



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Institut für Waldbau

KLIMATISCHE CHARAKTERISIERUNG DER FICHTEN-  
TANNEN-BUCHEN-ZONE IN SÜDTIROL UND  
WALDBAULICHE HANDLUNGSOPTIONEN IM  
KLIMAWANDEL

Diplomarbeit

Eingereicht von

Michael Kessler

Betreuer: Ao.Univ.Prof. DI Dr. MAS (GIS) Harald Vacik

Wien, März 2018



## **Danksagung**

Meinen besonderen Dank richte ich an ...

### **Professor Harald Vacik**

für seinen fachlichen Rat sowie die motivierende und ermutigende Begleitung dieser Arbeit, für sein Interesse und seine Offenheit sowie für die aufgeopferte Zeit.

### **Günther Unterthiner und das Amt für Forstplanung**

für die Möglichkeit, im Laufe des Studiums praktische Erfahrungen sammeln zu dürfen und besonders für die Inspiration und Motivation zu dieser Arbeit sowie die Bereitstellung der Daten zur Waldtypisierung Südtirol.

### **den Landeswetterdienst Südtirol**

für die rasche und unkomplizierte Bereitstellung der Klimadaten.

### **meine Freunde,**

mit denen ich während des Studiums sowohl in als auch außerhalb Wiens eine schöne Zeit verbringen durfte und die im Rahmen dieser Arbeit auch immer offen für eine fachliche Diskussion waren.

### **meine Eltern, Geschwister und Großeltern,**

die mich im Laufe des Studiums immer unterstützt und mir stets den Rücken gestärkt haben.



## Abstract

For the development of adaptive forest management guidelines regarding climate change in South Tyrol (Italy) a solid database is required. Thus, a characterization of climate parameters relevant for forest growth within five forest types of the spruce, fir and beech dominated ecoregion belonging to different altitudinal zones was done and compared to the potential climate of two future periods (2026-2055 and 2071-2100) projected by the scenario A1B. To assess silvicultural management options the climate data were obtained from the project 3PClim and processed in GIS to enable further investigations. Mean temperatures and parameters of the warmer months generally showed a higher ability to characterize the forest types compared with precipitation sums and parameters describing the colder months. However, also the temperature outside the vegetation period seems to have some relevance. The classification of the manna ash-hop-hornbeam- and the beech-forest type succeeded comparatively well. Most of the parameters are suspected to determine the altitudinal distribution of the tree species. Up to the end of the century a constant increase in temperature can be expected, whereas a drop in precipitation can be expected among the periods 2026-2055 and 2071-2100, with higher drops of the summer precipitation and in lower altitudes. The warming and related indirect effects could cause a shift in the altitudinal distribution of tree species. Within all forest types the potential impact of climate change varies among different elevations, in forest types with a high share of fir also among different slope directions. According to the provision of several ecosystem services and referring to the projected climate in 2071-2100, for a spruce-fir-beech dominated forest type different silvicultural goal types were derived aiming at both, promoting tree species adapted to the projected climate (fostering resistance) and increasing tree species richness (fostering resilience).

Keywords: Climate change, climate scenario, silviculture, forest management



## Kurzfassung

Für die Entwicklung waldbaulicher Handlungsempfehlungen für Südtirols Wälder im Klimawandel ist eine solide Datenbasis notwendig. Es wurden fünf Waldgruppen unterschiedlicher Höhenstufen in der Fichten-Tannen-Buchen-Zone hinsichtlich der aktuellen Ausprägung vegetationsökologisch relevanter Klimaparameter charakterisiert und anschließend mit den durch das Szenario A1B prognostizierten Klimabedingungen in den Perioden 2026-2055 und 2071-2100 verglichen, um die waldbaulichen Handlungsoptionen im Klimawandel beurteilen zu können. Die vom Projekt 3PClim bezogenen Klimadaten wurden vor der Auswertung im Geoinformationssystem aufbereitet. Es zeigte sich, dass sich die mittleren Temperaturen und die Parameter der warmen Monate besser zur Charakterisierung der Waldgruppen eignen, als die Niederschlagssummen und die Parameter der kälteren Monate. Dennoch scheint auch die Temperatur außerhalb der Vegetationsperiode relevant zu sein. Eine vergleichsweise gute Charakterisierbarkeit ergibt sich für die Mannaeschen-Hopfenbuchen- und Buchenwälder. Die meisten Parameter scheinen die Verbreitungsgrenzen der Baumarten zu beeinflussen. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist eine kontinuierliche Erhöhung der Temperatur zu erwarten, während eine Abnahme des Niederschlages vor allem zwischen den Perioden 2026-2055 und 2071-2100 (vor allem die Sommerniederschläge in tieferen Lagen) prognostiziert wird. Durch die Temperaturerhöhung und damit verbundene indirekte Effekte kann es in allen Waldgruppen zu einer Verschiebung der Höhenverbreitung der Baumarten kommen. Die potenzielle Einwirkung der Klimaveränderungen ist in allen Waldgruppen von der Höhe und in Waldgruppen mit höheren Tannen-Anteilen auch von der Exposition abhängig. Für den Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere wurden für unterschiedliche Waldfunktionen hinsichtlich der Periode 2071-2100 resistente (Förderung klimatisch angepasster Baumarten) und resiliente (Erhaltung einer hohen Baumartenvielfalt) Zieltypen abgeleitet.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Klimaszenario, Waldbau, Waldbewirtschaftung



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
1.1	Problemstellung	11
1.2	Zielsetzungen und Fragestellungen	11
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>14</b>
2.1	Datengrundlagen	14
2.1.1	Waldtypisierung	14
2.1.2	Klimadaten	14
2.1.3	Strahlungsdaten	18
2.1.4	Auswahl der vegetationsökologisch relevanten Klimaparameter	18
2.2	Literaturrecherche	22
2.3	Aufbereitung der Rasterdaten	23
2.3.1	Aufbereitung und Extraktion von Wuchszone, Waldgruppen und Waldtyp	23
2.3.2	Aufbereitung und Extraktion der aktuellen Klimaparameter	24
2.3.3	Aufbereitung und Extraktion der Klimaparameter der zukünftigen Perioden	25
2.4	Datenanalyse und statistische Auswertung	27
2.4.1	Veranschaulichung der Klimaparameter	27
2.4.2	Überlagerungen der Bereiche der Klimaparameter zwischen benachbarten Waldgruppen und zwischen Zeithorizonten	27
2.4.3	Statistische Mittelwertvergleiche für Parameter des aktuellen Klimas zwischen den Waldgruppen	28
2.4.3.1	Globaltests	29
2.4.3.2	Post-hoc-Tests	30
2.4.4	Statistische Vergleiche der Klimaparameter zwischen den Zeithorizonten	32
2.4.4.1	Globaltests	32
2.4.4.2	Post-hoc-Tests	32
2.4.5	Hauptkomponentenanalyse	34
2.4.6	Ableitung und Kartierung der potenziellen Einwirkung von Klimaveränderungen	35
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>37</b>
3.1	Vergleich der Klimabereiche zwischen den Waldgruppen	37
3.1.1	Datenübersicht	37
3.1.2	Statistische Mittelwertvergleiche	40
3.1.3	Überlappungen der Klimabereiche zwischen den Waldgruppen	43
3.1.4	Vergleich der Daten mit den Angaben zu den Waldgruppen aus der Waldtypisierung	44
3.1.5	Hauptkomponentenanalyse	46
3.2	Vergleich der aktuellen mit den zukünftigen Klimabereichen	49
3.2.1	Datenübersicht	49

3.2.2	Statistische Mittelwertvergleiche _____	52
3.2.3	Überlappungen zwischen dem aktuellen und den zukünftigen Klimabereichen _____	53
3.2.4	Potenzielle Einwirkung von Klimaveränderungen auf die Waldgruppen _____	55
<b>4</b>	<b>Diskussion _____</b>	<b>58</b>
4.1	Aktuelles Klima _____	58
4.1.1	Inhaltliche Aspekte _____	58
4.1.2	Methodik und Datenstruktur _____	61
4.1.3	Zusammenfassung _____	62
4.2	Klimazukunft _____	63
4.2.1	Inhaltliche Aspekte _____	63
4.2.2	Kritische Anmerkungen _____	67
4.2.3	Zusammenfassung _____	68
<b>5</b>	<b>Waldbauliche Schlussfolgerungen am Beispiel des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere _____</b>	<b>69</b>
5.1	Charakterisierung des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere _____	69
5.2	Aktuelles und zukünftiges Klima im Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere _____	69
5.3	Perspektiven für den Waldbau im Klimawandel _____	71
5.4	Perspektiven für die Hauptbaumarten des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere _____	73
5.5	Waldbauliche Handlungsoptionen für den Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere _____	74
5.5.1	Zieltyp Wirtschaftswald _____	75
5.5.1.1	Laubholzreicher Wirtschaftswald _____	75
5.5.1.2	Nadelholzreicher Wirtschaftswald _____	76
5.5.2	Zieltyp Schutzwald gegen Erosion _____	77
5.5.3	Zieltyp Schutzwald gegen Steinschlag _____	78
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis _____</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis _____</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis _____</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis _____</b>	<b>91</b>
<b>Anhang A</b>	<b>_____</b>	<b>93</b>
<b>Anhang B</b>	<b>_____</b>	<b>97</b>
<b>Anhang C</b>	<b>_____</b>	<b>99</b>
<b>Anhang D</b>	<b>_____</b>	<b>105</b>
<b>Anhang E</b>	<b>_____</b>	<b>109</b>
<b>Anhang F</b>	<b>_____</b>	<b>115</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

In Südtirol dient die im Jahr 2010 vom Amt für Forstplanung (Abteilung Forstwirtschaft der Autonomen Provinz Südtirol) herausgegebene Waldtypisierung als Leitlinie für einen naturnahen Waldbau. Im Zuge der Ausarbeitungen dieses zugleich wissenschaftlich fundierten und praxistauglichen Werkes wurden die in Südtirol vorkommenden Waldtypen (diese entsprechen den potenziell natürlichen Waldgesellschaften) sowohl standörtlich als auch waldbaulich charakterisiert und kartiert. Es wurden zudem regionale Waldbaurichtlinien als Entscheidungshilfe für die Planung und Umsetzung der waldbaulichen Tätigkeit erarbeitet (Amt für Forstplanung 2010a).

Im Zuge der Auseinandersetzung mit dem Klimawandel und in Anbetracht der diesbezüglich erhärteten Faktenlage (siehe IPCC 2014), ist das Klima als wichtiger forstlicher Standortfaktor sowie der Klimawandel in den letzten Jahren auch in der Forstwirtschaft zunehmend in den Fokus geraten. Aufgrund der mit der biologischen Produktion verbundenen langen Umtriebszeiten und der somit folgenschweren waldbaulichen Maßnahmensetzung ergibt sich ein reges Interesse der forstlichen Praxis an der Entwicklung waldbaulicher Handlungsempfehlungen im Umgang mit den sich ändernden klimatischen Bedingungen.

Auch für die in der Waldtypisierung charakterisierten Waldtypen ist in Anbetracht des Klimawandels eine Veränderung der Standortbedingungen zu erwarten, zumal für den Großraum Tirol und Belluno bereits eine Klimaänderung festgestellt werden konnte. Während im Raum Tirol und Belluno bis 1980 bereits ein Temperaturanstieg von 0,1 °C je Jahrzehnt beobachtet werden konnte, lag dieser zwischen 1980 und 2000 bereits bei 0,6 bis 1,0 °C. Am deutlichsten zeigte sich die Erwärmung in den Sommer- und Herbstmonaten, aber auch in den Wintermonaten konnte seit 1950 eine Erwärmung festgestellt werden. Dies wirkte sich auch in einer Verlängerung der Vegetationsdauer und einer Abnahme der Frosttage aus. Trends im Niederschlag konnten nur in Ausnahmefällen beobachtet werden (ZAMG et al. 2015a). Angesichts dieser Entwicklungstendenzen ist es von Interesse, Standorte bzw. Zonen, die auch in Zukunft einer möglicherweise starken Veränderung der klimatischen Bedingungen unterliegen, zu identifizieren. Hinsichtlich der Waldbewirtschaftung sollen besondere Maßnahmen bzw. Behandlungen ergriffen werden. Dies erfordert eine detaillierte Betrachtung der potenziellen zukünftigen Entwicklungen der für die Waldvegetation relevanten Klimakomponenten, um daraus bereits heute Entscheidungen bezüglich waldbaulicher Maßnahmen in einem sich ändernden Klima ableiten zu können. Um die Veränderung dieser klimatischen Bedingungen jedoch sinnvoll interpretieren zu können, sind diese den aktuellen klimatischen Gegebenheiten gegenüberzustellen. Obwohl diese in der Waldtypisierung auf Basis von Wetterstationsdaten, Literaturangaben sowie Erfahrungswissen auf Ebene der Höhenstufen und Naturräume eingehend beschrieben werden, gibt es aktuell noch keine flächendeckenden Angaben zu den klimatischen Standortbedingungen auf Ebene der Waldtypen.

Dies erfordert die Schaffung einer Datengrundlage zum aktuellen Klima auf den Standorten der Waldtypen. Erst auf dieser Grundlage können die in Klimaszenarien prognostizierten Veränderungen aufgezeigt und sinnvoll interpretiert und bewertet werden, um daraus mögliche waldbauliche Handlungsoptionen ableiten zu können.

## 1.2 Zielsetzungen und Fragestellungen

In der vorliegenden Arbeit soll eine Auswahl von fünf Waldgruppen aus unterschiedlichen Höhenstufen in der Fichten-Tannen-Buchen-Zone in Südtirol (siehe Abbildung 1) hinsichtlich

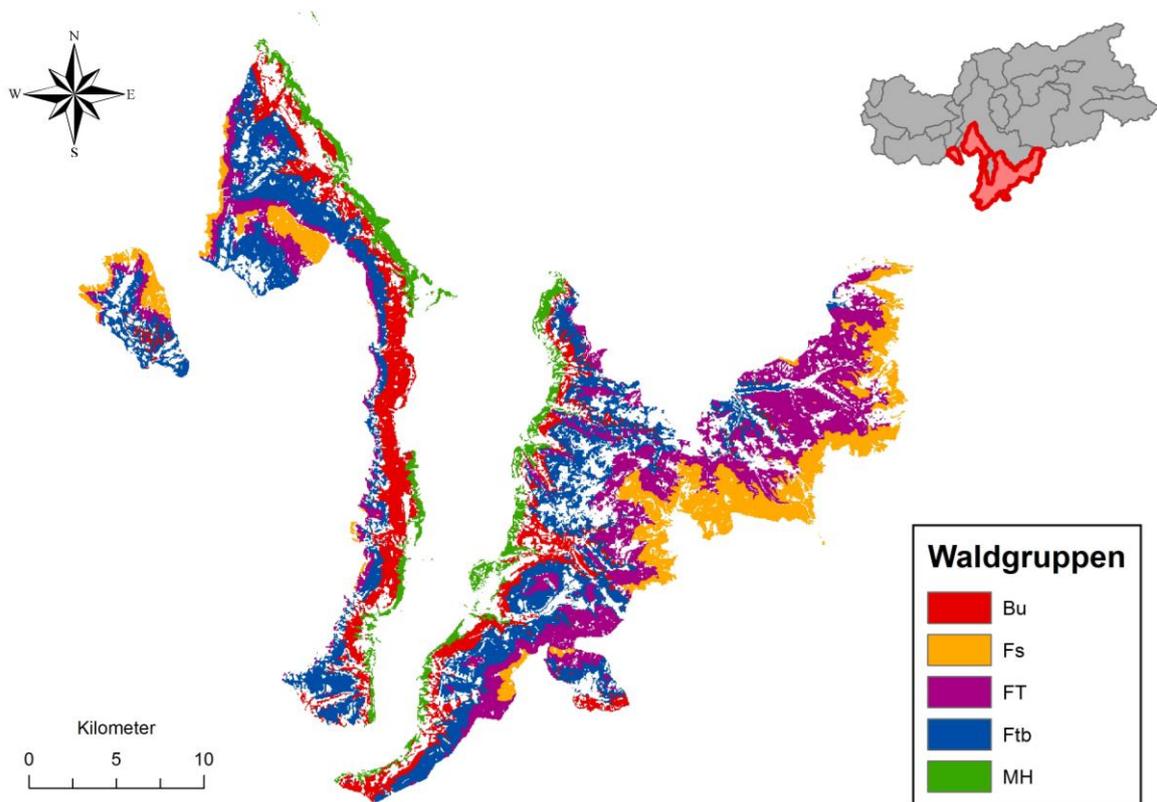
der aktuellen Ausprägung vegetationsökologisch relevanter Klimaparameter charakterisiert werden. Weiters sollen jene mit den durch ein Klimaszenario prognostizierten Ausprägungen der relevanten Parameter in zwei zukünftigen Perioden verglichen werden, um schließlich den waldbaulichen Handlungsspielraum bezüglich des prognostizierten Klimas am Beispiel eines ausgewählten Waldtyps aufzeigen zu können.

Die Beschränkung auf eine Wuchszone sowie die Auswahl von fünf, aufgrund des häufigen Vorkommens jeweils eine Höhenstufe repräsentierenden Waldgruppen (diese verstehen sich als Zusammenfassung ähnlicher Waldtypen und sind durch eine Hauptbaumart und eine Höhenstufe gekennzeichnet), ist in Zusammenhang mit der möglichen Bewältigung des Arbeits- und Rechenaufwandes im Rahmen dieser Arbeit zu sehen. Es erfolgt daher eine Beschränkung der Betrachtungen auf die Leitgesellschaften der kollinen (Leitgesellschaft Mannaeschen-Hopfenbuchenwald), submontanen (Leitgesellschaft Buchenwald), mittelmontanen (Leitgesellschaft Fichten-Tannen-Buchenwald), hochmontanen (Leitgesellschaft Fichten-Tannenwald) und tiefsubalpinen (Leitgesellschaft subalpiner Fichtenwald) Höhenstufe. Diese Stufen erstrecken sich im Mittel über folgende Höhen: Kollin (ca. 200 bis 700 m), submontan (ca. 700 bis 900 m), mittelmontan (ca. 900 bis 1400 m), hochmontan (ca. 1400 bis 1600 m) und tiefsubalpin (ca. 1600 bis 1800 m). Die Betrachtung auf Ebene der Wuchszone macht in Anbetracht der Problemstellung zudem insofern Sinn, als das durch ein bestimmtes Regionalklima und eine bestimmte Vegetation gekennzeichnete Wuchsgebiet wiederum nach klimatologischen und vegetationsökologischen Gesichtspunkten untergliedert wird und somit hinsichtlich des Klimas einigermaßen einheitlich gestaltet sein sollte (Amt für Forstplanung 2010a). Diese Eingrenzung sollte es möglich machen, einerseits noch ausreichend verfügbares Datenmaterial zu gewährleisten und andererseits die zu untersuchenden Waldgruppen auf ein überschaubares Maß zu beschränken.

Die Zielsetzung, die Waldgruppen hinsichtlich der aktuellen und prognostizierten zukünftigen Ausprägung von vegetationsökologisch relevanten Klimaparametern zu charakterisieren, erlaubt folgende Fragestellung zu formulieren:

- Welche Variablen (Parameter) aus dem verfügbaren Datenmaterial können als relevante Standortfaktoren für die Charakterisierung der Waldgruppen herangezogen werden?
- Wie sind die potenziell relevanten Klimaparameter der einzelnen Waldgruppen ausgeprägt und (wie) unterscheiden sie sich zwischen den Waldgruppen?
- Wie lässt sich die Eignung der Klimaparameter hinsichtlich ihres Potenzials zur Unterscheidung der untersuchten Waldgruppen beurteilen?
- Welche Unterschiede ergeben sich zwischen den ermittelten Ausprägungen der Klimaparameter und den Angaben in der Waldtypisierung?
- Lassen sich die Klimaparameter zu sinnvollen Faktoren verdichten, hinsichtlich derer sich die Waldgruppen unterscheiden?
- Wie sind die für die Waldgruppen relevanten Klimaparameter in den beiden zukünftigen Perioden des Klimaszenarios ausgeprägt und (wie) unterscheiden sie sich von der aktuellen Ausprägung?
- Welche Bereiche in der Fichten-Tannen-Buchen-Zone sind aufbauend auf den Ergebnissen des Szenarios stärkeren, schwächeren und oder keinen Änderungen ausgesetzt?

Schließlich sollen aufbauend auf den Erkenntnissen zur Klimazukunft für einen geeigneten Waldtypen innerhalb einer behandelten Waldgruppe mögliche waldbauliche Handlungsoptionen abgeleitet werden.



**Abbildung 1: Übersicht über die Lage der Fichten-Tannen-Buchzone in Südtirol sowie der ausgewählten Waldgruppen innerhalb der Zone (Bu = Buchenwälder, Fs = subalpine Fichtenwälder, FT = Fichten-Tannenwälder, Ftb = Fichten-Tannen-Buchenwälder, MH = Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder).**

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Datengrundlagen

#### 2.1.1 Waldtypisierung

Die räumliche Ausdehnung der Wuchszone sowie der darin liegenden zu untersuchenden fünf Waldgruppen wurde der im Rahmen der Waldtypisierung erstellten Waldtypenkarte und Kartierung der Wuchszonen entnommen. Dieses Kartenmaterial wurde vom Amt für Forstplanung im Shape-Format in der Projektion ETRF 1989 UTM Zone 32N bereitgestellt, wobei die Wuchszonenkartierung durch das Attribut Wuchszone und die Waldtypenkarte durch die Attribute Standort, Waldtyp und Waldgruppe charakterisiert sind. Die für die waldbaulichen Schlussfolgerungen relevante Standortbeschreibung und waldbauliche Charakterisierung des Waldtyps wurde vom Waldtypenkatalog der Typisierung bezogen.

Im Zuge der Waldtypisierung wurden unter Anwendung eines Geoinformationssystem-basierten geoökologischen Stratifizierungsmodells die Waldstandorte Südtirols charakterisiert und kartographisch dargestellt. Das Modell leitete aus einem digitalen Höhenmodell in Kombination mit einem Einstrahlungsmodell, geologischen Karten, einer Vegetationskartierung, digitalisierten Standortinformationen sowie Zusatzinformationen geoökologische Parameter wie etwa Höhenstufe, Hanglage (verantwortlich für den Wasser- und Wärmehaushalt), Substrat (Grundlage für die Bodenbildung), Geländeform und Neigung (bestimmend für die Wasser- und Nährstoffversorgung) ab, welche zur Stratifizierung der Waldtypen herangezogen werden konnten. Auf diese Weise konnte der für eine Fläche wahrscheinlichste Waldtyp abgeleitet werden. Der Modelloutput wurde schließlich durch Felderhebungen im Gelände überprüft und gegebenenfalls überarbeitet. In weiterer Folge wurden ähnliche Waldtypen zu Waldgruppen zusammengefasst, welche durch eine Hauptbaumart und eine Höhenstufe gekennzeichnet sind (Amt für Forstplanung 2010a).

Auf der Grundlage von Geländeaufnahmen, des potenziell natürlichen Zustandes (am Standort vermutete potenziell natürliche Waldgesellschaft), der Schutzfunktion, historischer Unterlagen (z.B. alte Waldbehandlungspläne) sowie der lokalen Erfahrungen des Forstpersonals konnten in einem weiteren Schritt waldbauliche Beurteilungen der Waldtypen ausgearbeitet werden. Eine standörtliche und waldbauliche Charakterisierung erfolgte auch auf Ebene der Waldgruppen (Amt für Forstplanung 2010a, Amt für Forstplanung 2010b).

Zudem wurde eine vegetationsökologische Gliederung Südtirols in Höhenstufen, Wuchsgebiete und Wuchszonen sowie Teilzonen (sogenannte Naturräume) vorgenommen. Die Wuchsgebiete und -zonen wurden hinsichtlich Lage und Ausdehnung, geologischer Einheiten, Höhenstufen und klimatischer Verhältnisse charakterisiert. Auch die ökologischen Bedingungen in den Höhenstufen wurden erläutert. In der Beschreibung der Naturräume (Teilzonen der Wuchszonen) wurden schließlich die lokalen und für die Waldbewirtschaftung relevanten Gegebenheiten wie etwa Klima (auf Basis von Literaturangaben und Wetterstationsdaten), Geologie und historische Waldnutzung angesprochen (Amt für Forstplanung 2010a, Amt für Forstplanung 2010b).

#### 2.1.2 Klimadaten

Als Datengrundlage für das aktuelle Klima (Lufttemperatur, Niederschlag und Schneedecke) wurden die Ergebnisse des Projektes 3PClim herangezogen, welche im Jahr 2015 unter dem Titel „Das Klima von Tirol – Südtirol – Belluno“ veröffentlicht wurden und zudem unter der Domain <http://www.alpenklima.eu/> in Form einer interaktiven Karte einsehbar sind. Dem selben Projekt entstammen auch die Angaben zum Klimaszenario. Beide Datensätze wurden vom Wetterdienst der Autonomen Provinz Bozen flächendeckend für den Bereich Tirol, Südtirol, Trentino und Belluno bereitgestellt, wobei die Angaben zum aktuellen Klima im

ADF-Rasterformat in einer Auflösung von 500 x 500 m in der Projektion ETRS 1989 UTM Zone 32N und jene zur Klimazukunft im ASCII-Rasterformat im geografischen Koordinatensystem WGS 1984 mit einer Auflösung von 0,9 x 0,9 Grad vorlagen. Die Daten zur Klimazukunft lagen jeweils für die Zeiträume 2026-2055 und 2071-2100 sowohl als in dieser Form potenziell auftretende Ausprägungen als auch in Form von Änderungen zur Referenzperiode 1981-2010 vor.

Die kartographische Darstellung des durchschnittlichen Zustandes des Klimas im Zeitraum 1981-2010 (aufgrund der Messstationsdichte lediglich Beschreibung des Makro- und Mesoklimas, nicht jedoch des Mikroklimas) ist das Resultat einer umfangreichen Datenanalyse, gefolgt von einer Qualitätskontrolle und Korrektur sowie der räumlichen Interpolation der Daten. Für die Auswertungen wurden die von unterschiedlichen Messnetzbetreibern bereitgestellten Datensätze von 1460 Stationen aus dem Untersuchungsgebiet und der näheren Umgebung herangezogen. Diese wurden anschließend einer Qualitätskontrolle unterzogen, im Zuge welcher eine Vorkontrolle (z.B. Ausreißerkorrektur), Vollständigkeitsprüfung (z.B. Auffüllen von Lücken mit interpolierten Werten), klimatologische Prüfung (Prüfung, ob alle Werte innerhalb des klimatologischen Grenzwertbereiches liegen), innere Konsistenzprüfung (Prüfung der Parameter auf logische Zusammenhänge), räumliche Konsistenzprüfung (Vergleich der Messwerte zwischen benachbarten Stationen) und zusätzliche Nachprüfungen (Prüfungen nach statistischen Testalgorithmen) durchgeführt wurden. Lücken in den Aufzeichnungen wurden bis zu einem Anteil von 50 % der Originaldaten zugelassen und wurden durch Anbindung an die höchstkorrelierten drei benachbarten Stationen geschlossen. Schließlich erfolgte die räumliche Interpolation unter Anwendung aktueller geostatistischer Interpolationsmethoden mittels Programmierungs- und GIS-Software. Als Arbeitsgrundlagen hierfür dienten die Klimamittel der Beobachtungsstationen und ein digitales Geländemodell mit Rasterauflösung 500 x 500 m. Die Karten des Temperatur-, Schnee- und Neuschneeklimas wurden unter Verwendung einer speziell für die Temperaturinterpolation im Gebirge entwickelten Methode erstellt, welche ein makroklimatisches Hintergrundfeld (Abbildung großräumiger horizontaler Schwankungen und vertikaler Schichtungen) mit einem mesoklimatischen Residualfeld (Abbildung lokaler Phänomene wie etwa Kaltluftseen) verbindet. Bei der Kartenerstellung des Niederschlagsklimas wurden geografisch gewichtete Regressionen implementiert, welche stark von der Seehöhe abhängig sind und ein hohes Maß an räumlicher Variabilität ermöglichen. Dabei wird an jedem Gitterpunkt des Rasterfeldes eine Regression zwischen der Seehöhe und den nächstgelegenen Stationen berechnet, deren Beitrag durch Gewichtung anhand ihrer Repräsentativität für die topografischen Verhältnisse am Gitterpunkt festgelegt wird (ZAMG et al. 2015a).

Die Angaben zur Klimazukunft wurden in Form einer Kartierung der Ergebnisse eines skalierten Klimaszenarios für zwei zukünftige Perioden (2026-2055 und 2071-2100) bereitgestellt. Klimaszenarien sind Resultate von Klimamodellen, welche als Antriebsfaktoren die Sonneneinstrahlung, die Konzentration von Treibhausgasen und die Menge an Aerosolen in der Atmosphäre benötigen und mit Hilfe dieser Inputdaten mögliche zukünftige Klimazustände simulieren. Die Sonnenaktivität sowie die Konzentration an Aerosolen in der Atmosphäre (in etwa als Folge von Vulkanismus) können nicht prognostiziert werden, sie werden daher konstant gehalten. Der zeitliche Verlauf der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre wird durch Treibhausgasszenarien prognostiziert, welche ihrerseits wiederum von sozioökonomischen Szenarien gesteuert werden. Diese sozioökonomischen Szenarien beschreiben die weltweite Entwicklung unter Berücksichtigung der Aspekte Ökonomie, Bevölkerung, Technologie, Energie und Landwirtschaft und können zu Familien (A1, A2, B1 und B2, siehe Abbildung 2) mit jeweiligen charakteristischen Basis-Szenarien zusammengefasst werden. Diese Familien können nach den beiden Hauptrichtungen Globalisierung vs. Regionalisierung und Wirtschaftswachstum vs. Umweltbewusstsein gegliedert werden. Im Projekt 3PClim wurde das Szenario A1B verwendet, welches in Fachkreisen als realistisch angesehen wird und im Wesentlichen dem aktuelleren RCP 6.0 entspricht. Hierin wird von einer globalisierten und wirtschaftlich orientierten Entwicklung ausgegangen, wobei die Energiequellen eine Balance aus fossilen und erneuerbaren

Ressourcen darstellen (ZAMG et al. 2015a, Fischer-Bruns und Petersen 2016). Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Szenarien bis zum Jahr 2100 ist in Abbildung 3 dargestellt.

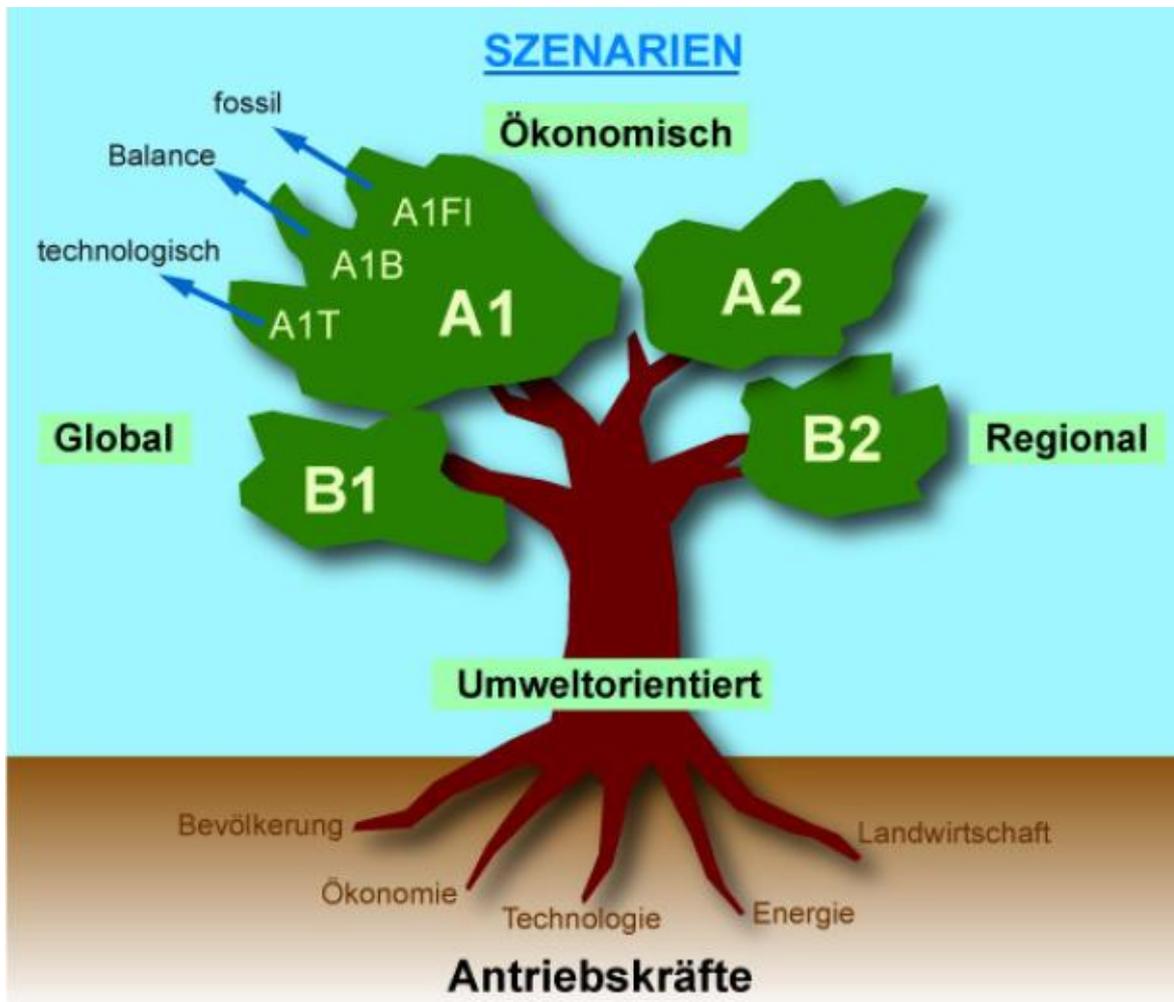
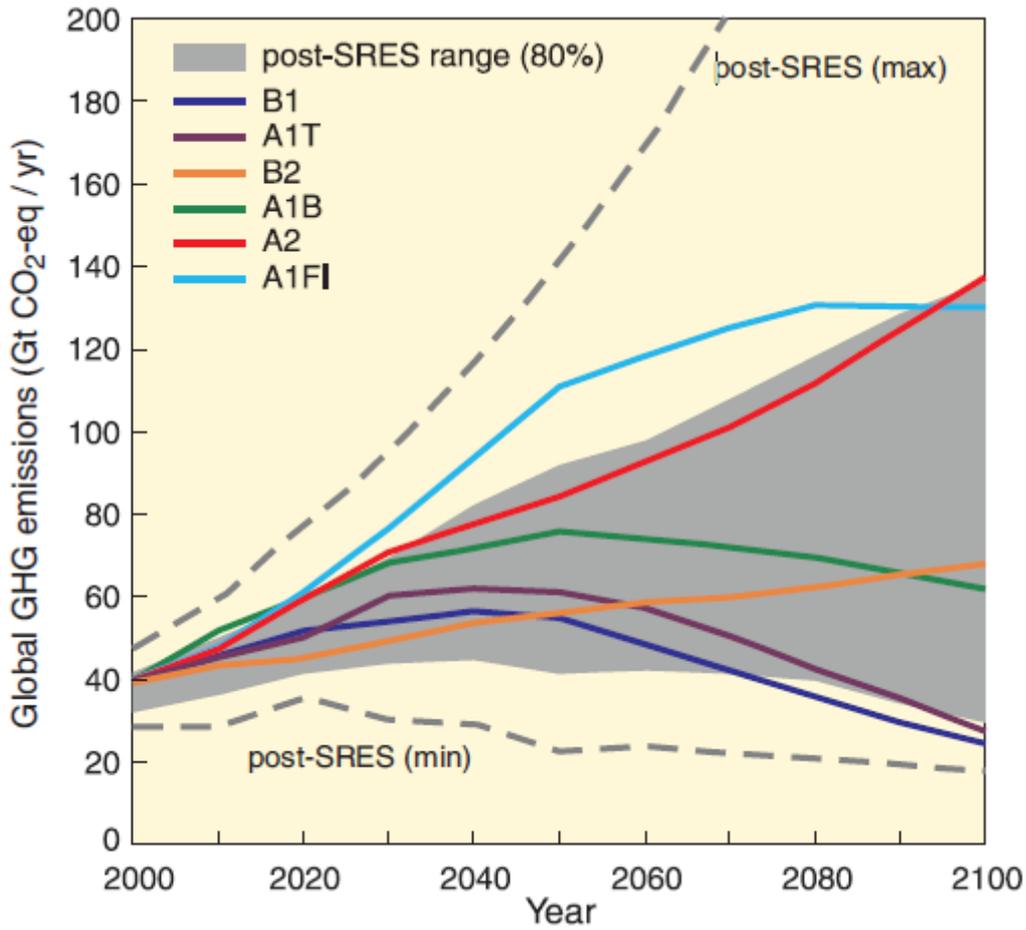


Abbildung 2: Szenariofamilien laut dem IPCC-Sonderbericht über Emissions-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) mit detaillierter Ausführung der A1-Familie (Wiki Klimawandel 2015).



**Abbildung 3: Emissionsszenarien laut dem IPCC-Sonderbericht über Emissions-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) bis zum Jahr 2100. Das Szenario A1B ist in grüner Farbe dargestellt (Stadler et al. 2015).**

Zur Entwicklung regional gültiger Klimaszenarien werden zunächst globale Klimamodelle (Global Climate Models oder GCMs) implementiert, die als mathematische Modelle die Vorgänge in der Atmosphäre digital simulieren, indem atmosphärische Vorgänge mit Ozeanmodellen, Eisschildmodellen, sowie Vegetations- und Landoberflächenmodellen gekoppelt werden. Die Vorgänge in der Atmosphäre sowie die Austauschprozesse zwischen den Modellkomponenten werden mittels mathematischer Gleichungen mit einer zeitlichen Auflösung im Minutenbereich berechnet. Diese globalen Modelle unterteilen die Erdoberfläche in ein Rasternetz mit einer Auflösung von etwa 200 bis 100 km sowie die Atmosphäre und die Ozeane in 20 bis 40 vertikale Schichten. Im Projekt 3PClim wurde das GCM ECHAM5 des Max Planck Institutes für Meteorologie in Hamburg implementiert. Das Herunterskalieren (Downscaling) der Klimavariablen auf die regionale Ebene erfolgte durch dynamisches Downscaling mittels des regionalen Klimamodells (Regional Climate Model, RCM) COSMO-CLM (CCLM). Regionale Klimamodelle beschränken die Simulationen auf einen Teil der Erdoberfläche und liefern höhere Auflösungen als globale Klimamodelle. Sie sind in ihrer Funktionsweise den globalen Klimamodellen ähnlich und beziehen an den Rändern Daten aus dem globalen Modell, in das sie eingebettet sind (sog. Nesting). Um Instabilitäten zu vermeiden, wurde zunächst ein regionales Modell mit einer Auflösung von 50 x 50 km über die Ausdehnung von Europa in das globale Modell eingebettet, in das schließlich das regionale Modell für den Alpenraum mit einer Auflösung von 10 x 10 km eingebettet wurde. Diese Auflösung vermag es nicht, die kleinräumigen Temperatur- und Windverhältnisse der Alpentäler zu beschreiben und insbesondere die Niederschläge in den Staulagen können dadurch nicht vollständig simuliert werden, wodurch besonders die

Prognosen des Niederschlages mit großen Unsicherheiten behaftet sind (ZAMG et al. 2015a).

### **2.1.3 Strahlungsdaten**

Für die Strahlungsdaten wurde der im Rahmen des Projektes Solar Tirol vom Institut für angewandte Fernerkundung der EURAC generierte und im Jahr 2015 veröffentlichte Datensatz zur mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung in Südtirol (in Wh/m<sup>2</sup>) herangezogen, welcher aus dem GeoKatalog, dem Instrument der Autonomen Provinz Bozen zum Download von Geodaten, bezogen wurde. Das Datenmaterial wurde im TIFF-Format in einer Rasterauflösung von 25 x 25 m bereitgestellt.

Die Werte basieren auf einer Datengrundlage, welche den Zeitraum 2004-2013 betreffen, sowie einem von Laserscan-Daten aus dem Jahr 2006 abgeleiteten digitalen Geländemodell, welches die Beschreibung geneigter Flächen ermöglicht. Neben der Berücksichtigung von Bewölkung durch den durchschnittlichen Cloud Index zwischen 2004 und 2013 in 15 Minuten Zeitauflösung wurde auch die Fernverschattung durch Gebirge sowie die Nahverschattung durch Vegetation oder Gebäude mit einbezogen. Aerosol und Wasserdampf wurde aus dem MACC-Datensatz bezogen. Zur Berechnung der Bestrahlungsstärke bei wolkenlosem Himmel wurde das Specmagic Modell implementiert (Institut für angewandte Fernerkundung, EURAC 2015).

### **2.1.4 Auswahl der vegetationsökologisch relevanten Klimaparameter**

Die Auswahl der für die Waldvegetation relevanten Klima- und Strahlungsparameter aus dem verfügbaren Datenmaterial konnte erst auf Grundlage einer Literaturrecherche durchgeführt werden, welche auf die Beeinflussung und Begrenzung des Vorkommens von Baumarten durch Klimaparameter fokussiert war. Diese Parameter wurden auch in Hinblick auf den Klimawandel als potenzielle Schlüsselparameter erachtet. Interessante Informationsquellen zu diesem Thema stellen Publikationen zu den Standortfaktoren von Wäldern bzw. den limitierenden Faktoren an extremen Standorten dar. Zudem liefern auch Eingabeparameter von Ökosystem- bzw. Habitataignungsmodellierungen sowie Untersuchungen der Reaktion von Baumarten auf die Änderung spezieller Klimaparameter relevante Informationen.

Ozenda (1988) zieht zur Beschreibung der alpinen Vegetation im europäischen Gebirgsraum unter anderem zahlreiche Standortfaktoren heran, welche mit Klima in Verbindung stehen. Vor allem die Lufttemperatur, welche in Form von Jahresmittel- und Saisonsmitteltemperaturen beschrieben werden kann, aber auch die Bodentemperatur wird dabei besonders hervorgehoben. In Hinblick auf Temperatur werden auch weitere Parameter, wie die Vegetationsperiode, die mittlere Anzahl der Frosttage je Jahr, die Fröste während der Vegetationsperiode, Frühjahrsfröste sowie die Anzahl der Monate mit einer mittleren Temperatur unterhalb 0 °C betont. Hinsichtlich der Wasserversorgung kommt dem Niederschlag eine große Bedeutung zu, welcher als Jahres-, Saisons- oder Monatsniederschlag beschrieben werden kann. In diesem Zusammenhang sind auch der Anteil von Schnee am Niederschlag, die Dauer der Schneebedeckung und damit der Zeitpunkt der Schneeschmelze und der erste herbstliche Schneefall zu nennen. Zudem spielt auch die Strahlungsintensität eine bedeutende Rolle. Ähnliche Faktoren ziehen Ott et al. (1997) zur Beschreibung der besonderen Standortfaktoren in den schweizerischen Gebirgsnadelwäldern heran. Hier wirken besonders Wärmemangel, eine hohe und lange andauernde Schneedecke, intensive Strahlungsverhältnisse und trockene Luft als limitierende Faktoren. Zudem wird auch die Rolle von Wind und Borkenkäfer betont. Vor allem Mitteltemperaturen, wie zum Beispiel die Jahresmitteltemperatur oder die mittlere Sommertemperatur, aber auch Extremereignisse, wie zum Beispiel Frostereignisse, spielen in Zusammenhang mit der Baumgrenze sowie der Höhenverbreitung der darunter liegenden

Waldökosysteme eine zentrale Rolle. (Lenoir et al. 2008, Lenoir et al. 2009, Vitasse et al. 2012).

In Zusammenhang mit dem Klimawandel können eine Reihe von Klimavariablen genannt werden, von denen erwartet wird, dass sie den Zustand der Wälder über verschiedene Prozesse maßgeblich beeinflussen. So erwähnt Handler (s.a.) als bereits beobachtete und prognostizierte Änderungen des Klimas in den sogenannten Northwoods in den USA die Jahresmitteltemperatur, saisonale Mittel-, Minimum- und Maximumtemperaturen, den Jahres- sowie den saisonalen Niederschlag, Extremereignisse wie Starkniederschläge, Tage mit gefrorenem Boden, die Anzahl der Gefrier-Tau-Zyklen im Jahr, die Dauer der Vegetationsperiode, den jährlicher Schneefall, die Anzahl der Nächte mit Temperaturen unterhalb 0 °C, die Anzahl der Tage mit einer Temperatur oberhalb 32 °C (90 °F) sowie den Spätfrost. Für europäische Wälder betonen Lindner et al. (2010) neben dem Einfluss mittlerer Klimagrößen auch die Einwirkung einer veränderten Variabilität des Klimas, wodurch Extremwerten eine hohe Bedeutung zukommen kann. Höhere Temperaturen können sich in einer höheren Jahresmitteltemperatur, höheren Saisontemperaturen oder in einer längeren Vegetationsperiode niederschlagen. Diesbezügliche Extremwerte können sich auf die Photosynthese auswirken und auch die Verdunstungsraten der Pflanzen maßgeblich beeinflussen. Daher kann auch der Anzahl von Hitzetagen sowie der Anzahl kalter Tage (z.B. Frosttage) in Zukunft eine hohe Bedeutung zukommen. Aber auch die Wasserverfügbarkeit, welche mit dem Klima über die Jahres- und Saisonsniederschläge zusammenhängen, kann in Zukunft verändert werden. Diesbezüglich sind auch die Verteilung der Niederschläge über das Jahr sowie zwischen Jahren und damit auch Trockenperioden bzw. Dürren von Bedeutung. Indirekt, also nicht durch die unmittelbare Wirkung als Standortfaktoren, wirken diese Klimaparameter auch über Störungen auf die Vegetation ein (z.B. Borkenkäferbefall, Sturm, Feuer, Überflutung). Spezielle dendroökologische Untersuchungen zur Trockentoleranz ausgewählter europäischer Baumarten wurden aufgrund einer erwarteten Zunahme von Trockenperioden von Zang et al. (2014) durchgeführt. Hierbei fanden die Klimaparameter Sommerniederschlag (Summe der Monatsniederschläge von Juni, Juli und August) und Mitteltemperatur des Sommers (Juni, Juli, August) Verwendung, um eine Charakterisierung von aridem und humidem Klima sowie die Ableitung von Trockenheitsindices zu ermöglichen. Einen anderen Trockenheitsindex haben Williams et al. (2013) entwickelt, welcher die Niederschlagssumme von November bis März sowie die Temperaturen von Mai bis Juli und von August bis Oktober als klimatische Eingangsparameter verwendet.

Zur Modellierung der aktuellen und potenziellen zukünftigen Habitateignung europäischer Baumarten zogen Zimmermann et al (2013) als Prädiktoren Temperatur-, Niederschlags- und Strahlungsparameter heran. Als Temperaturparameter wurden die Tage mit einer Temperatur über 5,56 °C sowie die Temperatursaisonalität (Standardabweichungen der Monatswerte) verwendet, während hinsichtlich Niederschlag zwischen Sommer (Summe der Monatswerte von April bis September) und Winter (Summe der Monatswerte von Oktober bis März) unterschieden wurde. Ein zusätzlicher Eingangsparameter war die jährliche Globalstrahlung. Im Zuge der Ermittlung der Vulnerabilität nordamerikanischer Wälder in den Appalachen gegenüber Klimaveränderungen wurden mittels verschiedener Modellierungen Vorhersagen zur Veränderung von Artverteilungen abgeleitet. Diese stützten sich auf Niederschlags- und Temperaturvariablen sowie die mittlere monatliche Windgeschwindigkeit und die totale Solarstrahlung. Hinsichtlich Temperatur fanden die mittlere Jahrestemperatur, die mittlere Jänner- und Julitemperatur sowie die Differenz zwischen diesen, die mittlere Temperatur von Mai bis September sowie die minimalen und maximalen Temperaturen Eingang in das Modell. Die Niederschlagsvariablen setzten sich aus dem jährlichen Niederschlag, dem mittleren Niederschlag von Mai bis September und den täglichen Niederschlägen zusammen (Butler et al. 2015). Eine ähnliche Vorgehensweise zur Beurteilung der Vulnerabilität der Wälder gegenüber Klimaveränderungen wurde in Wisconsin verfolgt, wo mit Hilfe skalierten Klimaszenarien die Auswirkung der Klimaveränderungen auf die Waldökosysteme modelliert wurde. Dabei wurden die

Parameter mittlere Sommer- und Wintertemperatur sowie mittlerer monatlicher Niederschlag, im Winter und im Sommer aus den Klimaszenarien herangezogen (Swanston et al. 2011).

Die Literaturangaben beziehen sich zumeist auf Parameter und Phänomene wie Temperatur, Frost, Hitze, Länge der Vegetationsperiode, Wasserversorgung bzw. Niederschlag, Trockenheit bzw. Trockenperioden, Schnee, Strahlung und Wind. Auf dieser Grundlage konnten schließlich die als vegetationsökologisch relevant erachteten Klimaparameter aus dem verfügbaren Datenmaterial ausgewählt werden. Dabei wurden die Parameter als solche übernommen und keine abgeleiteten Parameter (z.B. Trockenheitsindices) berechnet. Die ausgewählten Klimaparameter aus den Projekten 3PClim und Solar Tirol sind in Tabelle 1 angeführt und beschrieben.

