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

Masterarbeit

Schutzwaldwirkung im Klimawandel am Beispiel Patscherkofel/ Tirol

Lukas Bauhofer, BSc.

(Matrikelnummer: 1240311)

Angestrebter akademischer Grad: Diplom- Ingenieur

Masterstudium: Forstwissenschaften

Erstbetreuer: Prof. Dr. Rupert Seidl

Zweitbetreuer: DI Alexander Ploner, Mag. Thomas Sönser

Wien, September 2020

Zusammenfassung

Gebirgswälder in Österreichs erfüllen wichtige Schutzfunktionen vor Naturgefahrenprozessen in dem sie diese verhindern oder das Risiko für Menschen und Infrastruktur senken. Jedoch sind sie selbst einem großen Risiko gegenüber biotischen und abiotischen Einwirkungen ausgesetzt. Insbesondere der Klimawandel stellt dabei eine bedeutende Kraft in der Dynamik der Schutzwälder dar. Dadurch wird die Schutzwaldbewirtschaftung vor neuen Herausforderungen gestellt.

Im Literaturteil dieser Masterarbeit wird daher ein Überblick über die schadensrelevanten Naturgefahrenprozesse im Schutzwald gegeben und erläutert werden, wie er vor diesen Gefahren schützt. Des Weiteren soll eine aktueller Wissenstand zum Klimawandel mit Fokus auf den Alpenraum und seine Auswirkungen auf den Schutzwald gegeben werden. Darauf aufbauend werden mögliche Adaptionsstrategien beschrieben, um den Schutzwald „klimafit“ zu bewirtschaften.

Anhand eines Fallbeispiels am Patscherkofel bei Innsbruck (Tirol, Österreich) sollen die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche in der Praxis angewandt werden. Dabei wird die aktuelle und zukünftige Schutzfunktionalität im Klimawandel von ausgewählten Schutzwaldbeständen bewertet. Die Schutzwaldbewertung erfolgt dabei nach der Methode „NaiS“ (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald). Da diese Methode den Faktor Klimawandel bisher nicht berücksichtigt, wird sie in dieser Arbeit dahingehend erweitert. Es wird ein RCP8.5- Klimawandelszenario für Tirol unterstellt. Es wird ein Beurteilungsverfahren für verschiedene Bestandesindikatoren entwickelt welches auf Erkenntnissen aus der Literaturauswertung basiert. Auf Grundlage dieser Bewertung kann ein Handlungsbedarf für die Bestände abgeleitet und mögliche Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Schutzfunktion im Klimawandel gegeben werden.

Die Literaturauswertung hat ergeben, dass der Anstieg der mittleren Temperatur infolge des Klimawandels während der letzten Jahrzehnte in den Alpen etwa doppelt so stark war wie im globalen Durchschnitt.

Auch die erwarteten Veränderungen des Klimas bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden daher auf Gebirgswälder und insbesondere ihrer Schutzfunktion einen nachhaltigen Einfluss haben. Durch den Klimawandel kann sich die Schutzwirkung an bisher kältelimitierten Standorten verbessern. Jedoch wird an trockenheitslimitierten Standorten mit einer zunehmenden Mortalität von trockenheitsempfindlichen Baumarten, insbesondere der Fichte, gerechnet. Große Einbußen der Schutzwaldwirkung werden auch im Zusammenhang mit großflächigen Störungen erwartet. Durch Förderung einer klimawandelorientierten Waldbewirtschaftung bspw. mittels Erhöhung der Struktur- und Baumartenvielfalt, kann den negativen Folgen des Klimawandels für den Naturgefahrenschutz entgegengewirkt werden.

Die Beurteilung der ausgewählten Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet Patscherkofel hat gezeigt, dass derzeit die vorhandenen Naturgefahrenpotentiale in der Bewirtschaftung wenig beachtet werden. Ebenso werden derzeit noch kaum

klimawandelorientierte Anpassungen umgesetzt. Insbesondere die untersuchten Bestände in den Tieflagen weisen einen großen Handlungsbedarf auf. Jedoch zeigen die Bestände im Allgemeinen ein gutes Ausgangspotenzial, um diese in einen „klimafitten“ Zustand zu bringen.

Die Erweiterung des Bewertungsverfahrens nach NaiS um den Faktor Klimawandel zeigt eine Möglichkeit für die Praxis auf, wie Schutzwaldbestände auf ihre zukünftige Funktionserfüllung hin bewertet werden können. Die Ergebnisse dazu zeigen jedoch eine deutliche Ungewissheit, da der Stand des aktuellen Wissens zum Klimawandel selbst, als auch dessen Folgen auf den Schutzwald in der Wissenschaft mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Daher ist hier noch viel Forschungsarbeit notwendig.

Abstract

Mountain forests in Austria fulfill important protective functions against natural hazards (e.g. rockfall, mass movements, debris flows, avalanches) by preventing them or reducing the risk for people and infrastructure. However, mountain forests exposed to a high risk of biotic and abiotic impacts. Climate change in particular poses a significant challenge for protection forests and their management. This also applies to the protection forests of the study area Patscherkofel near Innsbruck/Austria.

The aim of this master thesis is to synthesize the literature on climate change and protective forests and assess the present and future protective functionality of the protection forests in the study area. The assessment is based on the "NaiS" method (sustainability and performance monitoring in protection forests). This method currently does not explicitly consider the factor climate change. Therefore, this master thesis is an attempt to extend this method by a literature-based evaluation method.

The evaluation of the stands has shown that currently little attention is paid to the existing natural hazard potentials in management. Likewise, hardly any climate-change-oriented adaption measures are currently being implemented. However, the current situation also shows good starting potential to prepare forests for a warmer and drier future. By promoting climate-change-oriented forest management, e.g. by increasing the diversity of structures and tree species, the negative consequences of climate change for natural hazard protection can be reduced.

The extension of the evaluation procedure shows how protection forest stands can be evaluated with regard to their future function fulfilment under explicit consideration of the knowledge about climate change presented in the literature and is therefore suitable as a practice-oriented procedure.

Danksagung

Einen großen Dank möchte ich dem Team des Ingenieurbüros i.n.n. in Innsbruck, insbesondere DI Alexander Ploner und Mag. Thomas Sönser aussprechen, welche mir diese Masterarbeit erst ermöglichten. Nicht nur, dass sie mir die nötigen Kontakte, Räumlichkeiten und Ressourcen zur Verfügung stellten, sie standen mir auch trotz ihrer kostbaren Zeit jederzeit mit Rat und Tat zur Verfügung. Ein herzliches „vergeltsgott“ dafür!

Ich möchte auch DI Dr. Rupert Seidl für seine Betreuung, hilfreichen Kommentare und sein Engagement danken.

Ein großer Dank gilt auch DI Kurt Ziegner und DI Cordula Ettmayer-Kreiner von der Landesforstdirektion Tirol, welche durch ihr großes Interesse an diesem Thema mich mit Informationen für das Untersuchungsgebiet unterstützten.

Besonders dankbar bin ich meinen Eltern Bianca und DI Dr. Peter Bauhofer für ihre große (finanzielle) Unterstützung und vor allem Geduld mit mir. Ohne euch wäre das alles nicht möglich gewesen!

Vielen Dank auch an meine Familie, insbesondere meinen Großeltern, die mir immer im in den schwierigen Phasen des Studiums Mut zugesprochen haben. Ich widme diese Arbeit auch meinem 2019 verstorbenen Opa Michä.

Zum Schluss möchte ich noch all meinen Freunden danken. Ich habe während meiner Studienzeit viele Freunde in Wien kennengelernt. Speziell möchte ich mich bei meiner lieben Studienkollegin Stefanie Brandstetter bedanken, mit der ich nicht nur den „Spezial-Ferialjob“ in Brandenberg machen durfte, sondern mit der ich auch viele Prüfungen bestreiten konnte, sowie ein schöne Zeit in Wien verbringen konnte- danke für deine Freundschaft. Auch möchte ich mich bei meinen Freunden in meiner Heimat Tirol für ihre Unterstützung bedanken.

Danke euch allen!

Radfeld, im September 2020

Eidesstaatliche Erklärungen

Ich erkläre hiermit eidesstattlich durch meine persönliche Unterschrift die Arbeit selbständig verfasst und nur die genannten Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Weiters erkläre ich, dass alle beteiligten Personen und Institutionen erwähnt sind. Diese Arbeit ist bisher an anderen Stellen noch nicht als Abschlussarbeit eingereicht worden.

Lukas Bauhofer, BSc.

Wien, Datum und Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Problemstellung 8
2 Literaturüberblick 10
2.1 Naturgefahrenprozesse im Schutzwald: Massenbewegungen 10
2.1.1 Massenselbstbewegungen 11
Definition 11
2.1.2 Massenschurf (Erosion) 24
2.2 Klima 26
2.2.1 Historische Klimaentwicklung in Österreich und Tirol unter Einbeziehung der Waldentwicklung 26
2.2.2 Aktuelle Klimasituation für Tirol 31
2.2.3 Klima der Zukunft: Klimaszenarien für Tirol und Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren 33
2.3 Gebirgswald als Schutzwald 41
2.3.1 Relevanz des Gebirgswaldes als Schutzwald 41
2.3.2 Die wichtigsten Baumarten des Schutzwaldes 44
2.3.3 Schutzwaldfunktionen 45
2.3.4 Schutzwald im Klimawandel 56
3 Fallbeispiel Patscherkofel: Qualitative Bewertung der Schutzfunktionalität und unter Einfluss des Klimawandels 70
3.1 Projektgebietsbeschreibung 70
3.1.1 Geografische Lage 70
3.1.2 Beschreibung des Standortes 72
3.1.3 Klima 72
3.1.4 Geologie 74
3.1.5 Geomorphologie 75
3.1.6 Naturgefahrenprozesse im Untersuchungsgebiet 76
3.1.7 Gewässer 77
3.1.8 Forstliche Charakterisierung 78
3.1.9 Nutzungsansprüche und Tourismus 80
3.2 Methoden zur Bewertung der Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet 81
3.2.1 Die Schutzwaldbewertung nach NaiS 81
3.2.2 Auswahl der Untersuchungsbestände (Weiserflächen) 83
3.3 Herleitung des Handlungsbedarfs auf der Probefläche 86

3.4 Erweiterung der Schutzwaldbewertung nach NaiS mit dem Faktor Klimawandel 88
3.5 Kombination der Bewertung nach NaiS und Klimawandel 91
4 Ergebnisse Der Schutzwaldbewertung 92
4.1 Überblick über die Ergebnisse 92
4.2 Beantwortung der Forschungsfragen 96
4.3 Abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerung 101
5 Diskussion 102
5.1 Literatur 102
5.2 Methodik 104
6 Conclusio 106
7 Appendix 0
8 Abbildungsverzeichnis 0
9 Tabellenverzeichnis 2
10 Literaturverzeichnis 3
11 Glossar 12

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Ohne Schutzwälder wäre das Leben in alpinen Räumen nicht in dem Maße vorstellbar, wie wir es heute kennen. Obwohl der Begriff „Schutzwald“ erst in jüngerer Zeit definiert wurde, so leistet der Gebirgswald seit Jahrhunderten eine Schutzfunktion vor verschiedenen Naturgefahren und hat dadurch die Besiedelung des Alpenraums begünstigt. Schutzwälder sind dabei selbst mit ständigen Gefahren durch biotische und abiotische wie Klima, Wind, Pilze oder Insekten konfrontiert.

Den wohl bedeutendste Treiber der Dynamik in (Schutz-) Wäldern stellt das Klima dar. Das Klima der Erde ist dabei ein dynamisches System und befindet sich so in einem ständigen Wandel. In den vergangenen 100 Jahren ist die durchschnittliche Temperatur im österreichischen Alpenraum um ca. 2 °C gestiegen. Der Anstieg ist dabei zum großen Teil wesentlich auf die anthropogen verursachten Treibhausgase zurückzuführen. Die künftige Klimaentwicklung zeigt ebenso einen ansteigenden Trendverlauf der Temperatur. Je nach gewähltem Emissionsszenario wird mit einem Temperaturanstieg von +2,3°C bis +4,0°C, sowie mit zunehmender Trockenheit für den österreichischen Alpenraum bis zum Ende dieses Jahrhunderts gerechnet. (APCC, 2014; BMNT 2016). Wie und ob sich der Klimawandel auf Extremereignisse (Stürme etc.) und Naturgefahrenprozesse auswirken wird, ist unsicher (z.B. APCC, 2014 und ONERC, 2008).

