirtschaftungsgeschichte der Wälder durch selektive Förderung und überhöhte Wilddichten die Fichte überproportional vertreten und dadurch auch unter historischem Klima

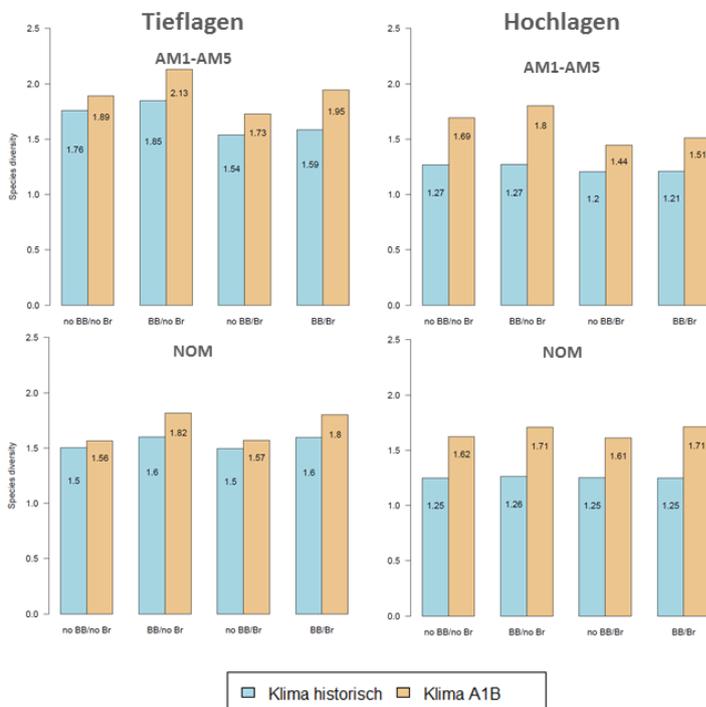
eine Veränderung der Diversität zu erwarten. Durch aktive Bewirtschaftung des Waldes wird wiederum der Baumartenwechsel generell beschleunigt. In den Tieflagen ist die Baumarten-diversität derzeit (Jahr 2010) im gewichteten Mittel bei 1.35, in den Hochlagen bei 1.25. Im Klimawandel nimmt die Diversität zu, während der selektive Verbiss dem entgegen wirkt und Borkenkäferschäden selektiv zu Mortalität von Fichte ab der Stangenholzphase führt. In den Tieflagen steigt die Diversität bis zum Ende des Jahrhunderts unter historischem Klima bei aktiver Bewirtschaftung durchschnittlich auf 1.59 (Abb. D-4.2.1-3) während im Klimawandel ein Anstieg auf 1.95 zu erwarten ist. Ohne selektiven Verbiss (betrifft vor allem die Tanne und Laubmischholz) wäre eine Artendiversität von 2.13 zu erwarten. Im Szenario ohne Bewirtschaftung ist die Entwicklung unter derzeitigem Klima vergleichbar (1.60), während im Klimawandel deutlich weniger Änderung der Diversität erfolgt (1.80 mit Verbiss, und ohne Verbiss 1.82), da ohne Nutzungen weniger Verjüngung initiiert wird und die Bestandesdynamik langsamer abläuft. In den Hochlagen hingegen ist die Ausgangslage anders, da hier die Bestandesstrukturen offener sind. Hier ist beim Szenario mit Verbiss das NOM-Szenario besser als die aktive Bewirtschaftung, was vor allem auf die Nutzung von Tannen in der Oberschicht zurückzuführen ist. Im Klimawandel wird mit Störungseinfluss (Szenario BB/Br) in NOM eine Diversität von 1.71 erreicht, während mit Bewirtschaftung im Mittel 1.51 simuliert wird. Ohne Verbiss, aber mit Borkenkäferstörungen, wird ein Anstieg auf 1.71 (in NOM) bzw. 1.80 (AM1-AM5) erwartet.



**Abb. D-4.2.1-1** Simulierte Bestandesgrundfläche je Hektar, flächengewichtet für Tieflagen (Höhenstufen Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin) in der Periode 2090-2100 für die Szenarien mit aktiver Bewirtschaftung (Mittelwert AM1-AM5) unter verschiedenen Simulationsszenarien. BB= mit Borkenkäfer, noBB= ohne Borkenkäfer, Br= Verjüngungsverbiss, noBr= ohne Verjüngungsverbiss.

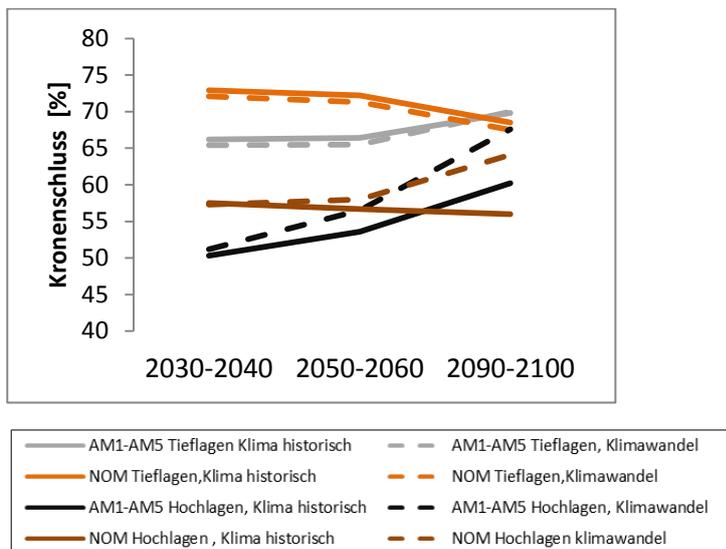


**Abb. D-4.2.1-2** Simulierte Borkenkäferschäden je Hektar und Simulationsjahr, flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin) im Simulationsszenario BB/Br (Borkenkäferschäden und Verbiss). Unten: ohne aktive Bewirtschaftung (NOM). Oben: Mittelwert der Szenarien AM1-AM5.

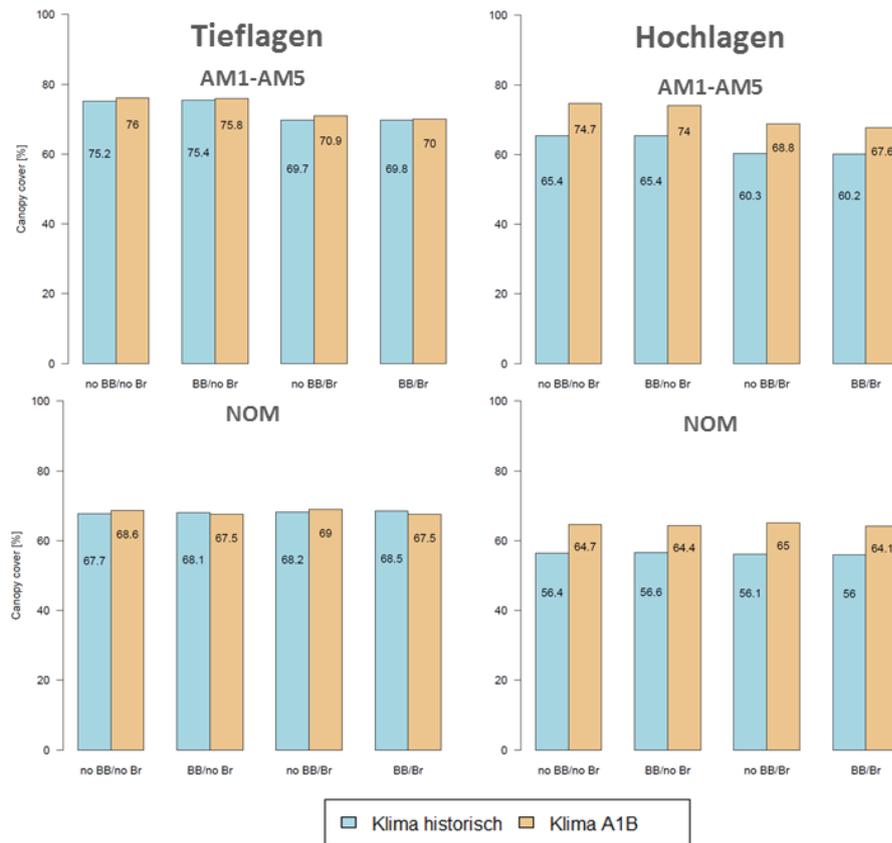


**Abb. D-4.2.1-3** Simulierte Artendiversität flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin) Unten: ohne aktive Bewirtschaftung (NOM). Oben: Mittelwert der Szenarien AM1-AM5. BB= mit Borkenkäfer, noBB= ohne Borkenkäfer, Br= Verjüngungsverbiss, noBr= ohne Verjüngungsverbiss.