**Tabelle 1: Auflistung, Abkürzung und Beschreibung der aus den Ergebnissen des Projektes 3PClim ausgewählten Klimaparameter zur Beschreibung der aktuellen Klimaverhältnisse. Die Bezeichnungen und Beschreibungen wurden von den Kartenbeschreibungen unter [www.alpenklima.eu](http://www.alpenklima.eu) sowie <http://geokatalog.buergernetz.bz.it/geokatalog/#/> übernommen.**

Bezeichnung	Abkürzung	Beschreibung
Beginn Borkenkäfersaison [d]	<i>bkb</i>	Der Beginn der Aktivitätsperiode des Borkenkäfers fällt auf den ersten Tag des längsten durchgehenden Abschnitts an warmen Tagen mit einer Höchsttemperatur von 20° C oder mehr. Allerdings wird ein früherer Abschnitt solch warmer Tage bereits in die Aktivitätsperiode des Borkenkäfers miteinbezogen, falls er länger anhält als die Summe aller dazwischenliegenden kühleren Tage
Dauer Borkenkäfersaison [d]	<i>bkd</i>	Die jährliche Dauer der Aktivitätsperiode des Borkenkäfers umfasst den Zeitraum zwischen dem Beginn und dem Ende der Aktivitätsperiode. Mit Aktivitätsperiode des Borkenkäfers wird jener Abschnitt des Jahres bezeichnet, in dem besonders günstige thermische Bedingungen für die Vermehrung und Ausbreitung der Borkenkäferarten herrschen.
Ende Borkenkäfersaison [d]	<i>bke</i>	Das Ende der Aktivitätsperiode des Borkenkäfers fällt auf den letzten Tag des längsten durchgehenden Abschnitts an warmen Tagen mit einer Höchsttemperatur von 20° C oder mehr. Allerdings wird ein späterer Abschnitt solch warmer Tage noch in die Aktivitätsperiode des Borkenkäfers miteinbezogen, falls er länger anhält als die Summe aller dazwischenliegenden kühleren Tage.
Anzahl Frosttage [d]	<i>fro</i>	Die jährliche Anzahl der Frosttage erfasst Tage, an denen die Tiefsttemperatur unter 0° C fällt. Demnach wird zumindest einmal im Laufe des Tages eine Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes verzeichnet.
Heiße Tage [d]	<i>hss</i>	Die jährliche Anzahl der heißen Tage beinhaltet Tage, an denen die Lufttemperatur einen Höchstwert von 30° C oder mehr erreicht. Heiße Tage zählen somit auch als Sommertage, umgekehrt ist das aber nicht unbedingt der Fall.
Mittlere Jahressumme Niederschlag [mm]	<i>rr</i>	Die jährliche Niederschlagssumme pro Flächeneinheit (in Liter pro Quadratmeter) entspricht der über das Jahr hindurch angesammelten gemessenen Niederschlagshöhe (in mm) im langjährigen Durchschnitt. Niederschlag umfasst kondensiertes Wasser aus Wolken und Nebel, das entweder in flüssiger Form als Regen und Nieselregen oder in fester Form als Schnee, Hagel, Eiskörner und Graupel die Erdoberfläche erreicht. Alle Auswertungen beziehen sich auf gemessene Niederschlagsmengen. Besonders in großen Seehöhen muss der potenzielle Messfehler durch Driftverluste aufgrund höherer Windgeschwindigkeiten und den höheren Schneeanteil berücksichtigt werden.

Mittlere Monatssumme Niederschlag (Jänner, Februar, März, April, Mai, Juni, Juli, August, September, Oktober, November, Dezember) [mm]	<i>rr01, rr02, rr03, rr04, rr05, rr06, rr07, rr08, rr09, rr10, rr11, rr12</i>	Die monatliche Niederschlagssumme pro Flächeneinheit (in Liter pro Quadratmeter) entspricht der gemessenen Niederschlagshöhe (in mm), welche sich im Laufe eines bestimmten Kalendermonats ansammelt, im langjährigen Durchschnitt. Niederschlag umfasst kondensiertes Wasser aus Wolken und Nebel, das entweder in flüssiger Form als Regen und Nieselregen oder in fester Form als Schnee, Hagel, Eiskörner und Graupel die Erdoberfläche erreicht.
Mittlere saisonale Summe Niederschlag (Winter, Frühjahr, Sommer, Herbst) [mm]	<i>rrdjf, rrmam, rrjja, rrson</i>	Die jahreszeitliche Niederschlagssumme pro Flächeneinheit (in Liter pro Quadratmeter) entspricht dem langjährigen Durchschnitt der gemessenen Niederschlagshöhe (in mm), welche sich im Laufe einer klimatologischen Jahreszeit, die drei Kalendermonate einschließt, ansammelt (Frühling: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter: Dezember, Jänner, Februar). Niederschlag umfasst kondensiertes Wasser aus Wolken und Nebel, das entweder in flüssiger Form als Regen und Nieselregen oder in fester Form als Schnee, Hagel, Eiskörner und Graupel die Erdoberfläche erreicht.
Mittlere jährliche Sonneneinstrahlung [Wh/m <sup>2</sup> ]	<i>str</i>	Durchschnittliche jährliche Sonneneinstrahlung in Südtirol unter Berücksichtigung von Wolkenbedeckung und Abschattung.
Mittlere jährliche Lufttemperatur [°C]	<i>t</i>	Die mittlere jährliche Lufttemperatur ist eine allgemeine Darstellung des Temperaturklimas. Den Auswertungen liegen Tagesmittelwerte der Temperatur zugrunde, die als arithmetisches Mittel aus Morgen- (7 Uhr) und Abendbeobachtung (19 Uhr) sowie Tiefst- und Höchstwert berechnet werden. Andere regionale Konventionen der Berechnung täglicher Temperaturen wurden an diese Methode angepasst.
Mittlere monatliche Lufttemperatur (Jänner, Februar, März, April, Mai, Juni, Juli, August, September, Oktober, November, Dezember) [°C]	<i>t01, t02, t03, t04, t05, t06, t07, t08, t09, t10, t11, t12</i>	Die mittlere monatliche Lufttemperatur bezieht sich auf die durchschnittlichen Temperaturbedingungen eines bestimmten Kalendermonats. Den Auswertungen liegen Tagesmittelwerte der Temperatur zugrunde, die als arithmetisches Mittel aus Morgen- (7 Uhr) und Abendbeobachtung (19 Uhr) sowie Tiefst- und Höchstwert berechnet werden. Andere regionale Konventionen der Berechnung täglicher Temperaturen wurden an diese Methode angepasst.
Mittlere saisonale Lufttemperatur (Winter, Frühjahr, Sommer, Herbst) [°C]	<i>tdjf, tmam, tjja, tson</i>	Die mittlere jahreszeitliche Lufttemperatur beschreibt die typischen Temperaturbedingungen einer klimatologischen Jahreszeit, die jeweils drei Kalendermonate umfasst (Frühling: März, April, Mai; Sommer: Juni, Juli, August; Herbst: September, Oktober, November; Winter: Dezember, Jänner, Februar). Den Auswertungen liegen Tagesmittelwerte der Temperatur zugrunde, die als arithmetisches Mittel aus Morgen- (7 Uhr) und Abendbeobachtung (19 Uhr) sowie Tiefst- und Höchstwert berechnet werden. Andere regionale Konventionen der Berechnung täglicher Temperaturen wurden an diese Mittelungsmethode angepasst.
Mittlere Dauer Trockenperiode [d]	<i>trdau</i>	Die mittlere Dauer von Trockenperioden bezieht sich auf die durchschnittliche Anzahl von Tagen ohne Niederschlag. Gemeint ist damit der mittlere Zeitabschnitt zwischen zwei Niederschlagstagen, die sich durch eine Niederschlagssumme von mindestens 1 mm auszeichnen.
Beginn Vegetationsperiode $\geq 5^\circ\text{C}$ [d]	<i>veg5b</i>	Der Beginn der Vegetationsperiode nach der Fünf-Grad-Schwelle fällt auf den ersten Tag des längsten durchgehenden Abschnitts an Tagen mit einer Mitteltemperatur von mindestens $5^\circ\text{C}$ . Allerdings wird ein früherer Abschnitt solch warmer Tage bereits in die Vegetationsperiode miteinbezogen, falls er länger anhält als die Summe aller dazwischenliegenden kühleren Tage.
Dauer Vegetationsperiode $\geq 5^\circ\text{C}$ [d]	<i>veg5</i>	Die jährliche Dauer der Vegetationsperiode umfasst den Zeitraum zwischen dem Beginn und dem Ende der Vegetationsperiode.

Ende Vegetationsperiode $\geq 5^\circ\text{C}$ [d]	<i>veg5e</i>	Das Ende der Vegetationsperiode nach der Fünf-Grad-Schwelle fällt auf den letzten Tag des längsten durchgehenden Abschnitts an Tagen mit einer Mitteltemperatur von mindestens $5^\circ\text{C}$ . Allerdings wird ein späterer Abschnitt solch warmer Tage noch in die Vegetationsperiode miteinbezogen, falls er länger anhält als die Summe aller dazwischenliegenden kühleren Tage.
Beginn Winterschneedecke [d]	<i>wdb</i>	Der Beginn der Winterschneedecke fällt auf den ersten Tag des längsten ununterbrochenen Zeitraumes eines Jahres mit einer Schneedecke. Schneedecke bezieht sich auf eine morgendliche Schneeeauflage von mindestens 1 cm Höhe. Die Jahre werden dabei von August bis Juli anstatt von Jänner bis Dezember ausgewertet, um die Teilung der natürlichen Schneesaison zu vermeiden.
Dauer Winterschneedecke [d]	<i>wdd</i>	Die Dauer der Winterschneedecke beschreibt den längsten ununterbrochenen Zeitraum eines Jahres mit einer Schneedecke. Schneedecke bezieht sich auf eine morgendliche Schneeeauflage von mindestens 1 cm Höhe.
Ende Winterschneedecke [d]	<i>wde</i>	Das Ende der Winterschneedecke fällt auf den letzten Tag des längsten ununterbrochenen Zeitraumes eines Jahres mit einer Schneedecke. Schneedecke bezieht sich auf eine morgendliche Schneeeauflage von mindestens 1 cm Höhe.

Die Auswahl der zu betrachtenden Parameter aus dem Klimaszenario wurde nach den selben vegetationsökologischen Gesichtspunkten, die bereits bei der Auswahl der Klimaparameter zur Beschreibung des aktuellen Klimas Berücksichtigung fanden, durchgeführt. Aufgrund der im Szenario nur in geringerem Umfang verfügbaren Parameter belief sich die Auswahl auf die in Tabelle 2 angeführten und beschriebenen elf Variablen. Bis auf die Dauer der Vegetationsperiode stimmen alle Definitionen mit jenen der Parameter zur Beschreibung des aktuellen Klimas überein. Im Klimaszenario wird die Vegetationsperiode folgendermaßen definiert: „Die Vegetationsperiode beginnt, wenn die mittlere Temperatur an zehn aufeinanderfolgenden Tagen  $5^\circ\text{C}$  nicht unterschreitet und endet, wenn in der zweiten Jahreshälfte die mittlere Temperatur an zehn aufeinanderfolgenden Tagen  $5^\circ\text{C}$  unterschreitet“ (ZAMG et al. 2015b, Kartenbeschreibung der mittleren Vegetationsperiode in der interaktiven Karte unter <http://www.alpenklima.eu/tpclim/future.php?lang=de>).

**Tabelle 2: Auflistung und Abkürzung der aus dem Klimaszenario A1B ausgewählten Klimaparameter zur Beschreibung der zukünftigen Klimaverhältnisse. Die Bezeichnung wurde von den Kartenbeschreibungen unter [www.alpenklima.eu](http://www.alpenklima.eu) übernommen.**

Bezeichnung	Abkürzung
Mittlere jährliche Summe des Niederschlages [mm]	<i>rr</i>
Mittlere Summe des Niederschlages im Frühjahr [mm]	<i>rrmam</i>
Mittlere Summe des Niederschlages im Sommer [mm]	<i>rrjja</i>
Mittlere Summe des Niederschlages im Herbst [mm]	<i>rrson</i>
Mittlere Summe des Niederschlages im Winter [mm]	<i>rrdjf</i>
Mittlere tägliche Lufttemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	<i>t</i>
Mittlere tägliche Lufttemperatur im Frühjahr [ $^\circ\text{C}$ ]	<i>tmam</i>
Mittlere tägliche Lufttemperatur im Sommer [ $^\circ\text{C}$ ]	<i>tjja</i>
Mittlere tägliche Lufttemperatur im Herbst [ $^\circ\text{C}$ ]	<i>tson</i>
Mittlere tägliche Lufttemperatur im Winter [ $^\circ\text{C}$ ]	<i>tdjf</i>
Mittlere Länge der jährlichen Vegetationsperiode [d]	<i>veg5</i>

## 2.2 Literaturrecherche

Die Literatursuche wurde unter anderem auf Grundlage von bereits vorhandenem Material (Lehrveranstaltungsunterlagen der Universität für Bodenkultur, Tagungsbeiträge, Vorträge, bereits bekannte wissenschaftliche Publikationen, persönliche Mitteilungen) durchgeführt,

indem relevante Aspekte durch zusätzliche Recherchen vertieft wurden. So konnten beispielsweise die Literaturangaben wissenschaftlicher Publikationen als Verweis zu relevanten Informationsquellen herangezogen werden. Neben wissenschaftlicher Literatur wurde auch auf praktische Informationen zurückgegriffen. Als Suchinstrumente diente daher neben den wissenschaftlichen Suchplattformen Google Scholar, Scopus und der Recherche-Plattform „BOKU:LITsearch“ der Bibliothek der Universität für Bodenkultur auch die allgemeine Suchmaschine Google. Die meisten verwendeten Hardcopies wurden der Bibliothek der Universität für Bodenkultur entliehen.

## **2.3 Aufbereitung der Rasterdaten**

Die Aufbereitung und Verarbeitung des Kartenmaterials erfolgte mit dem Geoinformationssystem ArcGis Desktop 10.4.1 sowie ArcGis Desktop 10.5.1.

### **2.3.1 Aufbereitung und Extraktion von Wuchszone, Waldgruppen und Waldtyp**

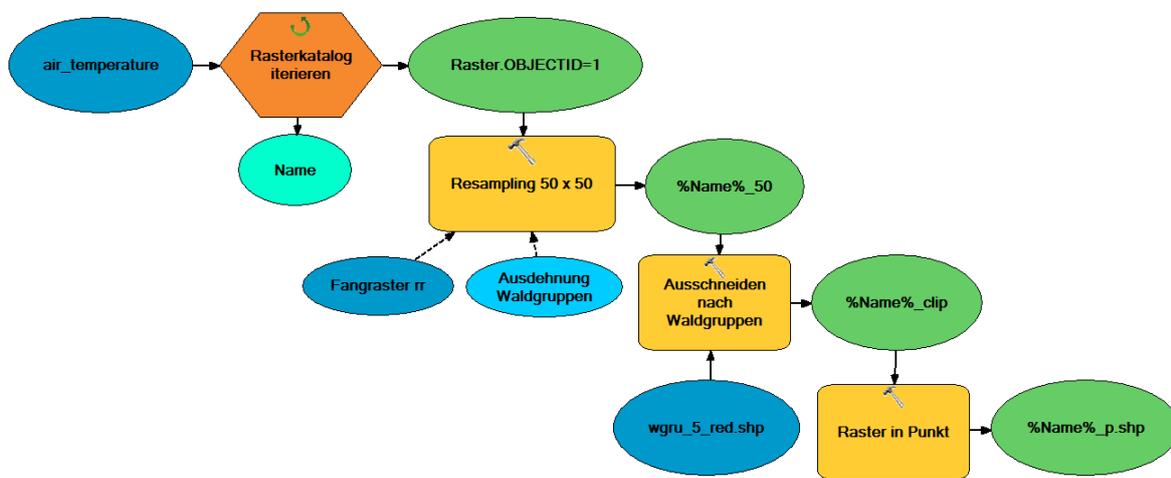
Zur Begrenzung der Kartenausdehnung auf den interessierenden Bereich musste zuerst die Fichten-Tannen-Buchen-Zone aus der Karte der Wuchszonen exportiert und als Shape-Datei abgespeichert werden. Mit dieser Datei konnten in einem weiteren Schritt die in der Wuchszone liegenden Waldtypen aus der Waldtypenkarte ausgeschnitten und abgespeichert werden. Zumal die Untersuchungseinheiten Waldgruppen und nicht Waldtypen sind, wurden die Waldtypen-Features anschließend anhand des Attributes „Waldgruppe“ zu Waldgruppen-Features verschmolzen. Schließlich war es notwendig, aus den vorliegenden Waldgruppen die interessierenden fünf Waldgruppen zu extrahieren und als Datei abzuspeichern.

Um die im Rasterformat vorliegenden Klimadaten für die Analysen als Tabellen auslesen zu können, mussten sie in Punktdateien umgewandelt werden, welche im Gegensatz zu Rasterdateien über eine exportierbare Attributtabelle verfügen. Es war daher notwendig, auch die Polygone der Waldgruppen in ein geordnetes und zu den Punkten der Klimavariablen lagegleiches Punktenetz umzuwandeln, um später die erstellten Punkte mit den Klimavariablen den Waldgruppen zuordnen zu können. Hierzu erfolgte mittels des Werkzeugs „Polygon to Raster“ eine Transformation der Polygone, welche die fünf ausgewählten Waldtypen darstellen, in ein Raster mit Auflösung 50 x 50 m (diese Auflösung garantiert eine noch ausreichend präzise Darstellung der Waldtypen) und dem Ursprung analog zum Fangraster „Jahresniederschlag“ (dieses wurde als Referenz für alle Rastertransformationen ausgewählt, um eine exakt gleiche Position der Rasterzellen und später Punkte zu gewährleisten). Als Wertefeld wurde das Attribut, das die Waldgruppen bezeichnet, ausgewählt. In einem weiteren Schritt erfolgte mit dem Werkzeug „Raster to Point“ die Umwandlung des Rasters in eine Punktdatei mit Attribut „Waldgruppe“. Den Punkten wurden in der Attributtabelle anschließend noch die Koordinaten hinzugefügt. Diese Punktdatei diente über das Feld „POINTID“ bzw. über die Koordinaten schließlich der Zuordnung der Punkte mit den Klimavariablen zu einer Waldgruppe. Zudem erfolgte auch eine Umwandlung des aus den Polygonen erstellten Rasters in eine Shape-Datei, die zum Ausschneiden des räumlichen Untersuchungsbereiches aus den gerasterten Klimadaten nach den Konturen der neu erstellten Polygone diente. Rasterdateien eignen sich hierzu nicht.

Um bei den waldbaulichen Schlussfolgerungen die Klimavariablen des ausgewählten Waldtyps über die in den Datentabellen enthaltenen Koordinaten der Punkte identifizieren zu können, mussten auch die Polygone des Waldtyps entsprechend aufbereitet werden, indem sie aus der bereits auf die Wuchszone beschränkten Karte exportiert und unter Berücksichtigung des Fangrasters „Jahresniederschlag“ in ein Raster mit Auflösung 50 x 50 m umgewandelt und schließlich in eine Punktdatei transformiert wurden, welche anschließend mit den Koordinaten versehen wurde.

### 2.3.2 Aufbereitung und Extraktion der aktuellen Klimaparameter

Die Aufbereitung der Klimadaten erfolgte mit Hilfe eines Modelles, welches einen automatisierten Ablauf mehrerer aufeinanderfolgender Bearbeitungen an einer Reihe von Dateien durchführt (siehe Abbildung 4). Dazu war die Einrichtung eines Rasterkataloges in einer Geodatabase erforderlich, aus dem mit Hilfe eines Iterators die Raster nacheinander aufgerufen werden konnten. Für jede, jeweils einen Klimaparameter beschreibende Datei, wurde zunächst die Auflösung von 500 x 500 m auf 50 x 50 m geändert, wobei der Ursprung (anhand des Fangrasters „Jahresniederschlag“) für alle Dateien einheitlich gewählt wurde. Hierzu wurde das Werkzeug „Resampling“ in der Toolbox herangezogen. In einem weiteren Schritt wurde mit dem Werkzeug „Clip“ die Ausdehnung der Rasterdateien auf die Ausdehnung der zuvor erstellten Shape-Datei mit den fünf Waldgruppen in Polygonform beschränkt. Weiters wurden die reduzierten Raster mit dem Werkzeug „Raster to point“ in Punktdateien transformiert, die den Vorteil haben, dass die Eigenschaften eines jeden Punktes über die Attributtabelle abgerufen werden können.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung des mit dem ModelBuilder erstellten Modells zur automatisierten Verarbeitung der Klimadatenätze. Wichtige Komponenten sind die implementierten Werkzeuge (gelb), die ausgegebenen und im darauffolgenden Arbeitsschritt weiterverarbeiteten Dateien (grün), die im Zuge der Ausführung konstant bleibenden Inputdateien (Fangraster, Ausdehnung der Verarbeitung, Polygone zum Ausschneiden; blau) sowie der Iterator, welcher die Elemente des Rasterkatalogs durchläuft (orange).**

Schließlich konnten die Punktdateien mit den Klimaparametern mit Hilfe der Funktion „Join“ über das in beiden Attributtabelle übereinstimmende Feld „POINTID“ mit der zuvor erstellten Punktdatei mit den Waldgruppen verbunden werden, wodurch jedem Punkt neben der Ausprägung des Klimaparameters auch die zugehörige Waldgruppe zugeordnet werden konnte. Lediglich bei den Parametern „Strahlung“, „Borkenkäfersaison Beginn“ und „Borkenkäfersaison Ende“ musste die Verbindung auf Basis räumlich übereinstimmender Punkte vorgenommen werden, zumal die Felder „POINTID“ zwischen den Attributtabelle wegen unterschiedlicher Punktezahlen nicht übereinstimmten. Die Werte der Attributtabelle wurden schließlich über die Tabellenoptionen als CSV-Dateien exportiert und in Excel zur weiteren Verarbeitung mit der Statistiksoftware R organisiert und aufbereitet. Dabei wurde der Parameter „Winterschneedecke Beginn“ dahingehend bearbeitet, dass die Jahrteilung nicht zwischen Dezember und Jänner, sondern zwischen Juli und August erfolgt, um die Daten zwischen den einzelnen Waldgruppen vergleichbar zu machen. Hierbei wurde bei Werten nach dem 31. Juli 212 Tage (die Tage der Monate Jänner bis Juli) abgezogen und bei Werten vor dem 31. Juli 153 Tage (die Tage der Monate August bis Dezember)

hinzugezählt. Da die Winterschneedecke in den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern zum Teil im Dezember, zum Teil aber erst im Jänner beginnt, hätten die untransformierten Daten mit Werten um 0 und Werten um 365 keine Vergleichbarkeit zugelassen.

Der Datensatz zur Strahlung bedurfte einer besonderen Aufbereitung, zumal die Bittiefe der Datei die Angabe der Werte nur in wissenschaftlicher Notation erlaubte und die außerhalb des kartierten Bereiches liegenden Rasterzellen nicht als NoData-Werte sondern mit 0 klassifiziert waren. Daher musste im Zuge des Kopierens des Rasters in den Optionen die Bittiefe auf 32 Bit geändert und der Wert 0 als NoData definiert werden.

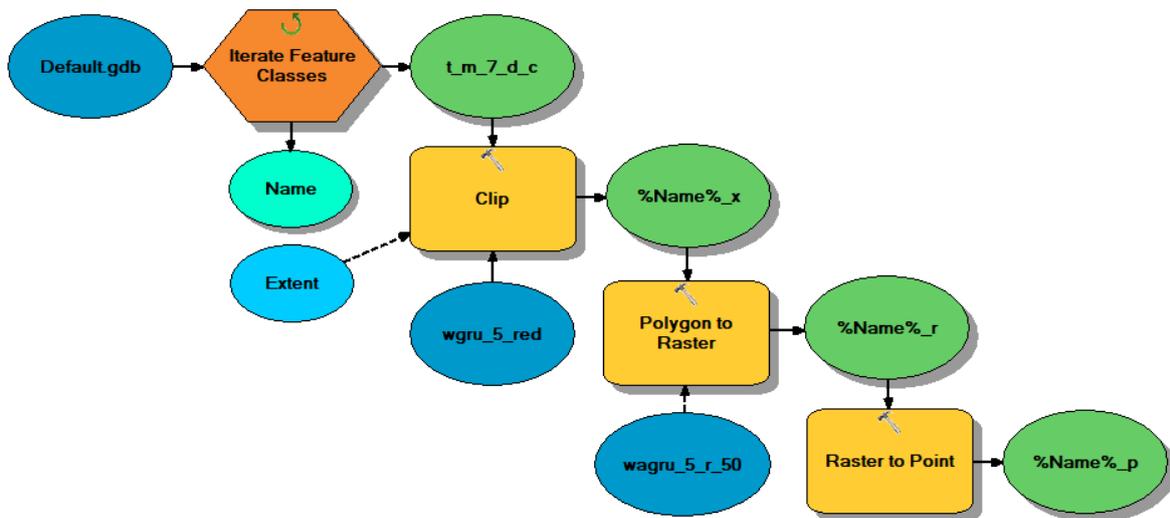
### 2.3.3 Aufbereitung und Extraktion der Klimaparameter der zukünftigen Perioden

Zumal für Rasterdateien in ArcGis die Verarbeitungsmöglichkeiten begrenzt sind, wurde die Extraktion des relevanten räumlichen Bereiches sowie die nachfolgende Aufbereitung des Datenmaterials bis hin zum Vorliegen in einem Punkt-Format auf Basis von Shape-Dateien durchgeführt. Hierzu wurde eine Vorlage im ASCII-Format erstellt, welche in benachbarten Zellen jeweils unterschiedliche Werte enthält und somit die Umwandlung eines jeden Rasterpixels in ein Polygon erlaubt. Andernfalls würden benachbarte Zellen mit dem selben M-Wert zu einem Polygon verbunden werden. Die ASCII-Datei wurde im nächsten Schritt mit dem Werkzeug „ASCII to Raster“ in ein Raster umgewandelt. Diesem wurde im Katalog die Projektion der vorliegenden ASCII-Dateien (WGS 1984) zugewiesen. In weiterer Folge wurde das Raster mit dem Werkzeug „Raster to Polygon“ ohne Vereinfachung der Konturen in eine Shape-Datei umgewandelt, wobei durch die vorherige Aufbereitung der ASCII-Datei aus jeder Rasterzelle ein Polygon erstellt wurde. Zumal es sich bei der Datei lediglich um eine Vorlage zur räumlichen Zuweisung der entsprechenden Parameterwerte handelt, wurde der M-Wert der Zellen („Grid code“) in der Attributtabelle der Vorlage gelöscht. Schließlich wurde mittels des Werkzeuges „Project“ das geografische Koordinatensystem WGS 1984 in die Projektion ETRS 1989 UTM Zone 32 N transformiert, in welcher auch die übrigen Klimaparameter des aktuellen Klimas vorliegen. Nach Erstellung der Vorlage wurde diese mit dem Werkzeug „Copy features“ vervielfältigt, sodass für jeden Parameter eine Rohdatei mit dem räumlichen Gitter in Form von Polygonen vorlag.

Um den leeren Polygonen einen Zellenwert zuweisen zu können, wurden die ASCII-Dateien mit den Klimaparametern in Rasterdateien umgewandelt („ASCII to Raster“) und diese wiederum mit dem Werkzeug „Raster to Point“ in Punktdateien. Zumal die Reihenfolge der Punkte jener der Polygone in den leeren Shape-Dateien entsprach, konnte den Polygonen der entsprechende M-Wert (Zellenwert oder „Grid Code“, welcher die Ausprägung des Parameters im jeweiligen räumlichen Bereich beschreibt) durch Verbindung der Attributtabelle der leeren Vorlage mit dem Zellenwert der Punktdateien auf Basis des übereinstimmenden Feldes „FID“, welches eine fortlaufende Nummerierung der Zellen darstellt, zugeordnet werden. Dies wurde mit dem Werkzeug „Join Field“ bewerkstelligt.

Zum Extrahieren des interessierenden räumlichen Bereiches, zur Veränderung der Auflösung sowie zur Erstellung einer Punktdatei mit Attributtabelle wurden die Shape-Dateien mit den zugewiesenen M-Werten in eine Geodatabase importiert und mittels eines Modells für jede Datei, die einen Klimaparameter beschreibt, die Verarbeitung mit Hilfe eines Iterators automatisiert durchgeführt (siehe Abbildung 5). Die Bezeichnung der Dateien musste aufgrund der Zeichenbeschränkung insbesondere bei Rasterdateien auf 13 Zeichen abgekürzt werden. Im Zuge der Verarbeitung wurde mit dem Werkzeug „Clip“ der interessierende räumliche Bereich der Shape-Dateien (die Ausdehnung der fünf zu untersuchenden Waldgruppen) mittels der Konturen der zuvor erstellten Shape-Datei, welche die Ausdehnungen der Waldgruppen mit Polygonen darstellt, ausgeschnitten. Diese neu erstellten Shape-Dateien wurde dann unter Verwendung des Werkzeuges „Polygon to Raster“ in Raster mit Auflösung 50 x 50 m umgewandelt, wobei zur Festlegung des Ursprungs als Fangraster die bereits im Zuge der Verarbeitung der Waldgruppen erstellte Ausdehnung der fünf zu untersuchenden Waldgruppen verwendet wurde. Schließlich wurden die Raster-Dateien mit dem Werkzeug „Raster to Point“ in Punktdateien umgewandelt, womit

für jeden Parameter eine auf den Untersuchungsbereich in Auflösung 50 x 50 m zugeschnittene Attributtabelle vorlag.



**Abbildung 5: Schematische Darstellung des mit dem ModelBuilder erstellten Modells zur automatisierten Verarbeitung der Datensätze zur Klimazukunft. Wichtige Komponenten sind die implementierten Werkzeuge (gelb), die ausgegebenen und im darauffolgenden Arbeitsschritt weiterverarbeiteten Dateien (grün), die im Zuge der Ausführung konstant bleibenden Inputdateien (Ausdehnung der Verarbeitung, Polygone zum Ausschneiden, Fangraster; blau) sowie der Iterator, welcher die Feature Classes durchläuft (orange).**

Die weitere Verarbeitung wurde für Dateien, welche eine Änderung zur Referenzperiode 1981-2010 beschreiben, anders durchgeführt als für Dateien, welche das zukünftige Klima als solches beschreiben. Letztgenannter Fall trifft auf die Dauer der Vegetationsperiode zu, welche im Szenario anders als in der Beschreibung des aktuellen Klimas definiert ist, weshalb die bereits modellierten Ausprägungen des Klimas in den unterschiedlichen Perioden zur Auswertung herangezogen wurden. Der Vorteil der Betrachtung der Änderung liegt in einer höheren Auflösung des zukünftigen Klimas, weil die in geringerer Auflösung vorliegende Änderung (10 x 10 km) zum Klima der Referenzperiode (1981-2010) addiert werden kann, welches in einer Auflösung von 500 x 500 m vorliegt.

Die Attributtabelle der Punktdaten, welche eine Veränderung zur Referenzperiode 1981-2010 beschreiben, wurden anhand lagegleicher Punkte mit den Attributtabelle der entsprechenden Punktdaten, welche das Klima für den Zeitraum 1981-2010 beschreiben, verbunden. Nach dem Hinzufügen einer neuen Spalte konnte schließlich durch Addition der Ausprägungen des Parameters im Zeitraum 1981-2010 mit der Ausprägung der Änderung das zukünftige Klima in der Auflösung des Klimas der Referenzperiode (500 x 500 m) berechnet werden. Um die Punkte den entsprechenden Waldgruppen zuordnen zu können, wurde anhand der lagegleichen Punkte eine weitere Verbindung zur Punktdaten mit den Waldgruppen hergestellt. Die Attributtabelle der Punktdaten, welche bereits das zukünftige Klima an sich beschreiben, wurden, um eine Zuordnung zur entsprechenden Waldgruppe herstellen zu können, anhand lagegleicher Punkte mit der Attributtabelle der Punktdaten, welche die Zuordnung zu einer Waldgruppe beinhaltet, verbunden. Die Werte der Attributtabelle wurden schließlich über die Tabellenoptionen als CSV-Dateien exportiert und in Excel zur weiteren Verarbeitung mit der Statistiksoftware R organisiert und aufbereitet.

## 2.4 Datenanalyse und statistische Auswertung

### 2.4.1 Veranschaulichung der Klimaparameter

Um einen Überblick über die Beschaffenheit der Daten zu gewinnen sowie diese darzustellen, wurde mit Hilfe der Statistik-Software R 3.4.2 sowohl für die Daten zum aktuellen Klima als auch für die Daten zum zukünftigen Klima eine grafische Aufbereitung vorgenommen. Dabei wurden als Darstellungsmethoden sogenannte Box- und Whiskers-Diagramme (Boxplots) sowie Klimahüllen gewählt.

Boxplots geben über die Visualisierung von Median, Quartilen und Extremwerten von Verteilungen Auskunft über die Streuung, das Spektrum und potenzielle Ausreißer der Daten. Mit dieser Darstellungsmethode wurden alle ausgewählten Klimaparameter zur Beschreibung des aktuellen Klimas für jede Waldgruppe visualisiert. Zudem wurden auch die Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Zeithorizonten innerhalb der fünf Waldgruppen sowie des zu behandelnden Waldtyps mittels Boxplots dargestellt. In der Statistik-Software R werden neben Median, 1. Quartil (25. Perzentile) und 3. Quartil (75. Perzentile) auch die sogenannten Whiskers dargestellt, wobei diese nach einer speziellen Definition ermittelt werden. Als oberer Whisker wird je nach Ausprägung entweder der maximale Wert der Daten oder die Summe aus dem 3. Quartil und dem eineinhalbfachen Interquartilbereich zwischen 1. und 3. Quartil festgelegt (es wird der kleinere der beiden Werte ausgewählt) und als unterer Whisker entweder der minimale Wert oder die Differenz aus 1. Quartil und dem eineinhalbfachen Interquartilbereich (es wird der größere der beiden Werte ausgewählt) (Shi 2010). Ausreißer, die außerhalb dieses Bereiches liegen, werden als Punkte dargestellt.

Zusätzlich zu den Boxplots wurden mit den Parametern Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur, die aufgrund ihrer Aussagekraft und der standardmäßigen Verwendung in der Forschung ausgewählt wurden, für die jeweiligen Waldgruppen auch Klimahüllen erstellt. Hierbei wurden innerhalb eines Koordinatensystems mit den Achsen Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur für alle drei betrachteten Klimaperioden Punktwolken (Scatterplots mit den aus dem Kartenmaterial extrahierten Punkten für alle drei Klimaperioden, sodass jeder Punkt entsprechend den Perioden drei mal vorhanden war) erstellt und anschließend die äußersten Punkte der jeweiligen Punktwolken durch gerade Linien verbunden, sodass Polygone (Klimahüllen) vorlagen. Diese umhüllen die Klimabereiche und können somit – ähnlich einem Ökogramm – zur Beschreibung der Klimaansprüche der Waldgesellschaften herangezogen werden. Die Darstellung mehrerer Klimaperioden in einem Plot macht es auch möglich, überlagernde und nicht überlagernde Klimabereiche zwischen den Perioden festzustellen. Die Erstellung konnte mit Hilfe des R-Paketes „ggConvexHull“ automatisiert durchgeführt werden (Martin 2017).

### 2.4.2 Überlagerungen der Bereiche der Klimaparameter zwischen benachbarten Waldgruppen und zwischen Zeithorizonten

Im Zuge der Betrachtung der aktuellen Klimaausprägung wurden für jeden Parameter diejenigen Bereiche ermittelt, in denen sich die Verteilungen der Klimaparameter zwischen Waldgruppen benachbarter Höhenstufen überlagern. Diese Bereiche wurden schließlich auf die gesamte Verteilung einer Waldgruppe hinsichtlich des betrachteten Parameters bezogen und somit als Prozentsatz angegeben. Dabei wurde, um Extremwerte auszuschließen, der Bereich zwischen der 5. und 95. Perzentile als Verteilungsspektrum definiert. Eine ähnliche Vorgehensweise gab es bei der Betrachtung der Klimaausprägung in den unterschiedlichen Perioden, wobei hier für die jeweiligen Klimaparameter die Überlagerung der Verteilung der aktuellen mit den beiden Verteilungen der zukünftigen Ausprägungen untersucht wurde. Es handelt sich mathematisch gesehen also um die Ermittlung von Schnittmengen zwischen den Waldgruppen bzw. zwischen den Zeithorizonten.

Zur Ermittlung dieser Mengen erfolgte zunächst die Berechnung der 5. und 95. Perzentile der Parameter innerhalb der zu vergleichenden Gruppen (Waldgruppen und Klimaperioden), wozu die Statistik-Software R 3.4.2 herangezogen wurde. Die weitere Bearbeitung erfolgte in Microsoft Excel 2016. Zumal beim Vorliegen unterschiedlicher Datenkonstellationen zum Teil die selben Rechenoperationen durchgeführt werden konnten, wurden zunächst mögliche Konstellationen zwischen den zu vergleichenden Verteilungen definiert und schließlich den durchzuführenden Rechenoperationen zugewiesen. Eine Übersicht über die Zuordnung der Verteilungskonstellationen zu den Rechenoperationen liefert Tabelle 3. Die Charakterisierung der Konstellationen als auch die Berechnungen bezogen sich dabei ausschließlich auf die 5. und die 95. Perzentile der Verteilungen. In einem weiteren Schritt erfolgte schließlich die Ermittlung des prozentuellen Anteils, indem der durch die Rechenoperation ermittelte, sich mit einer anderen Waldgruppe oder Klimaperiode überlappende Bereich auf den Bereich der gesamten Verteilung (Differenz zwischen 95. und 5. Perzentile) der betrachteten Waldgruppe oder Klimaperiode bezogen wurde.

**Tabelle 3: Übersicht über die Zuordnung der durchzuführenden Rechenoperationen den Konstellationen zwischen den Verteilungen. Die Bezeichnung 5P steht für die 5. Perzentile, während die Bezeichnung 95P die 95. Perzentile meint. Der Zusätze a und b charakterisieren die zu vergleichenden Gruppen (je nach Betrachtung entweder Waldgruppen oder Klimaperioden). Die logische Operation UND bedingt die gleichzeitige Erfüllung mehrerer Kriterien.**

Konstellation zwischen den Verteilungen	Rechenoperation
$95P_a > 95P_b \text{ UND } 5P_a < 5P_b$	$95P_b - 5P_b$
$5P_a < 5P_b \text{ UND } 95P_a = 95P_b$	$95P_a - 5P_b$
$5P_a < 5P_b \text{ UND } 95P_a < 95P_b$	
$95P_a > 95P_b \text{ UND } 5P_a = 5P_b$	$95P_b - 5P_a$
$95P_a > 95P_b \text{ UND } 5P_a > 5P_b$	
$95P_a = 95P_b \text{ UND } 5P_a = 5P_b$	$95P_a - 5P_a$
$95P_a = 95P_b \text{ UND } 5P_a > 5P_b$	
$5P_a = 5P_b \text{ UND } 95P_a < 95P_b$	
$5P_a > 5P_b \text{ UND } 95P_a < 95P_b$	

### 2.4.3 Statistische Mittelwertvergleiche für Parameter des aktuellen Klimas zwischen den Waldgruppen

Zumal die Waldgruppen hinsichtlich 47 ausgewählter Parameter mit unterschiedlichen Verteilungen, welche die Ausprägung des aktuellen Klimas beschreiben, zu vergleichen waren, musste die Auswahl eines geeigneten statistischen Verfahrens zum Vergleich der Mittelwerte der Klimaparameter zwischen den Waldgruppen für jeden Parameter gesondert erfolgen. Die Auswahl der statistischen Verfahren für die Globaltests erfolgte nach den in Lüpsen (2017) erläuterten Ansätzen und Kriterien.

Grundlage für die Berechnungen waren die in den vorangegangenen Schritten extrahierten Klimavariablen der Waldgruppen, womit folgende Stichprobenumfänge (dies entspricht den extrahierten Punkten je Waldgruppe gemäß einer Auflösung von 50 x 50 m) resultierten: Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder ( $n = 10902$ ), Buchenwälder ( $n = 25800$ ), Fichten-Tannen-Buchenwälder ( $n = 45648$ ), Fichten-Tannenwälder ( $n = 39855$ ) und subalpine Fichtenwälder ( $n = 23707$ ). Auch die Angaben zu den zukünftigen Ausprägungen des Klimas lagen je Gruppe in diesen Umfängen vor. Als Signifikanzniveau wurde ein  $\alpha$  von 0,05 gewählt (dies gilt auch für die Vergleiche der Ausprägungen des Klimas zwischen den unterschiedlichen Zeithorizonten).

Die Durchführung der Berechnungen (Prüfung der Voraussetzungen zur Anwendung der Tests sowie Durchführung der statistischen Tests) erfolgte sowohl für den Vergleich des

aktuellen Klimas zwischen den Waldgruppen als auch für den Vergleich der Klimaausprägungen zwischen den Zeithorizonten mit der Statistik-Software R 3.4.2.

### 2.4.3.1 Globaltests

Als parametrisches Verfahren ist der klassische F-Test nur bei Vorliegen einer Normalverteilung innerhalb der Gruppen und Varianzhomogenität zwischen den Gruppen erlaubt. Zumal laut dem zentralen Grenzwertsatz bei großen Stichprobenumfängen (was im untersuchten Datenmaterial mit einem Umfang von 10902 Stichprobenelementen in der kleinsten Gruppe gegeben war) alle Verteilungen quasi normalverteilt sind, konnte dieses Kriterium vernachlässigt werden. Dennoch hatte der Lilliefors-Test auf Normalverteilung ergeben, dass sich die vorliegenden Verteilungen innerhalb der Gruppen allesamt signifikant von einer Normalverteilung unterscheiden. Was die wesentlich kritischere Voraussetzung der Varianzhomogenität betrifft, so gilt der klassische F-Test auch bei signifikant verschiedenen Varianzen zwischen den Gruppen (was für alle der Untersuchung zugrunde liegenden Verteilungen mit einem Levene-Test für nicht normalverteilte Daten bestätigt werden konnte) als robust, vorausgesetzt dass sich bei heterogenen Varianzen zwischen den zu vergleichenden Gruppen die Stichprobenumfänge nicht allzu sehr unterscheiden. Lüpsen (2017) gibt hierzu ein Verhältnis der maximalen zur minimalen Varianz von kleiner 3 bei gleichzeitigem Vorliegen von einem Verhältnis des quadrierten maximalen Stichprobenumfanges zum quadrierten minimalen Stichprobenumfang von kleiner 4 als Grenzbedingung der Verwendung eines klassischen F-Test bei Vorliegen ungleicher Varianzen an. Beim zugrunde liegenden Datenmaterial war diese Voraussetzung bei keiner Verteilung erfüllt, da das Verhältnis des quadrierten maximalen Stichprobenumfanges zum quadrierten minimalen Stichprobenumfang immer 18 betrug und somit die Grenze von 4 überschritten wurde.

Der in dieser Situation (Vorliegen von nicht normalverteilten Daten und Varianzheterogenität) klassischerweise angewendete Test ist jener von Kruskal und Wallis. Allerdings herrscht in Fachkreisen Uneinigkeit über die Fehleranfälligkeit bei schiefen Verteilungen und heterogenen Varianzen. Lüpsen (2017) empfiehlt bei Verletzung aller eben erwähnten Voraussetzungen daher die robuste Variante nach Brunner, Dette und Munk (BDM-Test), welcher zusammen mit dem Test nach Kruskal und Wallis bei allen Datensätzen angewendet wurde.

Im Falle einer oben erläuterten schwerwiegenden Varianzheterogenität empfiehlt Lüpsen (2017) bei Vorliegen einer positiven Korrelation zwischen Mittelwert und Varianz eine Datentransformation mittels der dekadischen Logarithmus- oder quadratischen Wurzelfunktion. Als Grenzwert für eine solche Transformation wurde ein Korrelationsindex von 0,5 festgesetzt. Bis auf das eben beschriebene Kriterium der Transformation wurden alle übrigen Prüfungen der Voraussetzungen (Paarung der Stichprobengröße mit der Varianz und Schiefe) auch bei den transformierten Variablen durchgeführt. Zudem wurden die sich aus den nachfolgenden Kriterien ergebenden Verfahren auch unabhängig von der Erfordernis der Transformation durchgeführt, also zusätzlich für den untransformierten Datensatz durchgeführt.

Weiters erfolgte, wie von Lüpsen (2017) im Falle der Verletzung der Voraussetzungen des klassischen F-Tests zur speziellen Auswahl des für die jeweiligen Daten geeigneten Testverfahrens empfohlen, eine Überprüfung der Korrelation zwischen Stichprobengröße und Varianz (sog. Paarung bzw. „pairing“). Im Falle einer negativen Korrelation (kleine Stichprobenumfänge sind mit großen Varianzen gepaart, als Grenzwert wurde in diesem Fall ein Korrelationsmaß kleiner -0,5 gewählt) wird die Verwendung der ATS-Methode (Anova type statistic) angeraten, zumal bei negativer Paarung nur diese den Fehler 1. Art unter Kontrolle hält. Die beste Alternative dazu stellt die nichtparametrische Methode nach Puri und Senn (eine Verallgemeinerung des Tests von Kruskal und Wallis) dar, welche aufgrund der Verfügbarkeit der ATS-Methode nur für das zweifaktorielle Versuchsdesign bei negativer Paarung gewählt wurde.

Im Falle einer positiven Paarung (als Grenzwert wurde, wie von Lüpsen (2017) angeraten, ein Korrelationsmaß größer 0,5 gewählt) empfiehlt Lüpsen (2017) insbesondere die parametrischen Verfahren von Brown und Forsythe sowie von Welch und James. Falls keine Paarung festgestellt werden kann, wird zur Verwendung des nicht parametrischen van der Waerden-Tests geraten.

Bei rechtsschiefen Verteilungen (festgelegt wurde eine Schiefe von größer 0,9) wurden zusätzlich zu den nach obigen Kriterien bestimmten Testverfahren Histogramme erstellt und der klassische F-Test (ANOVA) durchgeführt, zumal bei rechtsschiefen Verteilungen die rangbasierten Verfahren aufgrund von Streuungsunterschieden zu falsch signifikanten Ergebnissen führen können.

Die parallele Durchführung verschiedener Tests bei manchen Datensätzen ergibt sich aus der erforderlichen Erfüllung mehrerer gleichwertiger Voraussetzungen, die bei diesen Datensätzen nicht allesamt erfüllt sind und wo daher bezüglich der eindeutigen Wahl des Testverfahrens Unsicherheit herrscht. Bei Vorliegen unterschiedlicher Testergebnisse (Ausgabe eines signifikanten Unterschiedes durch ein Verfahren und Ausgabe eines nicht signifikanten Unterschiedes durch ein anderes Verfahren) wurde die strengere Beurteilung übernommen (dies gilt auch für die multiplen Mittelwertvergleiche sowie die Vergleiche der Klimaausprägungen zwischen den Zeithorizonten).

Die Auswahl der Tests für die jeweiligen Klimaparameter nach den gerade ausgeführten Überlegungen ist in Tabelle 4 ersichtlich (es fehlt die Angabe des Tests nach Kruskal und Wallis sowie des Tests nach Brunner, Dette und Munk, die bei allen Parametern durchgeführt wurden).

### **2.4.3.2 Post-hoc-Tests**

Die meisten Verfahren zum multiplen Mittelwertvergleich sind unabhängig von einer Varianzanalyse anwendbar (Lüpsen 2016). Sachs (1991) empfiehlt für den multiplen Vergleich von Mittelwerten bei ungleich großen Stichproben und heterogenen Varianzen zwischen den Stichproben den Test nach Games und Howell. Lüpsen (2016) empfiehlt in diesem Fall aufgrund der großen Stichprobenumfänge zusätzlich noch Dunette's C-Test, mit der Anmerkung, dass der Games und Howell-Test der bessere mit der größeren Power sei und diese Tests in allen Fällen angebracht seien. Der Games und Howell-Test kann auch auf andere Tests angewendet werden (Lüpsen 2016).

Aufgrund dieser Überlegungen wurden alle Datensätze mit diesen beiden Verfahren analysiert. Bei den Parametern, welche bereits mit dem Globaltest nach van der Waerden analysiert worden waren, wurde zusätzlich ein spezielles Posthoc-Verfahren, welches auf den Ergebnissen des van der Waerden-Globaltests aufbaut, angewendet (eine Übersicht über die Auswahl der Verfahren liefert Tabelle 4).

Für die  $\alpha$ -Korrektur wurde bei allen Verfahren die Methode nach Holms gewählt, welche in einem schrittweisen Verfahren die Hypothesen aus dem Globaltest verfeinert (Lüpsen 2016).

**Tabelle 4: Auswahl der statistischen Tests (Globaltests und Post-hoc-Verfahren) zum Vergleich der Mittelwerte der Klimaparameter zwischen den Waldgruppen nach Lüpsen (2017), Lüpsen (2016) und Sachs (1991) (vdW = van der Waerden-Test, B&F = Test nach Brown und Forsythe, Welch = Test nach Welch, Transf. = Datentransformation, P&S = Test nach Puri und Senn, F = F-Test, G&H = Test nach Games und Howell, DunC = Dunette's C-Test).**

Parameter	Globaltest	Post-hoc-Test	Parameter	Globaltest	Post-hoc-Test
<i>bkb</i>	vdW	G&H + DunC + vdW	<i>t10</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>bkd</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>t11</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>bke</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>t12</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>fro</i>	Transf. + Test bzw. B&F + Welch	G&H + DunC	<i>tdjf</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>hss</i>	Transf. + Tests bzw. P&S	G&H + DunC	<i>tja</i>	B&F + Welch	G&H + DunC
<i>rr</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>tmam</i>	B&F + Welch	G&H + DunC
<i>rr01</i>	P&S	G&H + DunC	<i>trdau</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr02</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>tsou</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr03</i>	P&S	G&H + DunC	<i>veg5b</i>	B&F + Welch	G&H + DunC
<i>rr04</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>veg5</i>	B&F + Welch	G&H + DunC
<i>rr05</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>veg5e</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr06</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>wdb</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr07</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>wdd</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr08</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>wde</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr09</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(fro)</i>	B&F + Welch	G&H + DunC
<i>rr10</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Sqrt(hss)</i>	F + vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr11</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr)</i>	F + vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rr12</i>	P&S	G&H + DunC	<i>Log(rr02)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rrdjf</i>	P&S	G&H + DunC	<i>Log(rr04)</i>	P&S	G&H + DunC
<i>rrija</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr05)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rrmam</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr06)</i>	F + vdW	G&H + DunC + vdW
<i>rrson</i>	Transf. + Tests bzw. vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr07)</i>	F + vdW	G&H + DunC + vdW
<i>str</i>	vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr08)</i>	F + vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(rr09)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t01</i>	vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr10)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t02</i>	vdW	G&H + DunC + vdW	<i>Log(rr11)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t03</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(rrija)</i>	F + vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t04</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(rrmam)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t05</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(rrson)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t06</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(wdb)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t07</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(wdd)</i>	P&S	G&H + DunC
<i>t08</i>	B&F + Welch	G&H + DunC	<i>Log(wde)</i>	vdW	G&H + DunC + vdW
<i>t09</i>	B&F + Welch	G&H + DunC			

## 2.4.4 Statistische Vergleiche der Klimaparameter zwischen den Zeithorizonten

### 2.4.4.1 Globaltests

Zumal die Vergleiche die unterschiedlichen Ausprägungen des Klimas innerhalb einer Waldgruppe betreffen und die zu vergleichenden Gruppen (Klimazustand in unterschiedlichen Perioden) somit immer die selben Stichprobenumfänge aufweisen, konnte eine moderate Verletzung der Varianzhomogenität zwischen den Gruppen als Voraussetzung für den F-Test vernachlässigt werden (Sachs 1991, Lüpsen 2017). Auch auf die Voraussetzung normalverteilter Daten konnte aufgrund der großen Stichprobenumfänge verzichtet werden. Daher wurde bei einer lediglich moderaten Verletzung der Varianzhomogenität (dies ist bei einem Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Varianz der Gruppen von kleiner drei der Fall) als Globaltest der F-Test zum Gruppenvergleich herangezogen, ansonsten (ab einem Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Varianz der Gruppen von drei) auf den van der Waerden-Test zurückgegriffen. Bei zugleich vorliegender Rechtsschiefe und Varianzheterogenität wurde zusätzlich zum van der Waerden-Test auch noch ein F-Test durchgeführt, der laut Lüpsen (2017) bei rechtsschiefen Verteilungen angebracht ist. Der Parameter Winterniederschlag wurde aufgrund einer ausgeprägten Rechtsschiefe zusätzlich noch mittels einer dekadischen Logarithmusfunktion transformiert. Die Auswahl der statistischen Verfahren für die Klimaparameter innerhalb der jeweiligen Waldgruppe ist in Tabelle 5 ersichtlich.