Bäume reagieren dabei sehr vielfältig auf das sich verändernde Klima. Trockenheit und steigende Temperaturen führen zu Stress, Mortalität der Bäume oder Veränderung der Baumartenverbreitung (Arend et al., 2016; Zimmermann et al., 2016). Vor allem die trockenheitsempfindliche Fichte ist davon betroffen, speziell in den schon heute trockenheitslimitierten Tieflagen. Dadurch wird langfristig mit einer Abnahme der Schutzwaldleistung gerechnet, die durch großflächige Störungen verstärkt werden kann (Bebi et al, 2016; Sebald et al., 2019). Die österreichische Waldinventur (ÖWI) 2007/09 liefert interessante Ergebnisse zum aktuellen Zustand der österreichischen Schutzwälder. Demnach sind sie nach wie vor überaltert, arm an Verjüngung und Baumartenvielfalt. Zudem wirkt sich der vielerorts zu hohe Wildbestand nicht gerade förderlich für den schlechten Zustand aus, wodurch der Schutz vor Naturgefahrenprozessen geschwächt ist.

Die Wälder des Untersuchungsgebietes Patscherkofel, südlich der Tiroler Landeshauptstadt Innsbruck schützen die Siedlungsräume sowie (internationale) Verkehrsinfrastrukturen wie Brennereisen- und Autobahn vor Naturgefahren, insbesondere Rutschungen und Muren. Speziell die Einhänge des Sill- Baches, weisen im Projektgebiet eine Vielzahl von Rutschungen im Stirnbereich einer großräumigen Massenbewegung auf. Die Schutzwälder haben hier vor allem eine präventive Schutzwirkung. Es ist deshalb enorm wichtig, dass diese jetzt und in Zukunft, d.h. auch unter den Einwirkungen des Klimawandels, ihre Schutzfunktionalität erfüllen.

Die Waldeigentümer, aber insbesondere die Landesforstdirektion Tirol, haben dabei großes Interesse daran ihre Schutzwälder für die Zukunft „klimafit“ zu bewirtschaften. Daher beschäftigt sich diese Masterarbeit mit der Frage, in welchem aktuellen Zustand

die Schutzwälder im Untersuchungsgebiet sind und wie die Bestände unter dem erwarteten Klimawandel angepasst werden sollen, um auch in Zukunft ihre Schutzfunktion zu erfüllen.

Dazu werden im Literaturteil die Grundlagen über die schutzrelevanten Naturgefahrenprozesse, Schutzwaldfunktionen, Klima und dessen Auswirkungen auf den Schutzwald, sowie mögliche Anpassungsstrategien erarbeitet.

Im angewandten der Arbeit werden ausgewählte Schutzwaldbestände auf ihre aktuelle und zukünftige Schutzwaldwirkung hin beurteilt. Dazu wird das bestehende Schutzwaldbewertungsinstrument „NaiS“ (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (Frehner et al. 2005) verwendet. Da dieses Bewertungsverfahren den Faktor Klimawandel bisher nicht berücksichtigt, stellt diese Masterarbeit den Versuch auf, dieses damit zu erweitern. Diese Erweiterung und anschließende Bewertung der Bestände soll auf Basis der Erkenntnisse aus der Literaturauswertung erfolgen und praxisorientiert durchgeführt werden, um einen Handlungsbedarf für die Bestände zu ermitteln. Darauf aufbauend sollen Klimawandel- und Naturgefahrenprozess- orientierte Bewirtschaftungsmaßnahmen abgleitet werden. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen die Waldeigentümer bei ihrem Weg zum „klimafitten“ Schutzwaldmanagement unterstützen.

2 LITERATURÜBERBLICK

2.1 Naturgefahrenprozesse im Schutzwald: Massenbewegungen

Heute sind die Siedlungsräume in den Alpen so dicht besiedelt und die Infrastruktur so empfindlich geworden, dass selbst kleine Naturereignisse, die früher kaum jemand registriert hätte, zu Katastrophen oder zu vermeintlichen Katastrophen führen (Bunza 1992). Ein (Natur-) Ereignis ist dabei laut ONR als „Summe der Vorgänge und Wirkungen von einem oder mehreren Prozessen, die räumlichem, zeitlichem und kausalem Zusammenhang stehen." (ONR 24800:2009). In diesem Kontext ergeben sich zwei Betrachtungswinkel. Aus ökologischer Sicht spricht man bei Naturereignissen von Störungen. In diesem Kontext sind Naturereignisse somit Faktoren, die zum natürlichen Störregime beitragen. An einem bestimmten Ort können die Störungen mit unterschiedlichen Frequenzen und Intensitäten auftreten. Störungen sind dabei wichtige Treiber in der Dynamik von Ökosystemen. Störungen werden definiert als „[…] zeitlich und räumlich diskrete Ereignisse, die zum Verlust einer lebenden Biomasse führen und die Verfügbarkeit von Ressourcen in Lebensgemeinschaften verändern." (Wohlgemuth et al. 2019). Störungen müssen somit noch keine Gefahr für den Menschen darstellen, können aber durchaus, zum Teil enorme wirtschaftliche Schäden verursachen. So wurden beispielsweise in der Zeit von 1950 bis 2000 jährlich durchschnittlich 35 Millionen m³ an Schadholz durch Störungen verursacht (8 % der Gesamteinschlagsmenge). Seit den 1990er haben starke Winterstürme wie z.B. „Vivian" oder „Lothar" enorme Schäden nicht nur in der Forstwirtschaft angerichtet (Lindner et al. 2010).

Aus Sicht des integralen Risikomanagements werden Naturereignisse jedoch als Naturgefahren verstanden, in diesem Kontext betrachtet auch diese Arbeit die Naturereignisse. Von Naturgefahren wird gesprochen, wenn es zu Schäden an Menschen und Güter kommen kann (vgl. (Hübl 2015). Ein Schaden ist die Summe der negativ bewerteten Wirkungen eines Ereignisses (Schadereignis, Kosten) (Hübl 2015; ONR 24800:2009). Schäden durch Naturgefahren sollen möglichst gering gehalten werden. Dabei hat ein intakter Schutzwald eine wesentliche Funktion in der Prozessprävention dieser Naturgefahren. Als (Natur-) Gefahrenprozess wird ein „Zustand oder Vorgang, aus dem Personen- und/ oder Sachschäden entstehen kann." verstanden. „Der Begriff bezeichnet eine Bedrohung durch ein zukünftiges Ereignis, das unter bestimmten Bedingungen eintreten kann." (ONR 24810). Naturgefahren sind natürliche Prozesse, die auch bei bester Waldbestockung nicht verhindert werden, im besten Fall aber abgeschwächt werden können. Ein Schutzwald kann aber die Auswirkungen der Prozesse beeinflussen und die dabei auftretenden Energien abdämpfen (vgl. (Frehner et al. 2005). Im Folgenden soll daher ein allgemeiner Überblick von schadensrelevanten Naturgefahrenprozessen, welche für den Österreichischen Schutzwald und seine Wirkung relevant sind, gegeben werden. Die Prozesse werden dabei nach der „Systematik und Analyse alpiner Massenbewegungen" nach Bunza (1982) beschrieben. Bunza beschreibt dabei alpine Massenbewegungen nach ihrer geomorphologischen Form und nach dem Bewegungsmechanismus. Der Autor unterscheidet diese Massenbewegungen in **Massenselbstbewegungen** und **Massenbewegungen** und **-schurf durch Transportmedien**. Da jedoch auch nicht- geologisch- geomorphologische Massenbewegungen wie Schnee (**z.B. Lawinen**) bedeutende Prozesse für die

Schutzwaldwirkung darstellen, werden diese den Massenselbstbewegungen zugeteilt und ebenso beschrieben. Der Überblick der Prozesse soll dabei in Definition, allgemeine Voraussetzungen, auslösende Faktoren und anthropogene Einflussnahme erfolgen. Massenbewegungen können dabei direkte Gefahren für Menschen und Güter (z.B. Rutschungen) darstellen, aber auch indirekte durch Bereitstellung von Feststoffherden für alpine Wildbäche, welche in weiterer Folge wiederum Gefahrenpotentiale (z.B. Murgang) bedeuten können. Massenbewegungen beeinflussen sich dabei auch gegenseitig, jedoch können diese Prozesse durch den Eingriff in den Wasserhaushalt über die Vegetation beeinflusst werden.

Im späteren Kapitel 2.4.2 wird genauer auf die spezifischen Schutzfunktionen des Schutzwaldes eingegangen.

2.1.1 Massenselbstbewegungen

Massenselbstbewegungen sind talwärts gerichtete Bewegungen labiler Gesteins- und Bodenmassen, welche durch natürliche und anthropogenen Auslösefaktoren in Bewegung geraten. Innerhalb der Massenselbstbewegungen lassen sich nach Bunza (1982) drei große Gruppen unterscheiden, nämlich **Stürze**, **Rutschungen** und **Fließbewegungen**. Die Ursachen der Massenselbstbewegungen liegen in den geologischen, tektonischen und bodenkundlichen Gegebenheiten, hydrologischen Verhältnissen, sowie physikalisch- chemisch- mechanischen Eigenschaften der Gesteins- und Bodenmassen der instabilen Hänge. Diese Ursachen werden beeinflusst durch Klima, Topografie (Hangneigung, Hanglage, Hanglänge), Schwerkraft und **Vegetation** (wiederum auch beeinflusst von der anthropogenen Landnutzung). Auslösende Faktoren sind neben der Schwerkraft hauptsächlich Entlastungen und Kluft- und Porenwasserdrücken in Folge hoher Niederschläge und Schmelzwassermengen. Der Mensch kann auf die Auslösung der Bewegungen über die Eingriffe in der Vegetation, vor allem aber über die (Schutz-) Waldbewirtschaftung und damit in den Wasserhaushalt einwirken (Bunza 1982). Zu den Massenselbstbewegungen zählen auch **Lawinen** (z.B. Schneebrettlawinen), welche im Anfangsstadium Kriech- und Gleitvorgänge darstellen und durch einen auslösenden Faktor in eine Rutschbewegung übergehen. Der (Schutz-) Wald kann auch hier die Ursachen der Lawinenbildung vermindern, vorausgesetzt das Anbruchsgebiet befindet sich im bewaldeten Bereich (vgl. Kap. 2.3.3.1.4).

2.1.1.1 Stürze

Definition

Unter einem Sturz definiert Bunza (1982) das „mehr oder weniger abrupte Abbrechen und Ablösen an präformierten, richtungsgebenden Spalten und Klüften und dem nachfolgenden mehr oder weniger freien Fall von kleinen Gesteinspartikeln, Gesteinstrümmern oder sehr großen Gesteinskomplexen zum Talgrund an steilen bis sehr steilen Böschungen und Wänden.“

Allgemeine Voraussetzungen

Sturzart und Anbruchsformen hängen in erster Linie von den geologischen und tektonischen Gegebenheiten ab. Zu Stürzen führen neben der Gravitation vor allem Entlastungen verschiedener Art, z.B. der Verlust des Hangwiderlagers (z.B. durch Seitenerosion von Wildbächen), auch die verwitternden Einwirkungen des Wassers (in flüssiger und gefrorener Form durch Massenschurf) und Erschütterungen. Aber auch menschliche Aktivitäten (z.B. Berg- und Wegebau) können Stürze verursachen (Bunza 1982).

Formen der Stürze

Stürze werden nach Bunza (1982) unterteilt in:

(1) **Abgrusungen, Abbröckeln, Abrieseln:** darunter wird eine stürzende Bewegung kleiner und kleinster Gesteinspartikel in Folge der Schwerkraft von steilen Felsböschungen oder wandbildenden Lockergesteinskörpern verstanden. Ausgelöst wird diese Form der Stürze durch physikalische, chemische und biologische Verwitterung (Wurzeldruck und organische Stoffe).