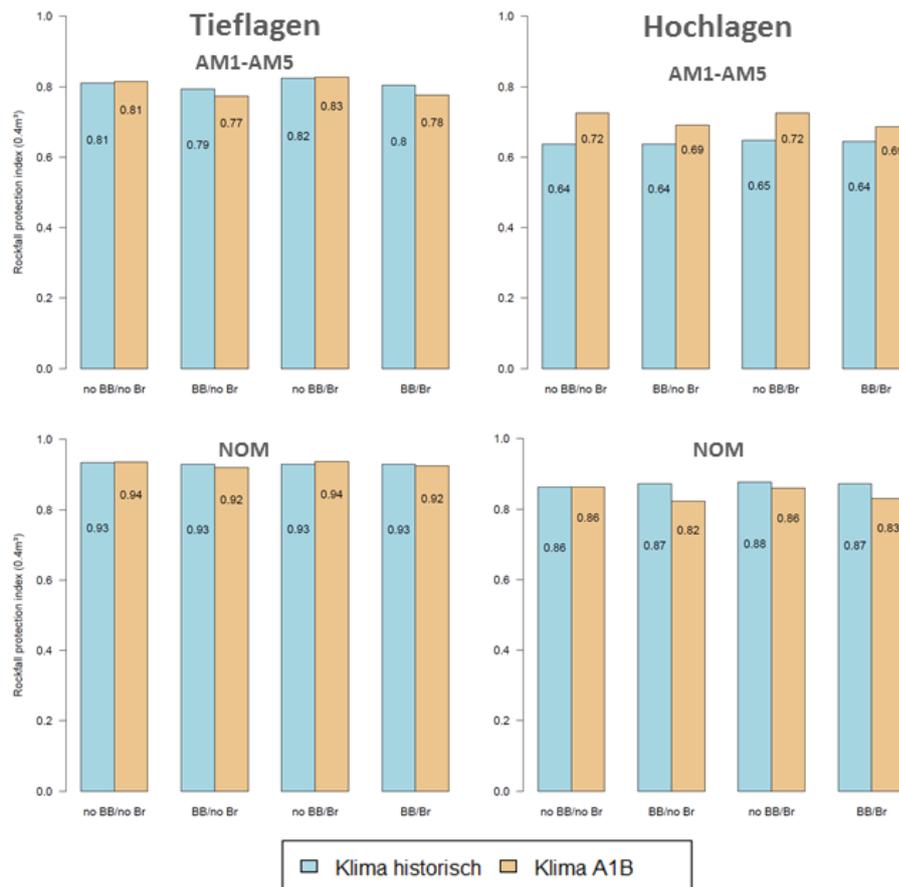
Der Kronenschlussgrades, also die durch Bäume übershirmten Fläche stellt einen wichtigen Indikator für den Schutz vor Hangrutschungen und Muren da. In den Hochlagen ist der Kronenschluss in P1 bei aktiver Bewirtschaftung (AM1-AM5) bei 50%, in den Tieflagen bei 66%, ohne Bewirtschaftung jeweils 7% darüber. In Abbildung D-4.2.1-4 ist die zeitliche Entwicklung des Kronenschlussgrads dargestellt. Es zeigt sich in den Szenarien mit aktiver Bewirtschaftung unter historischem Klima eine positiver Trend (+4% in den Tieflagen, bzw. +10% in den Hochlagen). Im NOM-Szenario ist der Kronenschluss zunächst deutlich höher, hat aber dann eine sinkende Tendenz und liegt in der dritten Periode bereits unterhalb der Bewirtschaftungsszenarien. Verbiss reduziert den Kronenschluss durch geringere Stammzahlen in der Verjüngung (Abb. D-4.2.1-5). Dieser Effekt ist in den Szenarien mit aktiver Bewirtschaftung bereits ab der 1. Periode klar ersichtlich (- 3% in den Tieflagen, -2% in den Hochlagen). In der 3. Periode ist der Effekt bei -5% (bzw. 4% in den Hochlagen). Dagegen beeinflussen die Schäden durch Borkenkäfer erst im Klimawandel in der 3. Periode den Kronenschluss leicht negativ.



**Abb. 4.2.1-4** Simulierte Entwicklung des Kronenschlussgrades mit Störungen (Szenario BB/Br) flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin)



**Abb. D-4.2.1-5** Simulierte Entwicklung des Kronenschlusses flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin). Unten: ohne aktive Bewirtschaftung (NOM). Oben: Mittelwert der Szenarien AM1-AM5. BB= mit Borkenkäfer, noBB= ohne Borkenkäfer, Br= Verjüngungsverbiss, noBr= ohne Verjüngungsverbiss



**Abb. D-4.2.1-6** Simulierte Steinschlagschutzwirkung (Blockgröße Dm. 0.46m) flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin) Unten: ohne aktive Bewirtschaftung (NOM). Oben: Mittelwert der Szenarien AM1-AM5. BB= mit Borkenkäfer, noBB= ohne Borkenkäfer, Br= Verjüngungsverbiss, noBr= ohne Verjüngungsverbiss

Im Durchschnitt ist unter allen Simulationsszenarien (Management und Klima) eine Abnahme im Steinschlagschutz von Periode 1 zu Periode 3 festzustellen (Abb. D-4.2.1-6). Unter aktiver Bewirtschaftung (AM1-AM5) sinkt in den Tieflagen der Schutzindex (0.4m<sup>3</sup>) auch ohne Störungseinfluss von 0.92 auf 0.81 im historischen Klima und auch im Klimaänderungsszenario. In den Hochlagen nimmt der Index unter historischem Klima von 0.85 auf 0.64 ab, liegt aber hier im Klimawandel etwas höher (0.72). Der Klimawandel bewirkt eine Reduktion der Schutzwirkung durch die Borkenkäferschäden in den Tieflagen (-0.02), während in den Hochlagen die besseren Wuchsbedingungen zu dichteren Bestandesstrukturen und dadurch trotz zunehmenden Borkenkäferschäden zu einer besseren Schutzwirkung führen (+0.05). Ohne Bewirtschaftung ist der Steinschlagschutz generell besser, jedoch ist in den Hochlagen ein negativer Einfluss durch den Klimawandel zu beobachten (-0.04).

#### D-4.2.2 Detailanalyse ausgewählter Bestandestypen

Für die wichtigsten Waldtypen (vergleiche Abschnitt D-4.1 Interviews mit Schutzwaldreferenten) wird ein detaillierter Blick auf die Simulationsergebnisse einzelner Bestände der Altersklasse 8 geworfen und die erwartende Entwicklung unter verschiedenen Szenarios verglichen.

##### Bestandestyp Fichte(rein)

###### Allgemeines:

Der Bestandestyp Fichte (rein) kommt im österreichischen Wald am häufigsten vor (30% der Waldfläche) und hat eine herausragende Rolle im österreichischen Schutzwald. Um die Auswirkungen des Klimawandels in verschiedenen Regionen mit unterschiedlichem Niederschlagsregime zu vergleichen wurden Bestandestypen der Höhenstufen Hochmontan und Tiefsubalpin aus der Region 5 (hm: 680mm Sommerniederschlag, bei MAT 5.5°C) mit der Region 8 verglichen (hm: 950mm Sommerniederschlag und 5°C). Im Klimawandel ist für beide Regionen ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um etwa 4°C bis zur Periode 3 zu erwarten, bei etwa gleichbleibenden Niederschlagswerten.