### 2.4.4.2 Post-hoc-Tests

Als Post-hoc-Verfahren für den multiplen Vergleich der Gruppen wurde bei Vorliegen eines Verhältnisses zwischen der maximalen und der minimalen Varianz der Gruppen von kleiner drei und statistisch nicht signifikanter Varianzheterogenität (ermittelt durch vorherige Durchführung eines Levene-Tests) Tukey's HSD-Test durchgeführt, bei signifikanter Varianzheterogenität der Test nach Games und Howell sowie Dunette's C-Test, die bei Varianzheterogenität immer angewendet werden können (Lüpsen 2016). Im Falle eines Verhältnisses zwischen der maximalen und der minimalen Varianz der Gruppen von mindestens drei wurde zusätzlich zum Test nach Games und Howell sowie Dunette's C-Test das van der Waerden Post-hoc-Verfahren angewendet (für die Auflistung der ausgewählten statistischen Verfahren je Parameter siehe Tabelle 5). Die  $\alpha$ -Korrektur erfolgte nach der Methode von Holms (Sachs 1991, Lüpsen 2016).

Tabelle 5: Auswahl der statistischen Tests (Globaltests und Post-hoc-Verfahren) zum Vergleich der Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Zeithorizonten jeweils innerhalb einer Waldgruppe nach Lüpsen (2017), Lüpsen (2016) und Sachs (1991) (vdw-Test = van der Waerden-Test, G & H = Test nach Games und Howell, Dun C = Dunette's C-Test, vdW posthoc = van der Waerden-Post-hoc-Test).

Waldgruppe	Parameter	Globaltest	Post-hoc-Verfahren
Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder	<i>t</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tmam</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tja</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tson</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tdjf</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>rr</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrja</i>	vdW-Test	G & H bzw. Dun C bzw. vdW posthoc
	<i>rrson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>veg5</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
Buchenwälder	<i>t</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tmam</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tja</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tson</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rr</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrja</i>	vdW-Test	G & H bzw. Dun C bzw. vdW posthoc
	<i>rrson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>veg5</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
Fichten-Tannen-Buchenwälder	<i>t</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tmam</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tja</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tson</i>	F-Test	Tukey HSD
	<i>tdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rr</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrja</i>	vdW-Test	G & H bzw. Dun C bzw. vdW posthoc
	<i>rrson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrdjf</i>	vdW-Test	G & H bzw. Dun C bzw. vdW posthoc
	<i>veg5</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
Fichten-Tannenwälder	<i>t</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tja</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rr</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrja</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrdjf</i>	F-Test und vdW-Test	G & H bzw. Dun C bzw. vdW posthoc
	<i>veg5</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
<i>Log(rrdjf)</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C	
Subalpine Fichtenwälder	<i>t</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tja</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>tdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rr</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrmam</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrja</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrson</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>rrdjf</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C
	<i>veg5</i>	F-Test	G & H bzw. Dun C

### 2.4.5 Hauptkomponentenanalyse

Die den multivariaten Verfahren der Faktorenanalyse zuzuordnende Hauptkomponentenanalyse verfolgt das Ziel, miteinander korrelierte Variablen zu sogenannten Komponenten zusammenzufassen. Es handelt sich damit um eine Methode zur Variablenreduktion bzw. Dimensionsreduktion, welche in der vorliegenden Arbeit zur Verdichtung bzw. Zusammenfassung der zahlreichen interkorrelierten Variablen verwendet wurde (Grunert 2005, Moder 2011, Werner 2014). Es wurden dabei nur solche Komponenten gesucht, die einerseits zwischen den Waldgruppen zu diskriminieren vermögen und sich andererseits logisch erklären lassen.

Die Methode baut auf lineare Zusammenhänge (Korrelationen) zwischen den Variablen auf und transformiert die Variablen durch eine Linearkombination derselben in Komponenten. Diese Komponenten stehen orthogonal aufeinander und sind somit unabhängig voneinander. Dabei erklärt die erste Komponente am meisten Varianz der betrachteten Beobachtungen (in diesem Falle der Punkte aus dem Rasternetz), d. h. entlang dieser Komponente streuen die Beobachtungen maximal. Die zweite Komponente steht orthogonal auf der ersten und versucht unter dieser Bedingung wiederum die meiste verbleibende Varianz zu erklären. Dies setzt sich fort, bis schließlich die maximal erklärable Varianz durch so viele Komponenten erklärt wurde, wie Variablen vorhanden sind. Die durch eine Komponente erklärte Varianz wird somit maximiert, ein unerklärter Rest ist nicht Teil des Modells. Konkret wird bei einer Hauptkomponentenanalyse versucht, den Eigenvektor und den zugehörigen Eigenwert einer Korrelationsmatrix oder einer Varianz-Kovarianzmatrix zu finden. Ein Eigenvektor einer Matrix ist ein vom Nullvektor verschiedener Vektor, der bei Multiplikation mit der Matrix nur skaliert wird, seine Richtung jedoch nicht ändert. Der zugehörige Skalierungsfaktor ist der Eigenwert einer Matrix. Der erste Eigenvektor der Korrelations- bzw. Varianz-Kovarianzmatrix beschreibt die erste Komponente, deren Richtung im multivariaten Raum entlang der größten Varianz verläuft. Die Bestandteile des Eigenvektors sind die sogenannten Ladungen oder loadings, mit denen die einzelnen Variablen zur Komponente beitragen. Der erste Eigenwert der Korrelations- oder Varianz-Kovarianzmatrix beschreibt die von der ersten Komponente erklärte Varianz. Die Lage der Beobachtungen im neuen Koordinatensystem, in welchem die Komponenten die Achsen bilden, ergibt sich aus der Summe der Produkte aus Variablen und entsprechenden Ladungen (sog. scores). Es erfolgt im Zuge der Hauptkomponentenanalyse also eine Verdrehung des Koordinatensystems, sodass die Komponenten zu den neuen Achsen werden und Linearkombinationen der zugrunde liegenden Variablen sind (Grunert 2005, Moder 2011, Werner 2014).

Die Berechnung der Komponenten, der Beiträge der einzelnen Variablen zu den Komponenten, die durch die Komponenten erklärte Varianz sowie die Zuordnung der Beobachtungen zu den Komponenten erfolgte auf Grundlage der Korrelationsmatrix, welche die Korrelation zwischen den Variablen beschreibt. Dies macht insofern Sinn, als die Variablen in unterschiedlichen Einheiten vorliegen und durch die Verwendung einer Korrelationsmatrix – im Gegensatz zur Verwendung einer Varianz-Kovarianzmatrix – standardisierte Daten vorliegen (der Korrelationskoeffizient ist die mit den jeweiligen Standardabweichungen standardisierte Kovarianz zweier Variablen) (Andreß 2001, Grunert 2005, Moder 2011).

Als erste Informationsquelle zur Auswahl der Variablen diente die Korrelationsmatrix nach Pearson. Aufgrund des Vorliegens aggregierter Daten (z.B. saisonaler Niederschlag als Summe von Monatsniederschlägen oder Dauer einer Periode als Differenz zwischen Ende und Beginn) wurde die Betrachtung des Niederschlages und der Mitteltemperaturen lediglich bis auf die Jahreszeitebene durchgeführt sowie bei Perioden (z.B. Vegetationsperiode) auf die Dauer beschränkt. Die mittlere jährliche Sonneneinstrahlung wurde mangels Korrelation mit anderen Parametern von den Untersuchungen ausgeschlossen. Im Zuge des weiteren Vorgehens erfolgte die Ermittlung der relevanten und aussagekräftigen Komponenten in einem schrittweisen Verfahren, indem mit einer groben Betrachtung unter Einbeziehung aller (nicht im Vorhinein ausgeschlossener) Parameter ein Überblick über mögliche Komponenten

gewonnen wurde und dann ausgehend von den Ladungen der Variablen zu einer Komponente sowie der Trennschärfe der Komponenten zwischen den Waldgruppen in mehreren Schritten Gruppen von Variablen mit hohen Ladungen auf den Komponenten für weitere Komponentenanalysen ausgewählt wurden, bis diese auf eine geringe Anzahl erklärbarer und trennscharfer Komponenten reduziert waren. Die Beurteilung des Vermögens der Komponenten, die Streuung zwischen unterschiedlichen Waldgruppen zu erklären, wurde durch die Darstellung der extrahierten und je nach Zugehörigkeit zu einer Waldgruppe unterschiedlich visualisierten Rasterpunkte in zweidimensionalen Komponenten-Koordinatensystemen ermöglicht (Scatterplots). In diesem Koordinatensystem wurden zudem die Variablen in Gestalt von Vektoren eingezeichnet, womit der Beitrag zu den Komponenten je nach Länge und Richtung der Vektoren beurteilt werden konnte. Für die Bestimmung der Anzahl der Komponenten wurde ein minimaler Erklärungsgehalt von 95 % der Varianz festgelegt. Die Berechnung der Korrelationsmatrix, die Durchführung der Hauptkomponentenanalyse sowie die Visualisierung der Ergebnisse erfolgte mit der Statistik-Software R 3.4.2.

#### **2.4.6 Ableitung und Kartierung der potenziellen Einwirkung von Klimaveränderungen**

Um die potenzielle Einwirkung von Klimaänderungen, speziell der Änderung von Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag, auf die Waldgruppen räumlich darstellen zu können, wurde mittels Excel 2016 die Zugehörigkeit der aus dem verfügbaren Kartenmaterial extrahierten Punkte zu den Klimahüllen der unterschiedlichen Zeithorizonte überprüft und nach einer festgelegten Klassifizierung im Geoinformationssystem kartiert.

Hierzu wurde auf die in den vorherigen Arbeitsschritten hergestellten Punktwolken mit den sich überlagernden Klimahüllen zurückgegriffen und die Betrachtung somit auf die Parameter Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur eingegrenzt. Aus der Darstellung der Klimabereiche der drei Klimaperioden, die durch die Koordinaten Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur definiert sind, konnten diejenigen Linien der Klimahülle des aktuellen Klimabereiches (Periode 1981-2010), welche die Klimabereiche der zukünftigen Perioden (2026-2055 und 2071-2100) schneiden, als Grenzen zwischen dem aktuellen Klima und den jeweiligen zukünftigen Perioden abgeleitet werden. Es konnte damit eine Randbedingung für das aktuelle Klima definiert werden, welche die Beschreibung der Überschreitung des aktuellen Klimabereiches im Zuge der zukünftigen Entwicklungen erlaubt. Aufgrund des Vorliegens der Hüllen im zweidimensionalen Koordinatensystem mit Definitionsbereich Jahresniederschlag und Wertebereich Jahresmitteltemperatur, konnte die Beschreibung dieser Grenzen über eine Reihe von linearen Gleichungen erfolgen, die für unterschiedliche Definitionsbereiche (Jahresniederschlag) verschiedene Werte (Jahresmitteltemperatur) lieferten. Die beiden Unbekannten (Steigung und Achsenabschnitt) konnten über die aus der Grafik bekannten Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte der Linien bestimmt werden. Somit konnten die Linien der Klimahüllen-Polygone mathematisch nachgebildet und als Beurteilungskriterium herangezogen werden.

Jeder extrahierte Punkt kann über seine räumlichen Koordinaten identifiziert werden und wird in jeder, jeweils eine Klimaperiode beschreibenden Punktwolke durch seine Klimakordinaten Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur genau einmal abgebildet. Das bedeutet, dass auch die Lage des Punktes innerhalb der Klimahülle exakt definiert ist. Es kann damit beurteilt werden, ob sich ein Punkt außerhalb oder innerhalb des aktuellen Klimabereiches (Periode 1981-2010) befindet, welcher durch die vorher ermittelten Geraden abgegrenzt wird. Obwohl die Punkte im Raum also einer zeitlichen Veränderung des Klimas unterliegen und in den Scatterplots ihren Platz wechseln, können sie trotzdem auch noch in Zukunft einem innerhalb der Waldgruppe aktuell bereits vorhandenen Klimaregime unterliegen. Im Gegensatz dazu kann die Lage des Punktes im Klima-Koordinatensystem in einer oder beiden zukünftigen Perioden auch außerhalb der definierten Grenze liegen, womit er nicht mehr innerhalb des aktuellen Klimabereiches liegt. Es ist z.B. auch möglich, dass ein Punkt in der Periode 2026-2055 außerhalb und in der Periode 2071-2100 wieder innerhalb des aktuellen Klimabereiches liegt.

Diese gerade beschriebenen Fälle dienten schließlich dazu, die Lage eines Punktes im Klima-Koordinatensystem bezüglich der unterschiedlichen Perioden zu beurteilen. Es konnte die Veränderung von Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur somit in unterschiedlichen Stufen beurteilt werden, nach denen die Karte im GIS eingefärbt wurde. Ein Punkt wurde der grünen Stufe zugeordnet, wenn er in beiden zukünftigen Perioden noch innerhalb des aktuellen Klimabereiches verortet werden konnte. Es erfolgte eine Zuordnung zur orangen Stufe, wenn er sich in der Periode 2026-2055 noch innerhalb des aktuellen Bereiches, in der Periode 2071-2100 jedoch außerhalb der aktuellen Klimahülle befand. Eine rote Stufe wurde zugeordnet, wenn sich der Punkt in beiden zukünftigen Perioden, also bereits 2026-2055 außerhalb des aktuellen Bereiches befand. Einen speziellen Fall stellt die gelbe Stufe dar, welche Punkte charakterisiert, die 2026-2055 außerhalb des aktuellen Bereiches, 2071-2100 jedoch wieder innerhalb der aktuellen Hülle liegen.

Die Daten wurden schließlich dahingehend aufbereitet, dass die Punkte mit den Attributen X- und Y-Koordinate sowie der zugeordneten Stufe je Waldgruppe in einer Excel-Tabelle vorlagen. Diese konnten sohin über die räumlichen Koordinaten in GIS importiert werden, wo sie in Punktdaten umgewandelt wurden. Diese konnten anschließend zur Visualisierung in Rasterdateien mit Auflösung 50 x 50 m umgewandelt werden.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vergleich der Klimabereiche zwischen den Waldgruppen

#### 3.1.1 Datenübersicht

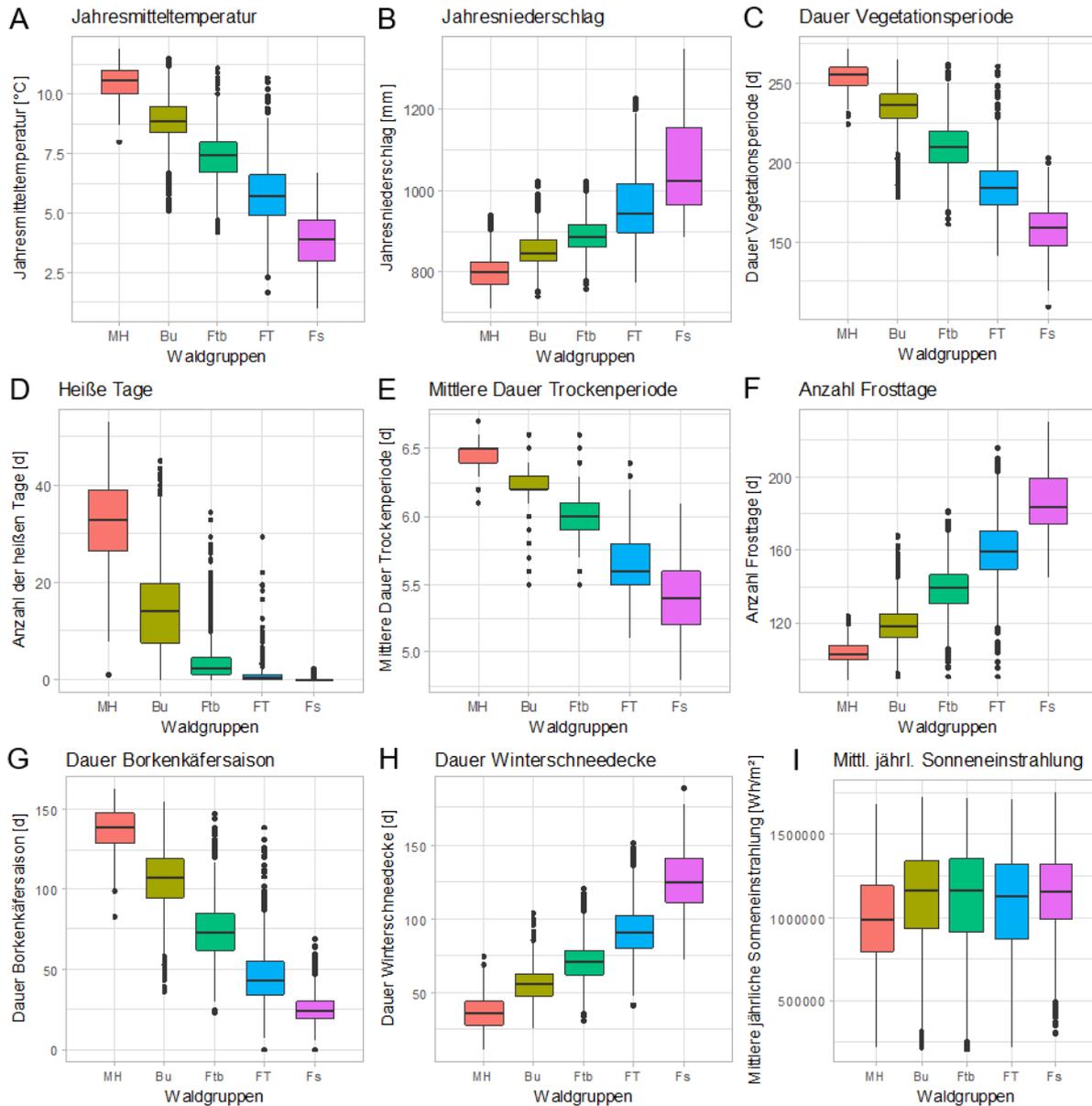
In Tabelle 6 wird die Verteilung aller ausgewählten Klimaparameter in der Periode 1981-2010 innerhalb der fünf Waldgruppen durch die Angabe von Mittelwert, Standardabweichung sowie 5. und 95. Perzentile charakterisiert. Zudem sind einige ausgewählte Klimaparameter in Abbildung 6 und in Abbildung 7 visualisiert. Eine Visualisierung der restlichen Parameter ist in Anhang A beigefügt.

Mit Ausnahme der mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung folgen alle Parameter einem Höhengradienten. Dieser ist bei Parametern, welche in Zusammenhang mit der Temperatur stehen, stärker ausgeprägt, als bei den Parametern, welche mit dem Niederschlag zusammenhängen. Grob zusammengefasst kann gesagt werden, dass es in Waldgruppen tiefer gelegener Höhenstufen wärmer und trockener ist, als in Waldgruppen höher gelegener Höhenstufen. Bis auf die mittlere jährliche Sonneneinstrahlung, die Dauer der Borkenkäfersaison und die Anzahl der heißen Tage ist die Streuung der Klimavariablen in den Waldgruppen hoher und mittlerer Höhenstufen tendenziell größer als in den tiefer gelegenen Höhenstufen. Dies kann in den Fichten-Tannen-Buchenwäldern und Fichten-Tannenwäldern durch die große Anzahl der Stichprobenpunkte begründet werden, deutet im Falle der verhältnismäßig kleinen Stichprobe der subalpinen Fichtenwälder jedoch auf eine heterogene Gruppe hin. Die sehr kleinen Standardabweichungen der Anzahl der heißen Tage in den Waldgruppen höherer Lagen lassen sich durch das seltene Auftreten solcher Tage in diesen Höhenstufen erklären. Die mittlere Dauer der Trockenperioden kann bei sehr geringen Standardabweichungen recht genau angegeben werden.

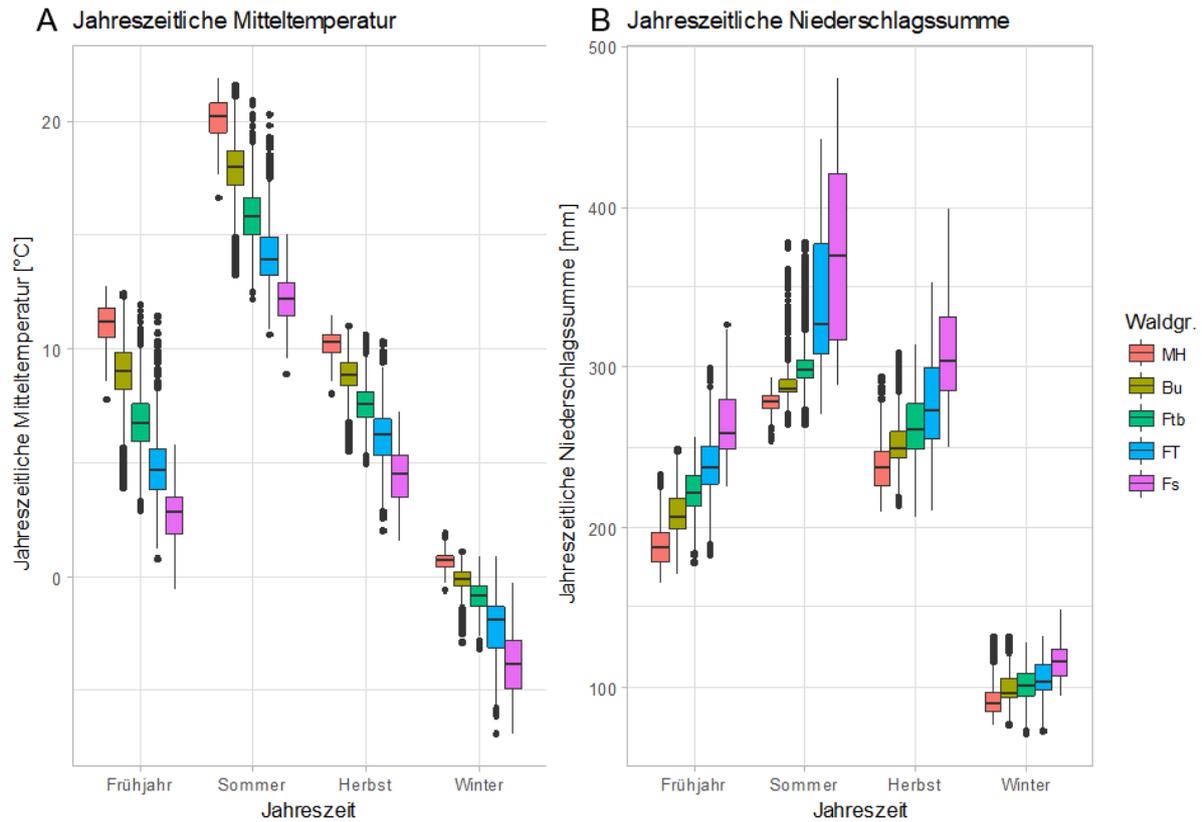
Die jahreszeitliche Verteilung des Niederschlages deutet auf ein Niederschlagsmaximum im Sommer und ein Minimum im Winter hin, wobei im Herbst mehr Niederschlag als im Frühjahr beobachtet werden kann (siehe Abbildung 7 B; für die monatliche Verteilung des Niederschlages siehe Anhang A). Während die Streuung des Saisonsniederschlages im Winter in allen Waldgruppen besonders gering ist, nimmt diese im Frühjahr und Herbst zu. Bis auf den Sommer ist sie zwischen allen Gruppen vergleichbar. Im Sommer ist sie in den Fichten-Tannenwäldern sowie in den subalpinen Fichtenwäldern besonders groß, während sie in den restlichen Waldgruppen mit der geringen Streuung des Winters vergleichbar ist. Die saisonale Temperatur weist zwischen den Jahreszeiten lediglich in den Fichten-Tannenwäldern und den subalpinen Fichtenwäldern vergleichbare Streuungen auf (siehe Abbildung 7 A; für die Verteilung der monatlichen Mitteltemperaturen siehe Anhang A). In den restlichen Waldgruppen nimmt sie zum Frühjahr und Sommer hin zu, während sie im Winter gering ist. Bis auf die Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder und die Buchenwälder übersteigt die Herbsttemperatur jene des Frühjahres.

**Tabelle 6: Übersicht über die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), 5. Perzentilen (5%), 95. Perzentilen (95%) und Standardabweichungen (sd) der aktuellen Ausprägung (Periode 1981-2010) der Klimaparameter innerhalb der Waldgruppen (MH = Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder, Bu = Buchenwälder, Ftb = Fichten-Tannen-Buchenwälder, FT = Fichten-Tannenwälder, Fs = subalpine Fichtenwälder).**

Parameter	MH				Bu				Ftb				FT				Fs			
	5%	$\bar{x}$	95%	sd																
str [kWh/m <sup>2</sup> ]	516	985	1437	277	623	1120	1509	276	632	1122	1510	280	611	1089	1488	280	745	1145	1500	226
t [°C]	9,5	10,6	11,5	0,7	7,3	8,9	10,2	0,9	5,8	7,3	8,6	0,9	3,2	5,6	7,6	1,3	2,0	3,8	5,4	1,1
t01 [°C]	-0,7	-0,2	0,2	0,3	-1,4	-0,8	-0,2	0,4	-2,1	-1,2	-0,6	0,5	-5,5	-2,6	-0,9	1,4	-6,2	-4,2	-2,3	1,2
t02 [°C]	1,1	1,9	2,7	0,5	-0,7	0,6	1,8	0,7	-1,9	-0,6	0,5	0,7	-5,0	-2,2	-0,3	1,4	-5,8	-4,0	-2,3	1,2
t03 [°C]	5,5	6,8	7,9	0,8	2,7	4,7	6,4	1,1	1,0	2,8	4,4	1,1	-1,8	0,9	3,0	1,4	-3,0	-1,1	0,6	1,2
t04 [°C]	9,4	10,7	12,0	0,8	6,0	8,4	10,2	1,3	4,0	6,1	8,1	1,3	1,5	4,0	6,4	1,5	0,1	1,9	3,5	1,1
t05 [°C]	14,1	15,6	16,9	0,9	10,9	13,3	15,0	1,2	9,0	11,0	12,9	1,2	6,8	9,0	11,3	1,3	5,3	7,0	8,5	1,0
t06 [°C]	17,6	19,0	20,3	0,9	14,5	16,7	18,4	1,2	12,5	14,5	16,3	1,2	10,6	12,7	14,8	1,3	9,1	10,7	12,1	0,9
t07 [°C]	19,7	21,1	22,5	0,9	16,7	18,9	20,6	1,2	14,8	16,8	18,5	1,1	12,9	15,0	17,2	1,3	11,4	13,1	14,6	1,0
t08 [°C]	18,9	20,3	21,6	0,9	16,1	18,1	19,8	1,1	14,3	16,1	17,8	1,1	12,1	14,4	16,6	1,3	10,8	12,5	14,1	1,0
t09 [°C]	14,6	15,9	17,0	0,8	12,2	14,0	15,5	1,0	10,6	12,2	13,7	1,0	8,1	10,5	12,6	1,3	6,8	8,7	10,4	1,1
t10 [°C]	9,6	10,5	11,4	0,6	7,8	9,1	10,2	0,7	6,6	7,8	9,0	0,7	4,0	6,4	8,1	1,2	3,0	4,8	6,4	1,1
t11 [°C]	3,6	4,3	4,9	0,4	2,5	3,4	4,1	0,5	1,5	2,5	3,3	0,6	-1,4	1,1	2,8	1,3	-2,4	-0,4	1,4	1,2
t12 [°C]	-0,2	0,4	0,9	0,3	-0,8	-0,2	0,3	0,4	-1,6	-0,7	0,0	0,5	-4,9	-2,0	-0,4	1,4	-5,8	-3,5	-1,5	1,4
tdjf [°C]	0,0	0,6	1,2	0,4	-0,9	-0,1	0,6	0,5	-1,9	-0,9	-0,1	0,6	-5,1	-2,3	-0,5	1,4	-5,9	-3,9	-2,0	1,3
tmam [°C]	9,8	11,1	12,4	0,8	6,6	8,9	10,7	1,2	4,7	6,7	8,5	1,2	2,2	4,7	7,0	1,4	0,8	2,6	4,3	1,1
tjja [°C]	18,7	20,1	21,5	0,9	15,8	17,9	19,6	1,2	13,9	15,8	17,6	1,1	11,9	14,0	16,2	1,3	10,4	12,1	13,6	1,0
tson [°C]	9,3	10,2	11,0	0,6	7,5	8,8	9,9	0,7	6,2	7,5	8,7	0,8	3,6	6,0	7,8	1,3	2,5	4,4	6,0	1,1
hss [d]	19	33	48	9	2	14	28	8	0	3	10	4	0	1	3	2	0	0	0	0
fro [d]	95	104	115	6	103	119	140	11	121	139	160	12	139	162	196	17	164	186	214	16
veg5b [d]	58	64	73	5	66	79	97	10	81	97	114	10	96	113	126	10	119	129	139	6
veg5 [d]	243	255	266	7	211	234	252	13	188	210	231	13	157	184	212	16	134	158	178	13
veg5e [d]	314	318	322	3	306	312	317	3	300	306	311	4	282	297	307	7	272	285	296	8
bkb [d]	122	132	144	7	135	150	169	10	153	169	181	9	168	183	193	8	185	192	198	4
bkd [d]	117	138	155	12	75	106	133	18	49	74	102	16	23	46	79	17	14	25	37	7
bke [d]	260	269	276	5	242	256	267	8	230	242	255	8	215	228	246	9	210	216	222	4
rr [mm]	738	801	890	45	797	853	937	41	828	889	967	41	857	966	1138	89	905	1056	1251	115
rr01 [mm]	24	29	38	4	27	31	39	4	27	32	39	3	28	33	39	3	30	37	44	4
rr02 [mm]	18	22	29	3	21	25	31	3	21	26	31	3	22	26	33	3	23	29	35	4
rr03 [mm]	36	42	52	5	40	46	54	4	42	48	55	4	44	50	57	4	48	55	63	5
rr04 [mm]	56	63	75	6	62	70	80	5	67	74	84	5	69	79	90	6	76	86	99	7
rr05 [mm]	79	85	92	4	87	93	100	4	93	100	108	5	99	112	130	9	108	122	141	11
rr06 [mm]	86	91	95	3	91	95	100	3	95	100	107	4	99	112	135	12	102	123	147	16
rr07 [mm]	93	96	99	2	97	99	105	3	93	103	113	6	97	117	142	15	97	125	154	20
rr08 [mm]	86	91	96	3	89	94	99	4	92	98	108	5	96	113	139	15	98	123	150	19
rr09 [mm]	69	74	80	4	73	78	85	4	76	81	90	4	78	87	101	7	82	95	111	10
rr10 [mm]	81	91	107	8	88	97	113	7	91	101	116	7	93	107	127	10	100	118	142	13
rr11 [mm]	64	75	89	7	68	80	94	7	69	82	97	10	70	83	101	11	72	93	109	12
rr12 [mm]	36	42	54	5	39	45	55	5	39	45	56	4	40	46	54	4	44	50	59	5
rrdjf [mm]	78	93	120	12	86	101	126	11	88	103	126	10	90	105	122	10	97	116	135	12
rrmam [mm]	171	190	219	14	190	209	233	13	203	222	241	12	213	241	276	19	233	264	302	22
rrjja [mm]	267	278	287	6	280	289	302	9	282	301	326	14	293	342	417	42	298	371	452	55
rrson [mm]	214	240	276	18	231	254	291	17	236	264	302	20	242	278	326	27	254	306	361	34
trdau [d]	6	6	7	0	6	6	6	0	6	6	6	0	5	6	6	0	5	5	6	0
wdb [d]	147	151	153	2	140	146	153	4	137	143	150	4	126	136	144	5	114	126	135	7
wdd [d]	21	37	54	10	38	56	75	11	46	70	90	13	67	92	123	16	99	127	161	19
wde [d]	24	36	47	7	36	49	62	8	42	59	74	9	56	74	95	11	80	99	121	13



**Abbildung 6: Ausprägung ausgewählter Klimaparameter in der Periode 1981-2010 innerhalb der Waldgruppen. A: Jahresmitteltemperatur, B: Jahresniederschlag, C: Dauer der Vegetationsperiode, D: Anzahl heißer Tage, E: Mittlere Dauer der Trockenperioden, F: Anzahl der Frosttage, G: Dauer der Borkenkäfersaison, H: Dauer der Winterschneedecke, I: Mittlere jährliche Sonneneinstrahlung.**



**Abbildung 7: Saisonale Mitteltemperatur (A) und Niederschlagssumme (B) innerhalb der Waldgruppen in der Periode 1981-2010.**

### 3.1.2 Statistische Mittelwertvergleiche

Die im Zuge der statistischen Mittelwertvergleiche ermittelten Mittelwertdifferenzen zwischen den Waldgruppen benachbarter Höhenstufen sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Waldgruppen benachbarter Höhenstufen unterscheiden sich hinsichtlich nahezu aller Parameter zumindest signifikant voneinander, das heißt es wurde die mit 5 % festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeit eines Fehlers erster Art meistens unterschritten. Lediglich die Unterschiede der Monatsniederschläge im Februar zwischen den Fichten-Tannen-Buchenwäldern und den Fichten-Tannenwäldern sowie die Unterschiede der mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung zwischen den Buchenwäldern und den Fichten-Tannen-Buchenwäldern wurden als nicht signifikant ausgewiesen. Der erstgenannte Vergleich war auch nach Logarithmierung der Daten nicht signifikant.

Während die Unterschiede der Jahresmitteltemperatur mit Werten um 1,6 bis 1,8 °C zwischen allen Waldgruppen ähnlich ausfallen, sind die monatlichen und saisonalen Differenzen in den kalten Monaten (November, Dezember, Jänner) zwischen den tiefer gelegenen Waldgruppen wesentlich geringer (0,5 bis 0,9 °C) als zwischen den höher gelegenen Waldgruppen (1,3 bis 1,6 °C). Die stärksten Unterschiede in der Temperatur ergeben sich zwischen März und August, wobei hier die Unterschiede in den tiefer gelegenen Waldgruppen mit 2,0 bis 2,3 °C stärker ausfallen als in den höher gelegenen (1,7 bis 2,0 °C). Hinsichtlich des Jahresniederschlages lassen sich in höheren Lagen tendenziell größere Unterschiede (ca. 80 bis 90 mm) zwischen den Waldgruppen feststellen als in tiefen Lagen (ca. 40 bis 50 mm). Der Monatsniederschlag von Mai bis August weist zwischen den Waldgruppen der mittelmontanen, hochmontanen und tiefsubalpiner Stufe größere Unterschiede (etwa 10 bis 15 mm) auf als zwischen den tiefer gelegenen Waldgruppen (3 bis 8 mm). Zudem fallen die Unterschiede in diesen Monaten zwischen allen Waldgruppen

stärker als im Winter aus, wo die Unterschiede mit monatlichen Differenzen von 0 bis 5 mm am geringsten sind. Der Mainiederschlag differiert mit Unterschieden im Bereich von 7 bis 11 mm zwischen allen Waldgruppen noch einigermaßen stark. Zwischen den Waldgruppen der hochmontanen und tiefsubalpinen Stufe lassen sich auch von September bis Dezember vergleichsweise große Unterschiede des Monatsniederschlages beobachten (etwa 5 bis 10 mm). Dies spiegelt sich auch in den Unterschieden hinsichtlich der Saisonsniederschläge wider, die zwischen der mittel- und hochmontanen Stufe sowie zwischen der hochmontanen und tiefsubalpinen Stufe in allen Jahreszeiten höhere Differenzen (2 bis 42 mm) aufweisen als zwischen den restlichen Höhenstufen (2 bis 19 mm). Mit Ausnahme des Vergleiches zwischen der hochmontanen und der tiefsubalpinen Stufe sind die Differenzen in den Wintermonaten besonders gering (2 bis 7 mm).

Hinsichtlich der mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung liegen die Unterschiede zwischen den Waldgruppen weit auseinander. Große Unterschiede lassen sich mit 135 kWh/m<sup>2</sup> zwischen den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und den Buchenwäldern feststellen. Die Gruppenunterschiede hinsichtlich der Anzahl der heißen Tage nehmen nach oben hin von 19 auf 1 stark ab. Eine leichte Abnahme der Unterschiede mit der Höhe von 32 auf 21 Tage lässt sich auch bei der Dauer der Borkenkäfersaison feststellen. Die Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Frosttage sind zwischen höher gelegenen Waldgruppen größer (23 bis 25 Tage) als zwischen tiefer gelegenen (15 bis 20 Tage). Ähnliche Tendenzen lassen sich bei der Dauer der Winterschneedecke beobachten, die sich zwischen tiefer gelegenen Waldgruppen um 14 bzw. 19 Tage, zwischen höher gelegenen Waldgruppen um 22 bzw. 35 Tage unterscheidet. Die Unterschiede der Vegetationsdauer sind mit Werten von 21 bis 27 Tagen zwischen allen Waldgruppen vergleichbar. Kaum Unterschiede zwischen den Waldgruppen lassen sich hinsichtlich der mittleren Dauer der Trockenperiode feststellen.

Die Unterschiede zwischen den Waldgruppen hinsichtlich der Vegetationsdauer können gleichermaßen auf Unterschiede in Beginn und Ende der Vegetationsperiode zurückgeführt werden. Die Differenzen der Dauer der Borkenkäfersaison sind durch den Beginn der Saison bedingt, während die Unterschiede der Dauer der Winterschneedecke hauptsächlich durch Unterschiede im Ende der Dauer der Winterschneedecke erklärt werden können.

**Tabelle 7: Differenzen der Mittelwerte zwischen den Waldgruppen angrenzender Höhenstufen. Es wurde jeweils der Mittelwert einer Waldgruppe einer höheren Höhenstufe vom Mittelwert der Waldgruppe einer angrenzenden tieferen Höhenstufe subtrahiert.**

Parameter	MH ↔ Bu	Bu ↔ Ftb	Ftb ↔ FT	FT ↔ Fs
Mittlere jährliche Sonneneinstrahlung [kWh/m <sup>2</sup> ]	-135	-2	33	-56
Jahresmitteltemperatur [°C]	1,7	1,6	1,7	1,8
Mitteltemperatur Jänner [°C]	0,5	0,5	1,3	1,6
Mitteltemperatur Februar [°C]	1,3	1,2	1,6	1,8
Mitteltemperatur März [°C]	2,0	2,0	1,9	2,0
Mitteltemperatur April [°C]	2,3	2,3	2,1	2,1
Mitteltemperatur Mai [°C]	2,3	2,2	2,0	2,0
Mitteltemperatur Juni [°C]	2,3	2,2	1,8	2,0
Mitteltemperatur Juli [°C]	2,3	2,1	1,8	1,9
Mitteltemperatur August [°C]	2,2	2,0	1,7	1,9
Mitteltemperatur September [°C]	1,9	1,7	1,7	1,8
Mitteltemperatur Oktober [°C]	1,4	1,3	1,5	1,6
Mitteltemperatur November [°C]	0,9	0,8	1,4	1,5
Mitteltemperatur Dezember [°C]	0,6	0,5	1,3	1,5
Mitteltemperatur Winter [°C]	0,8	0,7	1,4	1,6
Mitteltemperatur Frühjahr [°C]	2,2	2,2	2,0	2,0
Mitteltemperatur Sommer [°C]	2,2	2,1	1,8	1,9
Mitteltemperatur Herbst [°C]	1,4	1,3	1,5	1,6
Anzahl der heißen Tage [d]	19	11	3	1
Anzahl der Frosttage [d]	-15	-20	-23	-25
Beginn der Vegetationsperiode [d]	-15	-19	-16	-15
Dauer der Vegetationsperiode [d]	21	24	25	27
Ende der Vegetationsperiode [d]	6	6	9	11
Beginn der Borkenkäfersaison [d]	-19	-18	-14	-9
Dauer der Borkenkäfersaison [d]	32	32	29	21
Ende der Borkenkäfersaison [d]	13	14	14	12
Jahresniederschlag [mm]	-52	-37	-77	-90
Niederschlagssumme Jänner [mm]	-2	-1	-1	-4
Niederschlagssumme Februar [mm]	-2	-1	0	-3
Niederschlagssumme März [mm]	-4	-2	-2	-5
Niederschlagssumme April [mm]	-7	-4	-5	-8
Niederschlagssumme Mai [mm]	-8	-7	-11	-11
Niederschlagssumme Juni [mm]	-4	-4	-13	-10
Niederschlagssumme Juli [mm]	-3	-3	-14	-9
Niederschlagssumme August [mm]	-3	-4	-15	-10
Niederschlagssumme September [mm]	-4	-4	-6	-8
Niederschlagssumme Oktober [mm]	-6	-4	-7	-11
Niederschlagssumme November [mm]	-5	-2	-1	-10
Niederschlagssumme Dezember [mm]	-2	0	-1	-4
Niederschlagssumme Winter [mm]	-7	-2	-2	-11
Niederschlagssumme Frühjahr [mm]	-19	-13	-18	-23
Niederschlagssumme Sommer [mm]	-11	-12	-42	-28
Niederschlagssumme Herbst [mm]	-14	-9	-14	-29
Mittlere Dauer Trockenperiode [d]	0	0	0	0
Beginn Winterschneedecke [d]	5	4	7	10
Dauer Winterschneedecke [d]	-19	-14	-22	-35
Ende Winterschneedecke [d]	-13	-10	-15	-25

### 3.1.3 Überlappungen der Klimabereiche zwischen den Waldgruppen

In Tabelle 8 sind die Klimaparameter je nach den prozentuellen Überlagerungen des Klimabereiches einer Waldgruppe mit einer Waldgruppe aus einer benachbarten Höhenstufe in Klassen mit einer Breite von 25 % eingeordnet. Eine detaillierte Auflistung der überlappenden Bereiche je Parameter und Gruppenvergleich kann Anhang B entnommen werden. Es ist wichtig anzumerken, dass sich die prozentuelle Angabe des Überlappungsbereiches immer auf den Klimabereich der betrachteten Waldgruppe bezieht. Es wird somit beispielsweise der Überlappungsbereich zwischen den Buchen- und den Fichten-Tannen-Buchenwäldern einmal auf den Klimabereich der Buchenwälder und einmal auf den Klimabereich der Fichten-Tannen-Buchenwälder bezogen.

Allgemein lässt sich feststellen, dass sich die mittlere jährliche Sonneneinstrahlung sowie der Monatsniederschlag im November zwischen allen benachbarten Waldgruppen zu 75 bis 100 % überlappen. Zudem überlappen sich die Monatsniederschläge von Jänner bis April, die Niederschläge der Monate September, Oktober und Dezember und damit die saisonalen Niederschläge im Herbst und Winter zwischen allen benachbarten Waldgruppen zu 50 bis 100 %. Insgesamt überlagern sich die Waldgruppen hinsichtlich der mit Temperatur in Verbindung stehenden Parameter, weit weniger (hierbei fallen die Überlappungen zwischen den Waldgruppen tiefer Lagen schwächer aus als zwischen den Waldgruppen höherer Lagen), als hinsichtlich der mit Niederschlag in Verbindung stehenden Parameter.

Die Mai-, Juni- und Juliniederschläge überlappen zwischen den meisten benachbarten Waldgruppen zu weniger als 50 %. Ausgenommen davon sind die Überlappungen der Buchenwälder mit den Fichten-Tannen-Buchenwäldern, der Fichten-Tannen-Buchenwälder mit den Fichten-Tannenwäldern, der Fichten-Tannenwälder mit den subalpinen Fichtenwäldern und die Überlappung der subalpinen Fichtenwälder mit den Fichten-Tannenwäldern.

Die häufigsten schwachen Überlagerungen (weniger als 50 % des Klimabereiches der betrachteten Waldgruppe) ergeben sich beim Vergleich der Buchenwälder mit den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern sowie Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder mit den Buchenwäldern. Zahlreiche starke Überlagerungen (mehr als 50 % des Klimabereiches der betrachteten Waldgruppe) können beim Vergleich der subalpinen Fichtenwälder mit den Fichten-Tannenwäldern sowie der Fichten-Tannen-Buchenwälder mit den Fichten-Tannenwäldern beobachtet werden. Ein mehr oder weniger ausgeglichenes Verhältnis von starken und schwachen Überlagerungen findet man beim Vergleich der Buchen- mit den Fichten-Tannen-Buchenwäldern, der Fichten-Tannen-Buchenwälder mit den Buchenwäldern, der Fichten-Tannenwälder mit den subalpinen Fichtenwäldern sowie der Fichten-Tannenwälder mit den Fichten-Tannen-Buchenwäldern.

**Tabelle 8: Klassifizierung der Klimaparameter je nach Überlagerung des Klimabereiches einer Waldgruppe mit einer Waldgruppe aus einer benachbarten (darüber- oder darunterliegenden) Höhenstufe. Die Anteile beziehen sich auf die gesamte Verteilung des Parameters zwischen der 5. und 95. Perzentile in der jeweils betrachteten Waldgruppe (erste Spalte).**

Waldgruppe	Waldgr. benachb. Höhenst.	Klimaparameter nach Anteil des Klimabereiches einer Waldgruppe aus einer benachbarten Höhenstufe am Klimabereich einer Waldgruppe			
		0-24,99 %	25-49,99 %	50-74,99 %	75-100 %
<b>MH</b>	<b>Bu</b>		<i>t, t02-t12, tmam, tjja, tson, hss, veg5b, veg5, veg5e, bkb, bkd, bke, rr05-rr07, rrja, trdau, wdd, wde</i>	<i>t01, tdjf, fro, rr, rr02, rr04, rr08-rr10, rrmam, rrson</i>	<i>str, rr01, rr03, rr11, rr12, rrdjf, wdb</i>
<b>Bu</b>	<b>Ftb</b>		<i>t, t02, t03, t05-t09, tmam, tjja, hss, veg5, veg5e, bkb, bkd</i>	<i>t01, t04, t10-t12, tdjf, tson, fro, veg5b, bke, rr04-rr06, rr08, rrmam</i>	<i>str, rr, rr01-rr03, rr07, rr09-rr12, rrdjf, rrja, rrson, trdau, wdb, wdd, wde</i>
	<b>MH</b>	<i>t, t03-t08, tmam, tjja, veg5b, veg5, trdau</i>	<i>t01, t02, t09-t12, tdjf, tson, hss, fro, veg5e, bkb, bkd, bke, rr05-rr07, rrja, wdb, wdd, wde</i>	<i>rr, rr04, rr08, rr09, rrmam</i>	<i>str, rr01-rr03, rr10-rr12, rrdjf, rrson</i>
<b>Ftb</b>	<b>FT</b>		<i>hss, bkb<sup>1</sup></i>	<i>t, t02-t11, tmam, tjja, tson, fro, veg5b, veg5, veg5e, bkd, bke, rr05, rr06, rrmam, trdau, wdb, wdd, wde</i>	<i>str, t01, t12, tdjf, rr, rr01-rr04, rr07-rr12, rrdjf, rrja, rrson</i>
	<b>Bu</b>		<i>t, t06-t09, t11, tdjf, tjja, tson, fro, veg5b, veg5, veg5e, rr05-rr08, rrja</i>	<i>t01-t05, t10, t12, tmam, bkb, bkd, bke, rr09, trdau, wdd, wde</i>	<i>str, hss, rr, rr01-rr04, rr10-rr12, rrdjf, rrmam, rrson, wdb</i>
<b>FT</b>	<b>Fs</b>	<i>hss, veg5b, bke</i>	<i>t04-t08, tmam, tjja, veg5, bkb, bkd, wdd, wde</i>	<i>t, t01-t03, t09-t11, tdjf, tson, fro, veg5e, rr03-rr05, rr12, rrmam, wdb</i>	<i>str, t12, rr, rr01, rr02, rr06-rr11, rrdjf, rrja, rrson, trdau</i>
	<b>Ftb</b>	<i>rr06</i>	<i>t, t01-t04, t09-t12, tdjf, tmam, tson, fro, rr, rr05, rr07, rr08, rrmam, rrja, trdau, wdb, wdd, wde</i>	<i>t05-t08, tjja, veg5b, bkb, bkd, bke, rr04, rr09, rr10, rrson</i>	<i>str, hss, rr01-rr03, rr11, rr12, rrdjf</i>
<b>Fs</b>	<b>FT</b>		<i>veg5b, veg5, wdb, wdd, wde</i>	<i>t, t03-t11, tmam, tjja, tson, fro, veg5e, bkb, bkd, bke, rr, rr01, rr03-rr06, rr09, rr10, rr12, rrdjf, rrmam, rrson</i>	<i>str, t01, t02, t12, tdjf, hss, rr02, rr07, rr08, rr11, rrja, trdau</i>

<sup>1</sup>Beispiel: Die mittelmontanen Fichten-Tannen-Buchenwälder überlagern sich hinsichtlich der Parameter Anzahl der heißen Tage (*hss*) und Beginn der Borkenkäfersaison (*bkb*) zu 25-49,99 % mit den Fichten-Tannenwäldern der darüberliegenden hochmontanen Höhenstufe.

### 3.1.4 Vergleich der Daten mit den Angaben zu den Waldgruppen aus der Waldtypisierung

In der Waldtypisierung wurden im Zuge der Beschreibungen der Wuchszonen sowie der ökologischen Verhältnisse in den Höhenstufen auch die klimatischen Wuchsbedingungen erläutert. Eine Gegenüberstellung der dort beschriebenen Jahresmitteltemperaturen und Jahresniederschläge in den Höhenstufen mit den extrahierten Daten zu den Leitgesellschaften der Höhenstufen liefert Tabelle 9. Die Dauer der Vegetationsperiode konnte aufgrund unterschiedlicher Definitionen nicht in den Vergleich mit einbezogen werden. Die meisten Angaben aus der Waldtypisierung liegen, abgesehen von

vernachlässigbaren Abweichungen, innerhalb des Klimabereiches, welcher von den extrahierten Daten beschrieben wird.