(2) **Fels- und Schuttsturz**

Unter Fels- und Schuttsturz wird „das Absprengen, Abreißen und Ablösen mit nachfolgendem Sturz von cm- bis m- dicken, mehr oder weniger glatten, vornehmlich aber unregelmäßig begrenzten Gesteinslagen oder -trümmern vom Muttergestein an Wänden und Steilböschungen“ verstanden (Bunza 1982). Die ONR (24807) definiert einen Felssturz als „Sturz einer Felsmasse, die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine zerlegt wird, wobei die Interaktion zwischen den Komponenten keinen maßgeblichen Einfluss auf die Dynamik des Prozesses hat.“ (ONR 24810). Der Fels- und Schuttsturzprozess wird dabei in der Literatur (und im allgemeinen Sprachgebrauch) häufig auch als Steinschlagprozess oder einfach Steinschlag bezeichnet (vgl. ONR 24810) und wird auch in den nachfolgenden Kapiteln als solcher bezeichnet. Das Profil dieses Sturzprozesses wird durch seinen **Ablösebereich** bzw. **Herkunftsbereich**, dem **Transitgebiet** und dem **Ablagerungs-** bzw. **Auslaufgebiet** gekennzeichnet. Der Ablösebereich ist das Ursprungsgebiet von Steinschlagprozessen. In der Regel handelt es sich dabei um Festgesteinsaufschlüsse mit Neigungen >50°. In Ausnahmefällen können auch Lockergesteine Ablösebereiche darstellen (ONR 24810). Der Ablösebereich liegt oft außerhalb des bewaldeten Gebietes, so wie es auch Bunza (1982) beschreibt. Jedoch können Fels- und Schuttstürze auch im Waldgebiet entstehen. So können Wurzeln beispielsweise in Risse einwachsen und die physikalische Verwitterung fördern (Frehner et al., 2005). Durch den Austritt von organischen Säuren aus den Wurzeln kann zudem die biologische Verwitterung des Gesteins begünstigt werden. Diese Wirkung zeigt sich besonders an Bäumen, welche auf exponierten Felsblöcken stocken. Oft ist es so „[…], dass Steinschlag weniger von glatten, hohen Felswänden droht, sondern dass felsdurchsetzte oder mit Blockstreu bedeckte, oft bewaldete Steilhänge ein großes,

versteckstes Gefahrenpotential darstellen. Nach Daten der WLV und des BfW lagen bei 74 % der Schadereignisse die Auslöseflächen im Wald.“ (Perzl et al. 2017).

Eine Mobilisierung von Steinen ist auch durch den Einfluss des Windes möglich. Vor allem bei hochstämmigen Bäumen kann er die Bäume so stark in Schwingung setzen, dass sich auch die Wurzeln bewegen wodurch Steine gelöst werden können (vgl. Frehner et al., 2005). Werden Bäume durch Wind geworfen, so ergibt sich zudem ein weiteres Steinschlagpotential: durch die allmähliche Verwitterung der Wurzelteller können sich Steine aus dem Wurzelgeflecht lösen und stürzen zu Tal. Dies ist häufig der Fall, wenn Windwürfe nicht aufgearbeitet werden und kann vielfach in der Praxis beobachtet werden.

Im Allgemeinen ergibt sich das Initialstadium von Schutt- und Felsstürzen durch die Lockerung der Gesteinsoberfläche und oberflächennahen Zone durch physikalische Verwitterung oder durch Bildung von Spannungsrissen infolge von Gleichgewichtsstörungen (z.B. Verlust des Hangwiderlagers). Dies geschieht meist entlang vorgezeichneter Klüfte und Spalten im potenziellen Sturzhang. An diesen Flächen bricht dann die Masse ab und wird durch progressive Druckzunahme am Grunde der sich ablösenden Masse durch die Schwerkraft zum Absturz gebracht (Bunza 1982).

Weitere mögliche auslösende Faktoren der Lockerung der Gesteinsoberfläche können über die physikalische Verwitterung bspw. durch Insolationsverwitterung (starkes Erwärmen der Gesteine und plötzliches Abkühlen) und Frostverwitterung erfolgen.

Im **Transitgebiet** ist die Bewegung der Steine und Blöcke durch Fallen, Rollen und Springen gekennzeichnet. Treffen die Steine und Blöcke in diesem Abschnitt der Trajektorie auf Bäume, so kommt es beim Kontakt zum Energieverlust. Dadurch können erhebliche Schäden in Waldbeständen entstehen (Seidl 2019). Nach Versuchen von Dorren et al. (2005) sind die häufigsten Schäden an Bäumen Entwurzlungen, Stamm- oder Wipfelbrüche. Durch das Auftreffen von Steinen kann an den Bäumen, sofern sie ausreichend fest verwurzelt sind, ein sogenannter „Hula- Hoop“- Effekt (Abb.1, C) auftreten. Dadurch wird die Energie des Aufpralles in die Krone geleitet, wodurch sie brechen kann (siehe Abb.1) (Dorren et al. 2005). Werden Bäume nur getroffen, ohne dass es zum Bruch kommt, treten sogenannte Schlagmarken auf. Die räumliche Verteilung bzw. Lage/ Höhe der Schlagmarken stellt einen wichtigen Hinweis für Sprungweiten und Sprunghöhen vergangener Steinschlagereignisse dar (ONR 24810), welcher Eingang in die Beurteilung von Sturzprozessen findet. Dorren et al. unterscheiden drei Arten von Baumtreffern mit unterschiedlichen Auswirkungen: frontaler Treffer, lateraler Treffer und Kratzer (Streifung) (siehe Abb. 2). Durch das Auftreffen auf Bäume kommt es zur Ablenkung der Steintrajektorie und zum Energieverlust je nach Baumtreffer der Steine/ Blöcke (siehe Abb. 3) (Dorren et al. 2005). Zusammenfassend ist zu sagen, dass Schäden am Wald durch Sturzprozesse fast unvermeidlich sind, jedoch erfüllt der Gebirgswald so seine Schutzfunktion. Auf die Steinschlagschutzfunktion des Gebirgswaldes wird später genauer eingegangen.

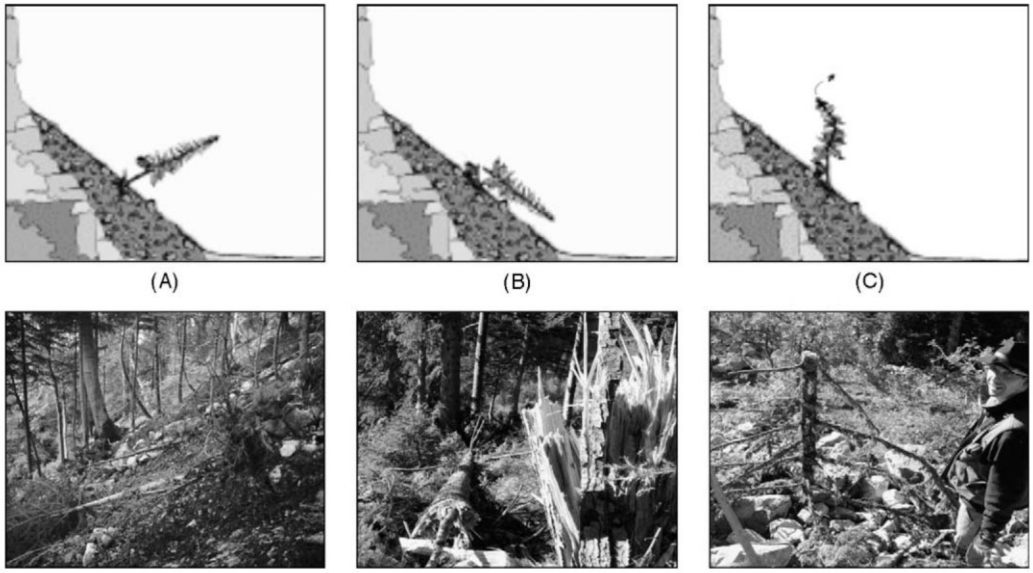


Abbildung 1: Die drei Haupttypen von Schäden an Bäumen durch Stein- oder Blockschläge: (A) Entwurzelung, (B) Stammbruch und (C) Wipfelbruch durch den "Hula-Hoop"- Effekt (Dorren et al. 2005, S. 9).

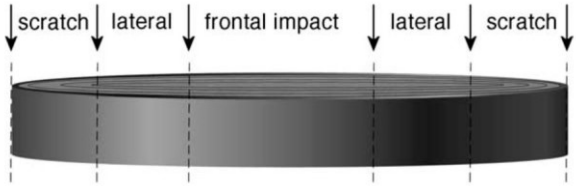


Abbildung 2: Die drei Arten von Baumtreffern: frontaler Treffer (frontal impact), seitlicher Treffer (lateral) und Kratzer (Streifung) (scratch). (Dorren et al. 2005, S. 6)

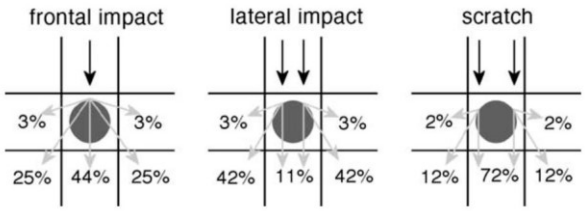


Abbildung 3: Ablenkung der Steintrajektorie durch das Auftreffen auf den Baum. (1) frontaler Treffer, (2) seitlicher Treffer, (3) Kratzer oder (Dorren et al. 2005, S. 8).

Im **Ablagerungsgebiet bzw. Auslaufgebiet** kommt es schlussendlich zum Stillstand der Bewegungen und die Steine und Blöcke lagern sich ab. „Die talseitige Begrenzung wird durch die am weitesten vorgedrungen Flächen (der abgelagerten Steine, Anm.) definiert, welche ein (quantitatives) Maß der maximalen Reichweite vergangener Sturzprozesse

darstellen." (ONR 24810).

(3) **Bergsturz:** Unter einem Bergsturz versteht man „[…] das plötzliche Hinabstürzen oder das Hinabrutschen/ Hinabgleiten von sehr großen, mehr oder weniger zusammenhängenden Felsmassen (bis zu mehreren Mill. m³) an zumeist übersteilten Böschungen und Abhängen vornehmlich in der Felsregion der Alpen […]" (Bunza 1982). Bergsturzereignisse der jüngeren Vergangenheit werden vermehrt mit dem Auftauen von Permafrostzonen in Verbindung gebracht.

Da die anthropogene Einflussnahme über den Schutzwald hier nur in sehr geringem Maße möglich ist, wird auf diesen Sturzprozess nicht näher eingegangen.

2.1.1.2 Rutschungen

Definition

„Rutsche sind hangabwärts gerichtete Bewegungen von Hangteilen, bestehend aus Fels- und/oder Lockergesteinsmassen oder aus Böden an mäßig geneigten bis steilen Böschungen, die hauptsächlich als Ergebnis eines Scherbruchs an der Grenze der bewegten Massen stattfinden. Die Bewegung vollzieht sich als mehr oder weniger abrupter Abbruch (Scherbruch) mit nachfolgendem, direkt wahrnehmbaren, relativ langsamen bis mäßig schnellem Gleiten der Rutschmassen auf einer Scherfläche." (Bunza 1982). Wie hoch die Geschwindigkeit einer Rutschung ist, hängt von den geomechanischen Eigenschaften des Materials und von der Gesamtsteilheit der Gleitfläche ab, sowie vom Wasserhaushalt. Rutschungen werden nach Bunza (1982) in vier Gattungen eingeteilt: **Translationsrutsche in Fels- und Lockergesteinen, Translationsbodenrutsche, Rotationsrutsche** und **zusammengesetzte Rutschungen**. Translationsrutsche ereignen sich dabei auf einer präformierten Gleitfläche im Hang, bei Rotationsrutschen hingegen entsteht eine Gleitfläche erst im Augenblick des Bruches. Zusammengesetzten Rutschungen weisen hingegen beide Gleitflächenarten auf (Bunza 1982).

Allgemeine Voraussetzungen für Rutschungen

Rutschungen in Fels- und Lockergesteinen und in Böden ergeben sich aus dem Zusammen- und Wechselspiel verschiedener Einzelursachen und liegen meist in der Natur des Gebirges (Geologie und Tektonik, Orientierung des Gefüges zur freien Oberfläche etc.) bzw. in der Instabilität des Hanges (Rutschempfindlichkeit der Gesteine). Eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung einer Rutschung ist die Möglichkeit des Eindringens von Wasser in den an sich labilen Hang. Das Einsickern wird dabei z.B. durch Klüfte und Zugspannungsrisse, durch Frost- und Schwundrisse und durch Dehnungsrisse als Folge von Entlastungsvorgängen begünstigt. Des Weiteren ermöglichen Bodenverwundungen durch Windwurf, Schneeschurf (vgl. Kap. 2.1.2), Viehtritt, Forstarbeiten (Rückewege) usw. das Einsickern von Wasser. Das Wasser stammt dabei aus langandauerndem Niederschlag, Starkregen, Schneeschmelze, quellenreiche Orte, Zonen der Vernässung und Oberflächenabfluss (z.B. Forststraßen, Almflächen, Skipisten,

Lawinenverbauungen, etc.). Dadurch kann es zu schwankender Grund- / Hangwasserströmung und starkem Hangwasserzug kommen. Diese ist jedoch abhängig von der Verteilung und Art der Niederschläge, Wassermenge, Durchlässigkeit, Hangneigung und dem Relief des Gebietes. (Bunza 1982).