###### Beschreibung der simulierten Bestandesentwicklung:

Die Bestandesgrundfläche (BA) sinkt unter den Schutzwaldbewirtschaftungsszenarios AM2-AM5 von Periode 1 zu Periode 2 zunächst leicht, steigt aber dann bis Periode 3 wieder über den Anfangswert hinaus an. In der Variante AM1 (Saumschlag/Saumschirmschlag) ist die Grundfläche in der ersten Periode durch die flächige Nutzung und Wiederaufforstung gering, steigt dann aber in Periode 2 und 3 kräftig an. Generell wird durch die Nutzungen, je nach Intensität der Szenarien, der Bestand auf Teilflächen verjüngt und eine verstärkte Wuchsdynamik in Gang gesetzt. Im Szenario ohne Managementeingriffe hingegen bleibt die Grundfläche nahezu konstant und nur im Klimawandelszenario ist eine leicht ansteigende Tendenz bemerkbar. Im hochmontanen Bestandestyp hat der Klimawandel nur geringen Einfluss auf die Gesamtgrundfläche, während im tiefsubalpinen Bereich eine etwas höhere Bestockung zu erwarten ist. Vergleicht man diese Trends mit der Region 8 ist die Entwicklung ähnlich, die beschriebene Bestandesdynamik jedoch etwas schwächer ausgeprägt. Die analysierten Bestände in Region 8 weisen zwar mehr Sommerniederschlag auf haben jedoch andererseits eine geringere Produktivität aufgrund von Standortsunterschieden.

Unter historischem Klima liegt die erwartete Menge an Borkenkäferschäden bei 0-0.5 m<sup>3</sup> pro Hektar und Jahr, jedoch steigt sie in Periode 3 im Klimaänderungsszenario auf bis zu 2.5m<sup>3</sup>, sowohl in der hochmontanen als auch in der submontanen Stufe. Die Schadmenge ist bei Management AM1 durch den höheren Vorrat am höchsten prognostiziert. Durch die etwas günstigeren Klimaverhältnisse in Region 8 werden hier weniger Schäden erwartet (im Durchschnitt jährlich 0.4m<sup>3</sup>/ha weniger).

Die Baumartendiversität (DSP) bleibt unter historischem Klima in beiden Regionen auf niedrigem Niveau, da der hohe Verbissdruck keinen Einwuchs von Mischbaumarten (v.a. Tanne) zulässt. Im Klimaänderungsszenario steigt die Diversität in der dritten Simulationsperiode an (deutlich in der hochmontanen Stufe). In der Region 8 ist dieser Anstieg geringer. (P3 hm: in Region 5: 1.8-2.2, Region 8: 1.4-1.7). Der geringste Effekt durch den Klimawandel tritt bei AM1 ein, da hier die zukünftige Baumartenzusammensetzung weitgehend durch die Aufforstung und darauf folgenden Pflegemaßnahmen bestimmt werden.

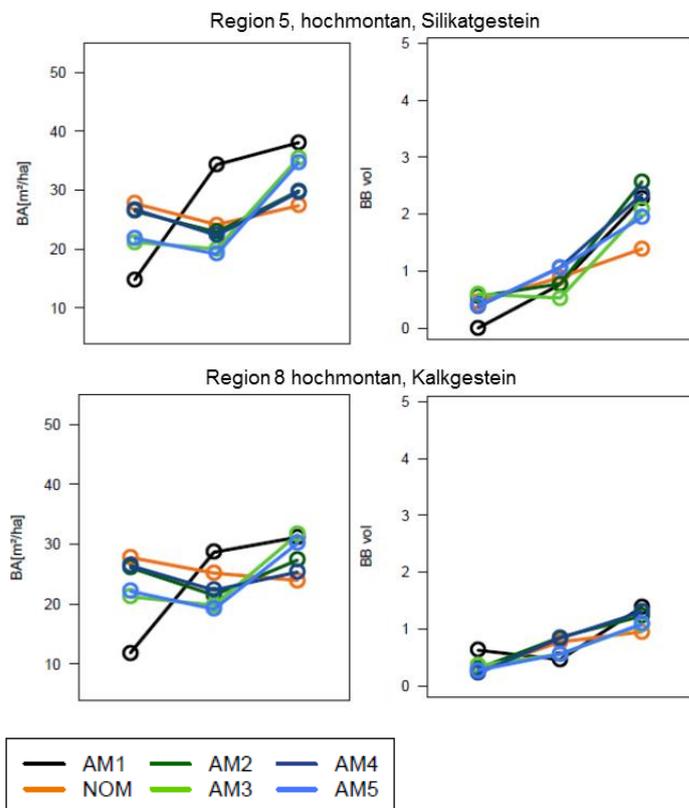
Die Strukturdiversität (DSI) zeigt in Region 5 unter historischem Klima und Klimaänderungsbedingungen zunächst eine konstante Entwicklung und dann in der Periode 3 einen leicht abfallenden Trend bei Bewirtschaftung mit den Schutzwaldkonzepten. Verglichen damit liegen die Bestände ohne Managementeinfluss zunächst etwas darunter, steigen aber dann in P3 an. Grund dafür ist, dass die Anzahl der großen Bäume (>50cm BHD) in NOM konstant bleibt, jedoch in den Nutzungsszenarien abnimmt. In AM1 (Saumschlag, Saumschirmschlag)

nimmt die Strukturdiversität durch die homogenisierenden Verjüngungsverfahren deutlich ab. Dieselben stark durch das Management geprägten Trends zeigen sich auch in der Region 8.

Der Kronenschlussgrad (CC) und damit die Schutzwirkung vor Erosion ist stark von der Entwicklung einer Verjüngungsschicht im Bestand geprägt, welche wiederum durch die Nutzungsintensität und Borkenkäferschäden beeinflusst wird. In der Periode 1 ist der Kronenschluss bei den Schutzwaldszenarien bei etwa 40 Prozent (historisches Klima ohne Störungen). Die Szenarien mit höherer Nutzungsintensität (AM3/AM5) liegen zunächst etwas niedriger, steigen dann aber in P3 mit 65% höher an als die extensiverer Schutzwaldbewirtschaftung (AM2/AM4: 55% in P3). Im Szenario AM1 entwickelt sich durch die homogene Verjüngung eine sehr dichte Bestandesstruktur mit etwa 90% Kronenschlußgrad ab der Periode 2, während unter NOM der Kronenschluß am niedrigsten ist. Die Störungen durch borkenkäferbedingte Mortalität bewirken unter historisches Klima in der hochmontanen Stufe eine Reduktion des Kronenschlusses um etwa 5-10% (sichtbar in NOM und AM2-AM5). Im Klimaänderungsszenario ist diese Reduktion auch in der tiefsubalpinen Stufe zu erwarten. Durch die schneller heranwachsende Verjüngung wird dieser negative Effekt teilweise kompensiert. Region 8 zeigt eine vergleichbare Dynamik.

Der Steinschlagschutz vor großen Steinblöcken (RPI3) nimmt in der unbewirtschafteten Variante (NOM) und den Schutzwaldkonzepten ab (historischem Klima und Klimawandelszenario). Die schlagweise Bewirtschaftung in AM1 bietet praktisch keinen Schutz gegen Stein Schlag in den ersten beiden Perioden. In Periode 3 (2090-2100) steigt die Schutzwirkung aber durch die dann größeren Durchmesser der Bäume und ist ähnlich wie in den anderen Bewirtschaftungsszenarien. Region 8 zeigt eine ähnliche Entwicklung.

Der Schutz vor dem Anriss von Waldlawinen (API) ist in den ausgewählten Höhenstufen für diesen Waldtyp immer optimal ausgeprägt.



**Abb. D-4.2.2-1** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Bestandesgrundfläche (BA) und Borkenkäferschäden (BB vol) im Fichten-Nadelholz Waldtyp der Höhenstufe Hochmontan unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen.