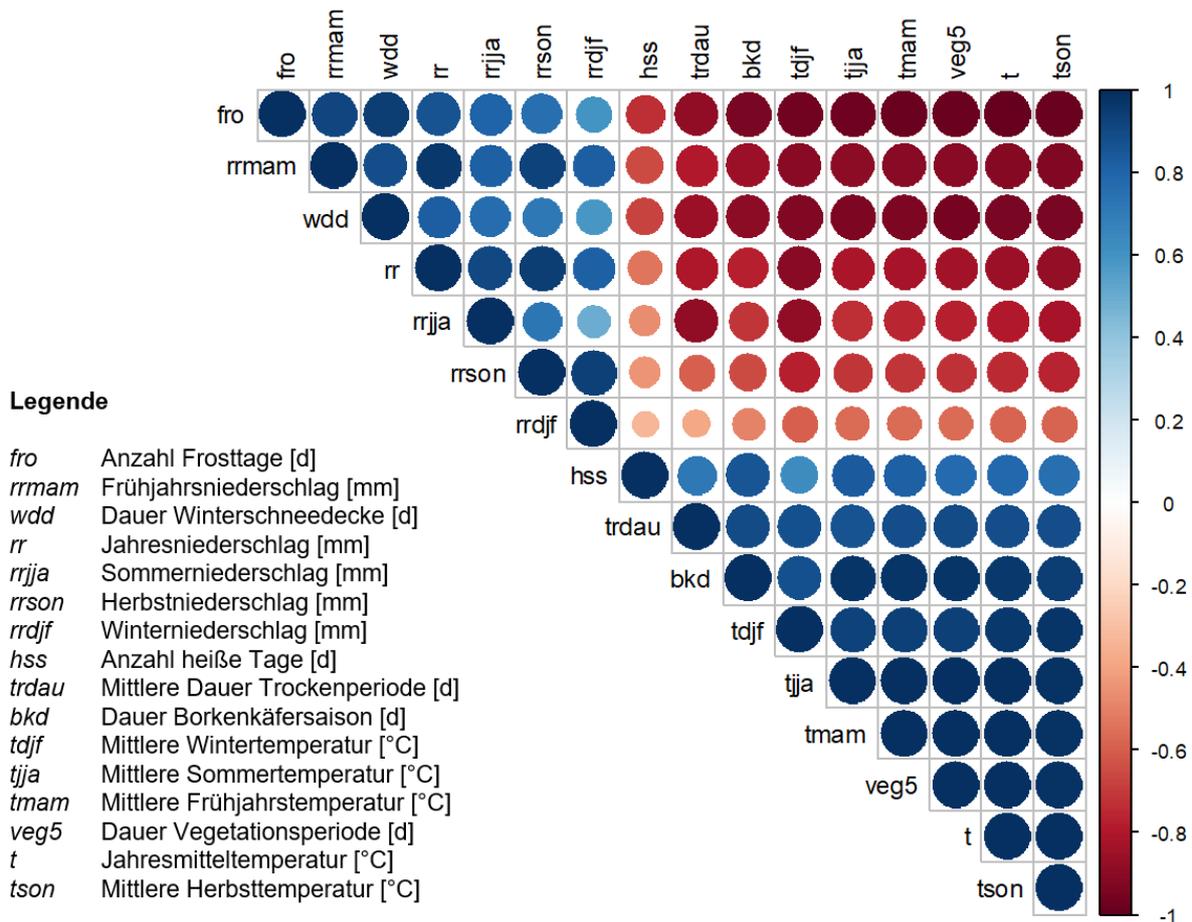
Nennenswerte Abweichungen der Angaben in der Waldtypisierung von den extrahierten Daten ergeben sich nur in der submontanen und in der hochmontanen Höhenstufe. In der submontanen Stufe übersteigen sowohl die Obergrenze als auch die Untergrenze der Jahresmitteltemperatur in der Waldtypisierung jene der extrahierten Daten um ca. 2 °C. Auch die Untergrenze des Jahresniederschlages liegt in der Waldtypisierung etwa 50 mm unterhalb jener des extrahierten Datensatzes. Es wird in der Waldtypisierung damit ein vergleichsweise wärmeres und trockeneres Klima unterstellt. Für die hochmontane Stufe wird in der Waldtypisierung mit einer um etwa 1 °C niedrigeren Obergrenze und um ca. 1 °C höheren Untergrenze der Jahresmitteltemperatur ein vergleichsweise enger Temperaturbereich angegeben. Auch die Obergrenze des Jahresniederschlages dieser Höhenstufe wird in der Waldtypisierung etwa 100 mm tiefer als im extrahierten Datenmaterial eingeschätzt. Hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur liegen für die kolline Höhenstufe in der Waldtypisierung unterschiedliche Angaben vor, wobei die Werte aus der Beschreibung der ökologischen Verhältnisse in den Höhenstufen abgesehen von der um etwa 2 °C höher angenommenen Untergrenze der Jahresmitteltemperatur noch recht gut mit den extrahierten Daten übereinstimmen. Es ist zudem anzumerken, dass die Untergrenze des Jahresniederschlages in der tiefsubalpinen Stufe von 650 mm auf den trockenen Vinschgau bezogen ist. Jedoch wird auch in den Angaben zu den ökologischen Verhältnissen in den Höhenstufen ein vergleichsweise enger Bereich (Obergrenze etwa 150 mm tiefer als im extrahierten Datenmaterial und Untergrenze ca. 50 mm höher als im extrahierten Datenmaterial) hinsichtlich des Jahresniederschlages beschrieben (Amt für Forstplanung, 2010a).

**Tabelle 9: Vergleich der extrahierten Klimadaten (3PClim) zu den Leitgesellschaften der Höhenstufen (Waldgruppen) mit den Angaben zu den Höhenstufen in der Waldtypisierung. Mit 1 versehene Zahlen entstammen den Beschreibungen der Höhenstufen, während mit 2 versehene Zahlen den Beschreibungen der Wuchszonen entstammen (Amt für Forstplanung 2010a).**

Param.	Tiefsubalpin		Hochmontan		Mittelmontan		Submontan		Kollin	
	Waldtypis.	3PClim	Waldtypis.	3PClim	Waldtypis.	3PClim	Waldtypis.	3PClim	Waldtypis.	3PClim
t [°C]	2,5-5 <sup>1</sup>	2-5,4	4,5-6,5 <sup>1</sup>	3,2-7,6	6-8 <sup>2</sup>	5,8-8,6	9-12 <sup>2</sup>	7,3-10,2	12-13 <sup>2</sup> ; 11-12 <sup>1</sup>	9,5-11,5
rr [mm]	990 (950-1100) <sup>2</sup> ; 650-1200 <sup>1</sup>	905- 1251	950 (850-1000) <sup>2</sup>	857-1138	920 (850-1000) <sup>2</sup>	828-967	870 (750-900) <sup>2</sup>	797-937	770 (750-900) <sup>2</sup>	738-890

### 3.1.5 Hauptkomponentenanalyse

Aus anfänglich 16 in die Analyse einbezogenen Parametern konnten vier aussagekräftige Komponenten abgeleitet werden. Abbildung 8 liefert einen Überblick über die Korrelationen zwischen den 16 Parametern, welche eine zentrale Voraussetzung für die Komponentenanalyse darstellen.



**Abbildung 8: Korrelationsplot mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen den zu Beginn der Analysen verwendeten Variablen. Die Größe der Kreise sowie die Intensität der Einfärbung visualisieren die Stärke des Zusammenhanges, während die Farbe die Richtung des Zusammenhanges zwischen den Variablen darstellt.**

Als ein Faktor mit zentraler Bedeutung konnte die Komponente „Temperatur“ abgeleitet werden. Alle mit Temperatur in Zusammenhang stehenden Variablen (ausgenommen die mittlere Wintertemperatur) lasten hoch auf dieser Komponente, woraus auch die Bezeichnung resultiert (siehe Tabelle 10). Es kann damit bei Erklärung von 99 % der Varianz, welche sich entlang der Variablen ergibt, gut zwischen den Schwerpunkten der Verteilungen aller Waldgruppen unterschieden werden, wobei die Fichten-Tannen-Buchenwälder stärker mit den benachbarten Fichten-Tannenwäldern und Buchenwäldern überlappen (siehe Abbildung 9).

Tabelle 10: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Temperatur“ beitragen.

Variable	Abkürzung	Ladung
Anzahl der Frosttage [d]	<i>fro</i>	0.4068640
Jahresmitteltemperatur [°C]	<i>t</i>	-0.4096826
Mittlere Frühjahrstemperatur [°C]	<i>tmam</i>	-0.4090206
Mittlere Sommertemperatur [°C]	<i>tjja</i>	-0.4079256
Mittlere Herbsttemperatur [°C]	<i>tson</i>	-0.4077059
Dauer der Vegetationsperiode [d]	<i>veg5</i>	-0.4082850

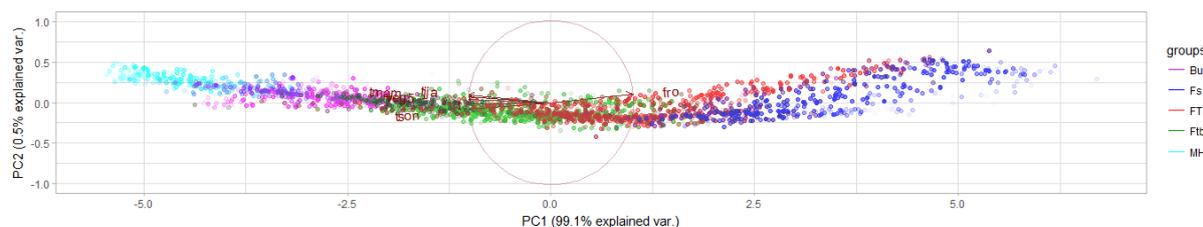


Abbildung 9: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Temperatur“ (horizontale Achse; Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).

Aus der Auswahl der Parameter, die zur Komponente Temperatur beitragen, konnten die Dauer der Vegetationsperiode (*veg5*) sowie die Temperaturen im Frühjahr (*tmam*) und im Sommer (*tjja*) (Periode März bis August, was grob der Vegetationszeit entspricht) zu einer weiteren Komponente zusammengefasst werden (siehe Tabelle 11). Sie kann als "Temperatur in der Vegetationsperiode" bezeichnet werden und erklärt annähernd 100 % der Variation entlang der Variablen. Entlang der Komponente ergibt sich eine gute Aufgliederung aller Waldgruppen (siehe Abbildung 10).

Tabelle 11: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Temperatur in der Vegetationszeit“ beitragen.

Variable	Abkürzung	Ladung
Mittlere Frühjahrstemperatur [°C]	<i>tmam</i>	-0.5780518
Mittlere Sommertemperatur [°C]	<i>tjja</i>	-0.5774336
Dauer der Vegetationsperiode [d]	<i>veg5</i>	-0.5765644

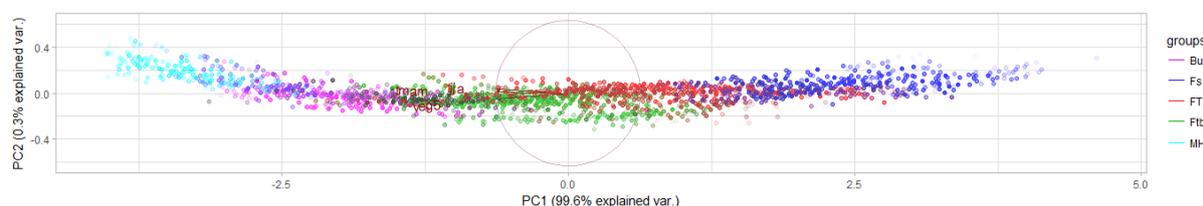


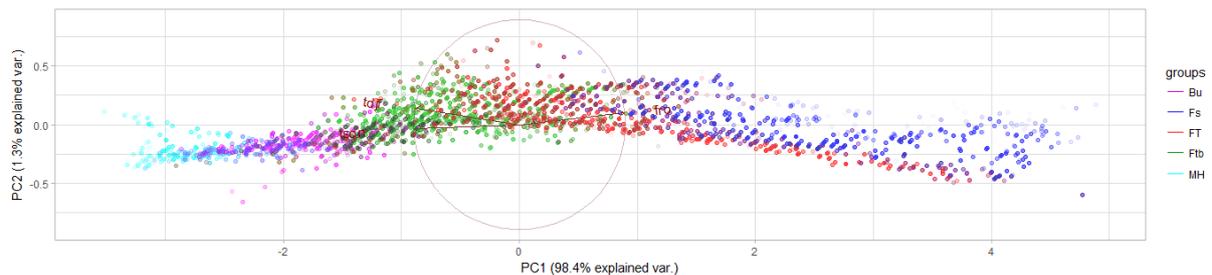
Abbildung 10: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Temperatur in der Vegetationszeit“ (horizontale Achse; Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).

Weiters konnten die Variablen Herbst- und Wintertemperatur (*tson* und *tdjf*) sowie die Anzahl der Frosttage (*fro*) isoliert und zur Komponente „Temperatur“ außerhalb der

Vegetationsperiode" zusammengefasst werden (siehe Tabelle 12). Diese Komponente vermag bei einer Erklärung von 98 % der Variation entlang der Variablen noch gut zwischen den Waldgruppen zu diskriminieren (siehe Abbildung 11).

**Tabelle 12: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Temperatur außerhalb der Vegetationszeit“ beitragen.**

Variable	Abkürzung	Ladung
Anzahl der Frosttage [d]	<i>fro</i>	0.5772927
Mittlere Herbsttemperatur [°C]	<i>tson</i>	-0.5800752
Mittlere Wintertemperatur [°C]	<i>tdjf</i>	-0.5746703

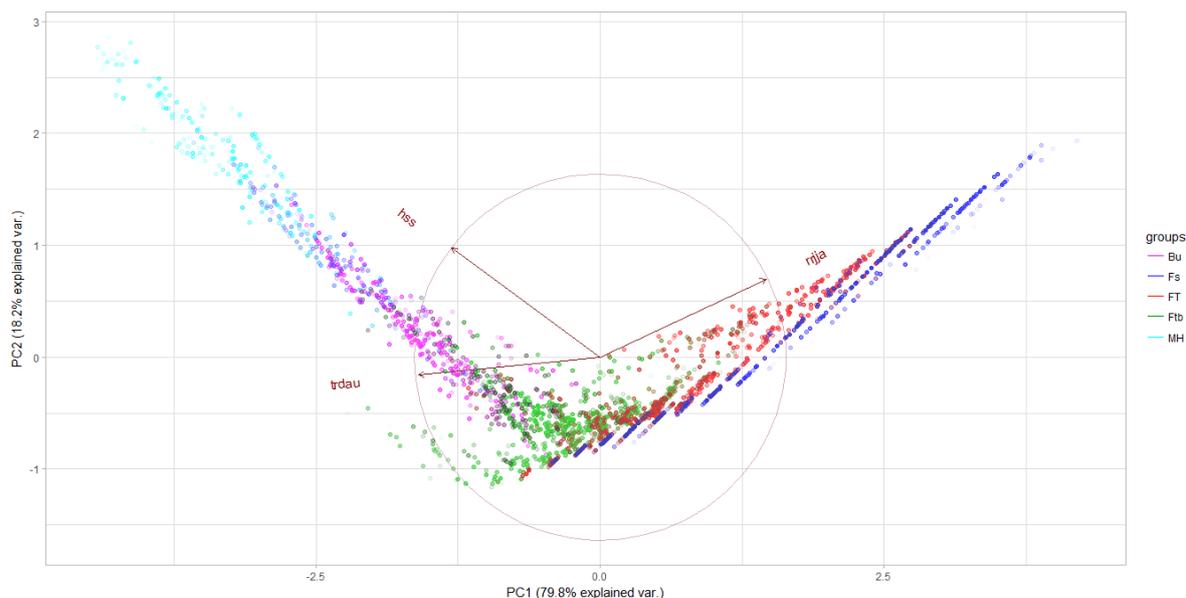


**Abbildung 11: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Temperatur außerhalb der Vegetationszeit“ (horizontale Achse; Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).**

Auf eine durch Interaktion verstärkte Wirkung von Hitze und Trockenheit deutet die Komponente "Hitze und Trockenheit" hin, auf welcher die Dauer der Trockenperiode (*trdau*) sehr hoch und der Sommerniederschlag (*rrjja*) sowie die Anzahl der heißen Tage (*hss*) hoch lasten (siehe Tabelle 13). Die Komponente erklärt 80 % der Streuung entlang der Variablen und entlang der Komponente ist eine Unterscheidung zwischen den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern, Buchenwäldern und Fichten-Tannen-Buchenwäldern möglich, während die Fichten-Tannen-Buchenwälder, Fichten-Tannenwälder und subalpinen Fichtenwälder mäßig überlagern (siehe Abbildung 12).

**Tabelle 13: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Hitze und Trockenheit“ beitragen.**

Variable	Abkürzung	Ladung
Anzahl der heißen Tage [d]	<i>hss</i>	-0.5168214
Mittlere Dauer der Trockenperiode [d]	<i>trdau</i>	-0.6319979
Sommerniederschlag [mm]	<i>tjja</i>	0.5774723



**Abbildung 12: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Hitze und Trockenheit“ (horizontale Achse) und Ladungen der Variablen mittlere Dauer der Trockenperiode (*trdau*), Sommerniederschlag (*rrja*) und Anzahl der heißen Tage (*hss*) auf den Komponenten (Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).**

## 3.2 Vergleich der aktuellen mit den zukünftigen Klimabereichen

### 3.2.1 Datenübersicht

Die Ausprägungen der Klimaparameter in den drei Klimaperioden (1981-2010, 2026-2055 und 2071-2100) innerhalb der fünf Waldgruppen sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Eine beispielhafte grafische Darstellung der Parameter erfolgt der Übersichtlichkeit halber lediglich für die Fichten-Tannen-Buchenwälder (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). Analog ausgeführte Darstellungen für alle Waldgruppen sind in Anhang C beigefügt.

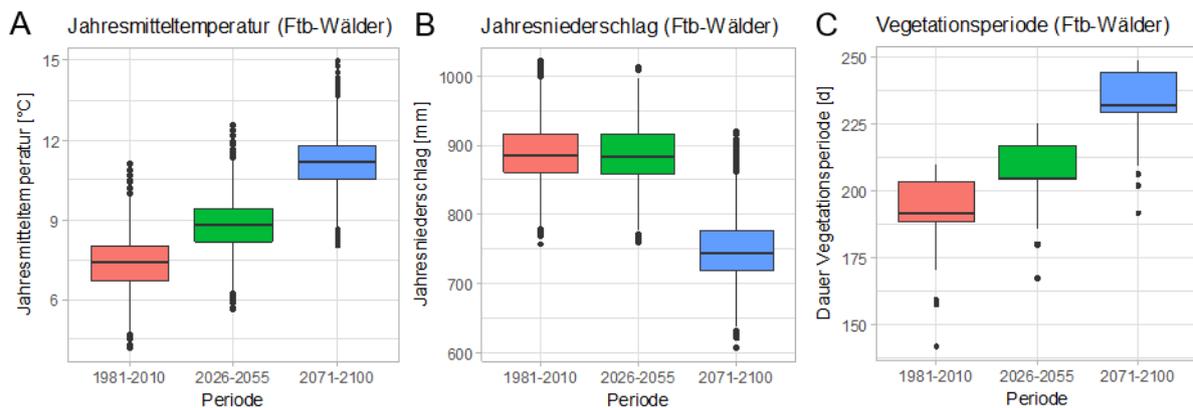
Die Temperaturparameter (Jahresmitteltemperatur, saisonale Mitteltemperatur, Dauer der Vegetationsperiode) weisen in allen Waldgruppen vergleichbare Streuungen zwischen den Perioden (1981-2010, 2026-2055, 2071-2100) auf. Die Streuungen der Herbst- und Wintertemperaturen fallen in den Buchen- und Fichten-Tannen-Buchenwäldern in allen Perioden geringer als jene der Frühjahr- und Sommertemperaturen aus. Hinsichtlich des Jahresniederschlages ist die Streuung in der Periode 2071-2100 in den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und Buchenwäldern größer als in den Perioden 1981-2010 und 2026-2055, während sie in den restlichen Waldgruppen zwischen den Perioden vergleichbar ist. Besonders heterogene Streuungen weisen die Sommerniederschläge zwischen den unterschiedlichen Perioden in allen Waldgruppen auf. Dabei liegen vor allem bei den Sommerniederschlägen der Periode 2071-2100 Streuungen im Bereich von etwa 150 bis 300 mm vor.

Die jahreszeitliche Verteilung der Temperaturen zeigt in allen Waldgruppen außer den Fichten-Tannen- und den subalpinen Fichtenwäldern ein Maximum im Sommer, ein Minimum im Winter und ähnliche Herbst- und Frühjahrstemperaturen. In den letztgenannten Waldgruppen übersteigt die Herbsttemperatur die Frühjahrstemperatur. Diese saisonalen Verteilungen sind in allen Perioden ähnlich ausgeprägt. Die Verteilung des Niederschlages weist in allen Waldgruppen 1981-2010 und 2026-2055 ein Sommermaximum und ein

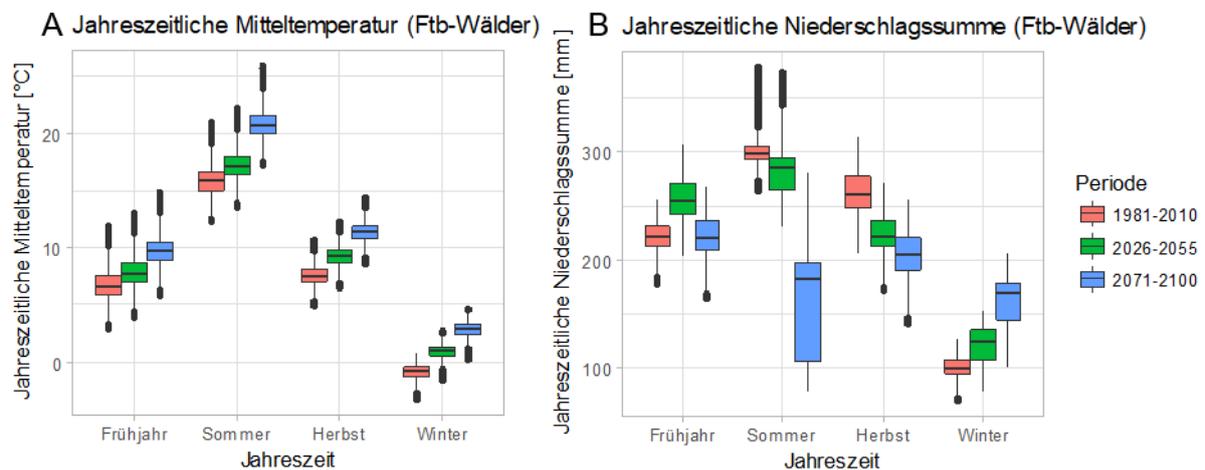
### 3 Ergebnisse

Winterminimum auf. In der Periode 1981-2010 übersteigt der Herbstniederschlag den Frühjahrsniederschlag, während sich dies in der Periode 2026-2055 umkehrt. Eine andere Verteilung weisen die saisonalen Niederschläge in der Periode 2071-2100 auf. Hier liegt das Niederschlagsmaximum mit Ausnahme der subalpinen Fichtenwälder in allen Waldgruppen im Frühjahr, in den subalpinen Fichtenwäldern liegt es im Sommer. Das Niederschlagsminimum liegt in den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und Buchenwäldern im Sommer, während es in den übrigen Waldgruppen im Winter zu finden ist. Die Frühjahrs- und Herbstniederschläge sind in dieser Periode sehr ähnlich.

Generell treffen diese Aussagen jedoch nur auf den Median und den Mittelwert zu und können im Einzelfall durch die hohen Streuungen der Parameter anders ausfallen.



**Abbildung 13: Ausprägungen von Jahresmitteltemperatur (A), Jahresniederschlag (B) und Vegetationsperiode (C) in den unterschiedlichen Perioden innerhalb der Fichten-Tannen-Buchenwälder.**



**Abbildung 14: Jahreszeitliche Verteilung der Temperaturen (A) und der Niederschläge (B) innerhalb der Fichten-Tannen-Buchenwälder über die drei Klimaperioden.**

Tabelle 14: Übersicht über die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), 5. Perzentilen (5%) und 95. Perzentilen (95%) der Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Perioden innerhalb der Waldgruppen.

Waldgruppe	Parameter	1981-2010			2026-2055			2071-2100		
		5%	$\bar{x}$	95%	5%	$\bar{x}$	95%	5%	$\bar{x}$	95%
Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder	Jahresmitteltemperatur [°C]	9,5	10,6	11,5	11,0	12,0	13,0	13,4	14,4	15,3
	Frühjahrstemperatur [°C]	9,8	11,1	12,4	10,9	12,2	13,5	12,7	14,1	15,3
	Sommertemperatur [°C]	18,7	20,1	21,5	20,0	21,4	22,7	23,7	25,0	26,4
	Herbsttemperatur [°C]	9,3	10,2	11,0	10,9	11,9	12,7	13,0	14,0	14,8
	Wintertemperatur [°C]	0,0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,7	4,3	4,8
	Jahresniederschlag [mm]	738	801	890	737	801	887	578	678	799
	Frühjahrsniederschlag [mm]	171	190	219	204	224	246	173	193	223
	Sommerniederschlag [mm]	267	278	287	236	262	278	73	141	181
	Herbstniederschlag [mm]	214	240	276	176	201	238	161	184	219
	Winterniederschlag [mm]	78	93	120	97	115	140	140	159	183
	Dauer Vegetationsperiode [d]	172	199	209	188	214	222	209	240	248
Buchenwälder	Jahresmitteltemperatur [°C]	7,3	8,9	10,2	8,7	10,3	11,6	11,1	12,7	14,0
	Frühjahrstemperatur [°C]	6,6	8,9	10,7	7,8	10,0	11,8	9,6	11,9	13,6
	Sommertemperatur [°C]	15,8	17,9	19,6	17,1	19,2	20,9	20,7	22,8	24,5
	Herbsttemperatur [°C]	7,5	8,8	9,9	9,2	10,5	11,6	11,3	12,6	13,7
	Wintertemperatur [°C]	-0,9	-0,1	0,6	0,9	1,6	2,4	2,7	3,5	4,3
	Jahresniederschlag [mm]	797	853	937	795	854	935	645	734	844
	Frühjahrsniederschlag [mm]	190	209	233	223	242	264	190	213	240
	Sommerniederschlag [mm]	280	289	302	253	275	292	94	158	196
	Herbstniederschlag [mm]	231	254	291	192	215	250	176	199	233
	Winterniederschlag [mm]	86	101	126	103	122	146	141	165	198
	Dauer Vegetationsperiode [d]	184	199	209	198	215	225	224	240	249
Fichten-Tannen-Buchenwälder	Jahresmitteltemperatur [°C]	5,8	7,3	8,6	7,2	8,8	10,1	9,6	11,2	12,5
	Frühjahrstemperatur [°C]	4,7	6,7	8,5	5,9	7,8	9,7	7,7	9,7	11,5
	Sommertemperatur [°C]	13,9	15,8	17,6	15,1	17,1	18,8	18,8	20,7	22,5
	Herbsttemperatur [°C]	6,2	7,5	8,7	7,8	9,2	10,3	10,0	11,3	12,5
	Wintertemperatur [°C]	-1,9	-0,9	-0,1	-0,1	0,9	1,7	1,8	2,8	3,6
	Jahresniederschlag [mm]	828	889	967	824	888	964	687	755	889
	Frühjahrsniederschlag [mm]	203	222	241	230	257	287	195	223	249
	Sommerniederschlag [mm]	282	301	326	251	283	316	93	163	218
	Herbstniederschlag [mm]	236	264	302	200	225	257	181	207	246
	Winterniederschlag [mm]	88	103	126	101	123	152	127	163	204
	Dauer Vegetationsperiode [d]	170	193	209	186	208	225	211	234	249
Fichten-Tannenwälder	Jahresmitteltemperatur [°C]	3,2	5,6	7,6	4,7	7,1	9,1	7,2	9,6	11,5
	Frühjahrstemperatur [°C]	2,2	4,7	7,0	3,4	5,9	8,2	5,6	7,9	10,2
	Sommertemperatur [°C]	11,9	14,0	16,2	13,2	15,3	17,5	16,7	18,9	21,1
	Herbsttemperatur [°C]	3,6	6,0	7,8	5,3	7,7	9,4	7,6	9,9	11,6
	Wintertemperatur [°C]	-5,1	-2,3	-0,5	-3,5	-0,5	1,4	-1,4	1,5	3,3
	Jahresniederschlag [mm]	857	966	1138	850	960	1130	707	814	976
	Frühjahrsniederschlag [mm]	213	241	276	238	271	305	193	227	255
	Sommerniederschlag [mm]	293	342	417	260	329	407	102	225	327
	Herbstniederschlag [mm]	242	278	326	207	241	288	183	216	257
	Winterniederschlag [mm]	90	105	122	100	119	144	122	147	189
	Dauer Vegetationsperiode [d]	142	176	204	167	193	219	192	219	244
Subalpine Fichtenwälder	Jahresmitteltemperatur [°C]	2,0	3,8	5,4	3,5	5,3	6,9	6,0	7,8	9,3
	Frühjahrstemperatur [°C]	0,8	2,6	4,3	2,0	3,8	5,5	4,2	5,9	7,4
	Sommertemperatur [°C]	10,4	12,1	13,6	11,7	13,4	14,9	15,2	17,0	18,5
	Herbsttemperatur [°C]	2,5	4,4	6,0	4,2	6,0	7,6	6,4	8,3	9,8
	Wintertemperatur [°C]	-5,9	-3,9	-2,0	-4,3	-2,1	-0,3	-2,3	-0,1	1,7
	Jahresniederschlag [mm]	905	1056	1251	898	1050	1240	760	894	1087
	Frühjahrsniederschlag [mm]	233	264	302	258	295	327	217	246	271
	Sommerniederschlag [mm]	298	371	452	261	357	445	101	251	366
	Herbstniederschlag [mm]	254	306	361	220	268	323	195	241	289
	Winterniederschlag [mm]	97	116	135	107	130	149	131	155	191
	Dauer Vegetationsperiode [d]	137	168	188	164	187	204	190	212	232

### 3.2.2 Statistische Mittelwertvergleiche

Die Mittelwertdifferenzen der Klimaparameter zwischen der aktuellen und den zukünftigen Perioden sowie der zeitliche Entwicklungstrend zwischen den Perioden sind in Tabelle 15 angeführt. Nicht signifikante Unterschiede ( $p > 0,05$ ) konnten nur hinsichtlich des Jahresniederschlages in den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern zwischen den Perioden 1981-2010 und 2026-2055 sowie hinsichtlich des Frühjahrsniederschlages in den Fichten-Tannen-Buchenwäldern zwischen den Perioden 1981-2010 und 2071-2100 festgestellt werden.

Mit fortschreitender Zeit wird eine erhöhte Jahresmitteltemperatur und eine verlängerte Vegetationsperiode prognostiziert, wobei diese Änderungen zwischen den Perioden 1981-2010 und 2026-2055 etwa 30 bis 50 % der Änderungen zwischen den Perioden 1981-2010 und 2071-2100 ausmachen. So verlängert sich die Vegetationszeit im Verhältnis zur aktuellen Situation bis zur Periode 2026-2055 um etwa zwei Wochen, während die Veränderung bis zur Periode 2071-2100 bereits sechs Wochen ausmacht. Die Jahresmitteltemperatur steigt bis 2026-2055 um etwa 1,5 °C und bis 2071-2100 um 3,8 bis 3,9 °C an. In allen Waldgruppen ändert sich der Jahresniederschlag zwischen den Perioden 1981-2010 und 2026-2055 kaum, während er in der Periode 2071-2100 mit 120 bis 160 mm (dies entspricht je nach Waldgruppe 14 bis 16 %) zurückgeht.

Bei allen Waldgruppen kann eine sehr ähnliche Entwicklung der saisonalen Temperatur beobachtet werden. Während in der Periode 2026-2055 die stärkste Erwärmung im Winter und Herbst (1,7 bzw. 1,8 °C) und die geringste im Frühjahr (1,1 bzw. 1,2 °C) festgestellt werden kann, ist in der Periode 2071-2100 die mit Abstand stärkste Erwärmung im Sommer (4,8 bzw. 4,9 °C), gefolgt vom Herbst und Winter mit einer Erwärmung um 3,7 bis 3,9 °C und dem Frühjahr mit einer Veränderung um 3,0 bis 3,2 °C zu beobachten.

Die Entwicklung der saisonalen Niederschläge gestaltet sich in allen Waldgruppen sehr ähnlich. Der Frühjahrsniederschlag steigt bis zur Periode 2026-2055 um etwa 30 mm an und sinkt in der Periode 2071-2100 wieder auf das Ausgangsniveau. Der Sommerniederschlag sinkt in der Periode 2026-2055 leicht (ca. 10 bis 20 mm) und in der Periode 2071-2100 stark (etwa 120 bis 140 mm), wobei in der zweitgenannten Periode die Abnahme in den Waldgruppen tiefer gelegener Höhenstufen stärker ausfällt (im Vergleich zu den höher gelegenen Waldgruppen, wo der Sommerniederschlag um 32 bis 35 % abnimmt, Abnahme des Sommerniederschlages um ca. 45 bis 50 %). Der Herbstniederschlag unterliegt in der Zeit einem abnehmenden, der Winterniederschlag einem steigenden Trend, wobei die Änderungen zwischen den Perioden 1981-2010 und 2071-2100 mit Abnahmen um 55 bis 65 mm und Zunahmen um ca. 40 bis 65 mm stärker ausfallen als die Änderungen zwischen den Perioden 1981-2010 und 2026-2055 (Abnahmen um 40 bis 55 mm und Zunahmen um ca. 15 bis 20 mm). Bis zur Periode 2071-2100 ist in den tiefer gelegenen Waldgruppen eine Zunahme des Winterniederschlages um etwa 60 bis 70 %, in den höher gelegenen Waldgruppen um ca. 30 bis 40 % zu erwarten.

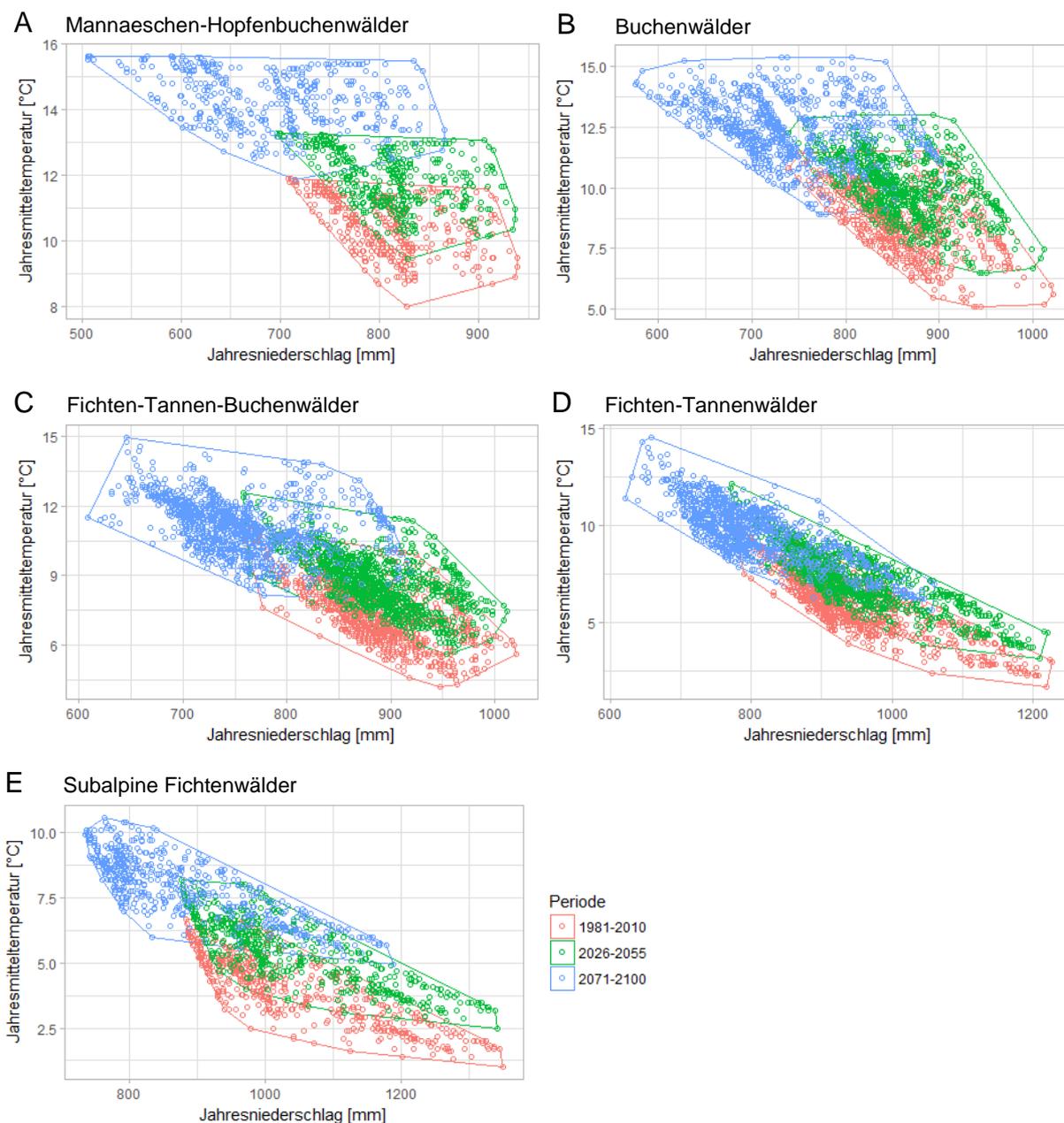
**Tabelle 15: Differenzen der Mittelwerte zwischen den zukünftigen (2026-2055 und 2071-2100) und der aktuellen (1981-2010) Periode für die jeweiligen Waldgruppen (es wurde jeweils der Mittelwert einer zukünftigen Periode vom Mittelwert der aktuellen Periode subtrahiert) und zeitlicher Entwicklungstrend zwischen den Perioden 1981-2010 und 2026-2055 sowie 2026-2055 und 2071-2100 für alle Waldgruppen.**

Parameter	MH		Bu		Ftb		FT		Fs		Entwicklungstrend zw. den Perioden	
	1981-2010 ↕ 2026-2055	1981-2010 ↕ 2071-2100	1981-2010 ↕ 2026-2055	2026-2055 ↕ 2071-2100								
Jahresmitteltemperatur [°C]	1,4	3,8	1,4	3,8	1,5	3,9	1,5	3,9	1,5	3,9	↗	↗
Frühjahrstemperatur [°C]	1,1	3,0	1,1	3,0	1,1	3,0	1,2	3,2	1,2	3,2	↗	↗
Sommertemperatur [°C]	1,3	4,9	1,3	4,9	1,3	4,9	1,3	4,9	1,3	4,8	↗	↗
Herbsttemperatur [°C]	1,7	3,8	1,7	3,8	1,7	3,8	1,7	3,8	1,7	3,9	↗	↗
Wintertemperatur [°C]	1,8	3,7	1,8	3,7	1,8	3,7	1,8	3,8	1,7	3,7	↗	↗
Jahresniederschlag [mm]	0	-123	1	-118	-1	-134	-6	-152	-6	-163	→	↘
Frühjahrsniederschlag [mm]	34	4	33	4	35	0	30	-14	31	-18	↗	↘
Sommerniederschlag [mm]	-16	-137	-14	-131	-18	-138	-13	-118	-14	-119	↘	↘
Herbstniederschlag [mm]	-39	-56	-39	-56	-39	-57	-37	-62	-38	-65	↘	↘
Winterniederschlag [mm]	22	66	21	65	20	60	14	42	14	39	↗	↗
Dauer Vegetationsp. [d]	16	41	15	41	15	41	17	42	19	44	↗	↗

### 3.2.3 Überlappungen zwischen dem aktuellen und den zukünftigen Klimabereichen

Die Überlappungen der Klimabereiche zwischen den zukünftigen und der aktuellen Periode sind in Tabelle 16 in 25 %-Klassen dargestellt, wobei sich die Anteile auf den Klimabereich der Periode 1981-2010 beziehen. Eine Darstellung der nicht klassifizierten Einzelwerte ist in Anhang D ersichtlich. Die in Abbildung 15 dargestellten Klimahüllen der unterschiedlichen Klimaperioden (größere Darstellungen sind in Anhang C ersichtlich) liefern zudem einen anschaulichen Überblick über die Überlagerungen der Klimabereiche hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlages innerhalb der Waldgruppen.

In Tabelle 16 ist eine durchwegs starke Überlappung (mehr als 75 %) des Jahresniederschlages der Periode 2026-2055 mit jenem der aktuellen Periode festzustellen. Dies zeigt sich auch in den Klimahüllen (siehe Abbildung 15), welche in den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlages eine noch mäßige Überlappung zwischen der Periode 2026-2055 und der aktuellen Klimaperiode (1981-2010) zeigen, während zwischen der Periode 2071-2100 und der aktuellen Periode keine Überlappung mehr festzustellen ist. Anders kann in den Buchenwäldern eine starke Überlappung zwischen den Perioden 2026-2055 und 1981-2010 beobachtet werden, während die Klimahüllen der Perioden 2071-2100 und 1981-2010 zum Großteil nicht mehr überlagern. Eine ähnliche Feststellung ist in den Fichten-Tannen-Buchenwäldern zu machen. In den Fichten-Tannenwäldern überlagert die Klimahülle der Periode 2026-2055 noch mäßig, jene der Periode 2071-2100 zum größten Teil nicht mehr mit der aktuellen Klimahülle. Die subalpinen Fichtenwälder überlagern 2071-2100 nur mehr zu einem geringen Teil, 2026-2055 noch mäßig mit dem aktuellen Klima. Allen Waldgruppen gemeinsam ist in der Periode 2026-2055 eine Verschiebung der Klimahülle ausschließlich aufgrund des Anstieges der Jahresmitteltemperatur und in der Periode 2071-2100 sowohl aufgrund des Anstieges der Jahresmitteltemperatur als auch aufgrund des Rückganges des Jahresniederschlages.



**Abbildung 15: Klimahüllen der unterschiedlichen Perioden mit den Variablen Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur für alle Waldgruppen (A = Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder, B = Buchenwälder, C = Fichten-Tannen-Buchenwälder, D = Fichten-Tannenwälder, E = Subalpine Fichtenwälder).**

In Tabelle 16 ist ersichtlich, dass in den höher gelegenen Waldgruppen (Fichten-Tannen-Buchen-, Fichten-Tannen- und subalpine Fichtenwälder) eine starke Überlappung zwischen den Perioden 2026-2055 und 1981-2010 auch auf den Sommerniederschlag zutrifft, während er in den tiefer gelegenen Gruppen zwischen 50 und 74,99 % überlappt. Mehr als 50 % und weniger als 74,99 % Überlagerung zwischen den selben Perioden ist auch hinsichtlich der Frühjahrs- und Sommertemperatur sowie hinsichtlich des Winterniederschlages zu beobachten. In den Mannaeschen-Hopfenbuchen-, Buchen- und Fichten-Tannen-Buchenwäldern überlagern die Winter- und Herbsttemperatur sowie der Frühjahrs- und Herbstniederschlag der Periode 2026-2055 durchwegs zu weniger als 50 % mit den Ausprägungen der Periode 1981-2010. In den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und in den Fichten-Tannen-Buchenwäldern überlagert die Jahresmitteltemperatur der Periode 2026-2055 zu weniger als 50 % und die Dauer der Vegetationsperiode zu mehr als 50 % mit der

aktuellen Periode, während in den Buchenwäldern die Vegetationsperiode zu weniger als 50 % und die Jahresmitteltemperatur zu mehr als 50 % mit der aktuellen Periode überlappt. In den Fichten-Tannen- und subalpinen Fichtenwäldern hingegen überlagern sich nahezu alle Parameter zwischen den Perioden 2026-2055 und 1981-2010 zu mehr als 50 %. Eine Ausnahme bildet lediglich die Dauer der Vegetationsperiode in den subalpinen Fichtenwäldern, die zu weniger als 50 % überlappt.

Die Periode 2071-2100 überlappt in allen Waldgruppen lediglich hinsichtlich des Frühjahrsniederschlages zu mehr als 50 % mit dem aktuellen Klima, in den subalpinen Fichtenwäldern zusätzlich auch hinsichtlich des Jahresniederschlages. Mit Ausnahme der subalpinen Fichtenwälder überlappt der Jahresniederschlag in allen anderen Waldgruppen zu 25-40,99 %. Umgekehrt verhält es sich mit dem Herbstniederschlag, der zwischen der aktuellen Periode und der Periode 2071-2100 in allen Waldgruppen mit Ausnahme der subalpinen Fichtenwälder, in denen er zu 25-49,99 % überlappt, zu 0-24,99 % überlagert. Besonders wenig Überlappung (weniger als 25 %) ist in allen Waldgruppen hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur, der Sommer-, Herbst- und Wintertemperatur, der Dauer der Vegetationsperiode, sowie des Winterniederschlages festzustellen. In den Fichten-Tannen- sowie subalpinen Fichtenwäldern überlagert der Sommerniederschlag mit 25-49,99 % noch etwas mehr mit der Periode 2071-2100 als in den tiefer gelegenen Waldgruppen.

**Tabelle 16: Klassifizierung der Klimaparameter je nach Überlagerung des Klimabereiches der zukünftigen Perioden (2026-2055 und 2071-2100) mit dem aktuellen Klimabereich (1981-2010), jeweils für eine Waldgruppe. Die Anteile beziehen sich auf die gesamte Verteilung des Parameters in der Periode 1981-2010 zwischen der 5. und 95. Perzentile.**

Waldgr.	Periode	Klimaparameter nach Anteil des zwischen den zukünftigen Perioden und der aktuellen Periode (1981-2010) überlappenden Klimabereiches am aktuellen Klimabereich			
		0-24,99 %	25-49,99 %	50-74,99 %	75-100 %
MH	2026-2055	<i>tson, tdjf</i>	<i>t, rrmam, rrson</i>	<i>tmam, tjja, rrjja, rrdjf, veg5</i>	<i>rr<sup>2</sup></i>
	2071-2100	<i>t, tmam, tjja, tson, tdjf, rrjja, rrson, rrdjf, veg5</i>	<i>rr</i>		<i>rrmam</i>
Bu	2026-2055	<i>tdjf, rrmam</i>	<i>tson, rrson, veg5</i>	<i>t, tmam, tjja, rrjja, rrdjf</i>	<i>rr</i>
	2071-2100	<i>t, tjja, tson, tdjf, rrjja, rrson, rrdjf, veg5</i>	<i>tmam, rr</i>		<i>rrmam</i>
Ftb	2026-2055	<i>tdjf</i>	<i>t, tson, rrmam, rrson</i>	<i>tmam, tjja, rrdjf, veg5</i>	<i>rr, rrjja</i>
	2071-2100	<i>t, tmam, tjja, tson, tdjf, rrjja, rrson, rrdjf, veg5</i>	<i>rr</i>		<i>rrmam</i>
FT	2026-2055			<i>t, tmam, tjja, tson, tdjf, rrmam, rrson, rrdjf, veg5</i>	<i>rr, rrjja</i>
	2071-2100	<i>t, tjja, tson, tdjf, rrson, rrdjf, veg5</i>	<i>tmam, rr, rrjja</i>	<i>rrmam</i>	
Fs	2026-2055		<i>veg5</i>	<i>t, tmam, tjja, tson, tdjf, rrmam, rrson, rrdjf</i>	<i>rr, rrjja</i>
	2071-2100	<i>t, tmam, tjja, tson, tdjf, rrdjf, veg5</i>	<i>rrjja, rrson</i>	<i>rr, rrmam</i>	

<sup>2</sup>Beispiel: Der Parameter Jahresniederschlag (*rr*) überlagert sich in den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern zwischen der Periode 2026-2055 und der Periode 1981-2010 zu 75-100 %.

### 3.2.4 Potenzielle Einwirkung von Klimaveränderungen auf die Waldgruppen

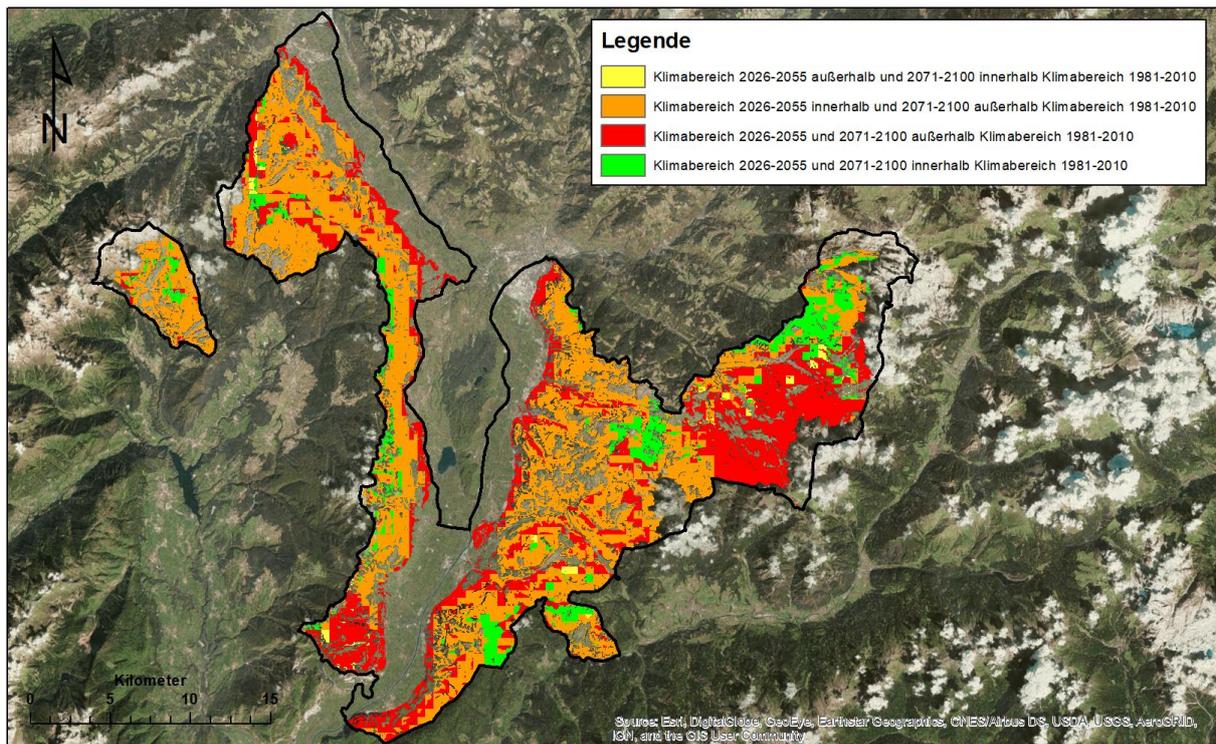
Durch die kartografische Darstellung der potenziellen Klimaveränderungen in Form unterschiedlich eingefärbter Zonen erfolgt eine räumliche Zuordnung dieser Veränderungen, was im Gegensatz zur abstrakten Darstellung der Klimaänderungen in Klimahüllen eine Betrachtung auf lokaler Ebene ermöglicht. Einen Überblick über die potenziellen

Veränderungen in allen ausgewählten Waldgruppen liefert Abbildung 16. In Anhang E sind nach Waldgruppen getrennte Darstellungen ersichtlich.