Allgemeine Rutschmechanik

Den Rutschungen in Fels- und Lockergesteinen gehen meist Vorbruchbewegungen, in der Form von sehr langsamen Kriech- und Fließbewegungen (siehe Kap. 2.1.1.3) voraus. Die Bewegungsgröße liegt meist bei nur einigen mm bis cm. Durch diese Bewegungen kommt es zu langanhaltenden, auf das Gestein wirkenden Spannungszuständen und Spannungsumlagerungen. Diese Spannungszustände können mit der Zeit einen kritischen Bereich erreichen, in dem es nur eine geringe Störung (z.B. Entlastung) braucht, um den Scherwiderstand zu überwinden. Es kommt zur Rissbildung. Mit der Entstehung eines Zugrisses oder eines Risssystems in einem Hang von genügender Steilheit ist das Initialstadium einer Rutschung erreicht. Mit einem auslösenden Faktor kommt es zum Rutsch (Bunza 1982).

Allgemeine auslösende Faktoren der Rutschungen (gelten zum Großteil auch für Kriechkörper)

Als hauptauslösende Faktoren für Rutschungen (und Kriechkörper) kommen neben der hangabwärts gerichteten Schwerkraftkomponenten und dem Eigengewicht, Strukturveränderungen und Spannungsumlagerungen infolge von Entspannungen bzw. Entlastungen in Frage. Gravitationskräfte und Entlastungen werden hauptsächliche durch Abtragungsvorgänge am Hangfuß hervorgerufen. Derartige Abtragungen (→ Entlastungen) können auf natürliche Weise durch Seitenerosion von Wildbächen (vgl. Kap. 2.1.2; Erosion durch Fließgewässer), oder aber auch anthropogen z.B. durch Bautätigkeiten erfolgen (Bunza 1982).

Neben Entlastungen bzw. Entspannungen können auch die Wirkungen des Wassers z.B. als Zusatzlast im Hang, durch Hangwasserzug, Kluft- und Porenwasserdruckzunahme, Schneeauflast etc. Rutschungen (und Talzuschübe) auslösen. Die Größe der Faktoren wird dabei durch die Verteilung und Art der Niederschläge und Schneeschmelze (Bunza 1982) sowie die lokalen strukturellen und topographischen Gegebenheiten bestimmt. Daher ergibt sich auch die Möglichkeit der anthropogene Einflussnahme auf Rutschungsprozesse über die Landnutzung (Land-, Forstwirtschaft, Siedlungsbau), insbesondere über den Eingriff in die Vegetation.

2.1.1.3 Fließbewegungen

Definition

„Fließungen sind hangabwärts gerichtete, sehr langsame Kriech- oder langsame bis schnelle Fließbewegungen von Felsgesteinen, Lockergesteinen oder Böden“ (Bunza 1982), sowie Schneedecken. Im Unterschied zu Stürzen und Rutschungen vollziehen sich diese Bewegungen **annähernd bruchlos** bzw. kann es zu einem Bruchvorgang an vielen kleinen Teilflächen (Bruchfließen) kommen. Zum Fließen kommt es dabei erst nach Anlage einer Mindest- oder kritischen Scherspannung infolge einwirkender Spannungen/ Spannungsumlagerungen. Diese können durch einen ausreichenden Belastungsanstieg (z.B. durch Verschlechterung der Standfestigkeit durch Versteilung; Kriechen in Felsgesteinen, Talzuschübe) oder durch Konsistenzänderung etc. entstehen. Die Scherspannungen halten sich aber unter der Grenze, die für Rutschungen oder Stürze erreicht werden muss. Das heißt, dass bereits bei kleineren Lasten als bei Rutschungen pro Einheitsfläche das Fließen auftreten kann, aber die Bruchfestigkeit des Materials **nicht** vollkommen überschritten wird. Kriechen bzw. Fließen finden so lange statt, bis an irgendeiner Stelle des sich bewegenden Körpers die kritische Scherspannung überschritten wird und es zur Rissbildung kommt (vgl. Kap. 2.1.1.2, Rutschungen). Häufig lösen sich Kriech- und Fließbewegungen mit Rutschungen am gleichen Hang ab, oder treten zwischen Rutschungspausen auf. Die Grenzen zwischen Fließbewegungen und Rutschungen sind oft verwischt (Bunza 1982).

Definition der Mechanik von Fließungsarten

Nach der vorhin gegebenen allgemeinen Definition können Fließbewegungen in zwei übergeordneten Typen, nämlich **Kriechen** und **Fließen** eingeteilt werden (Bunza 1982):

- **Fließen i.e.S:** ist eine hangabwärtige Bewegung <u>weichplastischer</u> Massen von losem Gesteinsschutt oder Boden unter dem Einfluss der Gravitation und einem mehr oder weniger hohen Wassergehalt verbunden mit innerer Verformung und Strukturänderung

- **Kriechen:** ein sehr langsames, unmerkliches, hangabwärtiges <u>steifplastisches</u> Fließen von Felsmassen oder plastisches Fließen von Gesteinsschutt, von Bodenmassen oder von gemischtem Lockermaterial. Dieses Fließen muss nicht unbedingt mit einer Konsistenzänderung verbunden sein. Es wird dabei auch von „Massenkriechen“ **(=Talzuschub)** gesprochen. Die Bewegung erfolgt durch die Gravitation, wobei Lockermaterialien und die Boden-, sowie Vegetationsdecke mitgeschleppt werden. Diese wird dabei bereichsweise kaum verformt. Die Kriechbewegung kann sich über Jahrzehnte oder Jahrhunderte erstrecken. Es werden dabei zweierlei Arten von Talzuschüben unterschieden:

  (1) **Gleitender Talzuschub:** Die Hauptbewegung des gleitenden Talzuschubes entspricht einem langsamen, großräumigen, meist tiefgreifenden Fließen

großer Gesteinsmassen auf einer präformierten durchgescherten Gleitfläche. Dabei gleitet bzw. kriecht die Masse unter dem Einfluss der Schwerkraft und des Eigengewichts gegen den Talgrund hin.

(2) **Sackender Talzuschub:** Der sackende Talzuschub stellt eine Bewegungskombination dar mit mehr oder weniger bogenförmig gestalteten Gleitflächen im Oberhang (= Sackung) und mit einem annähernd bruchlosen plastischen Kriechen (=Talzuschub) im tieferen Teil des Hanges, wobei erstere Bewegung in die letztere übergeht. Kennzeichnend für sackende Talzuschübe ist die Hanggliederung in einen höheren konkaven Abschnitt und einen konvexen vorgewölbten tieferen Teil infolge Massenverlustes und Massenzuwachses. Der Abrissbereich eines sackenden Talzuschubes ist gekennzeichnet durch ein Einsenken der Gratregion (Doppelgrat) bzw. Absackung (translationsförmige Abgleitung) der Felsmassen an einer oder mehreren Gleitbahnen (Nackentäler), die hoch oben im Hang im Gestein enden und nicht bis zum Böschungsfuß durchgeschert sind. Im Fußbereich wird durch das Vorwölben der Massen die Böschungsstirn lokal versteilt und daher instabil. Die Folge sind vielfach Rutschprozesse (Stirnrutschungen) oder Sturzprozesse, deren Massen der Hauptmasse weit vorauseilen. Häufig sind Rutschwülste und aufeinandergeschobene Schollen am Fuß derartiger Massenbewegungen erkennbar.

Allgemeine Voraussetzungen und auslösende Faktoren für Fließbewegungen

Für Fließbewegungen bzw. Talzuschübe gelten im Großen und Ganzen die selben Voraussetzungen und auslösende Faktoren wie für Rutschungen in Felsgesteinen (Hauptfaktoren: Gravitation und Entlastungen sowie Berg- und Hangwasserhaushalt), deshalb sei dabei auf das vorige Kapitel 2.1.1.2 verwiesen.

Allgemeine anthropogene Einflussnahme

Im Großen und Ganzen kann über Eingriffe in die Vegetation, und somit über den Schutzwald, in den Wasserhaushalt und damit in den Prozess der Fließbewegungen eingegriffen werden. Des Weiteren stellen auch verschiedene Bautätigkeiten in labilen Gebieten (Hängen) eine Einflussnahme auf Fließbewegungen dar (vgl. Bunza, 1982).

2.1.1.4 Quasiviskoses Fließen (Schutt- und Murgang)

Diese Form der Bewegungen stellen Übergange zum Massentransport dar. Im Unterschied zum Geschiebetransport in Gerinnen, in dem sich das Wasser schneller bewegt als das Geschiebe, bewegen sich beim „quasiviskosen Fließen“ bzw. bei „Gängen“ alle Bestandteile (Geschiebe und Wasser) annähernd gleich schnell und besitzen eine breiartige Konsistenz (Bunza, 1982). Wichtige Formen dieses quasiviskosen Fließens sind **(1) der nasse Erd- und Schuttgang und (2) Murgang:**

(1) Nasse Erd- und Schuttgänge

Allgemein treten Erd- und Schuttgänge nach Bunza (1982) in der Folge von fortschreitenden Bruchvorgängen auf. Meist gehen diese aus explosionsartig verlaufenden Translations- und Rotationsrutschen in Fels- und Lockergesteinen hervor. Bevorzugt treten diese Bewegungen an steilen und langen Hängen auf. Dort kann das abgerutschte Locker- und Bodenmaterial in ein quasiviskoses trockenes, meist jedoch in ein quasiviskoses **nasses**, **breiartiges Fließen** mit sehr hoher Geschwindigkeit übergehen. Diese Prozesse treten meist während exzessiver Niederschläge und bei oder nach der Schneeschmelze auf. Als Synonyme werden für diese Prozesse Schuttlawinen, fließende Rutsche, Hangabschälungen oder auch **Waldabbrüche** verwendet**.**

Die Gleitflächen der Erd- und Schuttgänge sind mehr oder weniger oberflächennahe, wasserundurchlässige Boden- oder Gesteinsschichten oder glatte Felsoberflächen. Diese Gleitflächen sind zusätzlich gute Hangzugwasserbahnen. Zu Beginn eines Erd- und Schuttganges zeigen diese eine rotationsförmige Bewegung, danach geht die gekrümmte Gleitfläche in eine hangparallele präformierte Gleitbahn über. Während dieses Prozesses wird die gesamte Auflage aus Lockergesteinen, Bodenkörper und Vegetation abgeschert. Diese „Anbruchsflächen“ sind zu Beginn „punktförmig“, können in der Folge hangabwärts sehr lange (über 1000 m) sein und verbreitern sich talwärts trichterförmig (Bunza 1982).

Auslösende Faktoren und Bewegungsablauf von Erd- und Schuttgängen

Auslösende Faktoren für diese Prozesse können ähnlich der „großen“ Fließ- und Kriechbewegungen Hangfußunterschneidungen und Wegnahme der Hangstütze sein. Hauptsächlich aber wird durch die hohe Gewichtsbelastung durch Wasser (während exzessiver Niederschläge) der Scherwiderstand überschritten. Die Rutschscholle fährt dabei einer benachbarten auf oder schiebt diese ab, wobei vielfach Kettenreaktionen in Form weiterer Rutsche durch die jeweilige Gewichtsbelastung von oben her ausgelöst werden. Der Moment, wo der Rutsch in ein quasiviskoses Fließen übergeht ist gekennzeichnet durch die plötzliche Umwandlung der Lockermassen zu Brei. Die Bewegung eines Erd- und Schuttgangs ist einer Wasserwelle ähnlich, die einen Hang hinunterläuft und auf ihrem Weg alles zerstören kann. Selbst ein Wald kann vor solchen Bewegungen nicht schützen, wenn die geologischen Voraussetzungen für diese Prozesse vorhanden sind. Dabei ist das Gewicht der Bäume aufgrund des geringen Tiefgangs der Startbereiche nicht zu vernachlässigen. Ebenso ist die Bewegungswirkung der Wurzeln bei Sturm zu beachten. Diese können einen durchnässten Lockergesteinskörper durch die „Durchknetungsbewegung“ in einen Brei verwandeln (Bunza, 1982).

(2) Murgang

Ein Murgang ist ein wichtiger Prozesstyp in alpinen Wildbächen[1] und wird nach Bunza (1982) folgendermaßen definiert: „Ein Murgang (Bewegungsform und Mure) ist eine sehr schnelle bis extrem schnelle, reißende Bewegung (quasiviskoses Fließen) einer breiartigen Suspension aus Wasser, Erde, grobem und feinen Schutt bis zur Blockformgröße und Baumstämmen in Wildbächen oder alten Murfurchen im Hang, mit mehr oder weniger steilem Gefälle.“ (Bunza 1982).