## Bestandestyp Fichte + Lärche

### Allgemeines:

Der Fichte + Lärche Typ kommt vorwiegend in den Höhenstufen Mittelmontan bis Tiefsubalpin vor. Bei diesem Bestandestyp werden die Regionen 14 und 6 verglichen, da in diesen Regionen Bestände der Altersklasse 8 jeweils entlang eines Höhengradienten vorkommen: Region 6 weist unter historischem Klima in der tiefsubalpinen Zone einen Sommerniederschlag von 700mm bei einer Mitteltemperatur von 4°C auf. In Region 14 ist das Temperaturniveau im Mittel etwas tiefer und man findet ähnliche Temperaturverhältnisse in der Stufe Hochmontan vor, jedoch bei geringeren Niederschlagswerten (SNS: 600mm). Im Klimawandel wird für beide Regionen ein Anstieg auf 8°C, bei gleichem bis leicht abnehmendem Niederschlag, bis zur Periode 3 erwartet.

### Beschreibung der simulierten Bestandesentwicklung:

Betrachtet man die Entwicklung der Grundfläche für diese beiden beschriebenen Bestände zeigt sich eine ähnliche Tendenz wie im Fichten-Nadelholztyp: Von Periode 1 zu Periode 2 nimmt die Grundfläche unter AM2-AM5 sowie NOM ab. Bis Periode 3 kommt es zu einer Stabilisierung (NOM) bzw. leichten Zunahme (AM2-AM5) in Region 14, und einer etwas stärkeren Zunahme in Region 6. Die Reaktion auf den Klimawandel ist abhängig vom Zusammenspiel von Temperatur und Niederschläge: In beiden Regionen ist, beginnend mit der tiefsubalpinen Höhenstufe, eine spürbare Zunahme der Bestandesgrundfläche zu erwarten, obwohl die Jahresmittel in Region 14 in derselben Höhe um 1°C tiefer liegt. Bei den tiefer liegenden Beständen nimmt der Zuwachs nur wenig zu und kann die zunehmenden Borkenkäferschäden nicht mehr kompensieren.

Unter historischem Klima sind die Borkenkäferschäden bei einer Mitteltemperatur von 4°C sehr gering, da es nur in einzelnen Jahren ausreichende Temperatursummen zur Ausbildung einer vollständigen Käfergeneration vorkommen. Im Klimawandel wird diese Schwelle bereits in Periode 1 (2030/2040) überschritten und in Periode 3 kommt es teilweise zur Ausbildung einer 2. Generation und damit zu einem enorm gesteigerten Schadenspotential in Beständen die heute nur gering bis gar nicht vom Borkenkäferproblem betroffen sind.

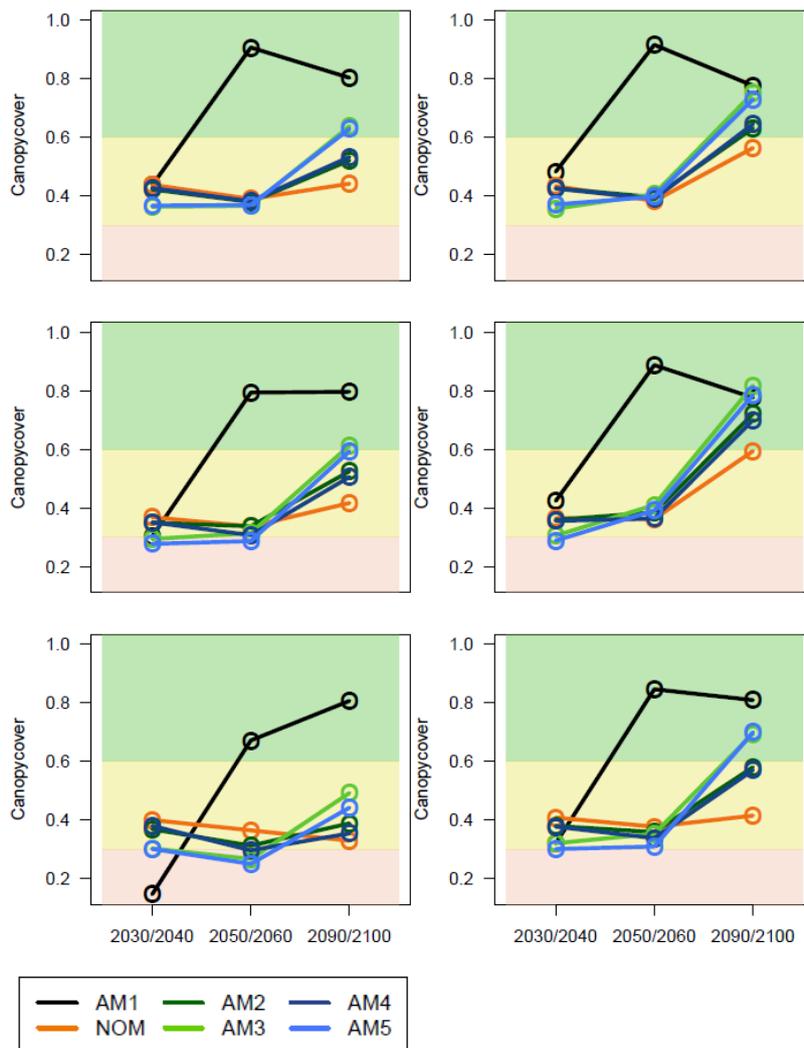
Die Baumartendiversität (DSP) nimmt unter historischem Klima in Region 6 in den mittel- und tiefmontanen Lagen zu (in Region 14 ist der Bestandestyp auf diesen Höhenstufen nicht vertreten). In den darüber liegenden Höhenstufen bleibt die Diversität in etwa konstant. Im Klimawandel kommt es zu einem Anstieg der Artendiversität bis in die subalpinen Standorte. Der stärkste Anstieg ist unter der nicht bewirtschafteten Variante (NOM) zu beobachten, der geringste Effekt wiederum unter AM1.

Die Strukturdiversität ist aufgrund der ähnlichen Baumartenzusammensetzung zu Beginn und der hohen Abhängigkeit vom Management ähnlich zum Typ Fichte-Nadelholz.

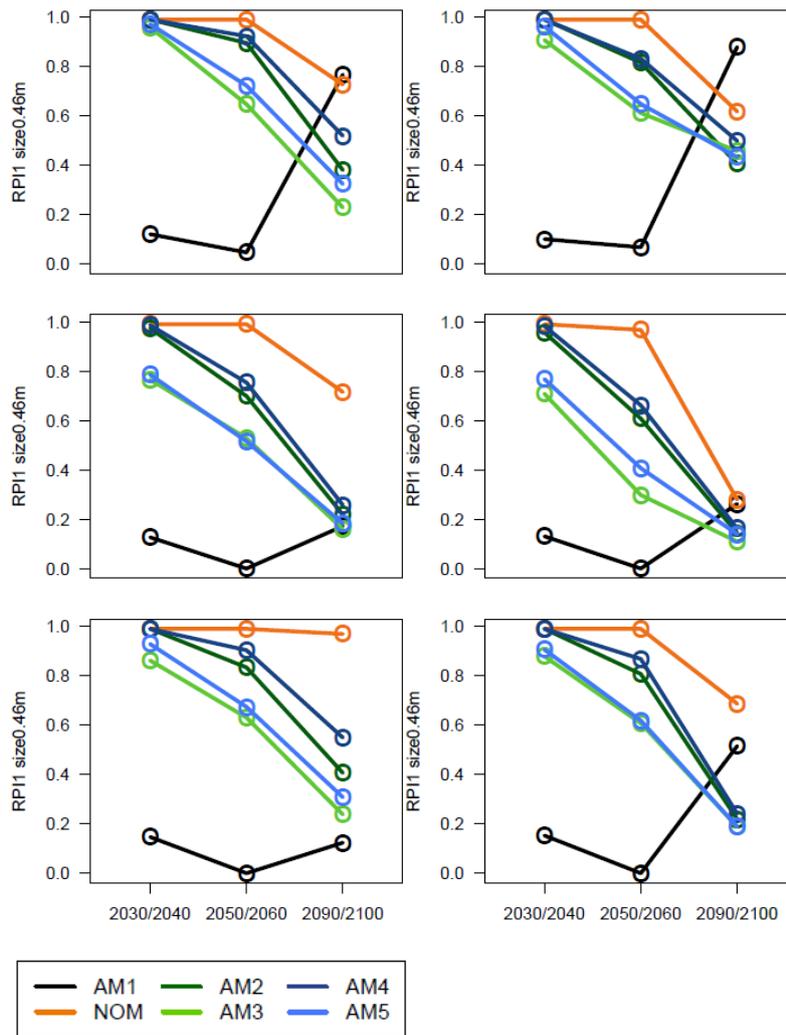
Auch der Kronenschlussgrad entwickelt sich ähnlich: Das Szenario AM1 schneidet in der hochsubalpinen Stufe in Periode 1 besonders schlecht ab, da die Verjüngung erst ab dem Jahr 2040 die nötigen Dimensionen erreicht (Abb. D-4.2.2-2). Auch in den Schutzwaldszenarien mit höherer Intensität (AM3/AM5) liegt der Kronenschirm unter der kritischen Marke von 30% in Periode 1 und 2. Im Klimawandel wird der Kronenschlußgrad im Allgemeinen leicht positiv beeinflusst. Besonders stark profitiert das Szenario AM1 in den höheren Lagen, da die Verjüngung bessere Wuchsbedingungen vorfindet. Betrachtet man den Verlauf des Kronenschlußgrades mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Jahren, liegen die Minimalwerte bei AM1 auch im Klimawandel noch unter 30% liegt.