Insgesamt fällt auf, dass auf den meisten Standorten erst in der Periode 2071-2100 ein Klima außerhalb des aktuellen Klimabereiches herrscht (orange Einfärbung). Ein großer Teil der Standorte unterliegt aber bereits in der Periode 2026-2055 einem Klima, das außerhalb des aktuellen Bereiches liegt (rote Einfärbung). Es sind dies vor allem die tiefer gelegenen Zonen entlang der Talhänge des Etschtales sowie dessen Seitentäler. Diesbezüglich fallen zudem zwei Bereiche mit einem besonders hohen Anteil an roten eingefärbten Standorten auf: Einerseits die Hänge westlich der Ortschaften Margreid und Kurtinig im Süden des Etschtales und andererseits ein ausgedehnter Bereich in den Gemeinden Deutschnofen und Welschnofen unterhalb des Latemars. Während in den roten Zonen oberhalb von Margreid und Kurtinig vorwiegend Fichten-Tannen-Buchenwälder und seltener Buchenwälder hauptsächlich nördlicher Exposition vorkommen, sind im Bereich von Welschnofen und Deutschnofen hauptsächlich subalpine Fichtenwälder und Fichten-Tannenwälder betroffen. Hier sind vorwiegend Hänge nördlicher und westlicher Exposition betroffen, jedoch nur selten südexponierte Hänge. Die Meereshöhe scheint keinen Einfluss zu haben. In diesem Bereich ist auch ein markanter Unterschied innerhalb der Fichten-Tannenwälder zu erkennen. Diese liegen im nördlichen Teil Welschnofens nämlich in der grünen Zone (das Klima liegt also in beiden zukünftigen Perioden innerhalb des aktuellen Klimabereiches), während sie im südlichen Teil vorwiegend in der roten Zone zu liegen kommen, was sich mit unterschiedlichen Expositionen in diesen Bereichen deckt (rote Zonen sind vor allem an nordexponierten, grüne Zonen vorwiegend an südlichen und westlichen Expositionen festzustellen). Zudem lässt sich in der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen Einwirkungsklassen der Klimaeinfluss aus den unterschiedlichen Tälern feststellen (z.B. zwischen dem Tierser- und Eggental sowie zwischen dem Eggental und der Hochfläche bei Petersberg und Aldein).

Die Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder sowie die Buchenwälder weisen fast ausschließlich rote und orange Zonen auf, wobei die roten Zonen vor allem in den tieferen Lagen der jeweiligen Höhenstufen festzustellen sind. Die Buchenwälder sind besonders im südlichen Etschtal häufig einer roten Zone zugewiesen. Die Fichten-Tannen-Buchenwälder sind generell in nordwestlichen bis nordöstlichen Expositionen sowie in tiefer gelegenen Bereichen der roten Zone zugeordnet, während sie nur in höheren Lagen der grünen Klasse zugeordnet wurden. Die meisten grünen Bereiche lassen sich in den Fichten-Tannenwäldern feststellen, wo sie sich ungefähr über ein Viertel der Flächen erstrecken, die vorwiegend südlich exponiert und höher gelegen sind. Die subalpinen Fichtenwälder weisen fast ausschließlich rote und orange Zonen auf, wobei sich die roten Zonen vorwiegend auf tiefer gelegene Abschnitte erstrecken; ein Einfluss der Exposition ist nicht festzustellen.

Damit lässt sich zusammenfassen, dass die Verteilung der Einwirkungsklassen (Zonen) innerhalb der Waldgruppen meistens höhenabhängig ist. Lediglich in den Waldgruppen mit höheren Anteilen an Tanne (es sind dies die Fichten-Tannen-Buchenwälder und die Fichten-Tannenwälder) ist auch ein Einfluss der Exposition auf die räumliche Verteilung der Klassen feststellbar. Es sind zugleich auch diese Waldgruppen, welche die höchsten Anteile an grünen Zonen aufweisen.



**Abbildung 16: Kartografische Darstellung der in Stufen gegliederten potenziellen Einwirkung der Klimaveränderungen (Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag) auf die fünf ausgewählten Waldgruppen in der Fichten-Tannen-Buchenzone (schwarz umrandet).**

## 4 Diskussion

### 4.1 Aktuelles Klima

#### 4.1.1 Inhaltliche Aspekte

Die Temperatur- und Niederschlagsparameter folgen einem deutlichen Höhengradienten, was mit der Auswahl der Leitgesellschaften aus unterschiedlichen Höhenstufen begründet werden kann. Während die Temperaturmittelwerte mit zunehmender Meereshöhe abnehmen, nehmen die Niederschlagssummen zu. Dabei ist dieser Trend bei der Temperatur stärker ausgeprägt, wo zwischen den Waldgruppen deutliche Unterschiede in den zentralen Tendenzen zu beobachten sind. Hinsichtlich der Temperaturparameter sind generell auch geringere Überlappungen zwischen den Waldgruppen benachbarter Höhenstufen feststellbar, weshalb diese zur Charakterisierung der Waldgruppen besser geeignet zu sein scheinen. Eine lineare Abnahme der Jahresmitteltemperatur mit der Höhe kann in verschiedenen Gegenden der Erde in ähnlicher Form festgestellt werden und ist daher ein universales Phänomen. Die Zunahme des Niederschlages mit der Höhe ist im Gegensatz dazu zwar allgemein als sogenannter Steigungsregen feststellbar, jedoch stark von den lokalen topografischen Gegebenheiten abhängig. Für die zwischenalpinen Gebiete gilt mit einem Kontinentalitätswinkel zwischen 40 und 50 ° in etwa eine Zunahme um 100 mm Jahresniederschlag je 100 m Höhendifferenz (Ozenda 1988). Im untersuchten Datenmaterial konnte jedoch keine Ausprägung des Parameters in diesem starken Ausmaß festgestellt werden (zwischen der kollinen und der subalpinen Stufe belaufen sich die Unterschiede lediglich auf 200 mm).

Es gibt starke Hinweise darauf, dass primär die Temperatur für die Höhenverbreitung von Baumarten verantwortlich ist. So konnte in mehreren Studien ein Zusammenhang zwischen einer beobachteten Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen bzw. der mittleren Sommertemperaturen und einem Ansteigen einerseits der oberen Verbreitungsgrenzen und andererseits der optimalen Höhenverbreitung von Baumarten unterhalb der Baumgrenze aufgezeigt werden (Lenoir et al. 2008, Lenoir et al. 2009, Vitasse et al. 2012). Daher kann angenommen werden, dass der hier beobachtete Temperaturgradient für die Ausbildung unterschiedlicher Waldgruppen in unterschiedlichen Meereshöhen mit verantwortlich ist. Die identifizierten Hauptkomponenten, die zumeist mit Temperaturparametern in Verbindung stehen und entlang derer sich die Waldgruppen recht gut aufgliedern, lassen dieselben Schlussfolgerungen zu. Hierbei fällt jedoch auf, dass nicht nur die Temperaturparameter in der Vegetationsperiode, die oft zur Charakterisierung der Wuchsbedingungen herangezogen werden (siehe z.B. Vitasse et al. [2012]), sondern auch die Temperaturparameter außerhalb der Vegetationsperiode zu sinnvollen Komponenten zusammengefasst werden können, welche die Verbreitung der Waldgruppen zu erklären vermögen. Neben den mittleren Temperaturen in den kalten Monaten (Herbst und Winter) lastet auch die mittlere Anzahl der Frosttage auf dieser Komponente, was die Rolle diskreter Phänomene unterstreicht. Das Auftreten von Frostschäden wird durch die Tiefe der Temperatur, die zeitliche Einwirkung dieser sowie insbesondere durch die zu diesem Zeitpunkt vorliegende Frosthärte der Bäume bedingt (Kozłowski et al. 1991). Insbesondere Frühjahrsfröste beeinflussen die geografische Verbreitung und Höhenverbreitung von Arten stark und tragen damit wesentlich zur Artenselektion bei (Ozenda 1988, Lenoir et al. 2009, Lindner et al. 2010, Bässler et al. 2013). Aufgrund einer ausgeprägten Spätfrostempfindlichkeit kann das Auftreten von Spätfrosten beispielsweise als Verbreitungsgrenze für die Buche angegeben werden (Felbermaier und Mosandl 2002). Laut Castagneri et al. (2014) beeinflusst die Apriltemperatur das Radialwachstum der Buche, worin auch eine Wirkung von Spätfrosten vermutet wird. Auch bei Mannaesche verursachen Spätfroste oft Schäden (Bartha 1996). Das Amt für Forstplanung (2010a) sieht aufgrund einer erhöhten Spätfrostempfindlichkeit von Tanne und

Buche Spätfrost als einen problematischen Faktor in den Fichten-Tannen-, Fichten-Tannen-Buchen- sowie Buchenwäldern. Daher kann vermutet werden, dass die hier beobachtete Zunahme der Frosttage zwischen den Waldgruppen benachbarter Höhenstufen mit der Höhe um zwei bis knapp vier Wochen eine Verbreitung vor allem der Buche aber auch der Tanne sowie der Mannaesche in höhere Lagen verhindert bzw. eine Abnahme der Häufigkeit des Vorkommens mit zunehmender Höhe bewirkt. Es muss jedoch betont werden, dass diese Schlussfolgerung mangels Aussagen zum zeitlichen Auftreten der Fröste rein hypothetischer Natur ist.

Die Komponente „Hitze und Trockenheit“ weist auf eine Interaktion zwischen Temperatur- und Niederschlagsparametern hin, die vor allem die tiefer gelegenen Waldgruppen aufgliedert, in denen diese Phänomene häufiger auftreten und die sich hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung deutlicher unterscheiden. Dies stimmt mit den Vermutungen von Lenoir et al. (2009) überein, wonach in tiefen Lagen die Wasserverfügbarkeit indirekt über die Temperatur zusätzlich beeinflusst wird, weil einerseits bei hohen Temperaturen die Transpirationsleistung aufgrund eines zunehmenden Dampfdruckgefälles zwischen Pflanze und Luft steigt und andererseits durch die Transpiration ein kühlender Effekt für die Blätter erzielt werden kann. Hierbei hängt es von der Strategie der Baumart bzw. genetischer Varianten einer Baumart ab, wann die Stomata zur Vermeidung von Schäden geschlossen und ein Zuwachsrückgang in Kauf genommen wird (Kozłowski et al. 1991, Tranquillini 1992, Castagneri et al. 2014, Zang et al. 2014, George et al. 2015,). Diese Strategien können somit mit ein Grund für unterschiedlich ausgeprägte untere Verbreitungsgrenzen der Baumarten sein. Sommertrockenheit wirkt sich beispielsweise ungünstig und limitierend auf die Baumarten Fichte, Tanne und Buche aus, während Mannaeschen aufgrund einer ausgeprägten Dürresistenz Konkurrenzvorteile genießen können (Bartha 1996, Schmidt 2002, Amt für Forstplanung 2010a, Castagneri et al. 2014). Dennoch ist anzumerken, dass die Mittelwertdifferenzen in der mittleren Dauer der Trockenperiode mit Werten von weniger als einem Tag sehr gering ausfallen und damit praktisch irrelevant sind, wenngleich sie eine statistische Signifikanz aufweisen. Zudem würde sich die längste Dauer einer Trockenperiode oder die Häufigkeit von Trockenperioden wesentlich besser zur Charakterisierung von Verbreitungsgrenzen eignen als die mittlere Dauer. Die Anzahl der heißen Tage lässt neben den oben erläuterten Effekten, die in Zusammenhang mit der Einschränkung der Wasserverfügbarkeit stehen, keine Rückschlüsse auf etwaige Schädwirkungen (z.B. Einschränkung von Stoffwechselprozessen aufgrund der Schädigung von Zellorganellen) durch Hitze zu, zumal Schäden zumeist erst etwas oberhalb der 30 °C-Marke eintreten und zudem nach dem Dosis-Wirkungs-Gesetz auch von der Dauer der Einwirkung abhängen (Tesche 1992).

Zwischen allen, besonders aber zwischen den tiefer gelegenen Waldgruppen ist die Temperaturdifferenz in den Monaten März bis August größer als in den restlichen Monaten. Diese Feststellung stimmt mit den Angaben von Ozenda (1988) sowie Ellenberg und Leuschner (2010) überein, wonach der Temperatur-Höhengradient im Alpenraum im Sommer stärker ausgeprägt ist als im Winter. Dies wird durch eine abnehmende Differenz zwischen dem kältesten und wärmsten Monat mit zunehmender Meereshöhe, was auch im vorliegenden Datenmaterial festgestellt werden konnte, bedingt. Auch die Überlappungen fallen zwischen Waldgruppen tiefer gelegener Lagen geringer aus.

Umgekehrt verhält es sich mit dem Jahresniederschlag und dem Monatsniederschlag von Mai bis August, wo zwischen den Waldgruppen höherer Lagen (somit zwischen den Fichten-Tannen-Buchen- und den Fichten-Tannenwäldern sowie zwischen den Fichten-Tannen- und den subalpinen Fichtenwäldern) größere Unterschiede als zwischen tiefer gelegenen Waldgruppen festgestellt werden konnten. Nur hinsichtlich dieser Monatsniederschläge konnten Unterschiede zwischen 10 und 15 mm beobachtet werden, während die Unterschiede bezüglich der restlichen Monatsniederschläge weniger als 10 mm ausmachten. Generell sind die Unterschiede zwischen den Waldgruppen hinsichtlich des Niederschlages im Sommer größer als im Winter. Dies spiegelt sich auch in den Überlappungen der Waldgruppen hinsichtlich des Niederschlages wider, die in den Monaten Mai, Juni und Juli zwischen den meisten benachbarten Waldgruppen zu weniger als 50 % überlappen und in den Monaten

Jänner bis April sowie September bis Dezember zu über 50 % überlappen. Die stärkeren Unterschiede im Sommer sind umso bedeutender, als diese Monate in allen Waldgruppen innerhalb der Vegetationsperiode liegen, innerhalb welcher aufgrund der Transpirationsleistung eine ausreichende Niederschlagsversorgung von Bedeutung ist (Mayer 1992, Röhrig und Bartsch 1992, Tranquillini 1992, Amt für Forstplanung 2010a). In den Sommermonaten liegt auch das Niederschlagsmaximum, während das Minimum im Winter liegt, was auf einen kontinentalen Klimatyp hinweist. Die Tatsache, dass sich die Fichten-Tannen-Buchen- und die Fichten-Tannenwälder hinsichtlich des Niederschlages im Februar nicht signifikant unterscheiden, deutet möglicherweise auf ähnliche Standortsansprüche dieser Waldgruppen hin, die sich in den Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung widerspiegeln.

Die Dauer der Vegetationsperiode nimmt nach oben hin im Ausmaß von drei bis vier Wochen zwischen den Waldgruppen ab. Eine ähnliche Höhenentwicklung der Vegetationsdauer führen mit einer mittleren Abnahme um 6 bis 7 Tage je 100 Höhenmeter auch Ellenberg und Leuschner (2010) an. Interessanterweise beträgt laut diesen Autoren die Vegetationsdauer an der Waldgrenze sowohl in den Innen- als auch in den Randalpen etwa 100 Tage, obwohl die Waldgrenze von den Rand- zu den Innenalpen hin ansteigt. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Dauer der Vegetationsperiode eine bedeutende Rolle bei der Höhenzonierung der Vegetation spielt. So ist laut dem Amt für Forstplanung (2010a) in den Buchen-, Fichten-Tannen-Buchen- und Fichten-Tannenwäldern eine kurze Vegetationszeit für die Baumarten Buche und Tanne problematisch. Daher kann vermutet werden, dass eine Änderung der Vegetationsdauer mit der Höhe auch die Höhenverbreitung dieser Waldgruppen beeinflusst.

Die Dauer der Winterschneedecke unterscheidet sich zwischen den Waldgruppen benachbarter Höhenstufen im Ausmaß von zwei bis fünf Wochen. Die von Ozenda (1988) sowie Ellenberg und Leuschner (2010) angegebenen Werte liegen in derselben Größenordnung. Der Winterschneedecke kommt vor allem in Zusammenhang mit dem Phänomen der Frostrocknis eine zentrale Stellung zu, welche in subalpinen Fichtenwäldern und an sonnseitigen Hängen der Fichten-Tannenwälder aufgrund mangelhafter Überdeckung der Jungpflanzen mit Schnee zu Problemen führen kann. Auch im Fichten-Tannen-Buchenwald kann sich eine Schneedecke noch als nützlich für die Tanne erweisen (Amt für Forstplanung 2010a). Zudem bietet die Schneedecke den Pflanzen der Strauchschicht im Winter Schutz vor Frösten (Ellenberg und Leuschner 2010). Insbesondere die Verbreitung der Tanne konzentriert sich aufgrund der gegenüber Frostrocknis besonders sensiblen Verjüngung auf vorwiegend nordexponierten Hängen. Darüber hinaus können jedoch keine eindeutigen Schlüsse in Hinblick auf die Verbreitung der Waldgruppen gezogen werden. Ozenda (1988) deutet an, dass das Ende der Schneedecke im Frühjahr einem stärkeren Höhengradienten als der Beginn der Schneedecke im Herbst folgt. Das bedeutet, dass Unterschiede in der Dauer der Winterschneedecke eher durch das Ende der Schneedecke bedingt sind als durch den Beginn derselben. Dieses Phänomen konnte auch im untersuchten Datenmaterial beobachtet werden.

Hinsichtlich der Dauer der Borkenkäfersaison unterscheiden sich die Waldgruppen im Bereich von drei bis fast fünf Wochen, wobei die Dauer der Saison nach oben hin abnimmt. Dieser Parameter ist für Spätschwärmer, also die Nadelholzborkenkäfer, geeignet, die ab Temperaturen von 20 °C (diese treten ab etwa April bis Juni auf) schwärmen (Schwerdtfeger 1981). Dennoch sollten während der Entwicklung die Temperaturen 23 °C sowie die Tageslängen 14,7 Stunden nicht überschreiten, was durch den hier verwendeten Parameter „Dauer der Borkenkäfersaison“ nicht ermittelt werden kann, weil dieser Parameter lediglich die längste durchgehende Periode mit Tageshöchsttemperaturen von 20 °C oder mehr dokumentiert. Es ist zu vermuten, dass neben anderen Faktoren auch diese Unterschiede für die Mischungsanteile der Nadelbaumarten in den Waldgruppen verantwortlich sind, die nach oben hin zunehmen. Der Borkenkäfer wird in den Fichten-Tannenwäldern und Fichten-Tannen-Buchenwäldern als limitierender Faktor für Fichte angegeben; in den Buchen- sowie in den Mannaeschen-Hopfenbuchen-Wäldern zusätzlich zur Fichte auch für die Kiefer (Amt für Forstplanung 2010a).

Die meisten Waldgruppen benachbarter Höhenstufen unterscheiden sich hinsichtlich der mittleren jährlichen Sonneneinstrahlung im Bereich von etwa 30 bis 135 kWh/m<sup>2</sup>. Lediglich zwischen den Buchen- und den Fichten-Tannen-Buchenwäldern konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die beobachteten Unterschiede liegen durchaus über den Werten, die Yilmaz et al. (2012) zwischen unterschiedlichen Baumarten in der Türkei festgestellt haben. Die größten Unterschiede können zwischen den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und den Buchenwäldern beobachtet werden, was an der geringen Einstrahlung in den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern liegt, die sich aufgrund der Fernverschattung durch die umliegenden Gebirge sowie die Durchdringung mächtigerer Luftmassen in den tiefen Lagen ergibt. Eine geringere Sonneneinstrahlungs-Intensität in tieferen Lagen stellten auch Ozenda (1988) sowie Ellenberg und Leuschner (2010) fest. Dennoch kann über die Höhe kein konsistentes Muster erkannt werden. Weiters überlappen alle benachbarten Waldgruppen zu 75 bis 100 %. Diese starken Überlagerungen resultieren aus den großen Streuungen innerhalb der Waldgruppen. Diese deuten auf eine hohe Variabilität der Waldgruppen hinsichtlich der Strahlung hin, die aufgrund der unregelmäßigen Topographie wohl hauptsächlich den variierenden Expositionen und Hangneigungen zuzuschreiben ist. Hangneigung und Exposition sind zentrale Bestandteile des in der Waldtypisierung verwendeten Standortsschlüssels, weshalb vermutet werden kann, dass die große Streuung in den Waldgruppen aus der Zusammenfassung unterschiedlich exponierter und geneigter Standorte resultiert, die sich bei der Betrachtung einzelner Waldtypen stark reduzieren würde (Amt für Forstplanung 2010a).

Der Vergleich der Jahresmitteltemperaturen sowie der Jahresniederschläge mit den Angaben aus der Waldtypisierung zeigt, dass die Einschätzungen in der Waldtypisierung mit Ausnahme der submontanen und der hochmontanen Höhenstufen insgesamt recht gut mit den extrahierten Daten aus dem Projekt 3PClim übereinstimmen, wenngleich die Angaben in der Waldtypisierung tendenziell etwas konservativer sind, d. h. einen engeren Bereich umfassen. Abweichungen lassen sich im Vergleich ganzer Höhenstufen mit den Leitgesellschaften vermuten, was beispielsweise die höheren Temperaturen der kollinen Stufe in der Waldtypisierung erklären könnte, zumal die kolline Stufe neben den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern noch thermophilere Waldgesellschaften beinhaltet. Andererseits widersprechen die generell konservativeren Einschätzungen zu den Höhenstufen in der Waldtypisierung dieser Vermutung.

#### 4.1.2 Methodik und Datenstruktur

Die große Streuung, die bei allen Parametern beobachtet werden konnte, ergibt sich vermutlich aus der topographischen Heterogenität des Gebietes. In den Fichten-Tannen-Buchen-, Fichten-Tannen- und den subalpinen Fichtenwäldern ist die Streuung stärker als in den restlichen Waldgruppen. Dies kann bei den Fichten-Tannen-Buchen- und bei den Fichten-Tannenwäldern durch die großen Stichprobenumfänge erklärt werden. Die subalpinen Fichtenwälder weisen einen verhältnismäßig kleinen Stichprobenumfang auf, weshalb vermutet werden kann, dass es sich bei dieser Gruppe um eine heterogene Waldgruppe handelt. Tatsächlich sind die Waldtypen innerhalb der subalpinen Fichtenwälder hinsichtlich ihrer Standorte sehr divers, obwohl die Höhererstreckung der Höhenstufe dieser Waldgruppe recht eng gefasst ist.

Die Beschränkung der statistischen Betrachtungen auf die Unterscheidung mindestens signifikanter ( $p \leq 0,05$ ) und nicht signifikanter ( $p > 0,05$ ) Unterschiede diente in Anbetracht des Umfangs der durchgeführten Vergleiche einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse. Wo mangels Erfüllung aller Voraussetzungen für die Durchführung eines statistischen Tests mehrere Tests durchgeführt wurden, gab es immer übereinstimmende Resultate, sodass die Ergebnisse als eindeutig bezeichnet werden können. Die Tatsache, dass sich die Gruppen hinsichtlich der meisten Variablen zumindest signifikant unterscheiden ( $p \leq 0,05$ ), ist mitunter eine Folge der großen Stichprobenumfänge. Daher mussten die Unterschiede zwischen den Waldgruppen auch auf Plausibilität überprüft

werden. Aufgrund der Mittelwertdifferenzen im Bereich von weniger als einem Tag lassen sich beispielsweise bezüglich der mittleren Dauer der Trockenperiode keine Unterschiede von Bedeutung feststellen, obwohl die Mittelwertdifferenzen als signifikant ausgewiesen wurden. Es ist weiters anzumerken, dass die sukzessive Einschränkung der Variablen bei der Ableitung der Faktoren (die Ableitung der Faktoren erfolgte ausgehend von einer Auswahl von Variablen, welche in Abhängigkeit der Ladungen, der Erklärbarkeit und des Trennvermögens zwischen den Waldgruppen weiter eingeschränkt wurden) das Risiko birgt, falsche Entscheidungen aufgrund von Unsicherheiten im Datenmaterial schrittweise zu übernehmen. Generell herrscht beim vorliegenden Datenmaterial ein gewisser Grad an Unsicherheit, zumal die Kartierung der Waldgruppen aus einem Modell stammt und daher ein Potenzial beschreibt. Andererseits sind auch die Rasterdaten zum Klima selbst das Ergebnis von Interpolationen. Besonders die Messungen des Niederschlages an den Wetterstationen, welche als Grundlage für die räumliche Interpolation des Klimas dienen, sind in höheren Lagen mit Unsicherheiten behaftet.

#### 4.1.3 Zusammenfassung

Hinsichtlich aller Parameter konnte ein gewisser Grad an Überlagerungen festgestellt werden, was eine Charakterisierbarkeit der Waldgruppen ausschließlich durch Klimaparameter relativiert. Dies unterstreicht, dass ein Standort ein komplexes Gefüge aus unterschiedlichen, interagierenden Parametern darstellt und auch nur durch eine Betrachtung all dieser Größen hinreichend charakterisiert werden kann. Daher ist es auch nicht möglich, Verbreitungsgrenzen von Waldgesellschaften durch eine alleinige Betrachtung von Klimavariablen vollständig zu erklären. Dennoch konnte an den Mittelwertdifferenzen sowie den überlappenden Bereichen gezeigt werden, dass sich die mittleren Temperaturen besser zur Charakterisierung der Waldgruppen eignen als die Niederschlagssummen. Zudem scheinen auch Parameter, welche die warmen Monate beschreiben (März bis August bei der Temperatur und Mai bis August beim Niederschlag) generell besser zur Beschreibung der Waldgruppen geeignet zu sein, wenngleich im Zuge der Hauptkomponentenanalyse auch eine gewisse Relevanz der Temperatur außerhalb der Vegetationsperiode aufgezeigt werden konnte. Während sich die Waldgruppen hinsichtlich der Monatstemperaturen in tiefen Lagen stärker unterscheiden, unterscheiden sich die monatlichen Niederschlagssummen zwischen den Waldgruppen in hohen Lagen stärker. Die mittlere jährliche Sonneneinstrahlung differiert wahrscheinlich stärker zwischen Waldtypen als zwischen den Waldgruppen. Dies wurde in der gegenständlichen Arbeit allerdings nicht näher untersucht. Hinsichtlich der mittleren Dauer der Trockenperiode unterscheiden sich die Waldgruppen nicht, wenngleich die Komponente Hitze und Trockenheit gut zwischen den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und den Buchenwäldern aufzutrennen vermag. Unterschiede hinsichtlich der Dauer der Borckenkäfersaison und der Dauer der Vegetationsperiode können mit Verbreitungsgrenzen der Baumarten in Zusammenhang gebracht werden, während sich eine Interpretation der Unterschiede in der Dauer der Winterschneedecke und der Anzahl der Frosttage als schwierig erweist. Hitze in Zusammenhang mit Trockenheit scheint die untere Verbreitungsgrenze tiefer gelegener Waldgruppen zu beeinflussen, während die oberen Verbreitungsgrenzen der Waldgruppen sehr wahrscheinlich mit der Temperatur zusammenhängen. Nicht signifikante Unterschiede sowie große Überlappungsbereiche lassen sich auf ähnliche Standortsansprüche der Waldgruppen zurückführen, die sich in einer ähnlichen Baumartenzusammensetzung widerspiegeln. Die geringsten Überlappungen ergeben sich zwischen den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und den Buchenwäldern, woraus eine vergleichsweise gute Charakterisierbarkeit dieser Waldgruppen resultiert. Bei großen Überlappungsbereichen mit den Fichten-Tannenwäldern hinsichtlich vieler Klimaparameter können die subalpinen Fichtenwälder nur schlecht durch Klimaparameter charakterisiert werden. Ähnliches trifft auf die Fichten-Tannen-Buchenwälder zu, die hinsichtlich vieler Klimaparameter stark mit den Fichten-Tannenwäldern überlappen. Mit Ausnahme der submontanen und hochmontanen Höhenstufe stimmen die in der Waldtypisierung

angegebenen Jahresmitteltemperaturen und Jahresniederschläge recht gut mit dem untersuchten Datenmaterial überein.

## 4.2 Klimazukunft

### 4.2.1 Inhaltliche Aspekte

Die Prognosen des auf Südtirol herunterskalierten Szenarios A1B sagen für die Fichten-Tannen-Buchenzone bis zum Ende des Jahrhunderts allgemein ein zunehmend wärmeres und trockeneres Klima mit längeren Vegetationszeiten vorher. Dabei fallen die Veränderungen des aktuellen Klimas zum ersten Zeitschnitt (2026-2055) geringer aus als zum zweiten Zeitschnitt (2071-2100). Dies kann unter anderem durch die unterschiedlichen Zeitintervalle zwischen den verglichenen Perioden bedingt sein. Es fällt auf, dass hinsichtlich des Jahresniederschlages bis zur Periode 2026-2055 kaum Veränderungen zu erwarten sind und die Abnahme erst zwischen den Perioden 2026-2055 und 2071-2100 erfolgt. Generell zeigt die Entwicklung des Niederschlages (zeitlicher Entwicklungstrend sowie jahreszeitliche Verläufe) mehr Variabilität als die Temperaturparameter, die eine konsistentere Entwicklung aufzeigen (gleiche jahreszeitliche Verläufe und konsistenter Aufwärtstrend).

Der prognostizierte Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 3,8 bis 3,9 °C bis zur Periode 2071-2100 stimmt mit den Angaben von Lindner et al. (2010) überein, die für die temperierte kontinentale Zone sowie für die mediterrane Zone bis zum Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur um 3 bis 4 °C anführen. Die starke Zunahme der Temperatur spiegelt sich auch in den geringen Überlappungen des aktuellen Temperaturbereiches (1981-2010) mit dem Temperaturbereich der Periode 2071-2100 wider. Es wurde zwischen diesen beiden Perioden nämlich besonders wenig Überlappung hinsichtlich der meisten Temperaturparameter (Jahresmitteltemperatur, Sommer-, Herbst- und Wintertemperatur, sowie Dauer der Vegetationsperiode) festgestellt. Die stärkste Erwärmung konnte mit 4,8 bis 4,9 °C im Sommer beobachtet werden, was innerhalb des von Lindner et al. (2010) für den mediterranen Raum geschätzten Bereiches von 4 bis 5 °C liegt. Castagneri et al. (2014) konnten einen negativen Effekt erhöhter Sommertemperaturen auf das Wachstum von Fichte auf Standorten mittlerer Wasserversorgung feststellen. Bei Buche konnte dieser Effekt zeitlich verzögert beobachtet werden.

Den prognostizierten erhöhten Wintertemperaturen kommt vor allem in Hinblick auf Frostereignisse eine große Bedeutung zu, zumal der Aufbau der Frosthärte zum einen auch durch kühle Temperaturen induziert wird und zum anderen die Frosthärte durch vorübergehende Wärmeperioden im Winter herabgesetzt werden kann, sodass zu einem späteren Zeitpunkt auftretende Frostereignisse vermehrt zu Schäden führen können (Tesche et al. 1992, Vitasse et al. 2014). Ähnliche Vorgänge sind bei verminderter Ausbildung der Frostresistenz unterhalb einer Schneedecke nach frühzeitiger Schneeschmelze bzw. spät auftretenden Frösten möglich, was in Anbetracht der erhöhten Wintertemperaturen zunehmend problematisch werden kann (Neuner 2014).

Eine beobachtete Zunahme der Jahresmitteltemperatur und der Temperaturen in der Vegetationsperiode im 20. Jahrhundert konnte in der Schweiz und in Westeuropa bereits mit einem Anstieg einerseits der oberen Verbreitungsgrenze (beobachteter Anstieg um 69 bzw. 70 bis 80 m) und andererseits der optimalen Höhenverbreitung (beobachteter Anstieg um 29 m je Jahrzehnt) von Pflanzenarten und speziell auch Baumarten in Verbindung gebracht werden (Lenoir et al. 2008, Lenoir et al. 2009, Vitasse et al. 2012). Dies legt die Vermutung nahe, dass bei unveränderten Temperaturansprüchen der Baumarten auch die prognostizierte Erwärmung einen Anstieg der oberen Verbreitungsgrenzen sowie der optimalen Höhenverbreitung der Baumarten bewirken könnte. Inwiefern sich jedoch möglicherweise der Optimalbereich ganzer Waldgesellschaften nach oben verschiebt, bleibt aufgrund sich neu ergebender zwischenartlicher Interaktionen und nicht eindeutiger Mechanismen der Sekundärsukzession unklar (Lenoir et al. 2009). Zudem sind in

diesbezügliche Betrachtungen auch Überlegungen zu den Ausbreitungsmechanismen und -geschwindigkeiten der Baumarten mit einzubeziehen. Für Weißtanne, Esche, Mehlbeere, Sommerlinde und Edelkastanie wird hinsichtlich der temperaturabhängigen Höhenverbreitung einheitlich eine Ausbreitung in höhere Lagen dokumentiert, während für Rotbuche, Traubeneiche, Bergahorn und Vogelbeere unterschiedliche Angaben vorliegen, wobei für die drei erstgenannten Baumarten meistens jedoch ein Anstieg in der Höhenverbreitung angegeben wird (Lenoir et al. 2008, Lenoir et al. 2009, Vitasse et al. 2012). Lenoir et al. (2009) beobachteten unter Rotbuchen unter anderem Verjüngung von Weißtanne, Bergahorn, Esche, Traubeneiche und Mehlbeere, während unter Weißtanne unter anderem Verjüngung von Rotbuche, Stieleiche und Vogelbeere festgestellt wurde. Dies deutet in den montanen Waldgruppen auf einen möglichen Ersatz der Hauptbaumarten hauptsächlich durch Baumarten tiefer gelegener Höhenstufen hin (in den Fichten-Tannen-Buchenwäldern könnte beispielsweise von einer Zunahme der Rotbuchen-, Stieleichen-, Traubeneichen-, Mehlbeeren-, Eschen-, Vogelbeeren- sowie Weißtannen- und Bergahornanteile ausgegangen werden). In Nordostspanien konnte bereits der Ersatz von Buchenwäldern durch Steineiche beobachtet werden (Lenoir et al. 2009). Dennoch muss erwähnt werden, dass der beobachtete Anstieg der Höhenverbreitungen vielfach geringer ausfällt, als man unter Annahme eines Temperatur-Höhengradienten von 0,6 °C je 100 m zu erwarten hätte. Demnach müsste der Anstieg in der Höhenverbreitung bei 0,6 °C Erwärmung nämlich 100 m betragen. Dies kann einerseits laut Lenoir et al. (2009) durch die lange Regenerationsdauer von Bäumen, andererseits auch durch Hinderungsmechanismen in der Abfolge von Vegetationsgesellschaften erklärt werden, wie sie beispielsweise von Bässler et al. (2013) im Bayrischen Wald durch *Calamagrostis*-Bewuchs festgestellt wurden.

Ein potenzieller Anstieg unterer Verbreitungsgrenzen aufgrund der prognostizierten Erwärmung lässt sich durch erhöhte Evapotranspirationsraten erklären, kann sich aber auch als Folge wärmebedingt stabilerer und dichter Populationen herbivorer Insekten ergeben. Es wird nämlich erwartet, dass die Fitness und damit auch die Abwehrmechanismen von Baumarten im Zuge der Entwicklung veränderter Klimabedingungen zunehmend eingeschränkt werden, während die Insekten an ihrer oberen Verbreitungsgrenze durch geringere Wintermortalität, schnellere Entwicklungsraten und die Entwicklung mehrerer Generationen pro Jahr zunehmend günstige Bedingungen finden (Netherer und Schopf 2010). Zudem vermögen Insekten durch vergleichsweise kurze Regenerationszyklen ihre Verbreitung aufgrund veränderter Umweltbedingungen sehr rasch auszudehnen (Bässler et al. 2013). Dennoch herrscht bezüglich solcher negativen Auswirkungen ein hohes Maß an Unsicherheit, zumal die zeitliche Koinzidenz phänologischer Stadien, die Entwicklung von Antagonistenpopulationen oder eine Veränderung der Nahrungsqualität in die Betrachtung mit einzubeziehen sind. Hinsichtlich *Ips typographus*, dessen bisherige obere Verbreitungsgrenze mit etwa 1000 m angegeben wird, sind jedenfalls Epidemien größerer räumlicher und zeitlicher Ausdehnung zu erwarten und die Prädisposition von Nadelwäldern auch gegenüber anderen Borkenkäferarten ist bereits angestiegen. Im Zuge der Erwärmung kann also davon ausgegangen werden, dass vor allem in den Fichten-Tannen-Buchenwäldern der Anteil an Nadelbaumarten möglicherweise stark abnehmen wird (Netherer und Schopf 2010).

Die prognostizierte Verlängerung der Vegetationsperiode bis 2026-2055 um ca. 2 Wochen und bis 2071-2100 um etwa 6 Wochen lässt darauf schließen, dass es wahrscheinlich zu einer Verschiebung der phänologischen Phasen kommen wird (z.B. früherer Blattaustrieb oder Bildung der Maitriebe im Frühjahr), wie sie in Europa aufgrund der Erwärmung bereits für viele Pflanzen, darunter auch Baumarten festgestellt worden sind (Menzel 2000). Zumal sich hinsichtlich des Austriebsverhaltens in den Baumarten genetische Varianten ausgebildet haben, können sich hierbei auch Konkurrenzvorteile für früh austreibende Baumarten ergeben (Kozłowski et al. 1991, Tesche 1992, Vitasse 2014). Die Änderungen der Phänologie können zudem auch das Insektenbefallsrisiko aufgrund der zeitlichen Koinzidenz von Entwicklungsstadien zwischen Bäumen und Insekten verändern. Zudem sind für alle Baumarten aufgrund der Verlängerung des Produktionszeitraumes höhere Zuwächse zu vermuten.

Die großen Streuungen des Jahresniederschlags in den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und Buchenwäldern sowie der Sommerniederschläge in allen Waldgruppen innerhalb der Periode 2071-2100 stimmen mit den vielfach erwähnten Unsicherheiten zur Niederschlagsvorhersage in den Gebirgsregionen überein (Lindner et al. 2010, ZAMG et al. 2015a). Eine Abnahme des Sommerniederschlags und Zunahme des Winterniederschlags, wie von Lindner et al. (2010) für die temperierte kontinentale Zone und die mediterrane Zone für das Ende des 21. Jahrhunderts beschrieben, konnte für den Zeitraum 2071-2100 in allen Waldgruppen festgestellt werden. Dabei stimmt vor allem die Abnahme des Sommerniederschlags im Bereich von ca. 45 bis 50 % in den Mannaeschen-Hopfenbuchen-, Buchen- und Fichten-Tannen-Buchenwäldern mit den Angaben von Lindner et al. (2010) zur mediterranen Zone überein. Diese starke Abnahme der Sommerniederschläge bis zur Jahrhundertwende wurde laut ZAMG et al. (2015a) bereits in mehreren Arbeiten zur Klimaentwicklung im Alpenraum sowie in Mitteleuropa aufgezeigt und kann mit einer Zunahme von Hochdruckwetterlagen begründet werden.

Die aktuelle Niederschlagsverteilung ändert sich laut Klimaszenario in der Periode 2026 bis 2055 kaum, wobei es jedoch zu einer Zunahme des Frühjahrsniederschlags und einer Abnahme des Sommerniederschlags kommt. Zumal die Zunahme stärker als die Abnahme ausfällt, resultiert in der Vegetationszeit eine leicht erhöhte Niederschlagssumme, womit die aktuelle Baumartenzusammensetzung in den Waldgruppen wohl kaum beeinflusst werden dürfte. Dennoch ist in Anbetracht der Temperaturzunahme eine Erhöhung der Evapotranspirationsraten zu erwarten, was die erhöhte Wasserverfügbarkeit in der Vegetationsperiode relativiert. Zudem wurde auf Standorten mittlerer Wasserversorgung besonders bei Tanne eine positive Beziehung zwischen Sommerniederschlag und Wachstum festgestellt (Castagneri et al. 2014). Die geringen Unterschiede zwischen der aktuellen Periode und der Periode 2026-2055 hinsichtlich Niederschlag spiegeln sich in der hohen Überlappung der beiden Perioden hinsichtlich des Jahresniederschlags und in den höher gelegenen Waldgruppen auch hinsichtlich des Sommerniederschlags wider.

Eine deutliche Änderung der Niederschlagsverhältnisse ist erst in der Periode 2071-2100 zu erwarten, wie an den überlappenden Klimabereichen beobachtet werden kann: Der aktuelle Klimabereich der Waldgruppen überlappt nur mehr hinsichtlich des Frühjahrsniederschlags zu mehr als 50 % mit jenem der Periode 2071-2100, in den subalpinen Fichtenwäldern auch hinsichtlich des Jahresniederschlags. Auch die Mittelwertdifferenzen fallen hinsichtlich des Frühjahrsniederschlags gering aus. In den subalpinen Fichten- und den Fichten-Tannenwäldern gibt es eine etwas größere Überlappung auch noch hinsichtlich des Sommerniederschlags. Diese hohe Überlappung der Frühjahrsniederschläge und zum Teil der Sommerniederschläge lässt daher darauf schließen, dass die Niederschlagsversorgung vor allem in den höher gelegenen Waldgruppen zumindest über einen Teil der Vegetationsperiode noch ausreichend für die aktuelle Baumartenzusammensetzung ist. Zumal das Wachstum in der Vegetationsperiode stattfindet, sind der Frühjahrs- und der Sommerniederschlag diesbezüglich von hoher Bedeutung, wie Castagneri et al. (2014) insbesondere für Tanne nachweisen konnten.

Während das Niederschlagsmaximum in der Periode 2071-2100 bei nahezu allen Waldgruppen im Frühjahr liegt, ist es in den subalpinen Fichtenwäldern im Sommer festzustellen. Das Niederschlagsminimum liegt in Buchen- und Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern im Sommer, in den übrigen Waldgruppen im Winter. Diese Tatsache weist auf stark veränderte Wuchsbedingungen in den Mannaeschen-Hopfenbuchen- und Buchenwäldern in der Periode 2071-2100 hin. Vor allem die Buche scheint hinsichtlich einer Änderung der Niederschlagsverteilung empfindlich zu sein (Amt für Forstplanung 2010a). Die Änderung der Wuchsbedingungen wird zudem durch das Ausmaß der Rückgänge im Sommerniederschlag vor allem in den tiefer gelegenen Mannaeschen-Hopfenbuchen-, Buchen- und Fichten-Tannen-Buchenwäldern unterstrichen, welche mit 130 bis 140 mm nahezu den gesamten Rückgang des Jahresniederschlags ausmachen (dieser beträgt in diesen Waldgruppen etwa 120 bis 135 mm). Dennoch weist die große Streuung der Sommerniederschläge in dieser Periode auf große Unsicherheiten bezüglich dieser Aussagen hin. Zudem sei noch auf eine möglicherweise erhöhte Wassernutzungseffizienz

aufgrund einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Verfügbarkeit im Zuge des globalen Wandels hingewiesen, welche den Effekten einer verminderten Wasserverfügbarkeit entgegenwirken könnte (Handler s.a., Lindner et al. 2010, Lasch-Born et al. 2015).

In Zusammenhang mit der prognostizierten Temperaturerhöhung kann es aufgrund erhöhter Evapotranspirationsraten jedoch auch zu einer verstärkten Auswirkung der Niederschlagsverknappung kommen (Lenoir et al. 2009, Castagneri et al. 2014) und unter Umständen könnte sogar Trockenheit zum Problem werden. Die Reaktion der Baumarten Fichte, Tanne und Buche auf Trockenheit ist wissenschaftlich bereits eingehend untersucht worden. Zang et al. (2014) konnten zeigen, dass die anisohydrische Rotbuche (Schwankung des Wasserpotenzials bei Wassermangel) eine höhere Resistenz gegenüber Trockenheit aufweist als die isohydrische Fichte (Aufrechterhaltung des Wasserpotenzials bei Wassermangel durch verschiedene Regulierungsmechanismen), während Weißtanne aufgrund einer hohen Resistenz (kaum Einschränkungen des Zuwachses bei Trockenheit) und Resilienz (vergleichbare Zuwächse vor und nach einem Trockenereignis) wenig vulnerabel gegenüber Trockenheit zu sein scheint. Umgekehrt weist Rotbuche aufgrund der bei Trockenheit noch lange aufrecht erhaltenen Transpiration eine geringere Erholungskapazität auf. Entlang eines von warm-trocken bis kühl-feucht verlaufenden Gradienten nimmt die Resilienz von Fichte zu, während sich jene von Buche und Tanne nicht ändert. Dies deutet darauf hin, dass Fichte bei Trockenheit nur auf ausreichend wasserversorgten Standorten konkurrenzfähig gegenüber der Buche ist. Unterschiedliche Reaktionen auf Trockenheit sind bei Fichte und Tanne auch auf Ebene von Populationen bekannt (Zang et al. 2014, George et al. 2015). Frank et al. (2017) hingegen dokumentieren für die Schweiz bei Fichte eine genetische Ausdifferenzierung entlang eines Temperaturgradienten, während bei Buche und Tanne eine solche entlang eines Niederschlags- und Temperaturgradienten vorliegt. Diese Differenzierung ist bei Tanne jedoch nur schwach ausgeprägt, weshalb auch die Reaktion auf Trockenereignisse variabel ist (George et al. 2015, Frank et al. 2017). Daher kann angenommen werden, dass Tanne aufgrund einer geringen Spezialisierung auf eine bestimmte Strategie im Umgang mit Trockenheit wesentlich dynamischer reagiert als andere Baumarten. Für Buche birgt die prognostizierte Verknappung des Niederschlages hingegen ein hohes Risiko schlechter genetischer Anpassung, zumal die Populationen an lokale Bedingungen angepasst sind, während ein solches Risiko bei Fichte eher aus der Veränderung des Temperaturregimes resultiert (Frank et al. 2017). Dies weist darauf hin, dass die Wahl geeigneter Provenienzen in Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel wohl eine zentrale Rolle spielen dürfte.

Die anfängliche Verschiebung der Klimahüllen ausschließlich durch Temperaturveränderungen und die erst später folgende Verschiebung der Hüllen durch veränderte Jahresniederschläge deckt sich mit vorherigen Betrachtungen, wonach sich der Jahresniederschlag vorerst nicht ändert. In den Mannaeschen-Hopfenbuchenwäldern scheint die Fläche der hinsichtlich Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag geeigneten Standorte bereits bis zur Periode 2026-2055 stark zurückzugehen, während diese Entwicklung in den Buchenwäldern erst in der Periode 2071-2100 zu beobachten ist. In allen anderen Waldgruppen ist der Flächenrückgang derjenigen Standorte, die noch innerhalb des aktuellen Klimabereiches liegen, zwischen allen Zeithorizonten ähnlich ausgeprägt.

Hinsichtlich der kartografischen Darstellung der potenziellen Einwirkung von Klimaveränderungen auf die Waldgruppen konnte eine rote Einfärbung vor allem der tieferen Bereiche der Waldgruppen festgestellt werden, während höhere Lagen noch am ehesten grün eingefärbt sind. In den Waldgruppen mit höheren Tannen-Anteilen (Fichten-Tannen-Buchen- und Fichten-Tannenwälder) ist auch ein Einfluss der Exposition feststellbar (es sind hier vor allem nordwestlich bis nordöstlich exponierte Zonen von raschen und stärkeren Klimaänderungen betroffen, während südlich exponierte Hänge zum Teil von keinen Änderungen betroffen sind). Diese Waldgruppen weisen auch den höchsten Anteil an grünen Zonen auf. Zumal die zeitliche Veränderung der für die Erstellung der Zonen verwendeten Parameter (Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag) im gesamten Bereich ähnlich ausfällt, ist zu vermuten, dass die Zugehörigkeit einer Fläche zu einer Einwirkungszone (grün, gelb, orange oder grün) hauptsächlich durch die aktuelle Ausprägung dieser

Klimaparameter bedingt wird (Punkte, die in der Klimahülle der Periode 1981-2010, bereits am warmen und trockenen Ende liegen, kommen bei der prognostizierten Erwärmung und Verknappung des Niederschlages eher außerhalb des aktuellen Klimabereiches zu liegen). Während sich die Jahresmitteltemperatur und der Jahresniederschlag mit der Meereshöhe ändern, konnte jedoch keine Abhängigkeit dieser Parameter von der Exposition festgestellt werden. In tieferen Lagen ist die Temperatur aktuell bereits vergleichsweise hoch und die Niederschlagssumme vergleichsweise gering, weshalb diese Bereiche im Zuge der Erwärmung und Verknappung des Niederschlages als erste außerhalb des aktuellen Klimabereiches zu liegen kommen. Die Abgrenzung der Zonen mit unterschiedlicher potenzieller Einwirkung von Klimaveränderungen dient als Grundlage für eine integrale Betrachtung, im Zuge welcher auf die Vulnerabilität der Waldgruppen oder von Beständen geschlossen werden könnte. Hierzu müsste jedoch auch die Sensibilität der Waldgruppen oder Bestände gegenüber veränderten Klimabedingungen und deren Anpassungsfähigkeit an ein verändertes Klima näher untersucht werden. Auf keinen Fall soll jedoch die potenzielle Einwirkung mit einer möglichen Vulnerabilität verwechselt werden.

#### 4.2.2 Kritische Anmerkungen

Zumal für die Beschreibung des potenziellen zukünftigen Klimas aufgrund der Verfügbarkeit lediglich ein Klimaszenario herangezogen wurde, müssen die diesbezüglichen Aussagen mit großer Vorsicht genossen werden. Die Berechnungen der Klimaentwicklung bauen nämlich lediglich auf dem sozioökonomischen Szenario A1B auf, das zwar als relativ realistisch eingestuft wird, aber dennoch rein hypothetischer Natur ist. Daher steigt auch die Unsicherheit der Vorhersagen mit zunehmender zeitlicher Entwicklung. Aufgrund der heterogenen Topografie gilt dies vor allem für die Niederschlagsparameter, deren prognostizierte Änderung geringer ausfällt als die Variabilität zwischen einzelnen Jahren. Für eine realistische Betrachtung müsste zumindest die Spannweite möglicher zukünftiger Entwicklungen angegeben werden, die zwar einen großen Bereich abdeckt, dafür aber dem unsicheren Charakter der Prognosen Rechnung trägt (siehe dazu Abbildung 3 im Kapitel Material und Methoden).