Ein Murgang erhält seine Geschiebefracht aus schuttreichen Einzugsgebieten. Diese stammen aus:

- periglazialen Talverfüllungen bzw. Stausedimenten und Moränen
- mächtige Hangschuttmassen, wie Jungschutthalden unter steilen Felswänden
- Verwitterungsschutt
- Lockermassen aus anderen Massenbewegungen
- Rotationsrutschen
- ältere, abgelagerte Murgänge

Besteht dabei die Bachsohle aus erodier-/ transportierbaren Lockermaterial, so wird sie durch die Bewegung aufgerissen und gelangt in den Murstrom. Durch diese abtragende Wirkung der Tiefen- und Seitenerosion werden Feilen- und Uferanbrüche geschaffen, welche wiederum Lockermaterial in den Murstrom bringen. Diese Erosionen sind wiederum vorbereitende Kräfte für sekundäre Rutschungen oder Kriech- und Fließbewegungen, da so kontinuierlich der stabilisierende Hangfuß abgegraben wird. Durch die enorme Schurfkraft der Muren können seitliche Schurfflächen hoch am Hang hinaufgreifen (Bunza, 1982).

Ausgelöst werden Murereignisse durch katastrophenartige Regenfälle großer Intensität oder hohe Schmelzwassermengen. Diese erzeugen in den Wildbächen die Hochwässer (führen zu Tiefen- und Seitenerosion) und lösen in den Lockermaterialen des Einzugsgebietes der Wildbäche Rutschungen aus, welche schließlich als Feststoffherde für weitere Murereignisse dienen (Bunza, 1982).

Hier zeigt sich erstmals wie Massenselbstbewegung sich gegenseitig beeinflussen. Der Vegetation und insbesondere dem (Schutz-) Wald kommt dabei eine wichtige präventive Rolle zu. Einerseits durch die Stabilisierung des Bodens durch die Wurzeln und somit der Verringerung des Geschiebeeintrages in Wildbäche. Andererseits wird durch die Interzeptions- und Evapotranspirationswirkung des Waldes in den Wasserhaushalt eingegriffen. Zudem wird durch die Bodenrauigkeit die

[1] **Wildbach: „**Ein Wildbach im Sinne dieses Bundesgesetzes ist ein dauernd oder zeitweise fließendes Gewässer, das durch rasch eintretende und nur kurze Zeit dauernde Anschwellungen Feststoffe aus seinem Einzugsgebiet oder aus seinem Bachbett in gefahrdrohendem Ausmaße entnimmt, diese mit sich führt und innerhalb oder außerhalb seines Bettes ablagert oder einem anderen Gewässer zuführt.“ Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019b.

Fließgeschwindigkeit am Hang reduziert. Durch dieses Wirkungsgefüge wird das Wasser bereits im Wald retentiert und die Wildbäche führen in Folge weniger Hochwasser (nach Bunza, 1982).

2.1.1.5 Lawinen

Massenselbstbewegungen von Schnee stellen Naturgefahrenprozesse dar, vor denen der Schutzwald eine wichtige präventive Wirkung hat. Eine separate Darstellung und Beschreibung werden hier einzig aufgrund der historisch gewachsenen Trennung der Fachbereiche durchgeführt. Im Wesentlichen gelten die bereits beschriebenen Eigenschaften der geogenen Massenselbstbewegungen, Massenbewegungen und -schurf durch Transportmedien auch für Massenselbstbewegungen von Schnee. Entsprechende der gängigen Nomenklatur werden diese separat betrachtet und wie folgt untergliedert in:

- **Schneegleiten:** das Gleiten oder Kriechen der gesamten Schneedecke auf einem geneigten Untergrund (Bunza 1982)
- **Schneerutsche:** sind plötzliche Hangbewegungen des Schnees **unter 50m Länge** (Bunza 1982)
- **Lawinen:** sind plötzliche und schnelle Gleitbewegungen (Rutschbewegungen) von **über 50 m Länge** (Bunza 1982)

Nachfolgend wird vertiefend auf die Lawinen eingegangen. „Unter einer Lawine im Sinne des österreichischen Forstgesetzes sind Schneemassen zu verstehen, die bei raschem Absturz auf steilen Hängen, Gräben u. ä., infolge der kinetischen Energie oder der von ihnen verursachten Luftdruckwelle oder durch ihre Ablagerung Gefahren oder Schäden verursachen können.“ (Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019b). Eine Lawine ist dabei gekennzeichnet durch die schnelle Bewegung einer Schneemasse, die aus der Schneedecke angebrochen ist (ONR 24805).

Das Einzugsgebiet einer Lawine umfasst das Nähr-, Abbruch- und Ablagerungsgebiet sowie die Lawinenbahn (Sturzbahn) (Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019b). Dazu zählen (ONR 24805):

- **Nährgebiet:** Gebiet aus dem Schnee durch Windeinwirkung in das Anbruchsgebiet transportiert wird.
- **Anbruchsgebiet:** Hangbereich mit einer Neigung zwischen 28° und 55° (im Alpenraum), aus dem abhängig von Morphologie, Exposition, Vegetation und Rauigkeit Lawinen anbrechen können
- **Sturzbahn:** Abschnitt einer Lawinenbahn zwischen dem unteren Rand der Anbruchsfläche (Stauchwall) und dem Beginn der Auslaufstrecke
- **Auslaufstrecke:** flacher Streckenabschnitt am Ende der Lawinenbahn (Hangneigung meist geringer als 10°), in dem sich die Geschwindigkeit der Lawine bis zum Stillstand verringert

Die Entstehung einer Lawine ist dabei wesentlich von der Schneedecke bzw. des Schneedeckenaufbaus geprägt, welche wiederum von den Witterungsbedingungen vor

allem der Vorperiode und den aktuellen Wetterverhältnissen abhängig sind. Als Schneedecke ist die „Akkumulation des festen Niederschlags eines Winters auf dem Untergrund“ zu verstehen. „Das wesentliche Merkmal der Schneedecke ist ihr Aufbau in Schichten. Jede Schicht wird durch die Kornform und Korngröße der Schneepartikel, die Härte, die Temperatur, den Wassergehalt, die Dichte u. dgl. charakterisiert.“ (ONR 24805). Aufgrund der atmosphärischen Einflüsse besitzen die Schneekristalle schon bei der Deposition unterschiedliche Eigenschaften, was eine geschichtete, anisotrope Schneedecke entstehen lässt. Die Energie- und Massenflüsse innerhalb der Schneedecke, an der Oberfläche und am Übergang zum Boden (bzw. zur Vegetation) verändern die mechanischen Eigenschaften der Schneedecke ständig. Ob Schnee als Lawine abgleitet, hängt oft von sehr geringen Änderungen in der Kornstruktur ab. Die Schneehöhe ist eine Funktion der Niederschlagsmenge und der Dichte des Schnees. Die Neuschneedichte weist eine Korrelation mit der Lufttemperatur und den Windverhältnissen (Wind= „Baumeister der Lawinen“) bei Schneefall auf. Der Setzungsprozess wird von der Schneetemperatur und der darüber liegenden Schneelast gesteuert (Andrecs et al. 2010).

An einem Hang treten in der Schneedecke Kriechbewegungen auf und zusätzlich, je nach Verhältnissen zwischen Boden und Schnee, noch Gleitbewegungen auf der Bodenoberfläche. Durch einen auslösenden Faktor kann es in Folge zum Abgleiten der gesamten Schneedecke führen (vgl. Kap. 2.1.1.2; allgemeine Rutschmechanik). Das Abgleiten ist dabei von Hangneigung, Schneemächtigkeit, Bodenrauhigkeit, dem Relief und der Schneebeschaffenheit abhängig (Frehner et al. 2005). Somit ist das Abgleiten wesentlich von der Festigkeit des Schnees abhängig, welcher als „Widerstand einer Schneeschicht gegen Bruch“ definiert ist. Im Gefüge der Schnee- bzw. Eiskristalle einer Schneeschicht können Zug-, Druck-, und Scherkräfte übertragen werden. Je stärker die Bindung, desto höher ist die Festigkeit (ONR 24805).

Auslösende Faktoren für die Entstehung von Bodenlawinen sind ein starkes, anhaltendes Schneegleiten und -rutschen. D.h. auch der Lawine geht die Rissbildung mit großen seitlich ausgedehnten Spannungsrissen voraus. Besonders im Frühjahr (wärmere Temperaturen/ Tagesgang der Sonneneinstrahlung) kommt es zur Gewichtszunahme in der Schneedecke. Bodenlawinen entstehen weiters durch Erschütterungen oder Zusatzbelastungen (z.B. Skifahrer) (Bunza 1982).

Es nach dem „Lawinenatlas“ folgende Lawinenklassen unterschieden werden (Tab. 1):

Tabelle 1: Lawinenklassifikation- systematische Einteilung von Lawinen gemäß dem „Lawinen- Atlas“. Vereinfachte Darstellung, gekürzt. Quelle: Austrian Standards Institute, 2010.

Zone	Kriterium	Alternative Merkmale	
Anbruch-gebiet	Form des Anrisses	Von einem Punkt ausgehend: **Lockerschneelawine**	Von einer Linie anreißend: **Schneebrettlawine**
	Lage der Gleitfläche	Innerhalb der Schneedecke: **Oberlawine**	Auf der Bodenoberfläche: **Bodenlawine**
	Flüssiges Wasser im Schnee	Fehlend: **Trockenschneelawine**	Vorhanden: **Nassschneelawine**
Sturz-bahn	Form der Sturzbahn	Flächig: **Flächenlawine**	Runsenförmig: **Runsenlawine**
	Form der Bewegung	Stiebend, als Schneewolke durch die Luft: **Staublawine**	Fließend, dem Boden folgend: **Fließlawine**
		Gemischte Bewegungsform: **Mischlawine**	

Eine spezielle Form von Lawinen stellen „slush flows“ dar, welche dann entstehen können, wenn der Wassergehalt in der Schneedecke so hoch ist, dass das Wasser- Schnee-Gemisch keinerlei Bindung aufweist und diese Übergangsform zu hydraulischen Prozessen, zumeist in Rinnen mit hohem spezifischen Gewicht und Geschwindigkeit, zerstörerisch abfließen kann.

Lawinen haben auf Gebirgswälder zweierlei Auswirkungen: Durch den Luftdruck von schnellen Staublawinen können Bäume mit großer immergrüner Krone bzw. Angriffsfläche relativ einfach gebrochen werden. Boden- oder Grundlawinen hingegen bilden sich bei wärmeren und daher nassen Schneedeckenbedingungen. Sie bewegen sich langsamer zu Tal, können aber durch ihren Massentransport Stammbrechen und Entwurzlungen an den Beständen verursachen (Wohlgemuth et al. 2019). Häufig werden in Lawinen in der Fließ- und Saltationsschicht (Übergangsbereich zwischen Fließanteil und Staubanteil einer Lawine) feste Komponenten wie Steine, Eisknollen oder Bäume mitgeführt, die beim Auftreffen auf ein Hindernis einen Stoß (ONR 24805) und somit Schäden am Wald verursachen können.

Tirol verzeichnete für das Jahr 2018 einen Schadholzanfall durch Lawinen von rund 2.900 fm (Amt der Tiroler Landesregierung 2019). Das grundsätzliche Auftreten von Lawinen ist regional relativ gut vorhersehbar, da sie oft aus den gleichen Anrissgebieten entstehen („Stumme Zeugen“). Es bilden sich dadurch Lawinenschneisen mit einer Vegetation, die sich den gegebenen Bedingungen anpasst. Diese charakterisiert sich durch eine spezielle Baumartenverteilung (v.a. Pioniervegetation: z.B. Grünerlen und Latschenkiefern) (Wohlgemuth et al. 2019).

Schutzwälder können die Entstehung von Lawinen vermindern bzw. verhindern, vorausgesetzt das Anbruchsgebiet befindet sich im bewaldeten Bereich. Des Weiteren

kann je nach Größe und Art der Lawine eine abbremsende Wirkung auf diese bewirkt werden, welche aber zumeist von geringer Bedeutung ist. Näheres dazu im Kapitel „Schutz vor Lawinen“ (Kap. 2.3.3.1.4).

2.1.2 Massenschurf (Erosion)

Der zweite Typ innerhalb der Massenbewegungen ist der Massenschurf. Darunter wird nach Bunza (1982) das sehr langsame bis sehr schnelle Abschürfen und Ablösen von Fels-, Lockergesteinen, des Bodens und der Vegetationsdecke aus dem ursprünglichen Gesteins- und Bodenverband verstanden. Dies geschieht durch die in Bewegung befindlichen Medien wie **Schnee**, Gletscher Wind und **Wasser**, welche wiederum durch dieselben Medien abtransportiert werden. Der Massenschurf wirkt sich durch die Schaffung von verschieden ausgebildeten Schurfflächen am Hang oder im Bachbett aus (Bunza 1982).