So wie der Kronenschlussgrad ist auch der Schutz vor dem Anriss von Waldlawinen seehöhenabhängig und unterhalb der Stufe Subalpin immer sehr gut ausgebildet. In der Tiefsubalpinen Stufe ist im Szenario ohne Bewirtschaftung in der Periode 1 ein leichter Rückgang zu beobachten, in weiterer Folge wird der Index auch hier wieder optimal. In der hochsubalpinen Stufe ist die Schutzwirkung in Periode 1 für AM1 (API 0.78) und auch für NOM und AM3/AM5 (0.9) suboptimal, steigt aber auch hier in Periode 2 für alle Szenarien wieder nahe 1, womit Lawinenabgänge aus dem Bestand wieder sehr unwahrscheinlich werden.

Der Steinschlagschutz vor kleineren Steinblöcken (RPI1) nimmt in der Region 14 in der unbewirtschafteten Variante (NOM) und den Schutzwaldkonzepten tendenziell ab unter historischem Klima. Im AM1 ist praktisch kein Schutz gegen Steinschlag in den ersten beiden Perioden vorhanden, in P3 steigt die Schutzwirkung aber wieder an. AM1 profitiert dabei im Klimawandel vom rascheren Wuchs der Verjüngung. Im Gegensatz dazu wird die Schutzwirkung unter NOM im Klimawandel vermindert da sich hier durch Verjüngung die Mittendurchmesser in P3 absinken aber die Grundfläche gleich bleibt.



**Abb. D-4.2.2-2** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) der Kronenschlussgrade im Fichten-Lärchen Waldtyp in Region 14 unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen. Oben: Höhenstufe Hochmontan. Mitte: Tiefsubalpin. Unten: Hochsubalpin. Linke Spalte: unter historischem Klima. Rechte Spalte: unter Klimaänderungsszenario A2.



**Abb. D-4.2.2-3** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Steinschlagschutz-Indikator RPI1 (Blockgröße Durchmesser 0.46m) im Fichten-Lärchen Waldtyp in Region 14 unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen. Oben: Höhenstufe Hochmontan. Mitte: Tiefsubalpin. Unten: Hochsubalpin. Linke Spalte: unter historischem Klima. Rechte Spalte: unter Klimaänderungsszenario A2.

### Bestandestyp Buche-Fichte-Tanne :

#### Allgemeines:

Dieser Bestandestyp kommt vorwiegend in den Höhenstufen Tief- und Mittelmontan vor und nimmt derzeit 2% der Waldfläche ein. Im Klimawandel wird durch die besseren Wuchsbedingungen für Buche und Tanne eine flächenmäßige Zunahme des Typs erwartet. Es werden hier im Detail 4 Bestände der Altersklasse 8 aus den Regionen 8, 5 und 11 verglichen.

#### Beschreibung der simulierten Bestandesentwicklung:

Die Grundflächenentwicklung unter historischem Klima ist zunächst stabil bis leicht abnehmend, steigt dann aber von Periode 2 zu Periode 3 durchwegs an. Vergleicht man die Managementszenarien NOM und den Schutzwaldszenarien AM2-AM5 treten nur geringe Unterschiede in der resultierenden Grundflächenentwicklung auf. Im Management AM1 ist wie in den fichtendominierten Bestandestypen, die Grundfläche in Periode 1 deutlich abgesenkt, nimmt dann aber stark zu und resultiert in Periode 3 in sehr ähnlichen Werten wie die Schutzwaldszenarien und NOM. Im Klimaänderungsszenario ist auf den Karbonatstandorten mit geringerer Wasserspeicherkapazität keine wesentliche Änderung des Zuwachsverhaltens und somit der Grundflächenentwicklung zu erwarten, während auf gut nährstoffversorgten Silikatstandorten (hier als Beispiel in der Wuchsregion 6) ein höhere Bestandesgrundfläche in der 3. Periode zu erwarten ist (etwa +5m<sup>2</sup>/ha).

Das Borkenkäfermodul errechnet für die Bestände bereits bei derzeitigem Klima ein großes Schadpotential (im Durchschnitt 1.8-2 ausgebildeten Käfergeneration im tiefmontanen Bereich und 1.2 mittelmontan). Durch die geringen Anteile der Fichte (maximal 20%) in diesem Bestandestyp bleiben die Schäden bei etwa 0.5-0.8m<sup>3</sup>/ha relativ gering. Auch im Klimawandel steigt dadurch das Schadvolumen nicht wesentlich an.

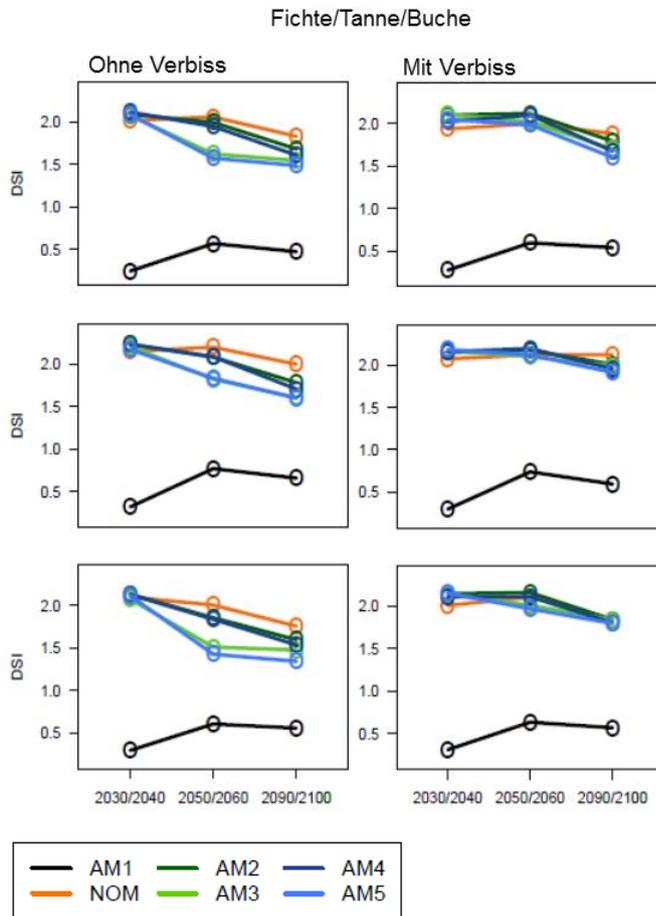
Die Baumartendiversität ist bei historischem Klima in den meisten Beständen stabil bei etwa 2.5. Durch den Klimawandel ergibt sich in Periode 3 eine Abnahme der Diversität, da der Anteil der Fichte und Tanne durch Borkenkäfer und selektivem Verbiss abnimmt. Im Simulationsszenario ohne Verbißschäden zeigt sich, dass der Tannenanteil zwar unter derzeitigem Klima in den Beständen steigen würde, jedoch im Klimawandel nur mehr auf den besseren Standorten und im Silikat eine Zunahme eintritt und auf Karbonat trotz Wegfalles von Verbiss der Tannenanteil konstant bleibt da ihre Konkurrenzkraft abnimmt.