Aufgrund nicht in die Betrachtung mit einbezogener Zusatzdaten (z.B. Bodendaten oder Geologie) und der Betrachtung auf Gruppen- und nicht Typenebene können potenzielle Auswirkungen der Klimaänderungen auf den heutigen Waldzustand (z.B. Baumartenzusammensetzung, Bestandesstruktur oder Wuchsleistung) nicht beurteilt werden. Daher konnte in der kartografischen Darstellung lediglich die potenzielle Einwirkung des zukünftigen Klimas, nicht jedoch die Vulnerabilität behandelt werden. Über potenzielle Auswirkungen der Klimaveränderungen kann somit nur gemutmaßt werden. Zudem scheint mangels verfügbarer Referenzen eine Betrachtung auf der Ebene von Baumarten sinnvoller zu sein als auf der Ebene von Waldgesellschaften. Zur Ableitung waldbaulicher Aussagen ist eine integrale Betrachtung jedoch unerlässlich, wozu sich beispielsweise die Methoden der Waldökosystemmodellierung anbieten (siehe z.B. Monserud und Sterba 1996, Seidl et al. 2005, Seidl et al. 2012, Blattert et al. 2014, Thurnher et al. 2017).

Aufgrund der zweidimensionalen Betrachtung sowie der Beschränkung auf zwei Variablen ergibt sich bei Betrachtung der Klimahüllen zum Teil ein anderes Bild als aus der gesonderten Betrachtung aller Variablen resultiert. So überlagern die Fichten-Tannen- und subalpinen Fichtenwälder generell hinsichtlich aller Parameter zwischen der Periode 2026-2055 und der aktuellen Periode, was eine vorerst schwächere Veränderung der Standorte in höheren Lagen erwarten lässt. Jedoch stimmt dies beispielsweise bei den subalpinen Fichtenwäldern nicht mit der zweidimensionalen Betrachtung der ausgewählten Parameter überein, wonach der Klimabereich 2026-2055 nur mehr mäßig mit dem aktuellen Klimabereich übereinstimmt. Dies liegt an der Temperaturveränderung, welche die Hülle bereits 2026-2055 aus dem aktuellen Bereich verschiebt.

### 4.2.3 Zusammenfassung

Laut den Klimaentwicklungen nach dem IPCC-Szenario A1B ist bis zum Ende des Jahrhunderts eine mehr oder weniger kontinuierliche Veränderung der Temperatur zu erwarten, während eine Änderung des Niederschlages vor allem zwischen den Perioden 2026-2055 und 2071-2100 prognostiziert wird. Diese Aussagen sind aufgrund des Prognosecharakters jedoch mit Unsicherheiten behaftet.

Durch die starke Temperaturerhöhung bis zur Periode 2071-2100 kann es in allen Waldgruppen zu einer Verschiebung der oberen und unteren Verbreitungsgrenzen sowie der optimalen Höhenverbreitung der Baumarten kommen. Dabei kann sich die Temperaturänderung auch über indirekte Effekte (z.B. erhöhte Transpirationsraten, stabilere und dichtere Insektenpopulationen) auswirken. Die prognostizierte Erhöhung der Sommertemperatur wirkt sich vermutlich schlecht auf das Wachstum der Fichte und der Buche aus. Die Verlängerung der Vegetationsperiode kann zu erhöhten Zuwächsen führen und kann zudem eine zeitliche Verschiebung der Phänologien der Bäume bewirken, wodurch sich die zeitliche Koinzidenz bestimmter Entwicklungsstadien zwischen Bäumen und herbivoren Insekten auflösen könnte. Erhöhte Wintertemperaturen können zu einer verminderten Ausbildung der Frostresistenz führen bzw. durch ein zeitiges Abschmelzen der Schneedecke im Frühjahr zu vermehrten Frostschäden führen. Für Fichte ergibt sich durch die Erwärmung aufgrund genetischer Anpassungen an spezielle Temperaturbedingungen möglicherweise ein hohes Risiko schlechter genetischer Anpassung.

In höheren Waldgruppen (Fichten-Tannen- und subalpine Fichtenwälder) sind die Überlappungen hinsichtlich des Niederschlages zwischen der Periode 2071-2100 und der aktuellen Periode etwas häufiger, während für die tiefer gelegenen Waldgruppen (Mannaeschen-Hopfenbuchen-, Buchen- und Fichten-Tannen-Buchenwälder) eine starke Abnahme der Sommerniederschläge prognostiziert wird, die, beispielsweise bei Tanne, von hoher Bedeutung für das Wachstum sind. Auch bei den geringen Veränderungen des Niederschlages zwischen der aktuellen Periode und der Periode 2026-2055 kann es durch erhöhte Evapotranspirationsraten infolge der Temperaturerhöhung zu Verknappungen in der Wasserversorgung kommen. Solche Trockenereignisse wirken sich schlecht auf das Wachstum der Fichte aus, während Tanne aufgrund einer hohen genetischen Vielfalt innerhalb der Populationen dynamisch reagiert. Das Wachstum der Buche unterliegt aufgrund genetischer Anpassungen an die Wasserversorgung durch die Verknappung des Niederschlages einem hohen Risiko.

Die potenzielle Einwirkung der Klimaveränderungen ist in allen Waldgruppen von der Höhe und in Waldgruppen mit höheren Tannen-Anteilen auch von der Exposition abhängig. Somit befinden sich in allen Waldgruppen vorwiegend die tiefer gelegenen Standorte bereits 2026-2055 außerhalb des von Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur beschriebenen Klimabereiches, während dies in den Wäldern mit Tannenbeteiligung auch auf nordwestlich bis nordöstlich exponierte Zonen zutrifft.

## 5 Waldbauliche Schlussfolgerungen am Beispiel des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere

Anhand der sich aus den Klimaänderungen ergebenden waldbaulichen Herausforderungen in Hinblick auf eine fortwährende Funktionserfüllung sollen mögliche waldbauliche Handlungsoptionen aufgezeigt und veranschaulicht werden. Diese waldbaulichen Empfehlungen beziehen sich auf den mittelmontanen Silikat- Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere, der aufgrund seines recht häufigen Auftretens in der Wuchszone sowie des geringen Einflusses des Bodens auf die Wasserversorgung (mittel- bis flachgründige Böden, sehr hoher bis hoher Skelettgehalt, leichte bis mittlere Bodenart, häufiges Vorkommen auf Oberhängen, Rücken und Hangversteilungen) und der damit vergleichsweise direkten Abhängigkeit von der Niederschlagsversorgung ausgewählt wurde.

### 5.1 Charakterisierung des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere

Die Hauptvorkommen dieses mittelmontanen Waldtyps beschränken sich auf Oberhänge, Hangversteilungen und Rücken mit Expositionen zwischen West-Nordwest und Ost sowie Hangneigungen zwischen 60 und 100 %, während Nebenvorkommen auf meist flacheren Mittelhängen östlicher bis west-nordwestlicher Exposition zu finden sind. Die meist mittelgründigen (31-60 cm Mächtigkeit) und seltener flachgründigen (15 bis 30 cm Mächtigkeit) Böden mit meist sehr hohem (40 bis 80 %) und mitunter auch hohem (20 bis 40 %) Skelettgehalt weisen vorwiegend eine leichte Bodenart auf, woraus ein hauptsächlich mäßig frischer, in den Nebenvorkommen auch frischer Standort resultiert. Es dominieren podsolierte Braunerden und an Steilhängen auch verbrauchte Ranker mit typischem oder rohhumusartigem Moder, seltener auch Rohhumus, weshalb oligotrophe Verhältnisse vorherrschen. Als Substrat können saure und intermediäre Silikatgesteine sowie silikatische Lockersedimente genannt werden (Amt für Forstplanung 2010a).

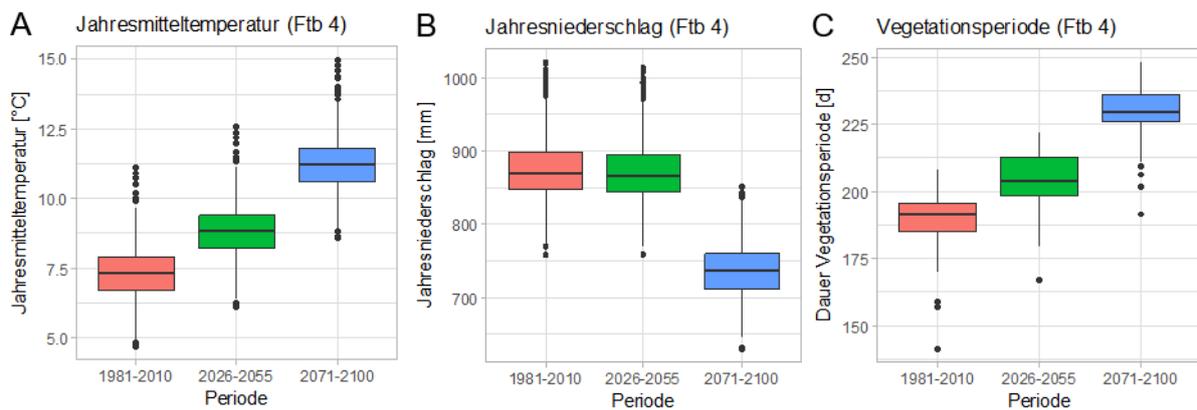
Dieser mäßig wüchsige Mischwald mit lockerem bis geschossenem Schlussgrad setzt sich meist aus vorwüchsigen Fichten und Tannen mit Buchen in der Unterschicht zusammen, woraus meist mehrschichtige Bestände mit überwiegender Einzelbaumstruktur resultieren. Lärche und Kiefer sind oft beigemischt, häufig trifft man auch auf Vogelbeere. Während Fichte und Buche eine gute Wüchsigkeit ausweisen, ist jene von Tanne und Lärche nur als mäßig zu bezeichnen. Die Qualitäten der Nadelhölzer sind nur mäßig, die Bestände durch Streunutzung und Waldweide oft degradiert. Die Waldfunktionen sind Wirtschaftswald mit Schutzfunktion gegen Erosion und Steinschlag, teilweise auch Erholungsfunktion (Amt für Forstplanung 2010a). Ein Auszug aus der Waldtypisierung mit einer detaillierten Beschreibung des Waldtyps ist in Anhang F beigefügt.

### 5.2 Aktuelles und zukünftiges Klima im Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere

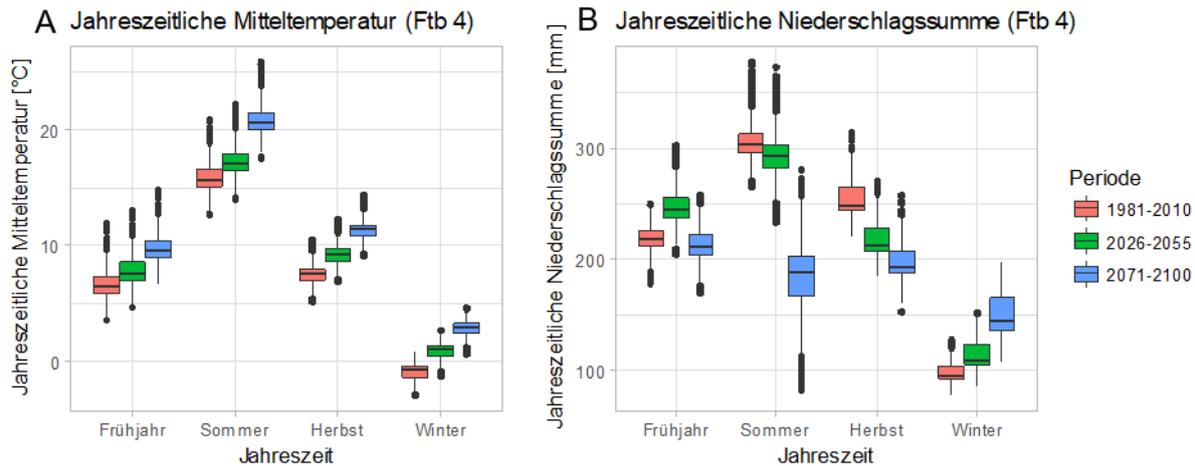
Die extrahierten Klimadaten des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes stimmen recht gut mit den extrahierten Daten der Fichten-Tannen-Buchenwälder überein. Lediglich die Niederschläge fallen innerhalb des Waldtyps geringfügig knapper als in der Waldgruppe aus und die Frühjahrsniederschläge sinken bis zur Periode 2071-2100 weniger stark, während die Winterniederschläge bis zur Periode 2071-2100 etwas stärker ansteigen als in der Waldgruppe. Auch die saisonalen Verteilungen sind identisch mit jenen der Waldgruppe (1981-2010 und 2026-2055 Niederschlagsmaximum im Sommer und Minimum im Winter, 2071-2100 Niederschlagsmaximum im Frühjahr und Minimum im Winter); die Sommerniederschläge weisen mit Werten zwischen ca. 100 und 225 mm wie in der Waldgruppe eine große Streuung auf. Bis zur Periode 2071-2100 wird es insgesamt wärmer und trockener. Detailliertere Einblicke liefern Tabelle 17, Abbildung 17 und Abbildung 18.

**Tabelle 17: Übersicht über die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), 5. Perzentilen (5%) und 95. Perzentilen (95%) der Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Perioden im Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere (links) und die Differenzen der Mittelwerte zwischen den zukünftigen (2026-2055 und 2071-2100) und der aktuellen (1981-2010) Periode (rechts). Es wurde jeweils der Mittelwert einer zukünftigen Periode vom Mittelwert der aktuellen Periode subtrahiert.**

Parameter	1981-2010			2026-2055			2071-2100			1981-2010 ↔ 2026-2055	1981-2010 ↔ 2071-2100
	5%	$\bar{x}$	95%	5%	$\bar{x}$	95%	5%	$\bar{x}$	95%		
$t$ [°C]	5,9	7,3	8,6	7,3	8,8	10,1	9,7	11,2	12,5	1,5	3,9
$tmam$ [°C]	4,9	6,7	8,5	6,1	7,8	9,7	8,0	9,7	11,5	1,1	3,0
$tja$ [°C]	14,1	15,8	17,6	15,3	17,1	18,8	18,9	20,7	22,5	1,3	4,9
$tson$ [°C]	6,3	7,5	8,7	7,9	9,2	10,3	10,1	11,3	12,5	1,6	3,8
$tdjf$ [°C]	-1,9	-0,9	-0,1	-0,1	1,0	1,9	1,8	2,9	3,7	1,8	3,7
$rr$ [mm]	816	876	954	812	872	949	680	738	815	-4	-139
$rrmam$ [mm]	200	219	239	228	249	287	192	214	244	31	-5
$rrja$ [mm]	282	306	338	250	291	328	97	178	226	-14	-128
$rrson$ [mm]	232	254	288	196	218	249	178	197	231	-36	-57
$rrdjf$ [mm]	86	97	113	100	114	140	126	149	180	16	51
$veg5$ [d]	170	190	204	186	205	219	211	231	244	15	40



**Abbildung 17: Ausprägungen von Jahresmitteltemperatur (A), Jahresniederschlag (B) und Vegetationsperiode (C) in den unterschiedlichen Perioden innerhalb des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere.**



**Abbildung 18: Jahreszeitliche Verteilung der Temperaturen (A) und der Niederschläge (B) innerhalb des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere.**

### 5.3 Perspektiven für den Waldbau im Klimawandel

In der forstlichen Fachliteratur gibt es eine rege Auseinandersetzung mit möglichen Anpassungsstrategien des Waldbaus an den Klimawandel. Allen Empfehlungen gemeinsam ist neben dem Aufzeigen ökologischer Anpassungsmöglichkeiten eine Integration sozioökonomischer Aspekte. Während im Rahmen der ökologischen Betrachtungen vor allem die Erhaltung und Steigerung der Anpassungsfähigkeit (sogenannte „adaptive capacity“) der Waldökosysteme an veränderte Umweltbedingungen betont wird, sind die sozioökonomischen Ausführungen auf eine anpassungsfähige, dynamische Waldbewirtschaftung (sogenanntes „adaptive management“) ausgerichtet. Darunter ist eine ständige Verbesserung von Planung, Management und Monitoring mit entsprechenden Rückkoppelungsmechanismen zu verstehen. Diese dynamischen Ansätze sind in Anbetracht einer ungewissen Zukunft sowie begrenzter Informationen über Ökosystemprozesse zu einer unverzichtbaren Grundlage des modernen Waldbaus geworden (Lindner et al. 2010, Brang et al. 2013).

Vielfach wird man sich daher bei der Waldbewirtschaftung von der Erhaltung bestimmter Waldbilder (z.B. Strukturen oder Baumartenzusammensetzungen) verabschieden und die fortwährende Erbringung gesellschaftlich gefragter Ökosystemleistungen in den Vordergrund stellen müssen (Seidl et al. 2016). Es scheint daher von Vorteil zu sein, möglichst viele Akteure (am Wald Interessierte, private Waldbewirtschafter, Waldbesitzer u.s.w.) in den Prozess der waldbaulichen Zielformulierung mit einzubeziehen, um einerseits einem möglichen gesellschaftlichen Wandel der geforderten Ökosystemleistungen durch die Formulierung realistischer Ziele und andererseits einer machbaren und möglichst vollständigen Realisierung dieser Ziele Rechnung zu tragen. Weit gefasste Ziele ermöglichen zudem eine Erfüllung mehrerer alternativer Ökosystemleistungen, die aufgrund unerwarteter Entwicklungen (z.B. in Hinblick auf die sozioökonomischen Rahmenbedingungen) plötzlich relevant und realistisch werden können. Durch eine Vielfalt an Meinungen und Interessen am Wald (und daher auch der geforderten Ökosystemleistungen) und die entsprechend diversen waldbaulichen Handlungsoptionen kann auch eine gewisse Risikostreuung in Hinblick auf den Klimawandel erreicht werden (Lindner et al. 2010, Seidl et al. 2016). Freilich bedarf es dazu besonders in Gebieten mit vorwiegender Kleinwaldstruktur und mit Wäldern tendenziell geringer wirtschaftlicher Bedeutung einer Motivation, Koordination und Unterstützung durch öffentliche Verwaltungsorganisationen (Lindner et al. 2010). Hierzu eignen sich beispielsweise Maßnahmen wie die Aufklärung und Ausbildung von Waldbesitzern und des Forstpersonals, das Einrichten eines Monitoringsystems, um die Wirksamkeit waldbaulicher Varianten beurteilen zu können, das Anbieten von Versicherungen, um das Risiko negativer

Effekte einer Klimaveränderung zu kollektivieren oder die Pflege und der Ausbau des Forststraßennetzes, um im Falle von Störungen wie Windwurfereignissen rasch reagieren zu können (Lindner et al. 2010, Brang et al. 2013, Seidl et al. 2016). Auf betrieblicher Ebene könnte zudem eine Ausdehnung von Bewirtschaftungseinheiten angedacht werden, um verschiedene Bewirtschaftungsmethoden räumlich besser zu verteilen und das Risiko somit besser streuen zu können (Seidl et al. 2016). Auch vor experimentellen Maßnahmen, begleitet von Überwachungsmaßnahmen und der Kommunikation der Erfahrungen soll nicht zurückgeschreckt werden (Brang et al. 2013, Seidl et al. 2016).

Die Erhaltung und Steigerung der Anpassungsfähigkeit der Wälder an veränderte Klimabedingungen zielt einerseits auf die Förderung der Fähigkeit von Waldökosystemen ab, sich hinsichtlich Struktur und Baumartenzusammensetzung ohne Bestandeszusammenbruch laufend anzupassen (Resistenz) und andererseits auf die Förderung der Fähigkeit, sich nach Störungen selbständig wiederaufzubauen (Resilienz). Diesbezügliche Maßnahmen können auf wenige, zentrale Thesen reduziert werden, nämlich die Erhöhung bzw. Wahrung der Baumartenvielfalt, die Erhöhung der genetischen Diversität sowie der strukturellen Vielfalt und die Reduktion der Umtriebszeiten, wobei die erstgenannten Optionen vielversprechender zu sein scheinen. In Anbetracht der prognostizierten raschen Klimaveränderungen ist es unwahrscheinlich, dass diese Ziele durch eine sogenannte „passive Bewirtschaftung“ realisierbar sind, zumal dadurch auch konkurrenzstarke invasive Arten begünstigt werden können (Brang et al. 2013).

Eine hohe Baumartenvielfalt bewirkt eine hohe Resistenz des Waldes gegenüber Veränderungen und Störungen sowie eine hohe Resilienz nach Störungen. Diese Vielfalt kann einerseits durch die Umsetzung unterschiedlicher Hiebsverfahren mit der Ausbildung von Bestandeslücken variabler Größe (Nischenheterogenität), andererseits durch die Pflanzung von Baumarten aus anderen Höhenstufen oder Regionen (z.B. fremdländische Baumarten) bzw. die Unterstützung bereits vorhandener Baumarten gefördert werden. In den Alpen scheint eine natürliche Migration im Zuge der Klimaerwärmung aufgrund der ausgeprägten Höhengradienten und der ausgedehnten Waldbedeckung vielversprechend zu sein, vor allem in den Talböden und aufgrund der langsamen Regeneration von Baumarten kann jedoch eine anthropogen geförderte Migration (sogenannte „assisted migration“) notwendig sein. Das Konzept der Migration von Baumarten im Zuge von Klimaveränderungen setzt voraus, dass die ökologische Nische der Baumarten unverändert bleibt. Die Anreicherung mit Baumarten, die an ein zukünftiges Klima angepasst sind, kann jedoch auch mit aufwändigen Pflegemaßnahmen verbunden sein, zumal sie unter den aktuellen Klimabedingungen eine verminderte Konkurrenzkraft besitzen (Lindner et al. 2010, Brang et al. 2013, Seidl et al. 2016, Frank et al. 2017).

Die Erhöhung der genetischen Vielfalt kann einerseits durch lange Verjüngungszeiträume und die dadurch erreichte Beteiligung vieler Eltern sowie die natürliche Selektion aus stammzahlreichen und genetisch diversen Verjüngungen erzielt werden. Andererseits, bei erwarteter schlechter genetischer Anpassung der vorhandenen Herkünfte bzw. geringer Ausbreitungsdistanzen der Pollen oder Samen, kann die künstliche Anreicherung mit anderen Provenienzen vorteilhaft sein (Lindner et al. 2010, Brang et al. 2013, Frank et al. 2017). Die künstliche Anreicherung von Provenienzen, die gut an ein prognostiziertes zukünftiges Klima angepasst sind, kann den Genfluss über größere Distanzen erleichtern. Dies erfordert jedoch noch eingehende Untersuchungen auf dem Gebiet der Provenienzforschung und müsste zudem bei der Saatguternte und im Pflanzgartenwesen verstärkt Berücksichtigung finden (Brang et al. 2013, Frank et al. 2017). Laut neuen Erkenntnissen können hierbei auch epigenetische Effekte relevant sein (Konopkova et al. 2017).

Eine hohe Strukturvielfalt kann durch ungleichaltrige Bestände bewirkt werden, was durch kleinflächige Hiebe oder Zielstärkennutzung erreicht werden kann. Durch das Vorhandensein unterschiedlicher Altersklassen resultiert eine Risikostreuung hinsichtlich Windwurf und Insektenbefall sowie eine heterogene vertikale Struktur, die vor allem in Schutzwäldern von Bedeutung sein kann (Brang et al. 2013). Eine gruppenweise Entnahme von Bäume im Zuge

der Erntemaßnahmen ist laut Brang et al. (2014) auch mit den anderen Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel gut vereinbar. Durch kleinflächige Verjüngungseingriffe wird jedoch die Rauigkeit des Kronendaches erhöht, was die Prädisposition gegenüber Windwurf erhöht. Daher wird in Zusammenhang mit der Anpassung der Waldbewirtschaftung an den Klimawandel als mögliche Option auch das Herabsetzen der Umtriebszeit genannt (Brang et al. 2013). Zudem kann laut Seidl et al. (2016) auch eine Risikostreuung auf Landschaftsebene bewirkt werden, indem durch unterschiedliche Eingriffsstärken im Zuge der Verjüngungsmaßnahmen unterschiedliche Strukturen geschaffen werden.

#### **5.4 Perspektiven für die Hauptbaumarten des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere**

Hohe Sommertemperaturen wirken sich schlecht auf das Wachstum von Fichte aus und es kann im Zuge der prognostizierten Erwärmung auch zu einer schlechten genetischen Anpassung der Fichtenpopulationen kommen. Auch geringe Niederschläge können problematisch für die Fichte werden, zumal Fichte aufgrund der langzeitigen Auswirkungen und Wurzelveränderungen als wenig trockenresistent gilt. In warm-trockenen Klimaten weist die Fichte aufgrund einer verminderten Resilienz gegenüber Trockenheit auch eine eingeschränkte Konkurrenzkraft gegenüber Buche auf (Castagneri et al. 2014, Zang et al. 2014, Frank et al. 2017). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Fichte aufgrund verminderter Niederschläge und erhöhter Temperaturen vor allem für tiefere Lagen zunehmend ungeeignet sein wird (Lindner et al. 2010). Zumal die mittelmontane Höhenstufe als untere Verbreitungsgrenze der natürlichen Fichtenvorkommen gilt, kann also vermutet werden, dass sich ihr Verbreitungsgebiet vor allem aufgrund der erhöhten Temperaturen (Jahresmitteltemperatur von 11,2 °C) und der damit einhergehenden erhöhten Transpirationsraten sowie des damit verbundenen erhöhten Insektenbefallsrisikos weiter nach oben verschieben wird. Diese Effekte relativieren auch die noch ausreichende Niederschlagsversorgung mit im Mittel 740 mm.

Im Gegensatz dazu könnte diese Niederschlagsversorgung für Tanne bereits problematisch werden, zumal für Weißtanne in Südeuropa Jahresniederschläge von mindestens 700 bis 800 mm notwendig sind. Andererseits übersteigen die Sommerniederschläge, die einen besonders positiven Effekt auf das Wachstum der Tanne ausüben, mit durchschnittlich etwa 180 mm die für Weißtanne geforderten 120 bis 150 mm. Die prognostizierten hohen Sommertemperaturen könnten den Wasserverbrauch jedoch steigern. Gegenüber Trockenheit weist Tanne eine hohe Resistenz und Resilienz auf und die genetische Bandbreite innerhalb der Populationen lässt eine dynamische Reaktion auf Trockenereignisse erwarten. Dennoch konnte auch ein Rückzug von wärmeren und trockeneren Standorten beobachtet werden (Castagneri et al. 2014, Zang et al. 2014, George et al. 2015, Dobrowolska et al. 2017, Frank et al. 2017). Dies lässt vermuten, dass Tanne wohl vor allem in den mittleren und hohen Lagen der Fichten-Tannen-Buchenwälder auch gegen Ende des Jahrhunderts noch ein Potenzial aufweist.

Hohe Sommertemperaturen und Trockenheit wirken sich zeitlich verzögert negativ auf das Wachstum der Buche aus. In tiefen Lagen ist daher in Anbetracht der prognostizierten Klimaveränderungen ein Rückgang der Produktivität zu erwarten, weshalb sich das Buchenoptimum in höhere Lagen verschieben könnte, wo die Buche zunehmend in Konkurrenz zu Fichte treten könnte. Auch die Populationen haben diesbezüglich ein hohes Risiko schlechter genetischer Anpassung (Castagneri et al. 2014, Zang et al. 2014, Frank et al. 2017). Zumal das Buchenoptimum aktuell in der submontanen Höhenstufe liegt, kann somit vermutet werden, dass es sich weiter nach oben in die Fichten-Tannen-Buchenwälder verschiebt, wo der Buchenanteil folglich stark zunehmen und die Fichte zunehmend unter Konkurrenzdruck geraten könnte. Zumal ca. 50 % des Niederschlages in der Vegetationszeit (Frühjahr und Sommer) fallen, dürfte die Verteilung des Niederschlages kaum problematisch für die Buche sein.

## **5.5 Waldbauliche Handlungsoptionen für den Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere**

Aufbauend auf den oben beschriebenen Perspektiven für die Hauptbaumarten und unter Berücksichtigung der Ansätze eines auf den Klimawandel ausgerichteten Waldbaus lassen sich für den Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere waldbauliche Handlungsempfehlungen konkretisieren. Die Ausführungen beziehen sich auf die Erfüllung jeweils einer Waldfunktion unter Berücksichtigung der durch das Szenario für den Zeitraum 2071-2100 prognostizierten Vegetationsperioden, Jahresmitteltemperaturen, Jahresniederschlagssummen sowie der jahreszeitlichen Verteilungen der letzten beiden Parameter. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf die mittleren Ausprägungen der Klimaparameter gelegt. Die Waldfunktionen entstammen der waldbaulichen Beurteilung in der Waldtypisierung (Amt für Forstplanung 2010a). Die Vorschläge verstehen sich dabei als eine Auswahl von mehreren möglichen Herangehensweisen.

Zumal es sich beim Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere um einen Waldtyp, jedoch nicht um einen konkret vorliegenden Bestand handelt, können die waldbaulichen Ausführungen mangels eines realen Bezugspunktes im Gelände nur einen Ziel-, nicht jedoch einen Behandlungstyp beschreiben, der konkret auf die IST-Situation eingehen muss. Daher werden die Anteile der geforderten Baumarten als Bereiche zwischen einem minimal geforderten und maximal zulässigen Anteil angegeben (fakultative Baumarten haben somit einen minimalen Anteil von 0). Bezieht sich ein Anteil auf mehrere Baumarten, so sollen diese zusammen (also nicht jede Baumart einzeln) in gleichen oder auch verschiedenen Verhältnissen mit diesem Anteil vorhanden sein. Die Baumartenanteile verstehen sich als Anteile am Vorrat im Endbestand (Bestockungsziel).

Die Empfehlungen zielen auf die Erhöhung der Baumarten- sowie der strukturellen Vielfalt ab. Durch das Einbringen und die Förderung von Baumarten, von denen vermutet wird, dass sie an das prognostizierte Klima angepasst sind, sowie durch die Erhaltung einer hohen Baumartenvielfalt wird versucht, den Zieltypen ein gewisses Maß an Resistenz zu ermöglichen. Zudem wird durch die Vielfalt an Baumarten sowie die Beimischung von Pionierbaumarten auch die Resilienz der Bestände verbessert. Weiters kann durch eine hohe Baumartenvielfalt auch der Unsicherheit der prognostizierten Entwicklungen Rechnung getragen werden. Um diese Vielfalt jedoch aufrecht erhalten zu können, sind mitunter auch regelmäßige und starke Pflegeeingriffe notwendig. Vorhandene Verjüngungspotenziale der angestrebten Zielbaumarten sollen genutzt werden, um, sofern möglich, eine hohe genetische Diversität zu erhalten. Weitere genetische Aspekte werden mangels diesbezüglicher Erkenntnisse nicht behandelt. Die hier vielfach empfohlenen Loch- und Schlitzhiebe zur Verjüngung und zum Waldumbau eignen sich aufgrund der kleinflächigen Eingriffe auch zur Diversifizierung der Waldstrukturen. Ein weiterer Effekt dieser zeitlich gestaffelten Eingriffe liegt in der Flexibilität, weil nicht exakt abgeschätzt werden kann, ab wann neu eingebrachte Baumarten tatsächlich besser an das vorherrschende Klima angepasst sind. Eine zusätzliche Risikostreuung auf Landschaftsebene kann aufgrund der unterschiedlichen Waldfunktionen durch die Realisierung der verschiedenen Zieltypen erreicht werden. Zumal die Vulnerabilität einzelner Bestände nicht bekannt ist, kann bezüglich der räumlichen Umsetzung der Maßnahmen keine Prioritätensetzung vorgenommen werden.

Die Standortsansprüche der Baumarten, welche als Grundlage für die Baumartenwahl herangezogen wurden, entstammen der Enzyklopädie der Holzgewächse (Bartha 1996, Maier s.a., Maier 1997, Bottacci 1998, Bucher 1999, Hermann 1999, Aas 2000, Roloff und Pietzarka 2000, Bartha 2001, Schütt und Stimm 2001, Tamm 2001, Aas 2002, Felbermeier und Mosandl 2002, Geburek 2002, Schmidt 2002, Albrecht 2003, Götz und Wolf 2004, Schütt 2006, Wagner 2009, Häberle 2011).

## 5.5.1 Zieltyp Wirtschaftswald

### 5.5.1.1 Laubholzreicher Wirtschaftswald

Die Realisierung dieses Zieltyps ist aufgrund der intensiven Pflegemaßnahmen nur in gut erschlossenem sowie aufgrund der großflächigen Eingriffe nur im flachen bzw. leicht geneigten Gelände möglich.

**Funktion:** Wertholz- und Rundholzproduktion

**Baumarten:**

Anteil [n/10]	Baumarten
2-4	Traubeneiche, Stieleiche
1-3	Lärche
2-4	Winterlinde, Rotbuche, Edelkastanie
1	Rotkiefer, Hängebirke, Zitterpappel, Salweide, Vogelbeere
0-1	Holzbirne, Zürgelbaum, Tanne, Fichte

Trauben- und Stieleiche sowie Lärche bilden den Hauptbestand, während die beigemischten Baumarten den dienenden Nebenbestand bilden.

**Verjüngung:** Dauerbestockung durch Mittelwaldbetrieb mit überwiegender Kernwuchsverjüngung des Oberholzes (Eiche und Lärche) und vorwiegend Ausschlagverjüngung im Unterholz (Winterlinde, Rotbuche, Edelkastanie). Das Oberholz liegt durch zeitlich gestaffelte Einzelbaumnutzungen im Zuge der Nutzungen des Unterholzes in ungleichaltrigen Stufen vor. Die Umtriebszeit des Oberholzes beträgt somit ein Vielfaches der Umtriebszeit des Unterholzes. Bei unzureichender Naturverjüngung sind Ergänzungspflanzungen durchzuführen.

Alternativ bietet sich eine Bewirtschaftung nach dem Prinzip des Altersklassenwalds an. Während einer Rotation im gleichaltrigen Oberholz durchläuft das gleichaltrige Unterholz mehrere Rotationen (auch im Stockausschlag möglich). Der Oberbestand wird flächig genutzt, wodurch dieser eine nicht gestufte, gleichaltrige Struktur aufweist und künstlich verjüngt werden muss (Mayer 1992). Um die Laubholzarten erfolgreich verjüngen zu können, ist die begleitende Umsetzung eines Wald-Wild-Managementkonzeptes unerlässlich.

**Waldpflege:** Die Wertholzträger sind intensiv zu fördern und zu pflegen. Im Falle von Mittelwaldbetrieb (Dauerwald) können Verjüngungsmaßnahmen auch als Pflegemaßnahmen fungieren. Im Zuge der Eingriffe in die schwächeren Durchmesserklassen der Oberschicht werden hauptsächlich Protzen, schlechtwüchsige, kranke, nicht hochwertige sowie konkurrierende und beschattende Bäume entnommen. Eine regelmäßige Erneuerung bzw. Verjüngung des Unterholzes ist sowohl im Mittelwald- als auch im Altersklassenbetrieb notwendig. Eichen oder Lärchen sollen in der Oberschicht stets vorhanden sein. Die Bewahrung einer gewissen Baumartenvielfalt kann sich in Anbetracht unsicherer Entwicklungen als nützlich erweisen (Samenbäume als Potenziale, Pionierbaumarten zur Besiedelung von Störungsflächen) (Mayer 1992).

**Umbau:** Aufgrund der Änderung der Baumartenzusammensetzung über künstliche Einbringung noch nicht vorhandener Baumarten handelt es sich um eine Umwandlung. Diese kann auf besser erschlossenen und nicht zu steilen Hängen horstweise durch Kleinkahlschläge (kleiner 0,5 ha) gefolgt von Kunst- bzw. Naturverjüngung (Ansammlung bzw. Stockausschlag) der bereits vorhandenen Baumarten (z.B. Buche oder Lärche) erfolgen.

### 5.5.1.2 Nadelholzreicher Wirtschaftswald

**Funktion:** Rundholzproduktion

**Baumarten:**

Anteil [n/10]	Baumarten
3-5	Douglasie
2-4	Lärche
1-3	Tanne
1-2	Traubeneiche, Stieleiche, Winterlinde, Rotbuche
1	Hängebirke, Zitterpappel, Salweide, Vogelbeere
0-2	Fichte
0-1	Edelkastanie, Holzbirne, Zürgelbaum

Die Beimischung von Douglasie wird aufgrund der dokumentierten Anbauerfolge, der Toleranz von Sommertrockenheit und der hohen Produktivität vielfach angestrebt. Hierbei stellt sich die Frage der Herkunft. Während Inlanddouglasienherkünfte eine geringere Produktivität aufweisen und anfälliger gegenüber Douglasienschütte sind, scheinen sie besser an Sommertrockenheit angepasst zu sein. Eine Invasivität und Einschränkung der Artenvielfalt durch Douglasienanbau konnte z.B. in Norddeutschland nicht beobachtet werden (Englisch 2008, Noack et al. 2009, Brang et al. 2013). Die beigemischten und eingesprengten Laubbaumarten dienen der Bodenaufbereitung. Die Lärche ergänzt die Sortimentsvielfalt in der Rundholzproduktion.

**Verjüngung:** Die Verjüngung erfolgt vorwiegend als Naturverjüngung nach Loch- oder Schlitzhieben. Aufgrund des im Vergleich zur Wertholzproduktion geringeren Pflegeaufwandes ist diese Bewirtschaftungsform auch im steileren und weniger gut erschlossenen Gelände möglich. Die Hiebe sollen nicht zu klein (1 bis 2 Baumhöhen) und zur Sonne ausgerichtet erfolgen, sodass ausreichend günstige Bedingungen zur Verjüngung der Douglasie herrschen und genügend Niederschlag den Boden erreicht. Nach erfolgreicher Verjüngung in den Löchern bzw. Schlitzern sollen diese erweitert werden, wodurch zunehmend günstige Verjüngungsbedingungen für Lärche geschaffen werden sollen; diese Erweiterungen können ev. durch Bodenverwundungen ergänzt werden, um die Ansamlung von Lärche zu erleichtern. Es ist eine gruppenweise Mischung der Baumarten anzustreben. Bei Bedarf sind die Hauptbaumarten (Douglasie und Lärche) künstlich einzubringen. Ein Grundbestand an bodenverbessernden Laubbäumen ist aufrecht zu erhalten. Zur erfolgreichen Verjüngung dieser Laubbäume sowie der Tanne ist die begleitende Umsetzung eines Wald-Wild-Managementkonzeptes unerlässlich. Zudem kommt der Wahl geeigneter Douglasienprovenienzen eine hohe Bedeutung zu.

**Waldpflege:** Bei Bedarf sind die Hauptbaumarten gegenüber konkurrenzstarken Baumarten (z.B. Buche) zu fördern und freizustellen. Zu fördern sind auch Mischbaumarten, welche in Anbetracht unsicherer Entwicklungen als Potenziale (Samenbäume) vorhanden sein sollen.

**Umbau:** Zumal die Baumarten des Zielbestandes großteils noch nicht vorhanden sind und über künstliche Verjüngung eingebracht werden müssen, ist der Bestand entweder sukzessive zu überführen oder flächig umzuwandeln. Dies kann durch gruppenweise Pflanzung nach kleinflächigen Erntemaßnahmen oder durch künstliche Verjüngung nach Kahlhieb erreicht werden.

## 5.5.2 Zieltyp Schutzwald gegen Erosion

**Funktion:** Erosionsschutz

**Baumarten:**

Anteil [n/10]	Baumarten
2-4	Rotkiefer
2-4	Rotbuche
2-4	Winterlinde, Tanne
1	Vogelbeere, Hängebirke, Zitterpappel, Salweide, Mehlbeere
0-2	Feldahorn, Mannaesche
0-1	Edelkastanie, Traubeneiche, Holzbirne, Zürgelbaum, Fichte, Lärche

Rotkiefer gewährleistet eine dauerhafte Überschirmung des Bodens sowie durch das Herzwurzelsystem eine gute Verankerung, während Rotbuche eine intensive und flächige Durchwurzelung v.a. des Oberbodens bewirkt; unter Umständen ist auch eine tiefreichende Durchwurzelung des Bodens möglich. Eine tiefe Durchwurzelung bewirkt auch Tanne. Winterlinde und Feldahorn eignen sich zur Bodenbefestigung, während die Mehlbeere dem Bodenschutz dient (Maier s.a., ETHZ/BUWAL 2001, Felbermeier und Mosandl 2002, Schütt 2006, Häberle 2011).

**Verjüngung:** Zumal Lücken eine Größe von 600 m<sup>2</sup> nicht überschreiten sollen (bei gesicherter Verjüngung in zielgerechter Mischung 1200 m<sup>2</sup>) bieten sich zur Verjüngung Loch- bzw. Schlitzhiebe an. Dabei sollen zunächst Rotbuche, Winterlinde, Mehlbeere, Feldahorn sowie Tanne und später im Zuge von Erweiterungen der Lücken Rotkiefer und Mannaesche begünstigt werden. Empfohlen werden daher Verjüngungseingriffe in der Größe einer Baumlänge (etwa 20 bis 30 m Lückendurchmesser), die nach gesicherter Verjüngung erweitert werden können. Durch sukzessive Verjüngungseingriffe soll ein mosaikartiges Nebeneinander verschiedener Altersklassen ermöglicht werden sowie zusammenhängende, große Kahlflächen vermieden werden. Um die Laubholzarten und Tanne erfolgreich verjüngen zu können, ist die begleitende Umsetzung eines Wald-Wild-Managementkonzeptes unerlässlich. Es empfiehlt sich eine gruppenweise Mischung mit einer mehr oder weniger gleichmäßigen Verteilung der Gruppen, um den Boden horizontal und vertikal gleichmäßig zu erschließen und auch im Winter einen gewissen Grad an Überschirmung zu gewährleisten (Frehner et al. 2005).

**Waldpflege:** Aufgrund einer möglicherweise starken Konkurrenz durch Rotbuche kann es notwendig sein, Rotkiefer stärker freizustellen. Selbiges gilt für Mannaesche, die auf locker bestockten bzw. lichtbegünstigten Standorten an Konkurrenzkraft gewinnt. Stabilitätspflege soll Windwürfen und damit der Bildung einer offenen Bodenfläche vorbeugen. Eine dauerhafte Überschirmung von 40 % mit Bäumen ab Stangenholzaltes ist anzustreben (Frehner et al. 2005).

**Umbau:** Aufgrund des Einbringens vieler noch nicht vorhandener Baumarten handelt es sich um eine Umwandlung. Vor allem vorhandene Rotkiefern-, Tannen- und Rotbuchenverjüngung ist nach der Durchführung von Loch- bzw. Schlitzhieben zu fördern, ansonsten durch Pflanzung zu ergänzen bzw. einzubringen. Selbiges gilt für die Mischbaumarten, die hinsichtlich unsicherer Entwicklungen und in Anbetracht von Störungsereignissen ein wertvolles Potenzial darstellen.

### 5.5.3 Zieltyp Schutzwald gegen Steinschlag

**Funktion:** Steinschlagschutz

**Baumarten:**

Anteil [n/10]	Baumarten
2-3	Tanne
3-4	Rotkiefer, Lärche
2-3	Rotbuche, Winterlinde
1-2	Mannaesche, Mehlbeere, Traubeneiche, Stieleiche
1	Vogelbeere, Hängebirke, Zitterpappel, Salweide
0-1	Fichte

Der hohe Anteil an Nadelbaumarten ermöglicht aufgrund des im Vergleich zu Laubbaumarten generell schmälere Kronenaufbaus die in Steinschlagschutzwäldern geforderte dichte Bestockung. Eichenarten und Rotbuche ertragen aufgrund der hohen Biegemomente des Holzes hohe Bruchlasten, Eichenarten sind zudem gut im Boden verankert. Weißtanne eignet sich trotz der geringeren Festigkeiten aufgrund der Fäuleresistenz. Winterlinde reagiert unempfindlich gegenüber Verletzungen und Mehlbeere sowie Mannesche sind typische Steinschlagschutzbaumarten (Mayer 1992, Bartha 1996, Aas 2000, ETHZ/BUWAL 2001, Aas 2002, Maier s.a., Götz und Wolf 2004, Dorren et al. 2005, Fachstelle für Gebirgswaldpflege 2012).

**Verjüngung:** Die Verjüngung des Bestandes erfolgt nach der Öffnung des Bestandes durch Schlitzhiebe oder Lochhiebe, wobei die Lückengröße in Falllinie 20 m (ca. eine Baumlänge) nicht überschreiten soll. Bei Vorhandensein von 1,30 m hohen Stöcken sowie mehr als zwei liegenden Stämmen mit einem Durchmesser größer als der Durchmesser der Steine alle 10 m sind in Falllinie auch Lückengrößen von 40 m zulässig, was die Verjüngung der lichtbedürftigen Baumarten erleichtert. Nicht zu kleine Lücken begünstigen die Ansamlung von Rotkiefer, Lärche und Eichenarten sowie das Ankommen von Niederschlag am Boden. Daher empfehlen sich Verjüngungseingriffe in Form von Streifen quer oder schräg zur Falllinie. Bereits im Bestand vorhandene Rotbuchen, Winterlinden, Mehlbeeren und Mannaeschen können auch durch Stockausschlag verjüngt werden, was auch den Aufbau einer zweiten, dicht stockenden Schicht mit schmälere Durchmessern erlaubt und einen stufigen Bestandaufbau ermöglicht. Die Verjüngung von Mannaesche gelingt nur in lichterem, sonnenbegünstigten Bereichen. Um die Laubholzarten und Tanne erfolgreich verjüngen zu können, ist die begleitende Umsetzung eines Wald-Wild-Managementkonzeptes unerlässlich. Anzustreben ist ein kleinflächiges, mosaikartiges Nebeneinander verschiedener Altersklassen, was einer Dauerbestockung einer größeren Fläche gleichkommt. Dabei sollten in sich mehr oder weniger homogene Bereiche (Entwicklungsstufen) mit hohen bzw. niedrigen Stammzahlen sowie mit starken bzw. schwachen Durchmessern auf der Fläche gleichmäßig verteilt sein. Im Bereich kürzerer Transitstrecken oder bei Gefährdung durch kleinere Steine kann auch eine niederwaldartige Bewirtschaftung mit Stockausschlag angedacht werden (Frehner et al. 2005).

**Waldpflege:** Anzustreben ist eine Bestockung von mindestens 400 N/ha mit BHD > 12 cm im Transit- und Ablagerungsgebiet mit Stammabständen in Falllinie von höchstens 20 m. Eine gleichmäßige Verteilung von Bäumen stärkerer Durchmesser ist von Vorteil. Um dem Loslösen von Steinen aus Wurzeltellern infolge Windwurf vorzubeugen, ist Stabilitätspflege unerlässlich. Es kann eine Begünstigung von lichtbedürftigen Baumarten gegenüber Schattbaumarten (z.B. Rotbuche) notwendig sein. Zudem sind Mischbaumarten als Potenziale für unvorhergesehene Entwicklungen sowie Pionierbaumarten für die rasche

Wiederbesiedelung von Störungsflächen zu fördern (Frehner et al. 2005, Amt für Forstplanung 2010b).

***Umbau:*** Im Zuge einer Umwandlung sollen nach Loch- oder Schlitzhieben durch gruppenweise Pflanzung vorwiegend Waldkiefer, Lärche, Eichenarten (Traubeneiche, Stieleiche), Winterlinde, Mannaesche sowie in geringerem Maße Pioniergehölze eingebracht werden. Bereits vorhandene Zielbaumarten (etwa Tanne) sind zu fördern und falls notwendig künstlich einzubringen.



## 6 Literaturverzeichnis

- Aas, G. (2000): *Quercus petraeae*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Aas, G. (2002): *Quercus robur*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Albrecht, L. (2003): *Celtis australis*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Amt für Forstplanung (2010a): Waldtypisierung Südtirol. Band 1: Waldtypen, Wuchsgebiete, Bestimmungsschlüssel. Bozen: Abteilung Forstwirtschaft, Autonome Provinz Bozen-Südtirol.
- Amt für Forstplanung (2010b): Waldtypisierung Südtirol. Band 2: Waldgruppen, Naturräume, Glossar. Bozen: Abteilung Forstwirtschaft, Autonome Provinz Bozen-Südtirol.
- Andreß, H.-J. (2001): Korrelationskoeffizient. Verfügbar in <http://eswf.uni-koeln.de/glossar/node103.html>, letzter Zugriff 15.1.2018.
- Bässler, C.; Hothorn, T.; Brandl, R. et al. (2013): Insects Overshoot the Expected Upslope Shift Caused by Climate Warming. *PLoS ONE* 8(6).
- Bartha, D. (1996): *Fraxinus ornus*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Bartha, D. (2001): *Ostrya carpinifolia*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Blattert, C.; Thees, O.; Lemm, R. (2014): Ein Vergleich von Waldwachstums-Simulatoren mittels Analytic Hierarchy Process hinsichtlich Funktionalität und Softwarestruktur. *Allg. Forst- und Jagdzeitung*, 186. Jg.: 14-31.
- Bottacci, A. (1998): *Castanea sativa*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Brang, P.; Breznikar, A.; Hanewinkel, M. et al. (2013): Managing Forests in a Changing Climate. In: Cerbu, G. A.; Hanewinkel, M.; Gerosa, J. et al. (2013): Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks. InTech unter CC BY 3.0 Lizenz. Verfügbar in: <https://www.intechopen.com/books/management-strategies-to-adapt-alpine-space-forests-to-climate-change-risks>, letzter Zugriff 15.02.2018.
- Brang, P.; Spathelf, P.; Larsen, J. B. et al. (2014): Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87 (2014): 492-503.
- Bucher, H. U. (1999): *Abies alba*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Butler, P. R.; Iverson, L.; Thompson, F. R. III et al. (2015): Central Appalachians Forest Ecosystem Vulnerability Assessment and Synthesis: A Report from the Central Appalachians Climate Change Response Framework Project. Gen. Tech. Rep. NRS-146. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.