Besonders flächiger **Schneeschurf** am Hang in Form von Schneegleiten, Schneerutsche und Lawinen „hobelt“ zuerst die Vegetationsdecke, dann nach und nach die Humus- und tieferen Bodenschichten ab. Dadurch entstehen vegetationslose, offene Stellen (Anrisse) im Hang, in denen Wasser eindringen kann. Dadurch wird die Entstehung von Rutschungen, Kriech- und Fließbewegungen begünstigt (Bunza 1982). Allgemein kann in bewaldeten Gebieten einerseits die Akkumulation von Schneedecken vermindert werden und andererseits durch die stabilisierende Wirkung der Bäume ein Abgleiten der Schneedecken vermindert/ verhindert werden.

Beim **Massenschurf durch fließendes Wasser** wird unterschieden zwischen:

(1) Schurf und Abspülen durch oberflächlich abfließendes Wasser
(2) Massenschurf durch Rinnerosion am Hang
(3) Ausspülung durch Hangzugwasser
(4) Erosion durch Fließgewässer

Ad 1: Zum **Schurf und Abspülen** durch oberflächlich abfließendes Wasser kommt es bei stärkerem Regen und/ oder bei Undurchlässigkeit des Bodens (letzteres ist beispielsweise häufig auf Forststraßen beobachtbar). Der flächenhafte Bodenabtrag geht dabei meist allmählich und ziemlich unauffällig vor sich. Die Stärke dieses Massenschurfes ist u.a. abhängig von der Dichte der Pflanzendecke. Der Abtrag ist umso stärker, je geringer die Pflanzendecke ist (Bunza 1982).

Ad 2: Beim **Massenschurf durch Rinnenerosion am Hang** handelt es sich um Tiefenerosion am Hang, bei der sich Einschneidungen in Form von Furchen und Rillen bilden. Auch hier sind die Voraussetzungen u.a. wieder abhängig von der Dichte der Vegetationsdecke (Bunza 1982).

Ad 3: Zum **Ausspülen durch Hangzugwasser** kommt es nach zu Tage treten des unterirdisch fließenden Hangzugwassers. Tritt dieses Wasser ins Freie, so spült es das mehr oder weniger lockere Bodenmaterial aus und bildet so charakteristische

dreieckartige Ausspülungsformen (Bunza 1982). Die Menge des Hangzugwassers wird wiederum u.a. von der Vegetation, die als Wasserverbraucher wirkt, beeinflusst.

Ad 4: Die **Erosion durch Fließgewässer**[2] stellt einen wichtigen Verlagerungsprozess in Wildbächen dar. Die mechanische Abtragungsleistung erfolgt durch Wasserwalzen und Schottertrieb am Grund und ist umso größer, je unregelmäßiger die Wasserführung ist und je häufiger sich der Wasserstrom bei Hochwässern verlagert. Die Erosion geht dabei nicht nur in die Tiefe (Tiefenerosion), sondern erfolgt auch an der Seite (Seitenerosion). Der auslösende Faktor ist dabei Hochwasser mit mehreren Hochwasserwellen in Folge hoher Niederschlags- oder Schmelzwassermengen im Einzugsgebiet. Durch den Tiefenschurf verbunden mit der Seitenerosion kommt es vielfach zum Untergraben der Böschungsfüße und damit zur Vergrößerung der Spannungen an den Ufer- und Einhängen, die sich oft hoch hinauf fortpflanzen können. In der Folge treten Entlastungsbewegungen auf, es kommt zum Kohäsionsverlust der Hangmassen und zum Geschiebeeinstoß ins Gerinne. Die Tiefenerosion der Bachsohle und das damit verbundene Nachgleiten der Böschungen wiederholt sich so oft, bis die Abflussmenge abnimmt (Bunza 1982). Somit bildet die Erosion durch Fließgewässer eine wichtige vorbereitende Kraft für Rutschungen oder Kriech- und Fließbewegungen durch den Abtrag des Hangfußes (Gerinneübertiefung) und damit die Entlastung des Hanfußbereiches.

Eine **anthropogene Einflussnahme** auf den wichtigen Prozess der **Erosion durch Fließgewässer** ist vor allem über die Vegetation (Schutzwald) und somit in den Eingriff in den Wasserhaushalt (Vorbeugung von Hochwässern), Stabilisierung der Hänge und Verminderung des Feststoffeintrages in Wildbäche. Vgl. Kap. 2.3.3.1..

Massenschurf (Erosion) durch **Wind** und **Gletscher** spielen für das Wildbachgeschehen und auch für die Schutzwaldwirkung eine geringere Rolle und werden daher nicht weiter beschrieben.

[2] Auch Wildbacherosion genannt; die durch die Tätigkeit des konzentriert abfließenden (Wild-) Wassers verursachte Erosion. Nach: Bunza 1982.

2.2 Klima

2.2.1 Historische Klimaentwicklung in Österreich und Tirol unter Einbeziehung der Waldentwicklung

Um abschätzen zu können, wohin die Waldentwicklung in Tirol bei einer globalen Erwärmung sich entwickeln kann, ist es wichtig zu wissen, woher die Tiroler Wälder kommen und in welchem Zusammenhang sie zum Klima der Vergangenheit stehen. Dazu wird im Folgenden ein Blick in die erdgeschichtliche Entwicklung Österreichs bzw. Tirols geworfen. Wir beginnen mit dem Pleistozän, welches vor etwa 2,6 Mio. Jahren seinen Anfang nahm und vor etwa 11.700 Jahren endete. Dieses Zeitalter war geprägt durch eine Abfolge von Kalt- (Glazialzeiten), sowie Warmzeiten (Interglazialzeiten). In den kältesten Phasen der Glazialzeiten herrschten auch im Alpenvorland arktische Klimabedingungen mit sehr kalten Wintern. Die Erwärmungsphasen gingen mit einer sprunghaften Abnahme der Saisonalität (milde Winter) einher, waren aber vor ca. 75.000 Jahren BP (BP= before present) noch zu kalt für eine ausgedehnte Wiederbewaldung Österreichs bzw. Tirols. Zu Ende der letzten Kaltphase der Würm, kam es zum letzten Vorstoß der Gletscher bis zum Alpenvorland. Im Spätglazial, vor 19.000 Jahren BP, kam es schlussendlich zum großflächigen Abschmelzen der Gletscher in den großen Alpentälern, unterbrochen nur durch kleinere regionale Wiedervorstößen. Das Abschmelzen schuf Raum für primäre Sukzession und erste Pionierpflanzen besiedelten die neu freigewordenen Lebensräume. Vor 14.700 Jahren BP kam es innerhalb kurzer Zeit zu einer deutlich günstigeren Warmphase, welche die Wiederbewaldung in Österreich begünstigte (APCC 2014, S. 79). Nach Bortenschlager[3] (1984) kam es jedoch erst vor 13.000 Jahren BP zu einer Wiederbewaldung in Tirol. Für das Spätglazial konnten im Inntal eine Pionier- und Steppenvegetation vor 13.000 BP festgestellt werden. Mit einer Strauchphase von Wacholder, Sanddorn und Weide beginnt die Wiederbewaldung. Nach einer ersten Initialphase begann zwischen 13.000- 12.800 Jahren im Inntal durch die Gattungen Kiefer und Birken die Wiederbewaldung. Im Alleröd (II) (letzte Warmphase kurz vor Ende der letzten Kaltzeit (Quartär, von 13.350 bis 12.680 BP, Anm.)) erreichten die Kiefernartigen die höchsten Ausbreitungsraten und stiegen z.B. im Ötztal bis zu einer Höhe von 1800 m auf (Bortenschlager 1984, S. 46–50).

Vor 12.900 Jahren kam es zu einer Abkühlung der Jüngeren Dryas (III), der letzten großen Kaltphase auf der nördlichen Hemisphäre, die jedoch vor etwa 11.700 Jahren BP endete. In dieser Zeit lag die Schneegrenze rund 300- 500 m tiefer, als während der Mitte des 20. Jahrhunderts und die durchschnittlichen Sommertemperaturen waren rund 3,5°C niedriger. (APCC 2014, S. 79) In dieser Zeit lässt sich laut Bortenschlager eine Waldgrenzenabsenkung nur aus den Hochlagen- Profilen der Moore ableiten, jedoch sank die Grenze z.B. im Gerlosgebiet (Zillertal/ Tirol) nicht unter 1500 m SH ab. Es hat sich

[3] Bortenschlager berichtet in seinen "Beiträgen zur Vegetationsgeschichte Tirols I. Inneres und Ötztal und unteres Inntal" über Untersuchungen Tiroler Moore. Hierbei wurden 16 Pollenprofile aus 11 Mooren aus dem inneren Ötztal, unterem Inntal, Gschnitztal und Gerlosplatte untersucht und dabei durch Analysen die Vegetationsgeschichte Tirol, einhergehend mit der Klimaentwicklung, rekonstruiert.

dabei eine gewisse Lichtung der Wälder, sowie einem erhöhten Birkenanteil feststellen lassen (Bortenschlager 1984, S. 46–50).

Dem **Pleistozän** folgte das **Holozän**[4]. Die ersten Jahrhunderte waren noch gekennzeichnet durch Gletschervorstöße. Gegenüber dem 20. Jahrhundert lagen die Sommertemperaturen um 1,5- 2°C tiefer (APCC 2014, S. 79). Dadurch kam es zum Ende der reinen Kiefern- Birken- Wäldern in den tieferen Lagen (Bortenschlager 1984, S. 46–50). Durch die Klimaerwärmung im Präboreal, hier lagen die Temperaturen in den ersten 2/3 meist über dem Mittel des 20. Jahrhunderts, begann im Inntal die Ausbreitung der Eichen- Mischwälder (Bortenschlager 1984, S. 46–50); vgl. dazu (Tinner et al. 2018, S. 62). Diese „wanderten" vermutlich über den Brenner ein. Neben Eichen ließen sich aber auch Ulmen und Linden in den Moorproben nachweisen. Im Tiroler Inntal herrschten im Präboreal und Boreal ein Trockenlaubmischwald bis auf etwa 1000 m SH. Den Übergangsbereich zu den Kiefern- Wäldern der Hochlagen bildeten Bestände aus Ulme, Linde, Esche und Hasel bis in eine Höhe von etwa 1200 m. In der zweiten Hälfte des Präboreals waren die klimatischen Verhältnisse in Tirol so günstig, dass sogar Efeu, Eibe, und Stechpalmen vorkamen.

Im mittleren Präboreal traten die ersten Fichten auf, welche vom Alpenvorland kontinuierlich die Bergregion eroberten. In den Tieflagen konnte sie sich jedoch nicht behaupten und wanderte in den Grenzsaum der Laub- und Föhrenwälder in eine Seehöhe von 1200- 1400 m ein. Sie drängten somit die Laubwälder nach unten und die Föhren-Birkenwälder nach oben ab.