Die Strukturdiversität ist konstant, bzw. nimmt etwas ab. Im Vergleich der Managementszenarien liefert auch hier AM1 einen deutlich schlechteren Wert. Klimaänderung resultiert nur in geringen Auswirkungen. Für die Strukturdiversität ist insbesondere die Verbiss der Verjüngung relevant. Ein Wegfall von Verbiss verursacht einerseits eine Änderung der Baumartenzusammensetzung in der Verjüngung und damit langfristig eine geringere Artendiversität, andererseits führt der Verbiss auch zu einer Änderung in der Stammzahl und Struktur der Verjüngung. Der Fichten/Tannen/Buchen Typ weist dabei eine hohe Sensitivität bezüglich der Bewirtschaftung auf (siehe Abbildung D-4.2.2-4). Bei den Schutzwaldszenarios mit höherer Intensität (AM3/AM5) ergibt sich eine geringere Strukturdiversität, da eine relativ homogene, stammzahlreiche Verjüngung heranwächst. Dagegen bleibt die Struktur in NOM konstant und nimmt unter AM2/AM4 durch wenig ab, da die Bestandesstruktur erhalten bleibt und diffizilere Lichtverhältnisse zu einer Stammzahlärmeren und besser strukturierteren Verjüngungsschicht führen. Beim Szenario mit Verbiss wird das Verjüngungswachstum hingegen verlängert und die Stammzahl reduziert, wodurch die Verjüngungsschicht eine inhomogenere Struktur aufweist.

Der Kronenschlußgrad steigt auch in diesem Bestandestyp im zeitlichen Verlauf an. Unter AM1-Management auf bis zu 100%, die anderen Managementszenarien steigen hier bis auf 65 (NOM) bis 80% AM5, wobei Einfluss durch die Klimaänderung gering ist.

Der Steinschlagschutz nimmt unter allen Managementszenarien ab, deutlich ausgeprägt ist dies in den betrachteten Kalkstandorten. Im AM1-Management ist während des gesamten Simulationsraumes praktisch keine Schutzfunktionalität vorhanden.

Der Lawinenanrisschutz ist in den Schutzwaldszenarien (AM2-AM5) durchwegs gegeben, im AM1 und NOM ist in der ersten Periode eine geringerer Schutzgrad zu erwarten (API 0.85). Ohne Management haben die Bäume durch die größer werdenden Durchmesser einen relativ großen Abstand während die Wirkung der Verjüngung hier erst in der 2. Periode positiven Einfluss auf die Schneestabilität bringt. Auch im Szenario AM1 muss die Verjüngung erst die nötige Dichte und Dimension erreichen. Klimawandel wirkt für den Lawinenindex positiv in der 1. Periode. In Periode 2 und 3 ist der Schutz auch im historischen Klima bereits optimal.



**Abb. D-4.2.2-4** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Strukturdiversität (DSI) im Fichten-Tannen-Buchen Waldtyp unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen im Klimaänderungsszenario A2. Oben: Höhenstufe Tiefmontan Region 5. Mitte: Höhenstufe Tiefmontan Region 11. Unten: Höhenstufe Mittelmontan Region 8. Linke Spalte: ohne Verbiss, mit Borkenkäferschäden. Rechte Spalte: mit Verbiss, mit Borkenkäferschäden.

Bestandestyp Buche:

Allgemeines

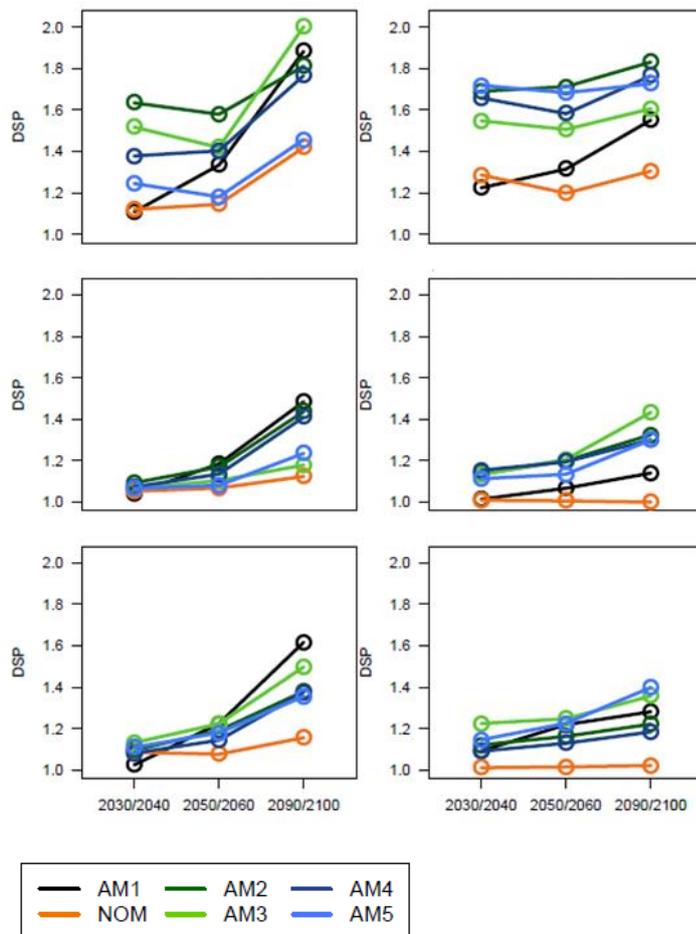
Der Bestandestyp Buche kommt im Allgemeinen bis zur mittelmontanen Stufe vor. Die buchendominierten Typen nehmen derzeit 3% der Waldfläche ein.

Beschreibung der simulierten Bestandesentwicklung

In den Buchenbeständen steigt die Grundfläche im historischen Klima leicht an. Die Bewirtschaftungsszenarien resultieren in einem ähnlichen Trendverlauf, wobei in Periode 3 die höchste Grundfläche ohne Bewirtschaftung und die niedrigste Grundfläche im Szenario AM1 erwartet wird. Im Klimawandel ist eine leichte Zunahme der Grundfläche festzustellen.

Die Artendiversität zeigt einen zunehmenden Trend, wobei unter NOM die Zunahme am geringsten ist. Vergleicht man die verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien ergibt sich meist bei den Szenarien AM2/AM3 (also bei den etwas größeren Lochhieben) die höchste Diversität (Abb. D-4.2.2-5). Der Effekt des Klimawandels auf die Artendiversität ist kurzfristig positiv (2030/2040), bis zum Ende der Simulationsdauer jedoch negativ.

Die Strukturdiversität zeigt eine abnehmende Entwicklung in den Managements NOM und AM2-AM5, wobei sie unter NOM geringer ist als unter AM2-AM5. Unter AM1 ist die Strukturdiversität anfangs gering, steigt dann in Periode 2 und Periode 3 an, bleibt aber unter den anderen Managementvarianten. Klimateffekt ist wenig ausgeprägt.



**Abb. D-4.2.2-5** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Artendiversität im Buchen-Bestandestyp in Region 8 in der Höhenstufe Mittelmontan. Oben: karbonatisch geringe Wüchsigkeit. Mitte: karbonatisch gute Wüchsigkeit. Unten: silikatisch gute Wüchsigkeit. Linke Spalte: unter historischem Klima. Rechte Spalte: unter Klimaänderungsszenario A2.

Der Kronenschlussgrad steigt während der Simulationsdauer an, wobei das AM1 in den dichtesten Beständen resultiert, gefolgt vom NOM. AM2-AM5 verzögern diese Entwicklung, wobei in der 3. Periode generell hohe Schlussgrade erwartet werden (>85%). Klimateffekt ist hierbei wiederum gering.

Der RPI zeigt einen abnehmenden Trend. Der Klimateffekt ist gering ausgeprägt.