- Castagneri, D.; Nola, P.; Motta, R. et al. (2014): Summer climate variability over the last 250 years differently affected tree species radial growth in a mesic *Fagus-Abies-Picea* old-growth forest. *Forest Ecology and Management* 320 (2014): 21-29.
- Dobrowolska, D.; Boncina, A.; Klumpp, R. (2017): Ecology and silviculture of silver fir (*Abies alba* Mill.): a review. *Journal of Forest Research* Vol. 22, No. 6 (2017): 326-335.
- Dorren, L.; Berger, F.; Maier, B. (2005): Der Schutzwald als Steinschlagnetz. *LWF aktuell* 50: 25-27. Verfügbar in:  
[https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a50\\_der\\_schutzwald\\_als\\_steinschlagnetz.pdf](https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a50_der_schutzwald_als_steinschlagnetz.pdf), letzter Zugriff 15.01.2018.
- Ellenberg, H. und Leuschner, C. (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 6., vollständig neu bearbeitete und stark erweiterte Auflage von Christoph Leuschner. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Englisch, M. (2008): Die Douglasie - Für und Wider aus standortkundlicher Sicht. *BFW-Praxisinformation* 16: 6-8. Verfügbar in:  
[https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/standort/bfw\\_douglasie/index\\_DE](https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/standort/bfw_douglasie/index_DE), letzter Zugriff: 14.02.2018.
- ETHZ/BUWAL (2001): Sommerlinde, Winterlinde. Verfügbar in:  
[https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/waldmgmt-waldbau-dam/documents/SEBA/Baumarten%20Informationen/SEBA1\\_AS\\_wili\\_soli\\_2000.pdf](https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/waldmgmt-waldbau-dam/documents/SEBA/Baumarten%20Informationen/SEBA1_AS_wili_soli_2000.pdf), letzter Zugriff 15.02.2018.
- Fachstelle für Gebirgswaldpflege (2012): Schutzwald gegen Steinschlag – Ist Holz härter als Stein? *Newsletter* 07, Dezember 2012.
- Felbermeier, B. und Mosandl, R. (2002): *Fagus sylvatica*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse*. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Fischer-Bruns, I; Petersen, J. (2016): Die Szenarien des IPCC. Verfügbar in  
<http://www.klimanavigator.de/dossier/artikel/011968/index.php>, letzter Zugriff 11.1.2018.
- Frank, A.; Howe, G. T.; Sperisen, C. et al. (2017): Risk of genetic maladaptation due to climate change in three major European tree species. *Global Change Biology* 23 (2017): 5358-5371.
- Frehner, M.; Wasser, B.; Schwitter, R. (2005): *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald: Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Geburek, T. (2002): *Larix decidua*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse*. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- George, J-P.; Schueler, S.; Karanitsch-Ackerl, S. et al. (2015): Inter- and intra-specific variation in drought sensitivity in *Abies spec.* and its relation to wood density and growth traits. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215 (2015): 430-443.
- Götz, B. und Wolf, C. (2004): *Tilia cordata*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse*. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag. Maier, J. (s.a.): *Sorbus aria*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse*. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Grunert, H. (2005): *Faktorenanalyse (Hauptkomponentenmethode, PCA)*. Ein kurzer Leitfaden zur Arbeit mit der Statistiksoftware R. Verfügbar in [http://mws-bbg.com/Down/Script\\_b.pdf](http://mws-bbg.com/Down/Script_b.pdf), letzter Zugriff 19.01.2018.

- Häberle, K.-H. (2011): *Acer campestre*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Handler, S. (s.a.): Climate Change and Northwoods Forests. Vortrag. Verfügbar in [http://forest.mtu.edu/niacs/FAPPo/Climate%20change%20and%20Northwoods%20Forests\\_Handler\\_FAPPo/Climate%20change%20and%20Northwoods%20Forests\\_Handler\\_FAPPo.html](http://forest.mtu.edu/niacs/FAPPo/Climate%20change%20and%20Northwoods%20Forests_Handler_FAPPo/Climate%20change%20and%20Northwoods%20Forests_Handler_FAPPo.html), letzter Zugriff 12.06.2016.
- Hermann, R. K. (1999): *Pseudotsuga menziesii*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Institut für angewandte Fernerkundung, EURAC (2015): Mittlere jährliche Sonneneinstrahlung in Südtirol, in Wh/m<sup>2</sup> (Projekt Solar Tirol) Verfügbar in <http://geokatalog.buergernetz.bz.it/geokatalog/#!>, letzter Zugriff 8.11.2016.
- IPCC (2014): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016. Verfügbar in: [https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5\\_SYR\\_barrierefrei.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf), letzter Zugriff 15.02.2018.
- Konopkova, A.; Kurjak, D.; Kmet, J. (2018): Differences in photochemistry and response to heat stress between silver fir (*Abies alba* Mill.) provenances. *Trees* 32 (2018): 73-86.
- Kozlowski, T. T.; Kramer, P. J.; Pallardy, S. G. (1991): The physiological ecology of woody plants. San Diego: Academic Press, Inc.
- Lasch-Born, P.; Suckow, F.; Gutsch, M. et al. (2015): Forests under climate change: potential risks and opportunities. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2: 157-172.
- Lenoir, J.; Gegout, J. C.; Marquet, P. A. et al. (2008): A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science* 320 (2008): 1768-1771.
- Lenoir, J.; Gegout, J.-C.; Pierrat, J.-C. (2009): Differences between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986-2006). *Ecography* 32 (2009): 765-777.
- Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S. et al. (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259: 698-709.
- Lüpsen, H. (2016): Multiple Mittelwertvergleiche - parametrisch und nichtparametrisch sowie  $\alpha$ -Adjustierungen mit praktischen Anwendungen mit R und SPSS. Version 0.91 (31.10.2016). Köln: Regionales Rechenzentrum (RRZK). Verfügbar in <http://www.uni-koeln.de/~a0032/statistik/texte/mult-comp.pdf>, letzter Zugriff 19.01.2018.
- Lüpsen, H. (2017): Varianzanalysen. Prüfen der Voraussetzungen und nichtparametrische Methoden sowie praktische Anwendungen mit R und SPSS. Version 2.4 (20.7.2017). Köln: Regionales Rechenzentrum (RRZK). Verfügbar in <http://www.uni-koeln.de/~a0032/statistik/texte/nonpar-anova.pdf>, letzter Zugriff 19.01.2018.
- Maier, J. (1997): *Sorbus aucuparia*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Martin (2017): ggConvexHull : Add a convex hull geom to ggplot2. Verfügbar in <https://github.com/cmartin/ggConvexHull>, letzter Zugriff 16.01.2018.
- Mayer, H. (1992): Waldbau auf sozioökologisch-ökologischer Grundlage. 4., teilweise neu bearbeitete Auflage. Stuttgart, Jena, New York: Gustav Fischer Verlag.

- Menzel, A. (2000) Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology* 44 (2000):76-81.
- Moder, K. (2011): *Multivariate Statistik. Unterlagen zur Lehrveranstaltung Multivariate statistics an der Universität für Bodenkultur, Wien.*
- Monserud, R. A.; Sterba, H. (1996): A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management* 80 (1996): 57-80.
- Netherer, S.; Schopf, A. (2010): Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests – General aspects and the pine processionary moth as specific example. *Forest Ecology and Management* 259 (2010): 831-838.
- Neuner, G. (2014): Frost resistance in alpine woody plants. *Frontiers in Plant Science* 5 (654).
- Noack, M.; Panka, S.; Wenk, S. (2009): Beitrag zur standortökologischen Leistungsfähigkeit der Grünen Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* var. *viridis*) im Nordostdeutschen Tiefland. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 33: 33-41.* Verfügbar in: [https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/wachstum/lfe\\_waldbau\\_douglasie/index\\_DE](https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/wachstum/lfe_waldbau_douglasie/index_DE), letzter Zugriff 14.02.2018.
- Ott, E.; Frehner, M.; Frey, H.-U. et al. (1997): *Gebirgsnadelwälder. Praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung.* 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag.
- Ozenda, P. (1988): *Die Vegetation der Alpen im europäischen Gebirgsraum.* Stuttgart: Fischer-Verlag.
- Röhrig, E. und Bartsch, N. (1992): *Der Wald als Vegetationsform und seine Bedeutung für den Menschen.* 6., völlig neubearbeitete Auflage. In: Dengler, A. (1992): *Waldbau auf ökologischer Grundlage.* Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey.
- Roloff, A. und Pietzarka, U. (2000): *Betula pendula.* In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017).* Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Sachs, L. (1991): *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden.* 7. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer.
- Schmidt, P. A. (2002): *Picea abies.* In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017).* Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Schütt, P. und Stimm, B. (2001): *Salix caprea.* In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017).* Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Schütt, P. (2006): *Pinus sylvestris.* In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): *Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017).* Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Schwerdtfeger, F. (1981): *Die Waldkrankheiten: ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes.* 4., neubearb. Aufl. Hamburg: Parey Verlag.
- Seidl, R.; Lexer, M. J.; Jäger, D.; Hönninger, K. (2005): Evaluating the accuracy and generality of a hybrid patch model. *Tree Physiology* 25: 939-951.
- Seidl, R.; Rammer, W.; Scheller, R. M.; Spies, T. A. (2012): An individual-based process model to simulate landscape-scale forest. *Ecological Modelling* 231 (2012) 87-100.
- Seidl, R.; Spies, T. A.; Peterson, D. L. et al. (2016): Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. *Journal of Applied Ecology* 53 (2016): 120-129.

- Shi, T. (2010): [R] Whiskers on the default boxplot {graphics}. Beitrag in einem Online-Diskussionsforum. Verfügbar in <https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/2010-May/238746.html>, letzter Zugriff 16.01.2018.
- Stadler, S.; Dryden, J. M.; Greene, J. S. (2015): Climate Change Impacts on Oklahoma Wind Resources: Potential Energy Output Changes. *Resources* 4 (2015): 203-226. Verfügbar in [https://www.researchgate.net/publication/276135866\\_Climate\\_Change\\_Impacts\\_on\\_Oklahoma\\_Wind\\_Resources\\_Potential\\_Energy\\_Output\\_Changes](https://www.researchgate.net/publication/276135866_Climate_Change_Impacts_on_Oklahoma_Wind_Resources_Potential_Energy_Output_Changes), letzter Zugriff 09.03.2018.
- Swanston, C.; Janowiak, M.; Iverson, L. et al. (2011): Ecosystem Vulnerability Assessment and Synthesis: A Report from the Climate Change Response Framework Project in Northern Wisconsin. Gen. Tech. Rep. NRS-82. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.
- Tamm, Ü. (2001): *Populus tremula*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Tesche, H. (1992): Klimaresistenz. In: Lyr, H.; Fiedler, H. J.; Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Thurnher, C.; Klopff, M.; Hasenauer, H. (2017): MOSES – A tree growth simulator for modelling stand response in Central Europe. *Ecological Modelling* 352 (2017) 58-76.
- Tranquillini, W. (1992): Wasserhaushalt. In: Lyr, H.; Fiedler, H. J.; Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Vitasse, Y.; Hoch, G.; Randin, C. F. et al. (2012): Tree recruitment of European tree species at their current upper elevational limits in the Swiss Alps. *Journal of Biogeography* (J. Biogeogr.) 39: 1439-1449.
- Vitasse, Y.; Lenz, A.; Körner, C. (2014): The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees. *Frontiers in Plant Science* 5(541).
- Wagner, I. (2009): *Pyrus pyraeaster*. In: Roloff, A.; Weisgerber, H.; Lang, U. M. et al. (2017): Enzyklopädie der Holzgewächse. Grundwerk (1994) bis Ergänzungslieferung 69 (2017). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Werner, C. (2014): Explorative Faktorenanalyse: Einführung und Analyse mit R. Verfügbar in <http://www.psychologie.uzh.ch/de/bereiche/nec/methoden/team/ehemalige/christinawerner/faktorenanalyse.html>, letzter Zugriff 19.01.2018.
- Wiki Klimawandel (2015): Anschauliche Darstellung der vier SRES-Szenario-Familien des IPCC. Verfügbar in <http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/Klimaszenarien>, letzter Zugriff 09.03.2018.
- Williams, A. P.; Allen, C. D; Macalady, A. K. et al. (2013): Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change* 3: 292-297.
- Yilmaz, O. Y.; Sevgi, O.; Koc, A. (2012): Determination of incoming solar radiation in major tree species in Turkey. *Journal of Environmental Biology* 33 (2012): 817-821.
- Zang, C.; Hartl-Meier, C.; Dittmar, C. et al. (2014): Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. *Global Change Biology* 20, 3767-3779.
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Abteilung Brand- und Zivilschutz - Autonome Provinz Bozen, Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV) (2015a): Das Klima von Tirol – Südtirol – Belluno. Vergangenheit – Gegenwart – Zukunft. Verfügbar in <http://www.alpenklima.eu/download>, letzter Zugriff 11.1.2018.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Abteilung Brand- und Zivilschutz - Autonome Provinz Bozen, Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV) (2015b): Temperatur :: Modellierte mittlere der jährlichen Vegetationsperiode :: Periode 1981-2010. Kartenbeschreibung. Verfügbar in <http://www.alpenklima.eu/tpclim/future.php?lang=de>, letzter Zugriff 19.01.2018.

Zimmermann, N. E.; Jandl, R.; Hanewinkel, M. et al (2013): Potential Future Ranges of Tree Species in the Alps. In: Cerbu, G. A.; Hanewinkel, M.; Gerosa, G. et al. (2013): Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks. Publisher: InTech. Verfügbar in <https://www.intechopen.com/books/management-strategies-to-adapt-alpine-space-forests-to-climate-change-risks>, letzter Zugriff 12.06.2016.

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung, Abkürzung und Beschreibung der aus den Ergebnissen des Projektes 3PClim ausgewählten Klimaparameter zur Beschreibung der aktuellen Klimaverhältnisse. Die Bezeichnungen und Beschreibungen wurden von den Kartenbeschreibungen unter <a href="http://www.alpenklima.eu">www.alpenklima.eu</a> sowie <a href="http://geokatalog.buergernetz.bz.it/geokatalog/#/">http://geokatalog.buergernetz.bz.it/geokatalog/#/</a> übernommen.....	20
Tabelle 2: Auflistung und Abkürzung der aus dem Klimaszenario A1B ausgewählten Klimaparameter zur Beschreibung der zukünftigen Klimaverhältnisse. Die Bezeichnung wurde von den Kartenbeschreibungen unter <a href="http://www.alpenklima.eu">www.alpenklima.eu</a> übernommen. ....	22
Tabelle 3: Übersicht über die Zuordnung der durchzuführenden Rechenoperationen den Konstellationen zwischen den Verteilungen. Die Bezeichnung 5P steht für die 5. Perzentile, während die Bezeichnung 95P die 95. Perzentile meint. Die Zusätze a und b charakterisieren die zu vergleichenden Gruppen (je nach Betrachtung entweder Waldgruppen oder Klimaperioden). Die logische Operation UND bedingt die gleichzeitige Erfüllung mehrerer Kriterien. ....	28
Tabelle 4: Auswahl der statistischen Tests (Globaltests und Post-hoc-Verfahren) zum Vergleich der Mittelwerte der Klimaparameter zwischen den Waldgruppen nach Lüpsen (2017), Lüpsen (2016) und Sachs (1991) (vdW = van der Waerden-Test, B&F = Test nach Brown und Forsythe, Welch = Test nach Welch, Transf. = Datentransformation, P&S = Test nach Puri und Senn, F = F-Test, G&H = Test nach Games und Howell, DunC = Dunette's C-Test). ....	31
Tabelle 5: Auswahl der statistischen Tests (Globaltests und Post-hoc-Verfahren) zum Vergleich der Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Zeithorizonten jeweils innerhalb einer Waldgruppe nach Lüpsen (2017), Lüpsen (2016) und Sachs (1991) (vdw-Test = van der Waerden-Test, G & H = Test nach Games und Howell, Dun C = Dunette's C-Test, vdW posthoc = van der Waerden-Post-hoc-Test). ...	33
Tabelle 6: Übersicht über die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), 5. Perzentilen (5%), 95. Perzentilen (95%) und Standardabweichungen (sd) der aktuellen Ausprägung (Periode 1981-2010) der Klimaparameter innerhalb der Waldgruppen (MH = Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder, Bu = Buchenwälder, Ftb = Fichten-Tannen-Buchenwälder, FT = Fichten-Tannenwälder, Fs = subalpine Fichtenwälder).....	38
Tabelle 7: Differenzen der Mittelwerte zwischen den Waldgruppen angrenzender Höhenstufen. Es wurde jeweils der Mittelwert einer Waldgruppe einer höheren Höhenstufe vom Mittelwert der Waldgruppe einer angrenzenden tieferen Höhenstufe subtrahiert. ....	42
Tabelle 8: Klassifizierung der Klimaparameter je nach Überlagerung des Klimabereiches einer Waldgruppe mit einer Waldgruppe aus einer benachbarten (darüber- oder darunterliegenden) Höhenstufe. Die Anteile beziehen sich auf die gesamte Verteilung des Parameters zwischen der 5. und 95. Perzentile in der jeweils betrachteten Waldgruppe (erste Spalte).....	44
Tabelle 9: Vergleich der extrahierten Klimadaten (3PClim) zu den Leitgesellschaften der Höhenstufen (Waldgruppen) mit den Angaben zu den Höhenstufen in der Waldtypisierung. Mit 1 versehene Zahlen entstammen den Beschreibungen der Höhenstufen, während mit 2 versehene Zahlen den Beschreibungen der Wuchszonen entstammen (Amt für Forstplanung 2010a). ....	45
Tabelle 10: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Temperatur“ beitragen. ....	47
Tabelle 11: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Temperatur in der Vegetationszeit“ beitragen. ....	47

Tabelle 12: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Temperatur außerhalb der Vegetationszeit“ beitragen.....48

Tabelle 13: Ladungen der Variablen, die zur Komponente „Hitze und Trockenheit“ beitragen. ....48

Tabelle 14: Übersicht über die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), 5. Perzentilen (5%) und 95. Perzentilen (95%) der Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Perioden innerhalb der Waldgruppen.....51

Tabelle 15: Differenzen der Mittelwerte zwischen den zukünftigen (2026-2055 und 2071-2100) und der aktuellen (1981-2010) Periode für die jeweiligen Waldgruppen (es wurde jeweils der Mittelwert einer zukünftigen Periode vom Mittelwert der aktuellen Periode subtrahiert.) und zeitlicher Entwicklungstrend zwischen den Perioden 1981-2010 und 2026-2055 sowie 2026-2055 und 2071-2100 für alle Waldgruppen.....53

Tabelle 16: Klassifizierung der Klimaparameter je nach Überlagerung des Klimabereiches der zukünftigen Perioden (2026-2055 und 2071-2100) mit dem aktuellen Klimabereich (1981-2010), jeweils für eine Waldgruppe. Die Anteile beziehen sich auf die gesamte Verteilung des Parameters in der Periode 1981-2010 zwischen der 5. und 95. Perzentile. ....55

Tabelle 17: Übersicht über die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ), 5. Perzentilen (5%) und 95. Perzentilen (95%) der Ausprägungen der Klimaparameter in den unterschiedlichen Perioden im Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere (links) und die Differenzen der Mittelwerte zwischen den zukünftigen (2026-2055 und 2071-2100) und der aktuellen (1981-2010) Periode (rechts). Es wurde jeweils der Mittelwert einer zukünftigen Periode vom Mittelwert der aktuellen Periode subtrahiert.....70

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Lage der Fichten-Tannen-Buchenzone in Südtirol sowie der ausgewählten Waldgruppen innerhalb der Zone (Bu = Buchenwälder, Fs = subalpine Fichtenwälder, FT = Fichten-Tannenwälder, Ftb = Fichten-Tannen-Buchenwälder, MH = Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder).....	13
Abbildung 2: Szenariofamilien laut dem IPCC-Sonderbericht über Emissions-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) mit detaillierter Ausführung der A1-Familie (Wiki Klimawandel 2015).....	16
Abbildung 3: Emissionsszenarien laut dem IPCC-Sonderbericht über Emissions-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) bis zum Jahr 2100. Das Szenario A1B ist in grüner Farbe dargestellt (Stadler et al. 2015).....	17
Abbildung 4: Schematische Darstellung des mit dem ModelBuilder erstellten Modells zur automatisierten Verarbeitung der Klimadatenätze. Wichtige Komponenten sind die implementierten Werkzeuge (gelb), die ausgegebenen und im darauffolgenden Arbeitsschritt weiterverarbeiteten Dateien (grün), die im Zuge der Ausführung konstant bleibenden Inputdateien (Fangraster, Ausdehnung der Verarbeitung, Polygone zum Ausschneiden; blau) sowie der Iterator, welcher die Elemente des Rasterkatalogs durchläuft (orange).....	24
Abbildung 5: Schematische Darstellung des mit dem ModelBuilder erstellten Modells zur automatisierten Verarbeitung der Datensätze zur Klimazukunft. Wichtige Komponenten sind die implementierten Werkzeuge (gelb), die ausgegebenen und im darauffolgenden Arbeitsschritt weiterverarbeiteten Dateien (grün), die im Zuge der Ausführung konstant bleibenden Inputdateien (Ausdehnung der Verarbeitung, Polygone zum Ausschneiden, Fangraster; blau) sowie der Iterator, welcher die Feature Classes durchläuft (orange)..	26
Abbildung 6: Ausprägung ausgewählter Klimaparameter in der Periode 1981-2010 innerhalb der Waldgruppen. A: Jahresmitteltemperatur, B: Jahresniederschlag, C: Dauer der Vegetationsperiode, D: Anzahl heißer Tage, E: Mittlere Dauer der Trockenperioden, F: Anzahl der Frosttage, G: Dauer der Borkenkäfersaison, H: Dauer der Winterschneedecke, I: Mittlere jährliche Sonneneinstrahlung.....	39
Abbildung 7: Saisonale Mitteltemperatur (A) und Niederschlagssumme (B) innerhalb der Waldgruppen in der Periode 1981-2010.....	40
Abbildung 8: Korrelationsplot mit Angabe des Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen den zu Beginn der Analysen verwendeten Variablen. Die Größe der Kreise sowie die Intensität der Einfärbung visualisieren die Stärke des Zusammenhanges, während die Farbe die Richtung des Zusammenhanges zwischen den Variablen darstellt.....	46
Abbildung 9: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Temperatur“ (horizontale Achse; Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).....	47
Abbildung 10: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Temperatur in der Vegetationszeit“ (horizontale Achse; Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).....	47
Abbildung 11: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Temperatur außerhalb der Vegetationszeit“ (horizontale Achse; Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).....	48

Abbildung 12: Streuung der Waldgruppen entlang der Komponente „Hitze und Trockenheit“ (horizontale Achse) und Ladungen der Variablen mittlere Dauer der Trockenperiode ( <i>trdau</i> ), Sommerniederschlag ( <i>rrjja</i> ) und Anzahl der heißen Tage ( <i>hss</i> ) auf den Komponenten (Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder = hellblau, Buchenwälder = violett, Fichten-Tannen-Buchenwälder = grün, Fichten-Tannenwälder = rot, subalpine Fichtenwälder = blau).....	49
Abbildung 13: Ausprägungen von Jahresmitteltemperatur (A), Jahresniederschlag (B) und Vegetationsperiode (C) in den unterschiedlichen Perioden innerhalb der Fichten-Tannen-Buchenwälder. ....	50
Abbildung 14: Jahreszeitliche Verteilung der Temperaturen (A) und der Niederschläge (B) innerhalb der Fichten-Tannen-Buchenwälder über die drei Klimaperioden. ....	50
Abbildung 15: Klimahüllen der unterschiedlichen Perioden mit den Variablen Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur für alle Waldgruppen (A = Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder, B = Buchenwälder, C = Fichten-Tannen-Buchenwälder, D = Fichten-Tannenwälder, E = Subalpine Fichtenwälder).....	54
Abbildung 16: Kartografische Darstellung der in Stufen gegliederten potenziellen Einwirkung der Klimaveränderungen (Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag) auf die fünf ausgewählten Waldgruppen in der Fichten-Tannen-Buchenzone (schwarz umrandet)..	57
Abbildung 17: Ausprägungen von Jahresmitteltemperatur (A), Jahresniederschlag (B) und Vegetationsperiode (C) in den unterschiedlichen Perioden innerhalb des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere. ....	70
Abbildung 18: Jahreszeitliche Verteilung der Temperaturen (A) und der Niederschläge (B) innerhalb des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere.....	71

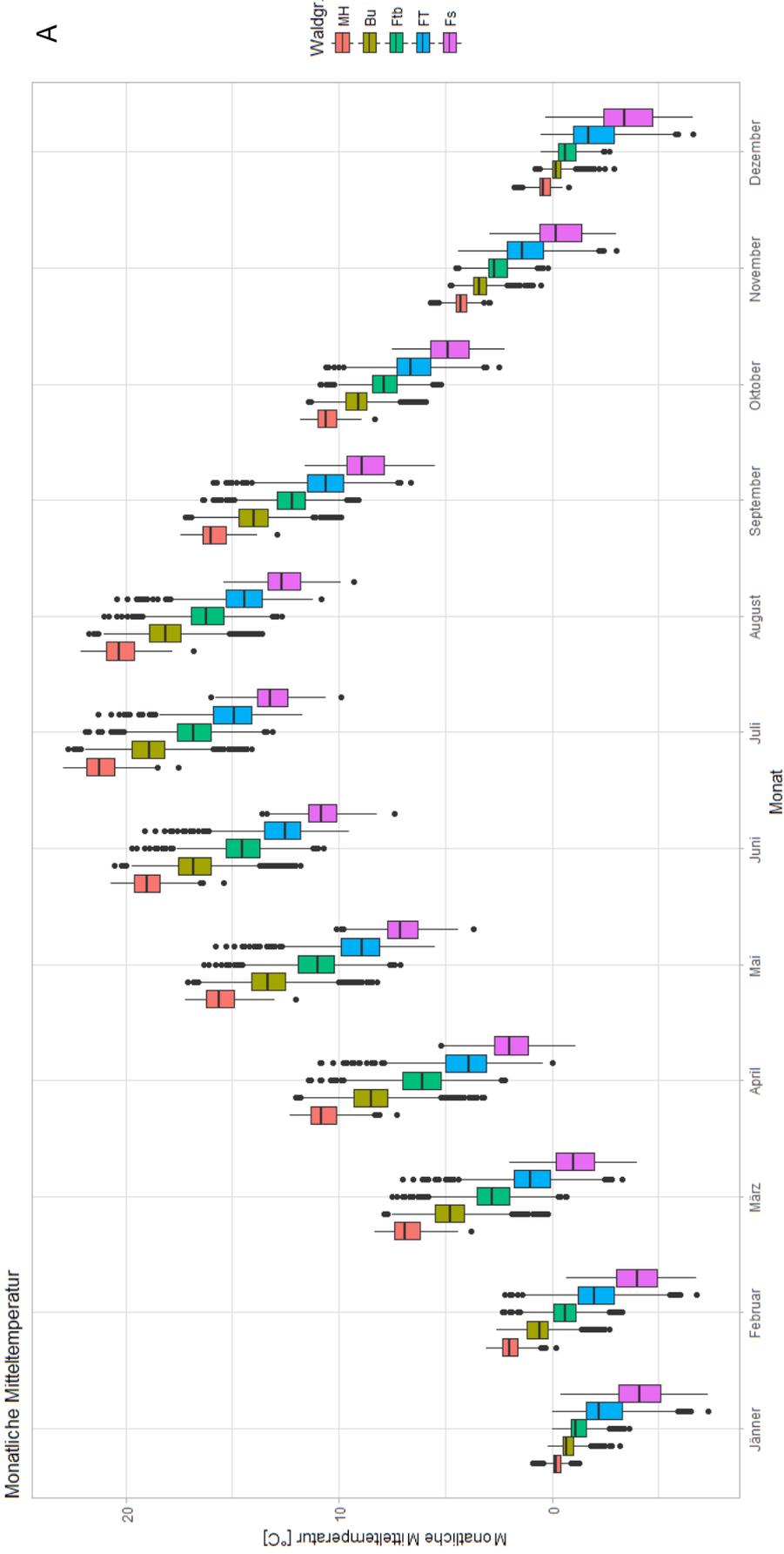
## 9 Abkürzungsverzeichnis

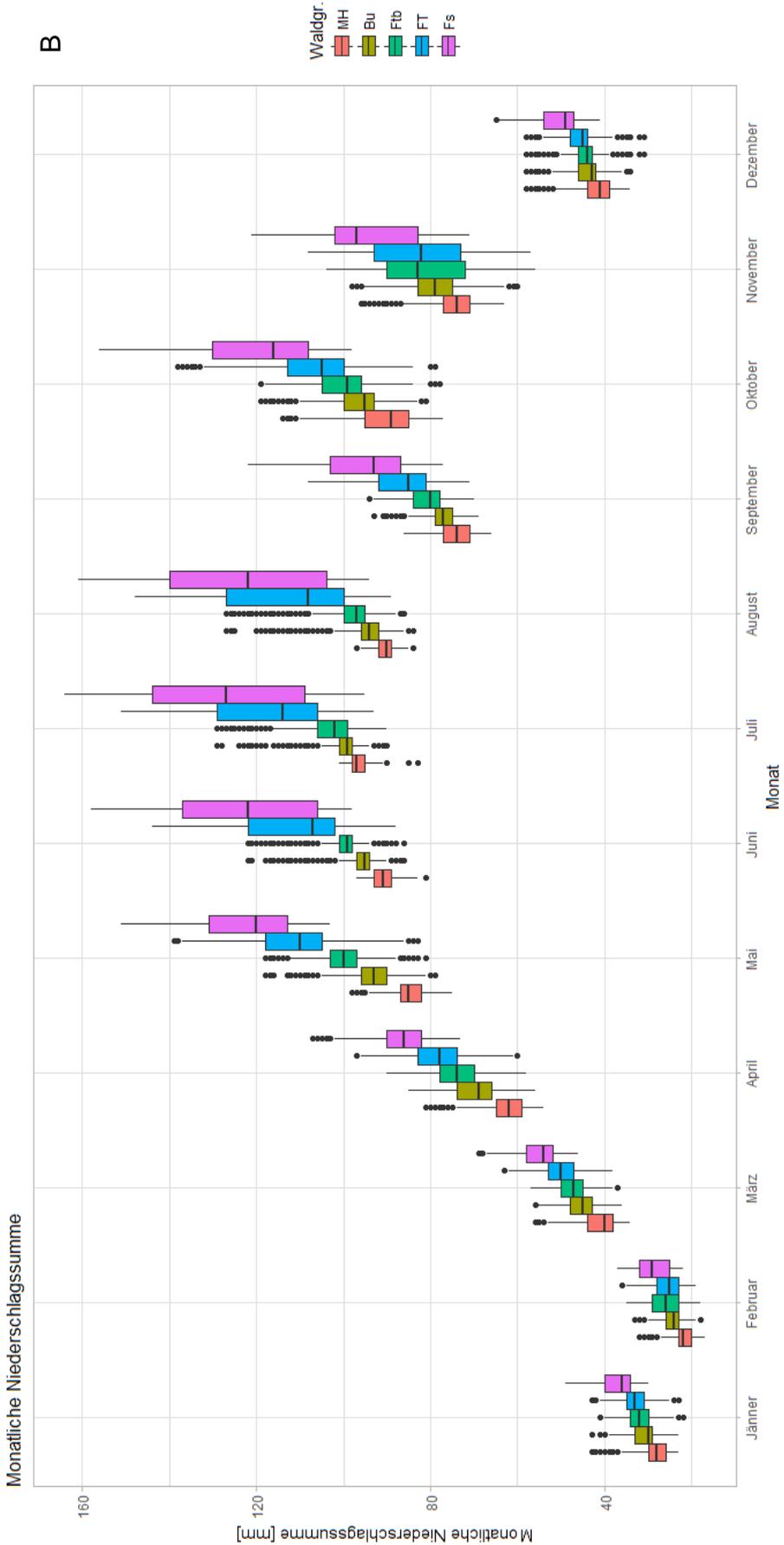
bkb	Beginn Borkenkäfersaison [d]
bkd	Dauer Borkenkäfersaison [d]
bke	Ende Borkenkäfersaison [d]
Bu	Buchenwälder
fro	Anzahl Frosttage [d]
Fs	subalpine Fichtenwälder
FT	Fichten-Tannenwälder
Ftb	Fichten-Tannen-Buchenwälder
Ftb 4	Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere
hss	Heiße Tage [d]
MH	Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder
rr	Mittlere Jahressumme Niederschlag [mm]
rr01	Mittlere Monatssumme Niederschlag Jänner [mm]
rr02	Mittlere Monatssumme Niederschlag Februar [mm]
rr03	Mittlere Monatssumme Niederschlag März [mm]
rr04	Mittlere Monatssumme Niederschlag April [mm]
rr05	Mittlere Monatssumme Niederschlag Mai [mm]
rr06	Mittlere Monatssumme Niederschlag Juni [mm]
rr07	Mittlere Monatssumme Niederschlag Juli [mm]
rr08	Mittlere Monatssumme Niederschlag August [mm]
rr09	Mittlere Monatssumme Niederschlag September [mm]
rr10	Mittlere Monatssumme Niederschlag Oktober [mm]
rr11	Mittlere Monatssumme Niederschlag November [mm]
rr12	Mittlere Monatssumme Niederschlag Dezember [mm]
rrdjf	Mittlere saisonale Summe Niederschlag Winter [mm]
rrjja	Mittlere saisonale Summe Niederschlag Sommer [mm]
rrmam	Mittlere saisonale Summe Niederschlag Frühjahr [mm]
rrson	Mittlere saisonale Summe Niederschlag Herbst [mm]
str	Mittlere jährliche Sonneneinstrahlung [Wh/m <sup>2</sup> ]
t	Mittlere jährliche Lufttemperatur [°C]
t01	Mittlere monatliche Lufttemperatur Jänner [°C]
t02	Mittlere monatliche Lufttemperatur Februar [°C]
t03	Mittlere monatliche Lufttemperatur März [°C]
t04	Mittlere monatliche Lufttemperatur April [°C]
t05	Mittlere monatliche Lufttemperatur Mai [°C]
t06	Mittlere monatliche Lufttemperatur Juni [°C]

t07	Mittlere monatliche Lufttemperatur Juli [°C]
t08	Mittlere monatliche Lufttemperatur August [°C]
t09	Mittlere monatliche Lufttemperatur September [°C]
t10	Mittlere monatliche Lufttemperatur Oktober [°C]
t11	Mittlere monatliche Lufttemperatur November [°C]
t12	Mittlere monatliche Lufttemperatur Dezember [°C]
tdjf	Mittlere saisonale Lufttemperatur Winter [°C]
tjja	Mittlere saisonale Lufttemperatur Sommer [°C]
tmam	Mittlere saisonale Lufttemperatur Frühjahr [°C]
trdau	Mittlere Dauer Trockenperiode [d]
tson	Mittlere saisonale Lufttemperatur Herbst [°C]
veg5b	Beginn Vegetationsperiode $\geq 5$ °C [d]
veg5	Dauer Vegetationsperiode $\geq 5$ °C [d]
veg5e	Ende Vegetationsperiode $\geq 5$ °C [d]
wdb	Beginn Winterschneedecke [d]
wdd	Dauer Winterschneedecke [d]
wde	Ende Winterschneedecke [d]

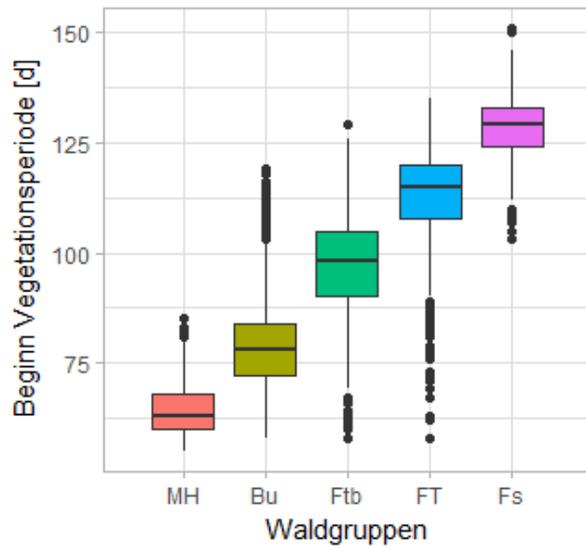
## Anhang A

Darstellung der aktuellen Ausprägung (Periode 1981-2010) innerhalb der Waldgruppen von monatlicher Mitteltemperatur (A), monatlicher Niederschlagssumme (B), Beginn (C) und Ende (D) der Vegetationsdauer, Beginn (E) und Ende (F) der Borkenkäfersaison sowie Beginn (G) und Ende (H) der Winterschneedecke

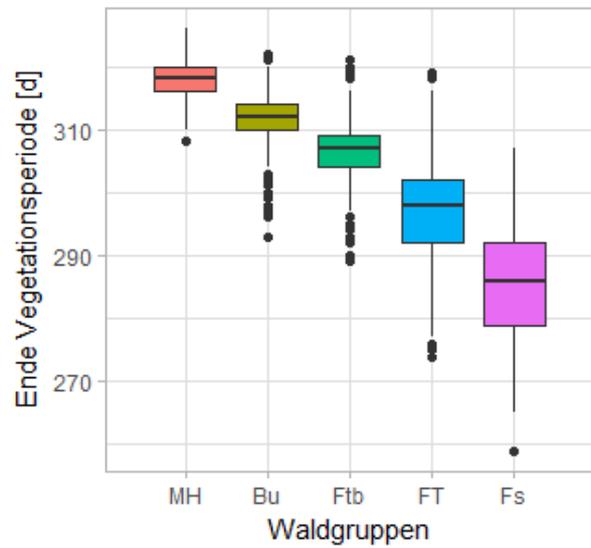




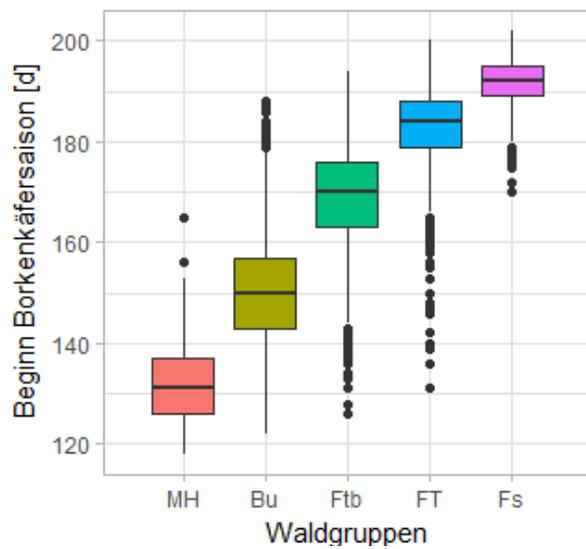
**C** Beginn Vegetationsperiode



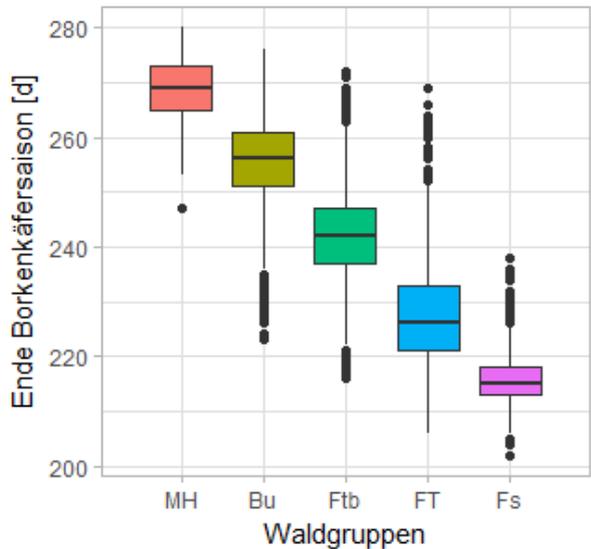
**D** Ende Vegetationsperiode



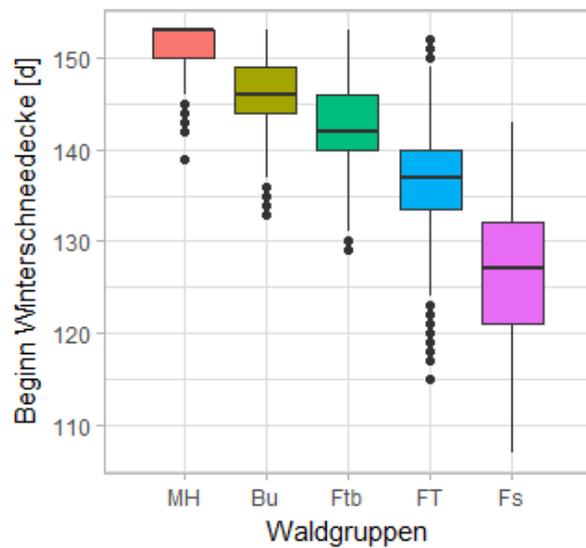
**E** Beginn Borkenkäfersaison



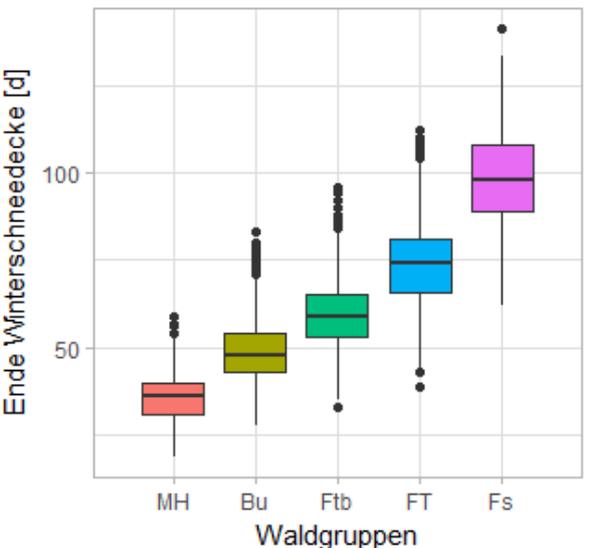
**F** Ende Borkenkäfersaison



**G** Beginn Winterschneedecke



**H** Ende Winterschneedecke



## **Anhang B**

Überlagerungen der Klimaparameter zwischen den Waldgruppen

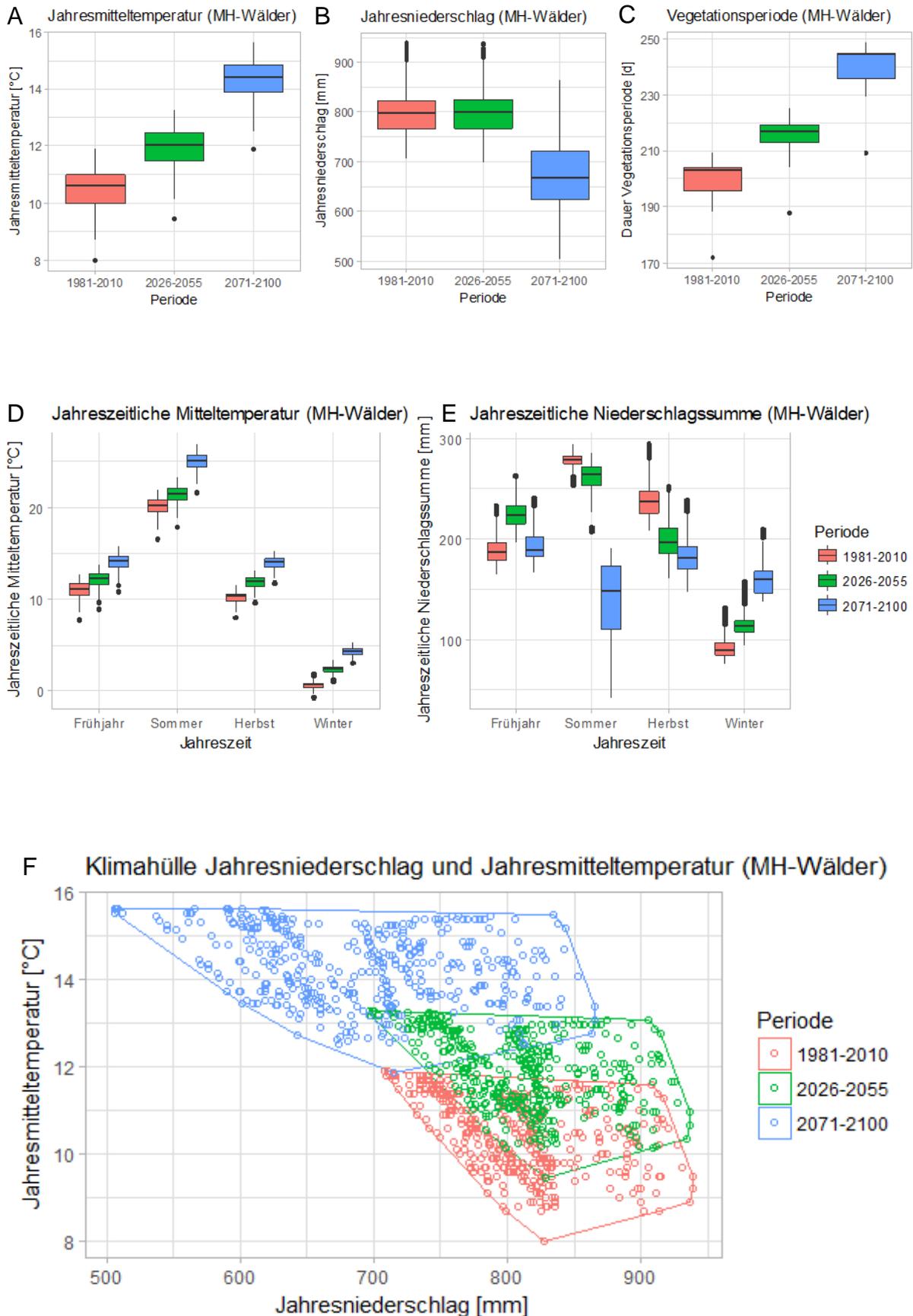
Überlappung zwischen:	MH		Bu				Ftb				FT				Fs	
	Bu		Ftb		MH		FT		Bu		Fs		Ftb		FT	
	Überlappungsbereich	Anteil an MH [%]	Überlappungsbereich	Anteil an Bu [%]	Überlappungsbereich	Anteil an Bu [%]	Überlappungsbereich	Anteil an Ftb [%]	Überlappungsbereich	Anteil an Ftb [%]	Überlappungsbereich	Anteil an FT [%]	Überlappungsbereich	Anteil an FT [%]	Überlappungsbereich	Anteil an Fs [%]
str [kWh/m <sup>2</sup> ]	814	88	877	99	814	92	856	98	877	100	743	85	856	98	743	98
t [°C]	0,7	35	1,3	45	0,7	24	1,8	64	1,3	46	2,2	50	1,8	41	2,2	65
t01 [°C]	0,5	56	0,8	67	0,5	42	1,2	80	0,8	53	3,2	70	1,2	26	3,2	82
t02 [°C]	0,7	44	1,2	48	0,7	28	1,6	67	1,2	50	2,7	57	1,6	34	2,7	77
t03 [°C]	0,9	38	1,7	46	0,9	24	2,0	59	1,7	50	2,4	50	2,0	42	2,4	67
t04 [°C]	0,8	31	2,1	50	0,8	19	2,4	59	2,1	51	2,0	41	2,4	49	2,0	59
t05 [°C]	0,9	32	2,0	49	0,9	22	2,3	59	2,0	51	1,7	38	2,3	51	1,7	53
t06 [°C]	0,8	30	1,8	46	0,8	21	2,3	61	1,8	47	1,5	36	2,3	55	1,5	50
t07 [°C]	0,9	32	1,8	46	0,9	23	2,4	65	1,8	49	1,7	40	2,4	56	1,7	53
t08 [°C]	0,9	33	1,7	46	0,9	24	2,3	66	1,7	49	2,0	44	2,3	51	2,0	61
t09 [°C]	0,9	38	1,5	45	0,9	27	2,0	65	1,5	48	2,3	51	2,0	44	2,3	64
t10 [°C]	0,6	33	1,2	50	0,6	25	1,5	63	1,2	50	2,4	59	1,5	37	2,4	71
t11 [°C]	0,5	39	0,8	50	0,5	31	1,3	72	0,8	44	2,8	67	1,3	31	2,8	74
t12 [°C]	0,5	46	0,8	73	0,5	45	1,2	75	0,8	50	3,4	76	1,2	27	3,4	79
tdif [°C]	0,6	50	0,8	53	0,6	40	1,4	78	0,8	44	3,1	67	1,4	30	3,1	79
tmam [°C]	0,9	35	1,9	46	0,9	22	2,3	61	1,9	50	2,1	44	2,3	48	2,1	60
tija [°C]	0,9	32	1,8	47	0,9	24	2,3	62	1,8	49	1,7	40	2,3	53	1,7	53
tson [°C]	0,6	35	1,2	50	0,6	25	1,6	64	1,2	48	2,4	57	1,6	38	2,4	69
hss [d]	9	32	8	32	9	36	3	32	8	80	0	3	3	100	0	100
fro [d]	12	61	20	53	12	32	22	54	20	50	32	56	22	38	32	64
veg5b [d]	7	47	16	52	7	23	18	55	16	48	7	23	18	60	7	35
veg5 [d]	9	39	20	49	9	22	24	56	20	47	21	38	24	44	21	48
veg5e [d]	3	38	5	45	3	27	7	64	5	45	14	56	7	28	14	58
bkb [d]	9	41	16	47	9	26	13	46	16	57	8	32	13	52	8	62
bkd [d]	16	42	27	47	16	28	30	57	27	51	14	25	30	54	14	61
bke [d]	7	44	13	52	7	28	16	64	13	52	7	23	16	52	7	58
rr [mm]	93	61	109	78	93	66	110	79	109	78	233	83	110	39	233	67
rr01 [mm]	11	79	12	100	11	92	11	92	12	100	9	82	11	100	9	64
rr02 [mm]	8	73	10	100	8	80	9	90	10	100	10	91	9	82	10	83
rr03 [mm]	12	75	12	86	12	86	11	85	12	92	9	69	11	85	9	60
rr04 [mm]	13	68	13	72	13	72	15	88	13	76	14	67	15	71	14	61
rr05 [mm]	5	38	7	54	5	38	9	60	7	47	22	71	9	29	22	67
rr06 [mm]	4	44	5	56	4	44	8	67	5	42	33	92	8	22	33	73
rr07 [mm]	2	33	8	100	2	25	16	80	8	40	45	100	16	36	45	79
rr08 [mm]	7	70	7	70	7	70	12	75	7	44	41	95	12	28	41	79
rr09 [mm]	7	64	9	75	7	58	12	86	9	64	19	83	12	52	19	66
rr10 [mm]	19	73	22	88	19	76	23	92	22	88	27	79	23	68	27	64
rr11 [mm]	21	84	25	96	21	81	27	96	25	89	29	94	27	87	29	78
rr12 [mm]	15	83	16	100	15	94	14	82	16	94	10	71	14	100	10	67
rrjif [mm]	34	81	38	95	34	85	32	84	38	100	25	78	32	100	25	66
rrmam [mm]	29	60	30	70	29	67	28	74	30	79	43	68	28	44	43	62
rrja [mm]	7	35	20	91	7	32	33	75	20	45	119	96	33	27	119	77
rrson [mm]	45	73	55	92	45	75	60	91	55	83	72	86	60	71	72	67
trdau [d]	0	33	0	80	0	20	0	67	0	67	1	75	0	50	1	75
wdb [d]	6	100	10	77	6	46	7	54	10	77	9	50	7	39	9	43
wdd [d]	16	48	29	78	16	43	23	52	29	66	24	43	23	41	24	39
wde [d]	11	48	20	77	11	42	18	56	20	63	15	38	18	46	15	37