Am Ende des Präboreals entwickelten sich in dieser Höhe Eichen- Mischwälder/ Fichten- und Föhrenmischwälder, in denen die Fichten aber schon bald die anderen Baumarten zu unterdrücken begannen. Zum Ende des Boreals entwickelten sich drei Hauptwaldtypen: Eichen- Mischwälder (mit Eichen, Linden, Ulmen und Eschen in den Tieflagen, Hasel war regelmäßig beigemischt, Erlen kamen in den Auen vor), Fichten (in den mittleren Höhenlagen) und Kiefern (mit Lärche in den Hochlagen) (Bortenschlager 1984, S. 46–50). Die letzten nicht- anthropogenen Änderungen der von Bortenschlager untersuchten Gebieten fand vor 6500- 6000 Jahre BP durch die Einwanderung von Tanne und Buche statt. Die Tanne breitete sich zunächst rascher aus, wurde aber später von der Buche dominiert. Beide Arten waren in den Tallagen den Eichen- Mischwäldern konkurrenzfähig und drängten diese auf trockenere Standorte zurück. In den Lagen über 1000 m SH bildeten sich Fichten-, Tannen-, und Buchen- Mischwälder (untere Lage Buche dominant,

---

[4] **Holozän**, Postglazial, Nacheiszeit, Alluvium (veraltet), der von H. Gervais 1867 benannte, jüngere Abschnitt (Epoche) des Quartärs (OIS 1), auf das Pleistozän folgend und von 10.000 Jahre v.h. bis in die Gegenwart reichend. Es ist gekennzeichnet durch die Wiedererwärmung des Klimas seit dem Ende der letzten Eiszeit mit der entsprechenden Entwicklung der Vegetation. Die Untergliederung des Holozän erfolgt im Wesentlichen aufgrund der Vegetationsentwicklung: Präboreal (10.000- 9000 Jahre BP), Boreal (9000- 8000 Jahre BP), Atlantikum (8000- 5000 Jahre BP), Subboreal (5000- 2500 Jahre BP), Subatlantikum (2500 Jahre BP bis heute). Quelle: https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/holozaen/7053

obere Lagen Fichten dominant). In den Hochlagen fanden sich Kiefern- und Birkenwälder. (Bortenschlager 1984, S. 46–50). Das sehr weite ökologische Potenzial der Tanne erlaubte es ihr, im Mittelholozän Waldgrenzbestände mit der Zirbe zu bilden (Tinner et al. 2018, S. 63). Laut Kral kam es dabei zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten zur Entstehung von Fichten- Tannen- Buchenwäldern. Dabei spielt die vergleichsweise langsame Ausbreitung der Buche eine wichtige Rolle (fehlende Windverbreitung der schweren Früchte) (Kral 1995, S. 8). Tinner et al. (2018) sehen hingegen die signifikant größere Trockenresistenz der Tanne als Grund für den unterschiedlichen Zeitpunkt der Etablierung von Tanne und Buche (Tinner et al. 2018, S. 63). Grund für die Konkurrenzkraft der Buchen und Eichen vermutet Bortenschlager in einer gewissen Temperaturabsenkung bzw. in einer Niederschlagserhöhung im Sommer, welches auch Tinner et al. (2018) in ihrer Arbeit bestätigen. Von der mittleren Nacheiszeit an kommt es zur Überschneidung der Areale von Fichte und Tanne, somit zum Wettbewerb zwischen den beiden Arten. Der divergierende Ausbreitungszeitpunkt macht sich zum Teil noch bis in die Gegenwart in einem höheren Fichtenanteil in den Ostalpen bzw. einem höheren Tannenanteil in den Westalpen bemerkbar (Kral 1995, S. 8). In Zeit der Invasion der Tannen und Buchen konnten erste anthropogene Einflüsse in den Mooranalysen festgestellt werden. Dies zeigte sich indirekt durch Abnahme von Birke und Hasel, aber auch direkt durch Pollen von Wegerich. Als die Menschen begannen in Tirol sesshaft zu werden, wurden erste Urwälder gerodet (Abnahme von Fichte, Buche, und Tanne) um Ackerflächen, bzw. Viehweiden zu gewinnen, was sich einwandfrei durch die Pollenanalysen belegen ließ (Bortenschlager 1984, S. 46–50).
Nach Kral wird das Maximum der Wald- und Baumgrenze im Subboreal erreicht (2150 bis 2250 m Seehöhe in der Innenzone, ohne Buschwaldgürtel). Der seitherige Rückgang ist sowohl klimatisch bedingt als auch anthropogenen Ursprungs und erfolgte dementsprechend örtlich unterschiedlich stark.(Kral 1995, S. 7)

Das Klima und die Waldentwicklung der letzten zwei Jahrtausende

Nach Bortenschlager (1984) zeigen die Analysen der Moore Spuren von Walnuss und Kastanie in der Zeit um Christi Geburt, was auf eine Zunahme der Siedlungs- und Rodungsaktivität in Tirol hindeutet. Im Inntal waren schon größere, geschlossene Kulturflächen vorhanden. Klimatisch betrachtet zeigt sich, dass das Klima der letzten zwei Jahrtausende eine Abfolge von warmen und kalten Perioden war, welche im Schnitt kühler waren als zu Beginn und in der Mitte des Holozäns. Im österreichischen Klimasachstandsbericht (APCC 2014) werden in dieser Zeit dazu grob vier Perioden unterschieden: einer ersten, relativ stabilen und milden römischen Warmzeit (von ca. 250 v. Chr. bis 300 n. Chr.), folgte eine von instabilen, feucht- kalten Sommern geprägte Periode zu Ende der Römerzeit und während des Frühmittelalters (von ca. 300 bis 840 n. Chr.).

An diese schloss sich eine dritte, relativ warme Periode an (mittelalterliche Warmzeit, ca. 840 n. Chr.) (APCC 2014, S. 79–83). Während des Hochmittelalters kam es zu einem immer größer werdenden Landbedarf. Wodurch die noch zu Beginn des Mittelalters

ausreichend vorhandenen Wälder, verstärkt gerodet wurden (Freitag, 2012). Dies konnte auch in den Pollenanalysen in Tirol nachgewiesen werden (Bortenschlager, 1984). Die Nutzung war weitgehend frei von Restriktionen seitens der Obrigkeit. Dennoch begannen in dieser Zeit die ersten Besitzansprüche an den Wald durch die adelige Bevölkerungsschicht. Im 13. Jahrhundert beschleunigte sich der Bevölkerungsanstieg, wodurch der Nutzungsdruck auf den Wald erhöht wurde (Freitag 2012, S. 1–3).

In dieser Zeit fand auch die vierte klimatologische Periode statt. Diese fand zwischen ca. 1260 und 1860 n. Chr. statt und war geprägt durch ein deutlich kühleres Klima als noch zur zweiten Periode. Jedoch gab es währenddessen auch wärmer Jahrzehnte. Wegen der sich in dieser Zeit ausbreitenden Gletscher wird diese Periode von den Wissenschaftlern auch "Kleine Eiszeit" genannt. Ursächlich für diese Kälteperiode dürften verminderte Sonnenaktivität und erhöhte vulkanische Aktivitäten sein (Bortenschlager 1984, S. 46–50) und (APCC 2014, S. 79–83). Der Wald lieferte den Menschen im Mittelalter Brenn-, Werk- und Bauholz, Holzkohle, Gerbstoffe, Harz, Pottasche und andere Waldprodukte.

Im 14. Jahrhundert kam es zu einer kurzzeitigen Erholung infolge des Nutzungsdrucks auf die Wälder, da große Teile der Bevölkerung durch Pest und Hungersnöte dahingerafft wurden. Ab Mitte des 15. Jahrhunderts stieg die demografische Entwicklung erneut, auch der Nutzungsdruck stieg wieder. Speziell der Bergbau und die Salinen verschlangen enorme Holzmengen, wodurch die Wälder zusehends abnahmen. Im 17. und 18. Jahrhundert entstanden durch übermäßige Holzentnahme, Überweidung, Verbiss und kurzzeitiger Waldfeldbau in siedlungsnahen, intensiv genutzten Wäldern zahlreiche Kahlflächen. Der schlechter werdende Zustand der Wälder und das Schrumpfen der Holzvorräte rief im 18. Jahrhundert aufgeklärte Beamte und Wissenschaftler auf den Plan. Sie warnten vor einer bevorstehenden „Holznot“ und forderten ein nachhaltiges Wirtschaften: Damit stets genug Holz vorhanden sei, dürfe immer nur so viel geerntet werden, wie zur gleichen Zeit nachwachse: Die Geburtsstunde der Nachhaltigkeit, bzw. der nachhaltigen Forstwirtschaft.

Anstatt den Wald wie bisher natürlich wachsen zu lassen und ungeordnet zu nutzen, wurden erste Pläne entworfen, die Wälder kontrolliert zu pflegen und zu ernten. Da sich die heimische Fichte, eine kälteliebende, aber trockenheitsintolerante Baumart, durch ihre Eigenschaften ideal als Bauholz verwenden ließ, wurde verstärkt auf einen Umbau der Mischwälder auf Nadelholzmonokulturen gedrängt. Speziell in Wäldern, welche im Einflussbereich der Salinen und Bergwerken lagen, kam es verstärkt zu diesen Umgestaltungen. Somit war der Weg zur Ausbreitung der Fichte geebnet. Parallel dazu nahm der Bedarf an Holz stetig zu. Eine Abnahme des Nutzungsdruckes erfolgte erst im 19. und 20. Jahrhundert. Paradoxerweise "rettete" gerade die Nutzung der fossilen Energieträger wie Kohle, Gas und Erdöl die heimischen Wälder vor Übernutzung. Des Weiteren wurden Jahrtausende alte enge Verflechtung von Landwirtschaft und Wald

aufgelöst. Der nach Mitte des 19. Jahrhunderts aufkommende Einsatz von Kunstdünger revolutionierte die Landwirtschaft und reduzierte gleichzeitig die starke Nutzung der Biomasse aus den Wäldern, somit konnten sich die Waldböden wieder erholen. Mit Aufkommen der Industrialisierung wurde auch zunehmend der Bedarf an Naturprodukten wie Gerbstoffe, Harz oder Pottasche geringer, welche nun synthetisch produziert werden konnten. Die Nadelholzmonokulturen entsprachen zwar den Ansprüchen der Holzindustrie, erwiesen sich durch ihre Artenarmut aus ökologischer Sicht als höchst labil (und somit anfällig gegenüber Störungen, Anm.) (Freitag 2012, S. 1–3).

Schlussendlich wurden die anthropogenen Einflüsse auf das Klima bemerkbar. Durch das Verbrennen fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas und der extensiven Nahrungsmittelproduktion wurden vor allem die zwei wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) in der Atmosphäre in immer höheren Konzentrationen angereichert (Böhm 2008, S. 170–171). Dadurch lässt sich zum Ende des 19. Jahrhunderts hin ein deutlicher Temperaturanstieg in Österreich nachweisen (vgl. dazu Temperaturentwicklungen Abb. 4). So ist die Temperatur seit 1880 um beinahe um 2°C gestiegen. Jedoch im Vergleich dazu global nur um 0,85°C (vgl. dazu Temperaturentwicklungen in Abb. 4). Dieser Trend lässt sich auch in der Periode ab 1980 feststellen: hier stieg die Temperatur in Österreich um etwa 1°C, global nur um 0,5°C. Im saisonalen Mittel lässt sich eine Erwärmung über das gesamte Jahr hinweg feststellen, am geringsten jedoch im Herbst. Die Temperaturzunahme stagnierte in der Zeit zwischen 1950 bis 1980 bzw. nahm in dieser Zeit sogar leicht ab. Verantwortlich dafür dürften die anthropogen verursachten Emissionen sein, welche ein sogenanntes „Global Dimming“, also eine Verdunkelung der Atmosphäre bewirkte. Seit den 1980er Jahren nimmt die Erwärmung wieder kontinuierlich zu. Auch ist in Zukunft mit einer weiteren Temperaturzunahme zu rechnen, dazu später mehr (APCC 2014, S. 79–83).

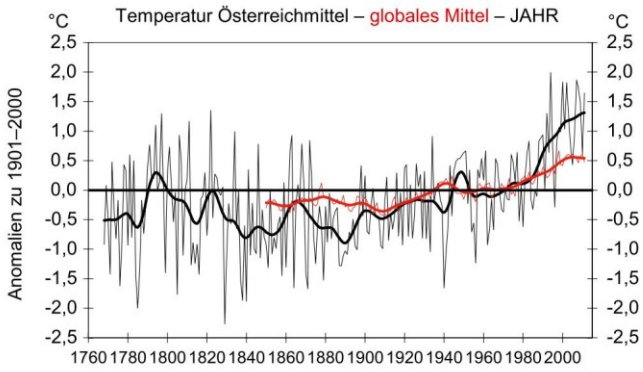


Abbildung 4: Anomalien der Jahresmittel der Lufttemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts für Österreich (schwarz, 1768 bis 2011) und für das globale Mittel (rot, 1850 bis 2011). Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass) (APCC 2014, S. 81).

Vegetationsgeschichtlich war die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts geprägt durch eine starke Zunahme des Waldvorrates. Seit dem zweiten Weltkrieg wurden Waldflächen

intensiv (vor allem mit Fichte), nach deren extensiven Nutzung in den Vorkriegsjahren, aufgeforstet. Dies führte zunehmend zu Problemen mit Waldschäden. Speziell zum Ende des 20. Jahrhunderts wuchsen die Fichten in ein Alter, in dem sie besonders anfällig für Sturmschäden und in Folge attraktiv für den Borkenkäfer waren (Küster 1998 // 2013, S. 222). Aber auch in den nächsten Jahren bis Jahrzehnte wird die Forstwirtschaft mit diesen Problemen konfrontiert sein.

Die Waldfläche in Österreich ist seit den 60er Jahren um 300.000 Hektar (ha) größer geworden und beläuft sich derzeit auf 3,99 Millionen ha (Schadauer 2019).