API ist unter NOM und AM2-AM5 immer optimal ausgeprägt. Unter AM1 in der ersten Periode ergeben sich Werte um 0.8, in der weiteren Entwicklung wird die Schutzwirkung wieder optimal. Kein Effekt durch Klimawandel.

### Bestandestyp Kiefer/ Kiefer-LH

#### Allgemeines:

Die durch Rotkiefer dominierten Bestandestypen kommen über einen relativ großen Höhengradienten von der kollinen bis zur hochmontanen Stufe auf nährstoffärmeren Standorten vor (3% der Waldfläche).

#### Beschreibung der simulierten Bestandesentwicklung:

Die Bestandesgrundfläche nimmt in diesem Bestandestyp unter historischem Klima in den niederen Beständen bis zu mittelmontanen Lagen zu. Unter Klimaänderung ist die Zunahme vergleichbar, oder nimmt leicht ab.

Die Artendiversität nimmt von Periode 1 zu Periode 2 tendenziell zu, von Periode 2 zu Periode 3 ab, wobei NOM im Allgemeinen in der höchsten Diversität resultiert. In der Region 14 (Imst, Innsbruck-Land, Landeck) ergibt sich jedoch beim AM1-Szenario in den mittel- und hochmontanen Lagen die höchste Artendiversität. In der Region 14 nimmt im Klimawandel die Diversität zu, während in den anderen betrachteten Regionen (2 und 5) kein deutlicher Effekt eintritt.

Die Strukturdiversität steigt in allen Managementszenarien. Bei AM1 liegt sie am Beginn am niedrigsten und kommt dann in der 3. Periode nahe an die anderen Szenarien heran. Klimawandel hat hierauf wenig Einfluss.

Der Kronenschlußgrad steigt in den Beständen meist an. Die Szenarien AM2-AM5 steigen jedoch langsamer an als NOM und AM1. Im Klimaänderungsszenario wenig Veränderung.

Beim Steinschlagschutz weisen die betrachteten Bestände je nach Standort eine relativ unterschiedliche zeitliche Entwicklung auf, wobei entweder zunehmende oder leicht abnehmende Schutzwirkung zu erwarten ist. Unter AM1 ist der Steinschlagschutz in Periode 1 nahezu bei 0, wobei bis Periode 3 ein starker Anstieg erfolgt und die Werte dann vergleichbar mit den anderen Managementszenarien sind. Im Klimawandel ist eine leichte Abnahme des Steinschlagschutzes sichtbar.

Lawinenschutz (API) ist in den Beständen bis Tiefmontan immer optimal (im Klimawandel als auch unter historischem Klima). Bei den mittel- und hochmontanen Beständen ist die Schutzwirkung in der 1. Periode im Management AM1 deutlich unterhalb von 1, nimmt aber dann deutlich zu. Im Klimawandel wird die Lawinenschutzwirkung in diesen Beständen positiv beeinflusst.

## 5 Schlussfolgerungen

Die Bestandesgrundfläche in den Tieflagen ist im Klimawandel generell niedriger als im historischen Klima. In den Hochlagen ist es umgekehrt und die Grundfläche liegt im Klimawandel höher, unabhängig von der Bewirtschaftungsvariante. Dieses generelle Muster bestätigt die schon in anderen Studien beschriebenen Produktivitätsrückgänge in Tieflagen und die Steigerung der Produktivität in höheren Lagen. Die größtenteils auf Naturverjüngung basierenden Bewirtschaftungsszenarios AM1-AM5 zeigen deutlich auf, welchen Einfluss Verbiss durch Wildtiere auf Baumartenzusammensetzung und Verjüngungsdynamik haben kann. Im Verbissszenario sind Artendiversitäts-Indikatoren deutlich geringer als im Szenario ohne Verbiss. Dies wird insbesondere in Kombination mit Borkenkäferschäden noch deutlicher, da durch die Borkenkäferschäden vielfach günstige Lichtverhältnisse für die Verjüngung geschaffen werden. In tiefer gelegenen Zonen ist naturgemäß das Potential an Baumarten größer als in den Hochlagen. Von hoher Relevanz ist insbesondere der zu erwartende Anstieg der Borkenkäferschäden in fichtenreichen Bestandestypen, insbesondere in den mittel- und hochmontanen Lagen. Auch in tiefsubalpinen Bestandestypen treten im Klimawandel deutliche Borkenkäferschäden auf. In den Simulationsexperimenten waren die Unterschiede zwischen den Regionen weniger deutlich ausgeprägt als zwischen unterschiedlichen Standortstypen und Höhenlagen. Dies unterstreicht den Umstand, dass Borkenkäferschäden primär von den ansteigenden Temperaturverhältnissen bestimmt werden. Baummortalität hat unmittelbare Auswirkungen auf sämtliche Schutzindikatoren. Simulationsanalysen, die Störungen nicht berücksichtigen (können), unterschätzen auf jeden Fall die negativen Auswirkungen von Klimawandelbedingungen auf die Schutzfunktionalität von Wäldern. Insbesondere durch die Interaktion von Störungsfaktoren wie etwa Sturm und Borkenkäfern können Schäden vervielfacht werden. Die rechtzeitige Aufarbeitung von Borkenkäferschäden und dadurch die Verhinderung von großflächigen Schäden durch Massenvermehrungen ist in den Hochlagen ungleich schwieriger, da die Erschließung durch Forststraßen in geringerem Ausmaß gegeben ist. Dieser Umstand unterstreicht die hohe Relevanz von Störungen für zukünftige Bewirtschaftungskonzepte zur Aufrechterhaltung von Schutzwirkung gegen gravitative Naturgefahren.

Drei Viertel des österreichischen Schutzwaldes sind dominiert von Fichte. Diese Baumart ist unter Klimawandelbedingungen besonders vulnabel. Ziel jeder Bewirtschaftungsstrategie muss deshalb eine Erhöhung der Baumartendiversität sein, um die Resilienz dieser Wälder gegenüber Störungseinflüssen zu erhöhen. Die Simulationsergebnisse stellen deutlich die Vorteile einer kleinflächigen Schutzwaldbewirtschaftung gegenüber einer traditionellen schlagweisen Bewirtschaftung dar. Nur diese auf kleinflächigen Hiebsformen basierenden Bewirtschaftungskonzepte können eine durchgehende Schutzwirkung und strukturreiche Waldbestände sicherstellen. In gut nährstoffversorgten Beständen ab der hochmontanen Stufe ist auch eine höhere Bewirtschaftungsintensität denkbar, um am Ende des Jahrhunderts stabile Bestandesstrukturen mit ausreichender Verjüngung zu erreichen. Die Tanne stellt an vielen Standorten in diesen Wäldern eine Zielbaumart in Hinblick auf zukünftige Bestandesstabilität dar. Diese weist oftmals ein hohes Naturverjüngungspotenzial auf, hat jedoch unter hohem Verbissdruck praktisch keine Chance auf erfolgreiche Etablierung. Auf ärmeren Standortstypen ist hingegen eine eher schwächere Eingriffstärke zu bevorzugen, da keine ausgeprägte Wuchsreaktion auf den Temperaturanstieg zu erwarten ist. Hier ist insbesondere auf eine Reduktion des Verbissdrucks zu achten und im Bedarfsfall Schutzmaßnahmen oder Kunstverjüngung mit trockenheitstoleranten Mischbaumarten durchzuführen. Ein gänzliches Verzicht auf Managementeingriffe führt zwar kurz- und mittelfristig zu höherer Schutzfunktionalität, birgt aber ein höheres Borkenkäferisiko in sich und verzögert eine Anpassung der Baumartenzusammensetzung an die klimatisch veränderten Bedingungen.

Schutzwälder der niederen Lagen (Fi/Ta/Bu-Typen sowie Buchen- Eichen- und Kiefer-Typen) haben im Allgemeinen eine größere Resilienz gegenüber einer Zunahme der Temperatur.

Auf sehr seichtgründigen Standorten (Kalkdominiert, steile Südhänge) sind aber auch hier langfristig höhere Mortaliätsraten zu erwarten.