	0-24,99 %
	25-49,99 %
	50-74,99 %
	75-100 %

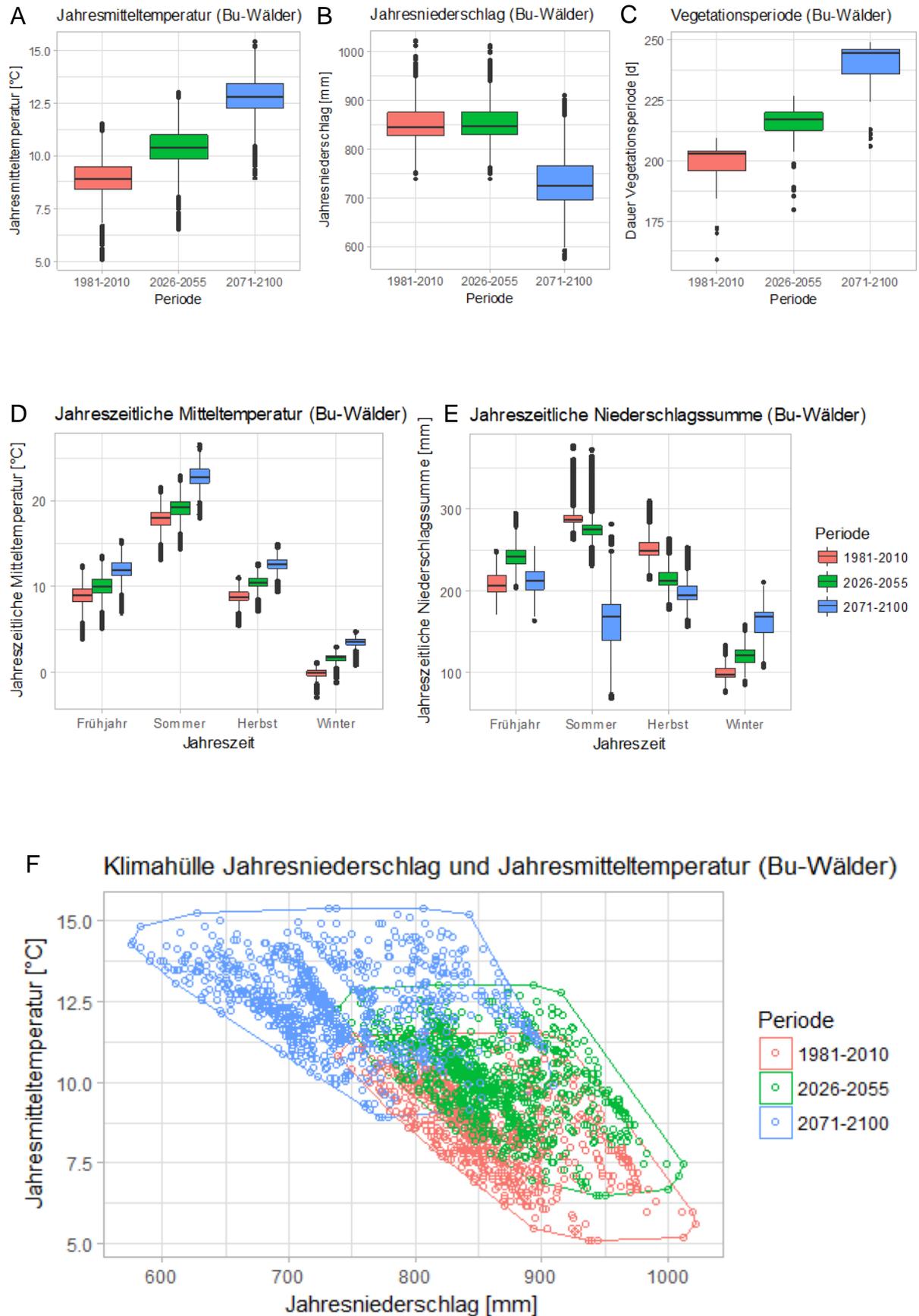
## Anhang C

Grafische Darstellung von Jahresmitteltemperatur (A), Jahresniederschlag (B), Dauer der Vegetationsperiode (C) sowie der jahreszeitlichen Verteilung von Temperatur (D) und Niederschlag (E) in den unterschiedlichen Perioden und Klimahüllen der unterschiedlichen Perioden mit den Variablen Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur (F) jeweils getrennt nach Waldgruppen

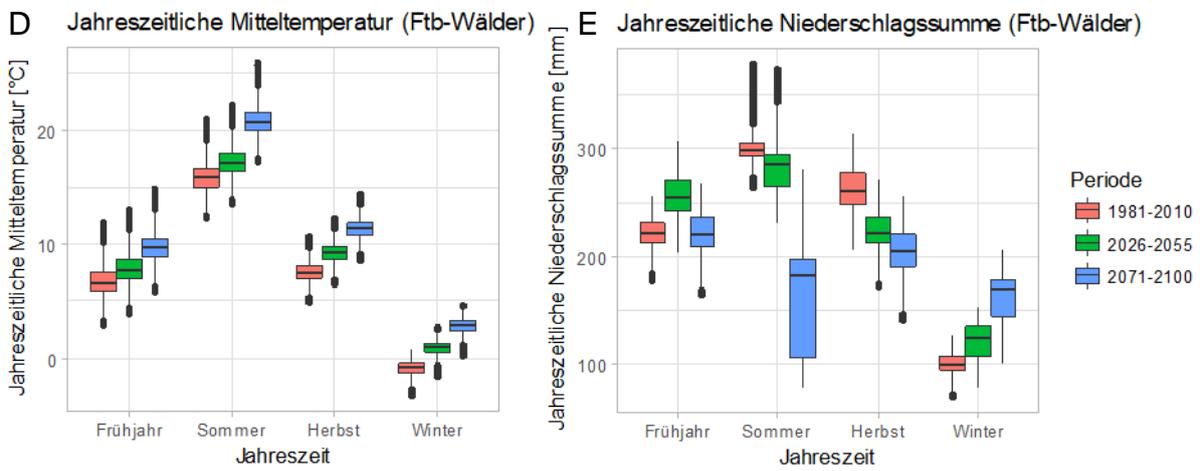
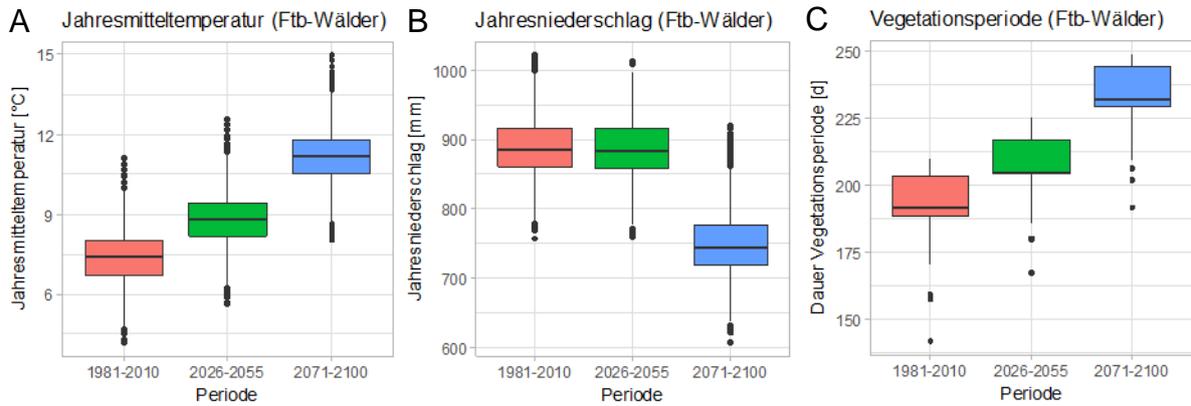
## Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder



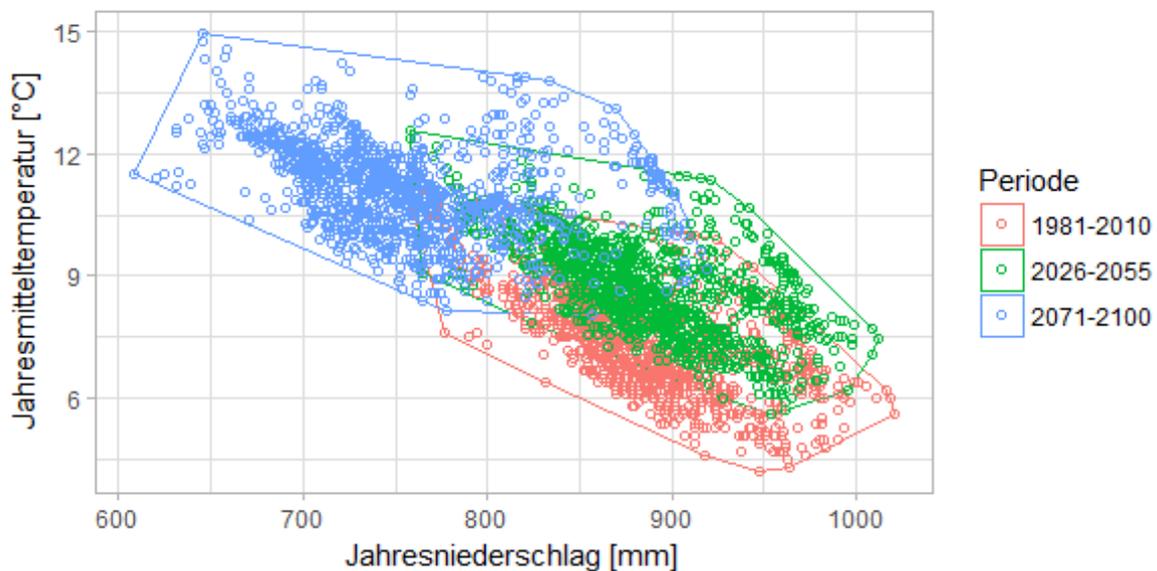
## Buchenwälder



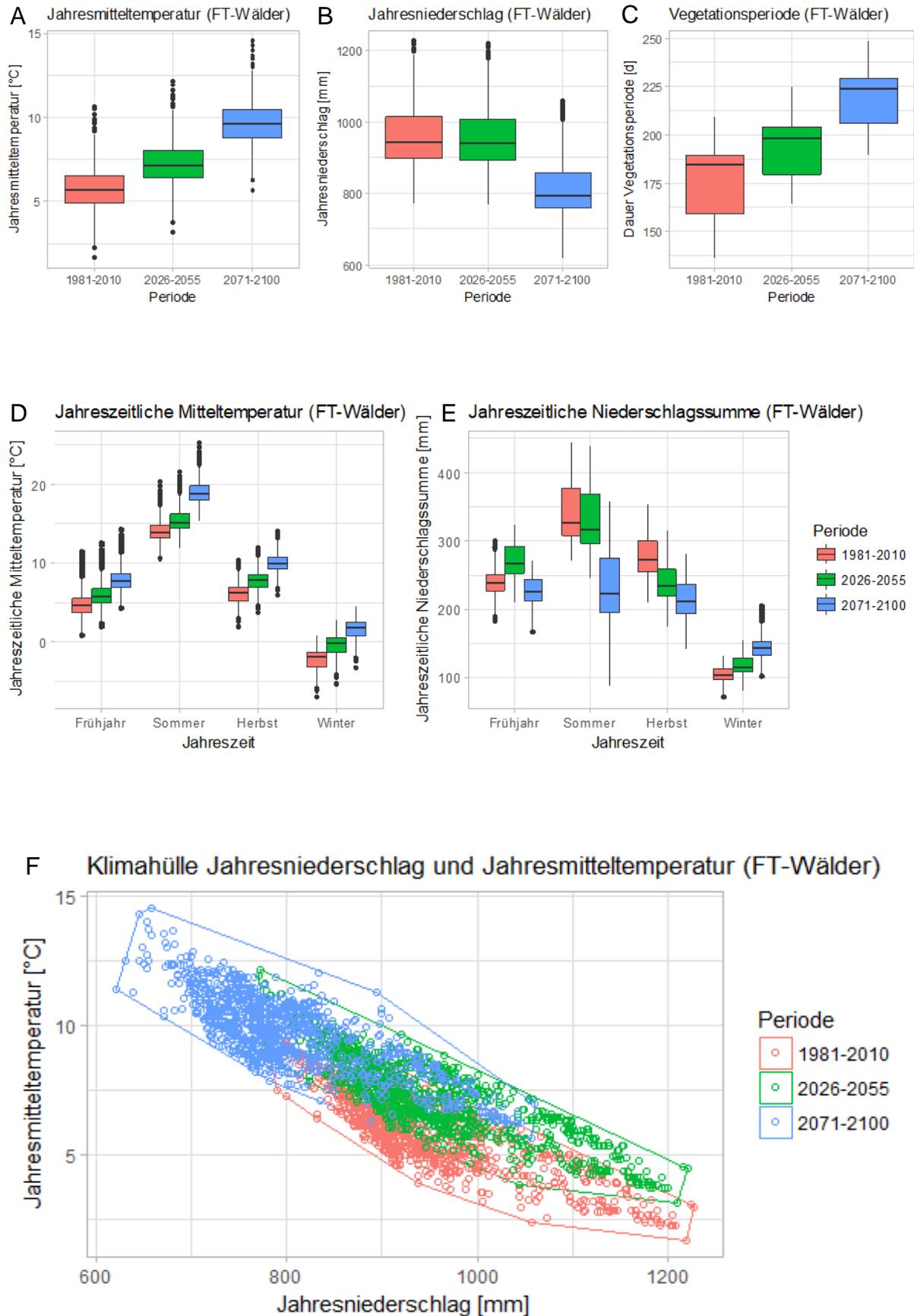
Fichten-Tannen-Buchenwälder



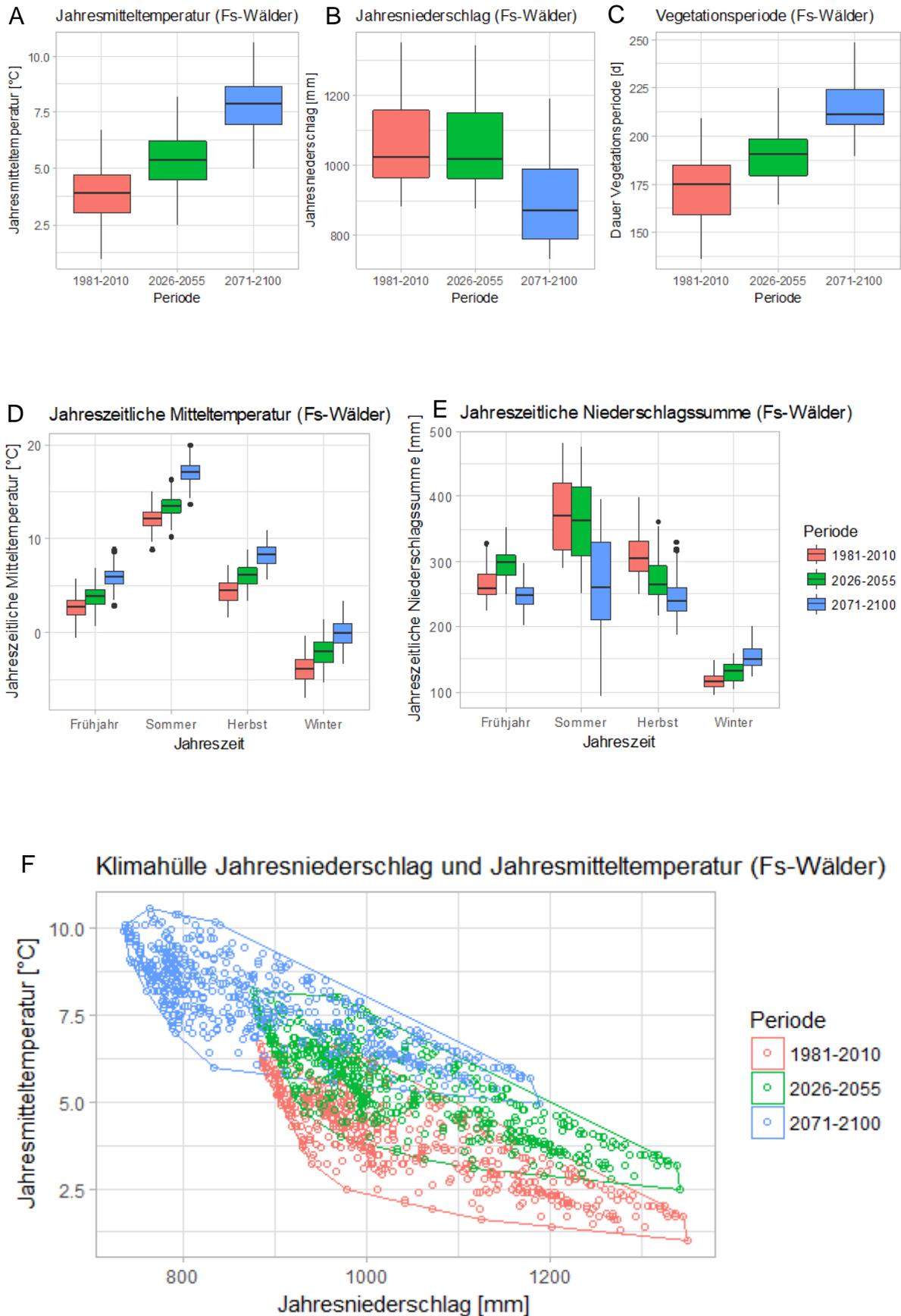
**F Klimahülle Jahresniederschlag und Jahresmitteltemperatur (Ftb-Wälder)**



## Fichten-Tannenwälder



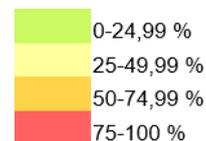
## Subalpine Fichtenwälder



## Anhang D

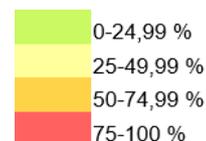
Überlagerung der aktuellen Ausprägung der Klimavariablen (1981-2010) mit den zukünftigen Perioden (2026-2055 und 2071-2100)

Buchenwälder								
Parameter	1981-2010 ↔ 2026-2055				1981-2010 ↔ 2071-2100			
	Bereich 2026-2055 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2026-2055 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]
<i>t</i> [°C]	1,5	50	1,4	50	0,0	0	2,9	100
<i>tmam</i> [°C]	2,9	72	1,2	28	1,1	26	3,0	74
<i>tja</i> [°C]	2,5	67	1,3	33	0,0	0	3,8	100
<i>tson</i> [°C]	0,7	31	1,7	69	0,0	0	2,4	100
<i>tdjf</i> [°C]	0,0	0	1,5	100	0,0	0	1,5	100
<i>rr</i> [mm]	138	98	2	2	47	34	93	66
<i>rrmam</i> [mm]	10	23	33	77	43	99	0	1
<i>rrja</i> [mm]	12	57	10	43	0	0	22	100
<i>rrson</i> [mm]	19	32	41	68	2	3	58	97
<i>rrdjf</i> [mm]	23	58	17	42	0	0	40	100
<i>veg5</i> [d]	12	47	13	53	0	0	25	100



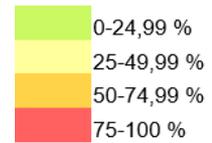
Mannaeschen-Hopfenbuchenwälder								
Parameter	1981-2010 ↔ 2026-2055				1981-2010 ↔ 2071-2100			
	Bereich 2026-2055 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2026-2055 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]
<i>t</i> [°C]	0,5	27	1,5	73	0,0	0	2,0	100
<i>tmam</i> [°C]	1,5	59	1,1	41	0,0	0	2,6	100
<i>tja</i> [°C]	1,5	54	1,3	46	0,0	0	2,8	100
<i>tson</i> [°C]	0,1	3	1,6	97	0,0	0	1,7	100
<i>tdjf</i> [°C]	0,0	0	1,2	100	0,0	0	1,2	100
<i>rr</i> [mm]	149	98	3	2	61	40	91	60
<i>rrmam</i> [mm]	15	31	33	69	46	95	2	5
<i>rrja</i> [mm]	11	54	9	46	0	0	20	100
<i>rrson</i> [mm]	24	38	38	62	5	7	57	93
<i>rrdjf</i> [mm]	23	55	19	45	0	0	42	100
<i>veg5</i> [d]	21	57	16	43	0	0	37	100

Fichten-Tannen-Buchenwälder								
Parameter	1981-2010 ↔ 2026-2055				1981-2010 ↔ 2071-2100			
	Bereich 2026-2055 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2026-2055 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]
<i>t</i> [°C]	1,4	49	1,4	51	0,0	0	2,8	100
<i>tmam</i> [°C]	2,6	70	1,2	30	0,8	20	3,0	80
<i>tjja</i> [°C]	2,5	66	1,2	34	0,0	0	3,7	100
<i>tson</i> [°C]	0,9	34	1,6	66	0,0	0	2,5	100
<i>tdjf</i> [°C]	0,0	0	1,8	100	0,0	0	1,8	100
<i>rr</i> [mm]	136	98	3	2	61	44	78	56
<i>rrmam</i> [mm]	11	28	27	72	38	100	0	0
<i>rrjja</i> [mm]	34	78	10	22	0	0	44	100
<i>rrson</i> [mm]	21	32	45	68	10	16	56	84
<i>rrdjf</i> [mm]	25	66	13	34	0	0	38	100
<i>veg5</i> [d]	24	61	15	39	0	0	39	100



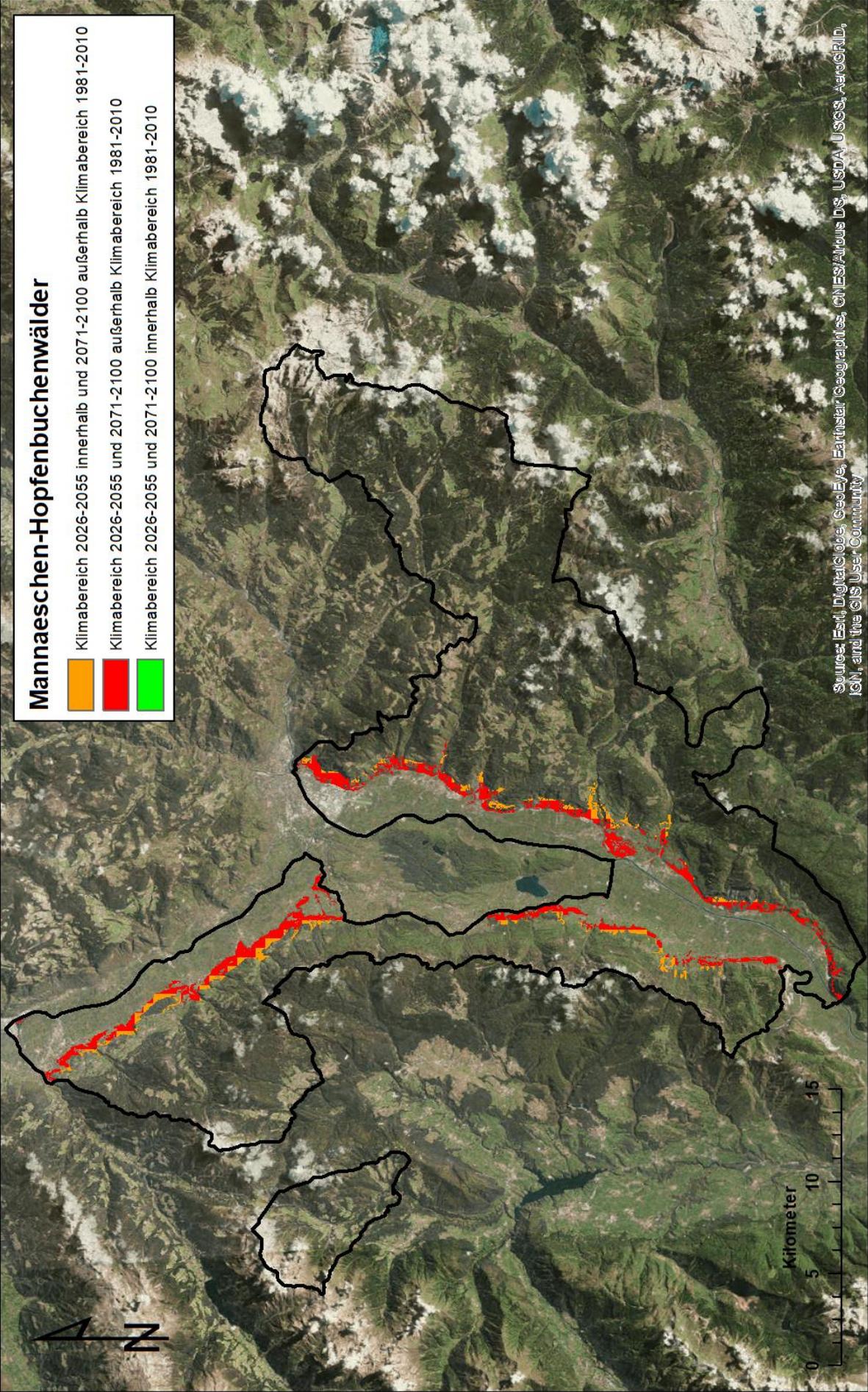
Fichten-Tannenwälder								
Parameter	1981-2010 ↔ 2026-2055				1981-2010 ↔ 2071-2100			
	Bereich 2026-2055 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2026-2055 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]
<i>t</i> [°C]	2,9	67	1,5	33	0,4	10	4,0	90
<i>tmam</i> [°C]	3,6	74	1,2	26	1,4	28	3,4	72
<i>tjja</i> [°C]	3,0	69	1,3	31	0,0	0	4,3	100
<i>tson</i> [°C]	2,5	59	1,7	41	0,2	6	4,0	94
<i>tdjf</i> [°C]	3,0	64	1,6	36	0,9	20	3,7	80
<i>rr</i> [mm]	273	97	8	3	119	42	162	58
<i>rrmam</i> [mm]	38	60	25	40	42	67	21	33
<i>rrjja</i> [mm]	114	92	10	8	34	27	90	73
<i>rrson</i> [mm]	46	55	38	45	15	18	69	82
<i>rrdjf</i> [mm]	22	69	10	31	0	1	32	99
<i>veg5</i> [d]	37	59	25	41	12	20	50	80

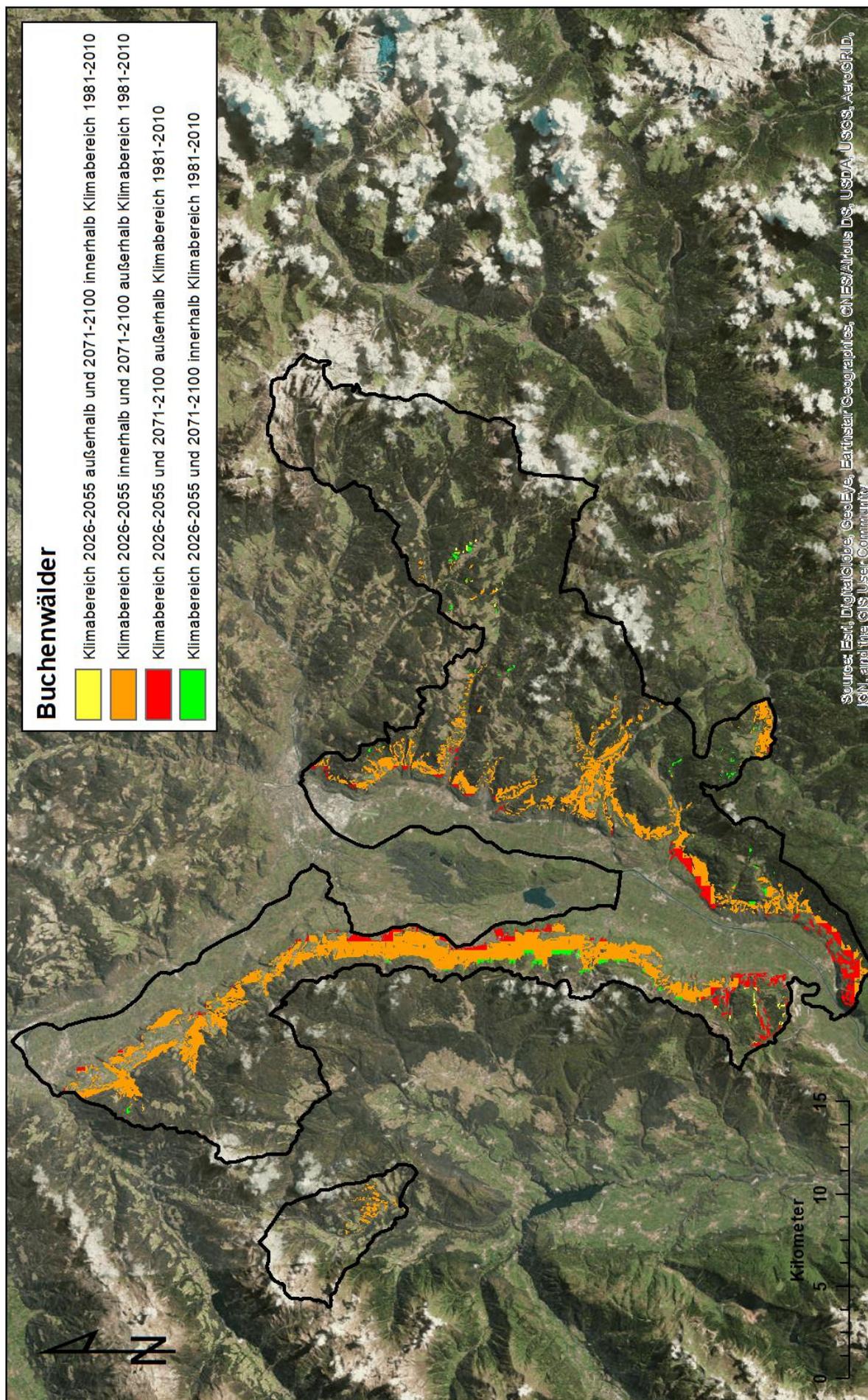
Subalpine Fichtenwälder								
Parameter	1981-2010 ↔ 2026-2055				1981-2010 ↔ 2071-2100			
	Bereich 2026-2055 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2026-2055 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 unverändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]	Bereich 2071-2100 verändert	Anteil an Bereich 1981-2010 [%]
	<i>t</i> [°C]	1,9	56	1,5	44	0,0	0	3,4
<i>tmam</i> [°C]	2,3	65	1,2	35	0,1	2	3,4	98
<i>tjja</i> [°C]	1,9	59	1,3	41	0,0	0	3,2	100
<i>tson</i> [°C]	1,8	52	1,7	48	0,0	0	3,5	100
<i>tdjf</i> [°C]	2,3	58	1,6	42	0,3	7	3,6	93
<i>rr</i> [mm]	335	97	11	3	182	53	164	47
<i>rrmam</i> [mm]	44	64	25	36	38	55	31	45
<i>rrjja</i> [mm]	147	95	7	5	68	44	86	56
<i>rrson</i> [mm]	69	64	38	36	35	33	72	67
<i>rrdjf</i> [mm]	28	74	10	26	4	12	34	88
<i>veg5</i> [d]	24	47	27	53	0	0	52	100

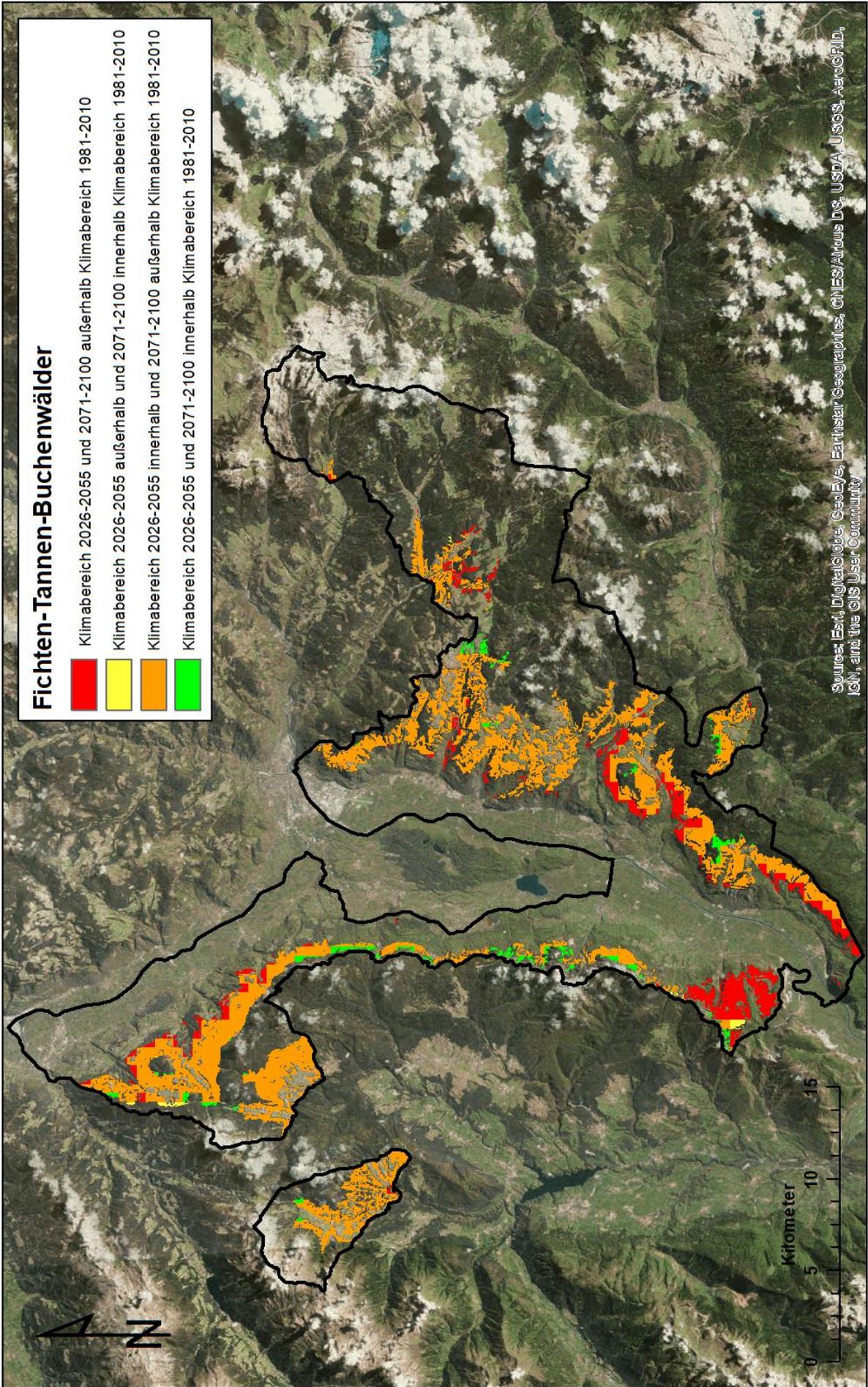


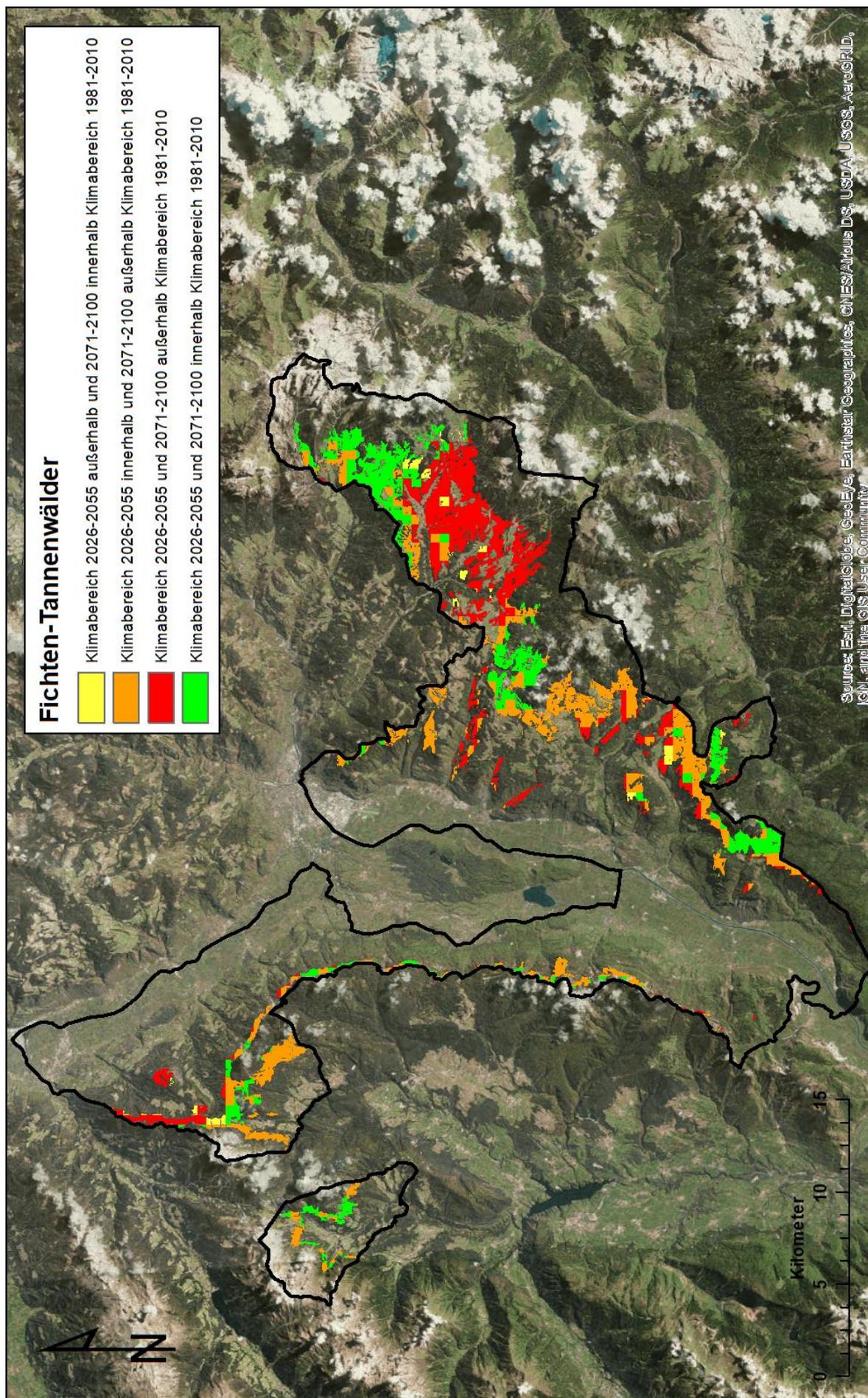
## Anhang E

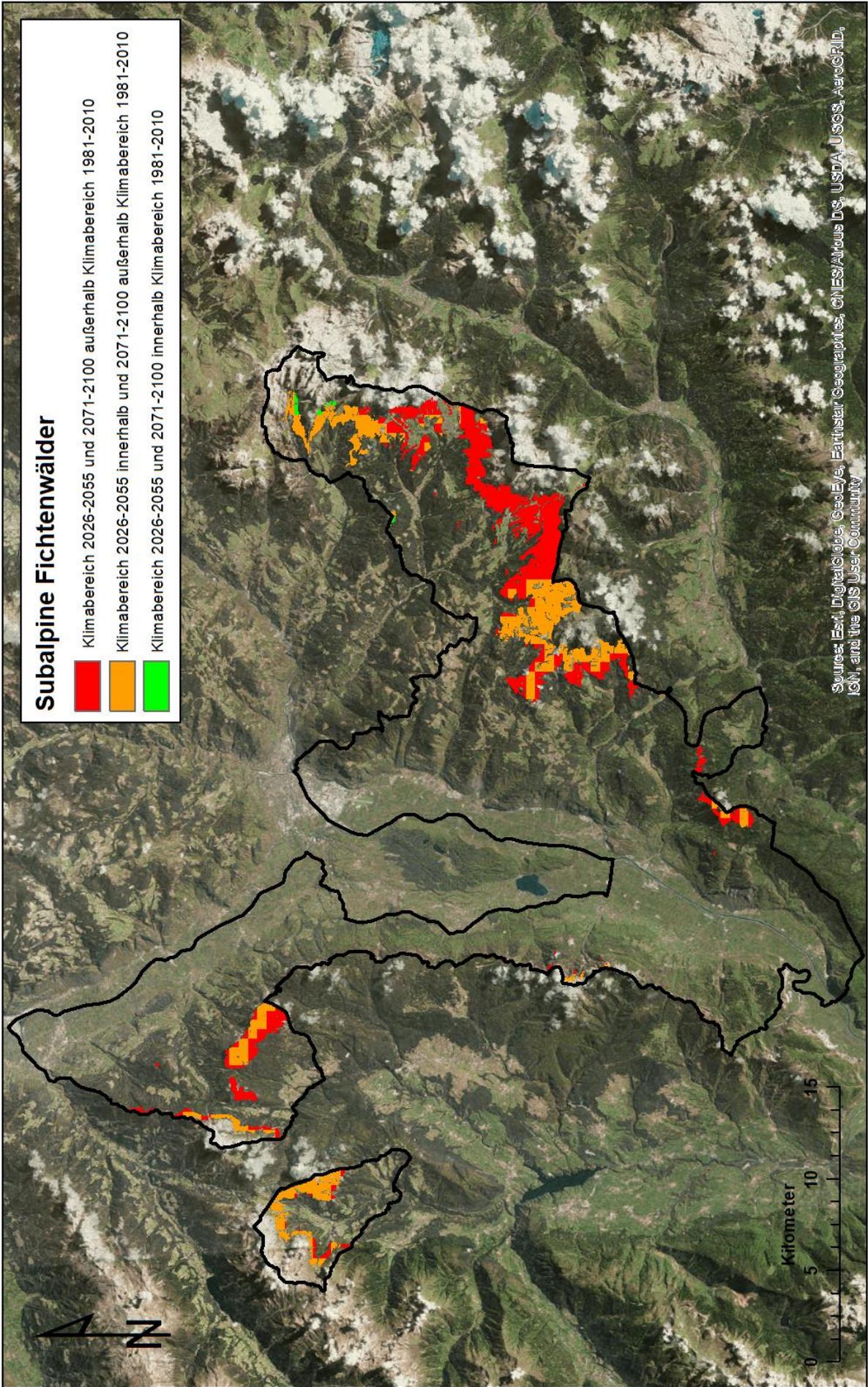
Kartografische Darstellungen der potenziellen Einwirkung von Klimaveränderungen (Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlag) in der Fichten-Tannen-Buchenzone, getrennt nach Waldgruppen











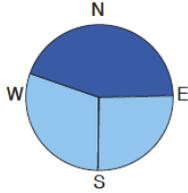
## **Anhang F**

Auszug aus der Waldtypisierung mit einer detaillierten Beschreibung des Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwaldes mit Heidelbeere (aus Amt für Forstplanung 2010a, S. 144f.)

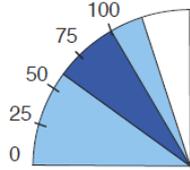
## Silikat-Fichten-Tannen-Buchenwald mit Heidelbeere

Polygonato verticillati-Fagetum vaccinetosum myrtilli

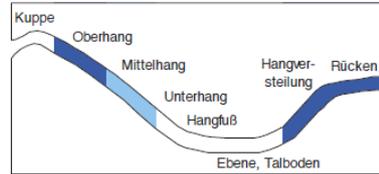
### Exposition



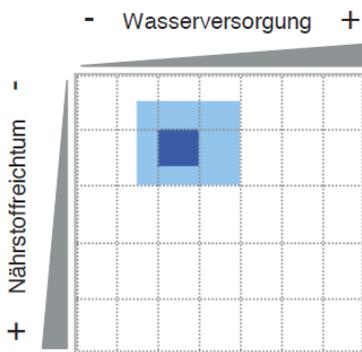
### Hangneigung



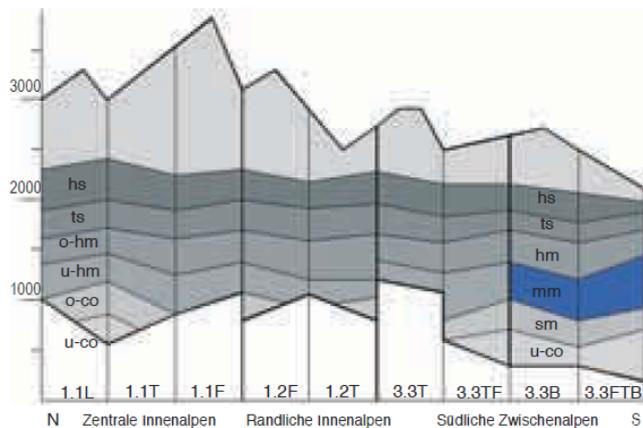
### Geländeform



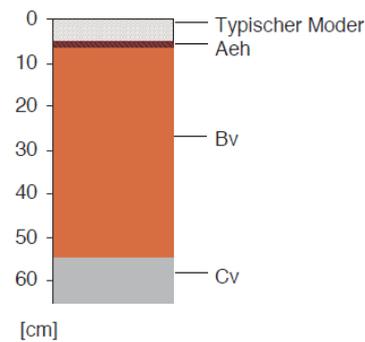
### Nährstoff- & Wasserhaushalt



### Höhenstufe



### Bodenprofil (Bsp.: Braunerde podsolig)



### Geologie & Bodenentwicklung

<b>Gesteine</b>	verschiedene saure und intermediäre Silikatgesteine, silikatische Lockersedimente
<b>Boden</b>	mittelgründige, podsolierte Braunerden oder verbrauchte Ranker (an Steilhängen); Bodenart leicht bis mittel
<b>Humus</b>	typischer oder rohhumusartiger Moder (seltener Rohhumus)

### Bodeneigenschaften

Gründigkeit	s. flach	flach	mittel	tief	s. tief
Skelettgehalt	vorwieg.	s. hoch	hoch	mäßig	gering
Bodenart	s. leicht	leicht	mittel	schwer	s. schwer

### Häufige Übergänge zu anderen Waldtypen

+	Wasser	Nährstoffe	Seehöhe	schuttig
	Ftb3	Ftb3	FT11	Bu16
	<u>Ftb4</u>	<u>Ftb4</u>	<u>Ftb4</u>	blockig
	Bu6 /Ki13	Ki13	Bu6	Fi11
			lawinar	
			erosiv	

## Erscheinungsbild

Die schattseitigen Rücken und Steilhänge, und im niederschlagsreicheren unteren Etschtal auch flachere Sonnhänge der mittelmontanen Stufe werden von einem mäßig wüchsigen Mischwald aus Rotbuche, Fichte und Tanne bestockt. Die Nadelbäume sind meist vorwüchsig, die Buche bleibt oft in der Unterschicht. Kiefer (selten auch Lärche) ist oft beigemischt. Eine Strauchschicht fehlt meist völlig bzw. wird nur von Verjüngung der Baumarten gebildet, Vogelbeere ist ein häufiger Begleiter.

In den Beständen kann die artenarme Kraut- bzw. Zwergstrauchschicht je nach Lichtangebot unterschiedlich stark decken. Jedenfalls setzt sie sich fast ausschließlich aus Säurezeigern zusammen. Die Heidelbeere ist hier üppiger, Schnee-Hainsimse, Drahtschmiele und Wachtelweizen-Arten sind bezeichnend. Frischezeiger wie Sauerklee oder Hasenlattich sowie anspruchsvollere Arten (Finger-Segge, Nesselblättrigem Ehrenpreis) treten dagegen deutlich zurück. Schneeheide und Nickendes Wintergrün sind typische Moderzeiger. Die Moosschicht ist mit typischen Nadelwaldarten gut vertreten (Zypressen-Schlafmoos, Stockwerkmoos etc.).



## Arten/Unterwuchs

latein	deutsch	Trennart zu
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Heidelbeere	
<i>Erica carnea</i>	Schneeheide	
<i>Avenella flexuosa</i>	Drahtschmiele	
<i>Hieracium murorum</i>	Wald-Habichtskraut	
<i>Luzula nivea</i>	Schnee-Hainsimse	KI13
<i>Melampyrum pratense</i>	Wiesen-Wachtelweizen	
<i>Orthilia secunda</i>	Nickendes Wintergrün	KI13
<i>Polypodium vulgare</i>	Gemeiner Tüpfelfarn	
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	Preiselbeere	Ftb3
<i>Hylocomium splendens</i>	Etagen-, Stockwerkmoos	
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Echtes Zypressen-Schlafmoos	

## Waldbauliche Beurteilung

**Baumarten:** Fichte subdominant bis dominant; Tanne eingesprengt bis subdominant; Buche stets, Lärche oft eingesprengt bis beigemischt; Rotkiefer oft eingesprengt bis subdominant; Vogelbeere, Edelkastanie, Hopfenbuche und Traubeneiche möglich.

**Produktivität:** Fichte und Buche sind gut wüchsig, Tanne und Lärche mäßig wüchsig. Fichte und Tanne erreichen Baumhöhen von über 30 m, haben aber meist nur mäßige Qualität. Buche erreicht meist nicht die Oberschicht und wird oft nur 20 m hoch. Lokal sind Steinschlag-schäden häufig. Rotkiefer ist oft wipfelgebrochen.

**Gefüge:** Lockere oder geschlossene, meist mehrschichtige Bestände. Einzelbaumstruktur überwiegt.

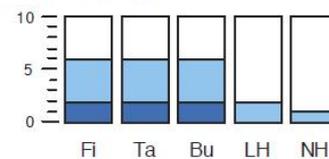
**Entstehung:** Lokal intensive Streunutzung und Waldweide haben die Bestände degradiert, Lärche und Rotkiefer wurden begünstigt.

**Waldfunktion:** Wirtschaftswälder mit Schutzfunktion gegen Erosion und Steinschlag. Teils haben die Wälder Erholungsfunktion.

**Entwicklung:** Bei natürlicher Entwicklung ohne Störungseinflüsse gehen die Anteile von Lärche und Rotkiefer zurück. Wildverbiss führt jedoch zu Baumartenentmischung, die Anteile von Tanne und Buche gehen zugunsten von Fichte zurück.

## Waldbauliche Behandlung

### Baumartenwahl:



Buche oder Tanne sind stets deutlich zu beteiligen, um der Podsolierung des Standorts entgegen zu wirken. Die Stabilitätsanforderungen bei Naturgefahren sind zu beachten.

**Naturverjüngung:** In aufgelichteten Beständen können lokal Gräser und Zwergsträucher verjüngungshemmend auftreten. Südseitig ist – v.a. bei direkter Sonneneinstrahlung – die Wasserversorgung limitiert. Buche verjüngt sich teils aus Stockausschlägen. Erst bei gesicherter Vorausverjüngung von Tanne und Buche unter Schirm kann Fichte durch Femelschlag (bis ½ Baumlänge) bzw. südseitig durch gezielte Entnahmen einzelner Altbäume gefördert werden.

**Waldpflege:** Dauerbestockung ist bei vorrangiger Schutzfunktion (Standortschutz, Steinschlagschutz) und aufgrund der Verjüngungsökologie von Tanne und Buche zu erhalten. Entzug von Streu ist zu vermeiden, um nicht die Podsolierung zu beschleunigen. Buche ist teils nur noch einzeln vertreten, Samenbäume sind zu erhalten und zu fördern. Im Übergang zum **FT11** gerät sie an ihre obere Verbreitungsgrenze.