## 6 Synthese der Projekte D und C

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

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

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

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

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

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

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

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

## 7 Literaturverzeichnis

- Berger, F. 1997. Interaction forêt de montagne-risques naturels. Détermination de Zones d'Interventions Forestières Prioritaires – L'exemple du département de la Savoie, thèse de doctorat, Paris, Engref, 475 p.
- Didion M, Kupferschmid a. D, Lexer MJ, Rammer W, Seidl R, Bugmann H (2009) Potentials and limitations of using large-scale forest inventory data for evaluating forest succession models. *Ecol Modell* 220:133–147. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.09.021
- Frehner, M., Wasser B., Schwitter, R. 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. © OFEV, Berne.
- Gauquelin, X., Courbaud, B. (ed.) 2006. Guide des sylvicultures de montagne des Alpes du Nord Françaises. 154 p.
- Irauschek F, Rammer W, Lexer MJ (2015) Can current management maintain forest landscape multifunctionality in the Eastern Alps in Austria under climate change? *Reg Environ Chang* 1–16. doi: 10.1007/s10113-015-0908-9
- Jacob D., Göttel H., Kotlarski S., Lorenz P., Sieck K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Climate Change 11/08, Umweltbundesamt Deutschland
- Jost L (2006) Entropy and diversity. *Oikos* 113:363–375. doi: 10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x
- Kilian W., Müller F. & Starlinger F. 1994: Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. FBVA-Berichte 82: 1-60.
- Lexer MJ, Hönninger K, Scheifinger H, Matulla C, Groll N, Kromp-Kolb H, Schadauer K, Starlinger F, Englisch M (2002) The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *For Ecol Manage* 162:53–72. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00050-6
- Maroschek M, Rammer W, Lexer MJ (2015) Using a novel assessment framework to evaluate protective functions and timber production in Austrian mountain forests under climate change. *Reg Environ Chang* 15:1543–1555. doi: 10.1007/s10113-014-0691-z
- Niese G (2011) Österreichs Schutzwälder sind total überaltert. BFW-Praxisinformation, Wien, (24): 29-31.
- Pasztor F, Matulla C, Rammer W, Lexer MJ (2014a) Drivers of the bark beetle disturbance regime in Alpine forests in Austria. *For Ecol Manag* 318:349–358. doi:10.1016/j.foreco.2014.01.044
- Pasztor F, Matulla C, Zuvela-Aloise M, Rammer W, Lexer MJ (2014b) Developing predictive models of wind damage in Austrian forests. *Annals of Forest Science*, DOI: 10.1007/s13595-014-0386-0
- Seidl R, Lexer MJ, Jager D, Honninger K (2005) Evaluating the accuracy and generality of a hybrid patch model. *Tree Physiol* 25:939–951. doi: 10.1093/treephys/25.7.939
- Seidl R, Rammer W, Lexer MJ (2011) Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps. *Can J For Res* 41:694–706. doi: 10.1139/x10-235
- Wimberly, M., & Spies, T. (2001) Influences of Environment and Disturbance on Forest Patterns in Coastal Oregon Watersheds. *Ecology*, 82(5), 1443-1459.

## 8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungen

<b>Abb. D-3.1-1.</b> Überblick über das Analysekonzept von ProForClim	9
<b>Abb D-3.3-1.</b> Zonierung Österreichs in 15 Regionen	10
<b>Abb. D-3.3-2.</b> Anzahl der Simulationseinheiten je Waldtyp	11
<b>Abb. D-3.3-3.</b> Verteilung von zwei ausgewählten Waldtypen auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur.	12
<b>Abb. D-3.5-1.</b> Schematische Darstellung der Hiebsformen zur Bestandesverjüngung in den Bewirtschaftungsszenarios.	14
<b>Abb. D-4.1-1.</b> Wie weit haben Sie sich bisher mit dem Thema Klimawandel und Schutzwald auseinandergesetzt?	18
<b>Abb. D-4.1-2.</b> Was sind ihre bevorzugten Informationsquellen?	19
<b>Abb. D-4.1-3.</b> Nennen Sie die für Ihr Bundesland häufigsten Waldtypen im Schutzwald.	19
<b>Abb. D-4.1-4.</b> Nennen Sie die für Ihr Bundesland wichtigsten Waldtypen im Schutzwald und geben Sie deren Relevanz in Bezug auf die Schutzfunktion an.	20
<b>Abb. D-4.1-5.</b> Nennen Sie wesentliche negative Einflussfaktoren auf die Schutzwirkung des Waldes in ihrem Bundesland in den vergangenen 10-15 Jahren und schätzen Sie deren Relevanz ein.	20
<b>Abb. D-4.1-6.</b> Faktoren, die Ihrer Meinung nach die zukünftige Entwicklung der Schutzwirkung (2030, 2050, langfristig 2050+) in Ihrem Bundesland beeinflussen werden und deren Relevanz.	21
<b>Abb. D-4.1-7.</b> Welche Merkmale (Indikatoren) schätzen Sie als sinnvoll ein, um die Schutzwirksamkeit eines Bestandes (i.e. einer Waldfläche) gegen gravitative Naturgefahren zu beurteilen?	22
<b>Abb. D-4.1-8.</b> Welche Merkmale (Indikatoren) schätzen Sie als sinnvoll ein, um das zukünftige Risiko des Verlustes der Schutzwirksamkeit eines Bestandes (i.e. einer Waldfläche) in Bezug auf gravitative Naturgefahren zu beurteilen?	23
<b>Abb. D-4.2.1-1</b> Simulierte Bestandesgrundfläche je Hektar, flächengewichtet für Tieflagen (Höhenstufen Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin) in der Periode 2090-2100 für die Szenarien mit aktiver Bewirtschaftung (Mittelwert AM1-AM5) unter verschiedenen Simulationsszenarien	24
<b>Abb. D-4.2.1-2</b> Simulierte Borkenkäferschäden je Hektar und Simulationsjahr, flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin) im Simulationsszenario BB/Br (Borkenkäferschäden und Verbiss).	25
<b>Abb. D-4.2.1-3</b> Simulierte Artendiversität flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin)	25
<b>Abb. D-4.2.1-4</b> Simulierte Entwicklung des Kronenschlussgrades mit Störungen (Szenario BB/Br) flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin)	26
<b>Abb. D-4.2.1-5</b> Simulierte Entwicklung des Kronenschlussgrades flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin).	27
<b>Abb. D-4.2.1-6</b> Simulierte Steinschlagschutzwirkung (Blockgröße Dm. 0.46m) flächengewichtet für Tieflagen (Kollin bis Mittelmontan) und Hochlagen (Hochmontan – Hochsubalpin)	28

**Abb. D-4.2.2-1** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Bestandesgrundfläche (BA) und Borkenkäferschäden (BB vol) im Fichten-Nadelholz Waldtyp der Höhenstufe Hochmontan unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen. 29

**Abb. D-4.2.2-2** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) der Kronenschlussgrade im Fichten-Lärchen Waldtyp in Region 14 unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen. 31

**Abb. D-4.2.2-3** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Steinschlag-schutz-Indikator RPI1 (Blockgröße Durchmesser 0.46m) im Fichten-Lärchen Waldtyp in Region 14 unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen. 32

**Abb. D-4.2.2-4** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Strukturdiversität (DSI) im Fichten-Tannen-Buchen Waldtyp unter verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen im Klimaänderungsszenario A2. 34

**Abb. D-4.2.2-5** Simulierte Entwicklung mit Störungen (Szenario BB/Br) von Artendiversität im Buchen-Bestandestyp in Region 8 in der Höhenstufe Mittelmontan. 35

## Tabellen

**Tabelle D-3.3-1.** Ausgewählte repräsentative Schutzwaldtypen und deren repräsentierte Punkte der ÖWI. 12

**Tabelle D-3.4-1.** Historisches Klima und Klimaänderungsszenario in den 15 Regionen für die Höhenstufe Mittelmontan. 10

**Tabelle D-3.5-1.** In ProForClim simulierte Bewirtschaftungsszenarios. 13

**Tabelle D-3.6-1.** In ProForClim verwendete Indikatoren zur Beschreibung der Schutzfunktionalität von Waldtypen. 14

**Tabelle D-3.7-1.** Durchgeführte Szenariosimulationen für alle Simulationseinheiten. 16