Der Niederschlag in den letzten 150 Jahren zeigt sich in Österreich im Gegensatz zur Temperaturentwicklung regional sehr unterschiedlich. Der APCC (2014) zeigt, dass sich in Westösterreich die Niederschlagsmenge im betrachteten Zeitraum um 10- 15% erhöhte, jedoch im Südosten die Menge um etwa die gleiche Größenordnung abnahm. Sehr niederschlagsreiche Jahrzehnte gab es in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, wodurch es zu starken Gletschervorstößen kam. Dennoch war es in allen Teilen Österreichs in den 1860er Jahre besonders trocken. Hohe Jahresniederschläge gab es wieder in den Jahrzehnten zwischen 1900 und 1940 (in Westösterreich jedoch gedämpft). Auch in den 1970er Jahren wurde ein neues Niederschlagsmaximum erreicht. Im Westen ist das aktuelle Niederschlagsniveau ebenso das höchste seit Beginn der Messreihe (1858). Im Alpeninneren liegt das aktuelle Niederschlagsniveau im langjährigen Durchschnitt des 20. Jahrhunderts (APCC 2014)

2.2.2 Aktuelle Klimasituation für Tirol

Durch seine Lage in den Alpen ist das Klima Tirols stark durch das Relief des Hochgebirges geprägt, welches unweigerlich die klimatischen Gegebenheiten des Landes beeinflusst. Das Klima wiederum wirkt sich auf die Topografie aus. Tirol gehört der gemäßigten Klimazone an und wird durch die atlantischen, kontinentalen und mediterranen Ströme beeinflusst. Prägend ist das inneralpine Klima, welches durch relativ feuchte Sommer, trockene Herbste und schneereiche Winter gekennzeichnet ist. Ein direktes Vordringen maritimer Luftmassen wird durch die Lage der Gebirgsketten verhindert und lenkt diese um. Das bekannteste Phänomen dieser Ausgleichsströme ist der Fön, welcher speziell im Innsbrucker Raum beachtliche Windgeschwindigkeiten erreichen kann (Adler et al. 2015, S. 39).

2.2.2.1 Aktuelle Temperatursituation in Tirol

Die großräumige Temperaturverteilung Tirols ist maßgeblich von der Seehöhe abhängig. Kleinräumig betrachtet ist die Form des Reliefs, Neigung und Exposition zur Sonne ausschlaggebend für die Sonneneinstrahlung und den Temperaturhaushalt. So können sich im Hochsommer rasch Gewitterzellen bilden, die sich innerhalb kurzer Zeit heftig entladen können. Des Weiteren können Kaltluftseen, Föhneinflüsse, Tallagen, sowie städtische Wärmeinseln Temperatur- beeinflussend sein. Laut dem ÖKS15 lag die mittlere Lufttemperatur für Tirol in der Periode 1971 bis 2000 bei 2,9°C (BMNT 2016, S. 5). Dabei ist der Jänner mit durchschnittlich -4°C der kälteste und der Juli mit +13°C der wärmste

Monat des Jahres. Das jährliche Temperaturminimum im Großteil Tirols liegt bei durchschnittlich -18 bis -16°C. Etwas weniger kalt ist es im Stadtgebiet von Innsbruck und Landeck. Das Temperaturmaximum liegt im Inntal bei ungefähr 32 bis 34°C bei steigendem Trend. Die Höchstwerte nehmen relativ zur Seehöhe ab. Betrachtet man die jährliche Anzahl der Sommertage, das sind jene Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von 25°C oder mehr, so lassen sich im Inntal 50- 60 Sommertage messen. Im Vergleich dazu schwankt die Anzahl der Sommertage in 1500 m Seehöhe zwischen 1 und 20 Tagen. Die Temperatur ist auch ein entscheidender Faktor für die Pflanzenwelt. So wird beispielsweise die Vegetationsperiode[5] dadurch direkt beeinflusst. In Tirol beginnt diese Periode in den Niederungen im Laufe des März. Im Mai bis Anfang Juli erreicht die Vegetationsperiode die Höhenlagen um 1700 bis 2800 m Seehöhe. Im August beenden die ersten Kälteeinbrüche die Vegetationsperiode in den Hochlagen. In den Niederungen endet diese in der zweiten Oktoberhälfte. Im Inntal dauert diese in der Regel etwa sieben bis acht Monate (Adler et al. 2015, S. 44–46).

2.2.2.2 Aktuelle Niederschlagssituation für Tirol

Der Niederschlag in Tirol wird hauptsächlich von großräumigen Wettersituationen (Fronten) verursacht. Die aus dem Nordwestsektor kommenden Fronten schwächen sich über dem europäischen Kontinent ab, werden in den Alpen aufgestaut und entladen sich schließlich dort. Inneralpin mit zunehmendem Abstand zu den Staulagen an den Alpenrändern, wird die durchschnittliche Niederschlagsmenge immer geringer (z.B. oberes Inntal). Während die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in Reutte noch 1375 mm, am Nordrand des Karwendelgebirges etwa 2000 mm und in Kufstein 1330 mm beträgt, sind es um Innsbruck um die 900 mm und im obersten Inntal nur 600 mm. Laut ÖKS15 beträgt die mittlere jährliche Niederschlagssumme für Tirol 1.314 mm (Periode 1971- 2000) (BMNT 2016, S. 7). Der wärmste Monat Juli ist auch der niederschlagsreichste. Der Februar hingegen ist der niederschlagsärmste Monat. Wie schon eingangs erwähnt können hochsommerliche Gewitterereignisse gewaltige Regenmengen mit sich bringen, welche zu großräumigen Überschwemmungen und zahlreichen Murgängen führen können (Adler et al. 2015, S. 46–50).

2.2.2.3 Aktuelle Schneedeckensituation für Tirol

Als Schneedecke bezeichnet man jenen Teil des Niederschlages, der die Erdoberfläche als Schneefall erreicht und sich zu einer geschlossenen Schneeauflage von mindestens 1 cm Höhe akkumulieren kann. Strömungen aus nordwestlicher Richtung begünstigen eine hohe Neuschneeakkumulation in den Nordalpen von 3- 6 m in rund 1000 m Seehöhe, bzw. 7-10 m in rund 2000 m Seehöhe. Im Hochgebirge werden Neuschneesummen von bis zu 20 m erreicht. Neben dem Hochgebirge werden die höchsten Messwerte in Reutte (11 m) und Hochfilzen (6,8 m) gemessen. Innsbruck erreicht durchschnittliche Neuschneesummen von 1,1 m. Die durchschnittliche Schneehöhe ist dabei weitaus

[5] **Vegetationsperiode:** Als Vegetationsperiode wird jener Zeitraum bezeichnet, in dem Pflanzen photosynthetisch aktiv sind. Das sind jene Wochen, an denen die Tagesmitteltemperatur die Schwelle von 5°C übersteigt.

geringer. So liegt der Schnee beispielsweise am Patscherkofel (2247m) nur durchschnittlich 86 cm hoch (Adler et al. 2015, S. 50–58).

2.2.3 Klima der Zukunft: Klimaszenarien für Tirol und Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren

2.2.3.1 Temperatur

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, ist das Klima der Erde ein Wechselspiel zwischen Kaltzeiten und Warmzeiten. Natürliche Schwankungen sind stets möglich. Es wird daher wärmere, kältere, feuchtere und trockenere Jahre oder Jahrzehnte geben, die von einem erwarteten längerfristigen Trend abweichen. Ein Hilfsmittel, um mögliche zukünftige Klimazustände zu simulieren sind sogenannte Klimamodelle. Diese sind, wie alle Modelle, vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. Fehler, Weiterentwicklungsmöglichkeiten, Schwächen sind stets möglich und sind bei der Interpretation zu beachten (BMNT 2016, S. 3). Sie stellen komplexe physikalische Modelle dar, die das Klimasystem der Erde in vereinfachter Form modellieren. Dadurch ist es möglich, die komplexen Vorgänge in der Atmosphäre darzustellen. Die spannendste Frage dabei ist, wie sich unterschiedlich starke Treibhausgasemissionen auf das zukünftige Klima auswirken. Heute stellen Klimamodelle gekoppelte Atmosphären-Ozean- Modelle dar. In diesen werden Atmosphäre und Ozeane in ein dreidimensionales Gitter geteilt und darin werden der Austausch an Masse und Energie zwischen den benachbarten Gitterpunkten durch mathematische Berechnungen von Zeitschritt zu Zeitschritt gelöst. Daraus ergibt sich die Dynamik der Modelle. Die Klimamodelle bestehen dabei aus mehreren Modulen, welche die verschiedenen Einzelteile des Klimasystems repräsentieren: Atmosphäre, Ozean, Chemie, Kryosphäre und Landoberfläche. Erst durch die Kopplung der einzelnen Module spricht man von einem globalen Klimamodell oder von einem globalen Zirkulationsmodell (**G**lobal **C**irculation **M**odel, GCM) (Anonymous 2020a).

Die typische Auflösung für die Modelle, die im 4. Klimasachstandsbericht verwendet wurden, liegt bei 100 bis 150 km und bei einer vertikalen Auflösung von 100 m bis 10 km. GCMs benötigen für ihre Berechnungen Randbedingungen. Diese werden durch Szenarien, die eine mögliche zukünftige Emissionsentwicklung beschreiben, definiert. Diese zukünftigen Emissionsentwicklungen sind jedoch dem anthropogenen Einfluss unterworfen und abhängig von der von Entwicklung der Weltbevölkerung, Wirtschaft, Einsatz und Entwicklung emissionsmindernder Technologien, Rohstoffverfügbarkeit und politischen Handlungen. Dafür wurden sogenannte sozioökonomische Modelle entwickelt, welche die Treibhausgasemissionen und andere relevante Parameter als Funktion der Zeit abschätzen. Die mit den Modellen berechneten Szenarien wurden im „**S**pecial **R**eport on **E**mission **S**cenarios“ (nach Nakicenovic und Swart, 2000) angeführt und dienten als Grundlage für die meisten Klimaprojektionen, die im 3. und 4. Sachstandsbericht veröffentlicht wurden . Allerdings wurden bei diesen Szenarien die Landnutzungsänderungen und mögliche politische Maßnahmen nicht berücksichtigt. Die bekanntesten SRES- Szenarien sind die sogenannten Markerszenarien **A1B, A2, B1** und **B2**, welche aber mittlerweile als überholt gelten (APCC 2014).

Im 5. IPCC- Sachstandsbericht wurden vier repräsentative Konzentrationspfade (**R**epresentative **C**oncentration **P**athways, RCP) entwickelt und dienen als Berechnungsgrundlage für die verschiedenen GCMs. Im Unterschied zu den „alten" Emissionszenarien (Special Report on Emission Scenarios, SRES), sind bei den RCPs auch Landnutzungsänderungen und politische Maßnahmen integriert. Der Grundgedanke dahinter ist es verschiedene Emissionsverläufe bis zum Jahr 2100 zu simulieren. Ausgehend vom RCP2.6, das als das „best case" Szenario gilt, bis zum RCP8.5 „worst case". RCPs weisen aber große Unsicherheiten auf, da sie stark abhängig sind von der wirtschaftlichen und sozioökonomischen Entwicklung der Menschheit und somit von CO_2-Emissionen (APCC, 2014). Als aktuelles Beispiel wie schnell unvorhersehbare Änderungen im Verhalten der Weltbevölkerung auftreten können, sei hier die aktuelle SARS- CoV-19- Pandemie zu nennen, die innerhalb kürzester Zeit den internationalen Flug- und Reiseverkehr lahmlegte. Welche langfristigen Auswirkungen dieser Stillstand, und somit Verminderung der CO_2- Emissionen, auf das Klima haben wird, werden zukünftige Untersuchungen zeigen.

Regionale Klimamodellsimulationen bis 2100 im Alpenraum

Im österreichischen Alpenraum ist bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts mit einem Temperaturanstieg von knapp 2 °C zu rechnen, bezogen auf die Periode 1971- 2000. Je nach gewähltem Emissionsszenario liegt der Anstieg bis zum Jahre 2100 zwischen +2.3 °C (RCP4.5) und +4,0 °C (RCP8.5) (APCC, 2014).

Werden die Temperaturveränderungen saisonal betrachtet, so treten deutliche Unterschiede auf: eine geringfügstärkere Erwärmung als im Jahresmittel wird für den Alpenraum für die Herbst- und Wintermonate (September- Februar) simuliert. Im Gegensatz dazu ist eine etwas niedrigere Erwärmung im Frühling (März- Mai) zu erwarten. Der Sommer weist vor allem südwestlich der Alpen eine überdurchschnittliche Erwärmung auf (Anonymous 2020b).

Für die regionale Betrachtung des Klimawandels werden für diese Arbeit die Ergebnisse des ÖKS15 Projektes (BMNT 2016) herangezogen. Das Projekt wurde vom Ministerium für ein lebenswertes Österreich (bmlfuw) und den neun österreichischen Bundesländern gemeinsam beauftragt „um Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel auf zuverlässige Informationsgrundlage zu stellen" (BMNT 2016). In dieser Masterarbeit werden die Ergebnisse für Tirol herangezogen, in dem zwei Emissionsszenarien betrachtet werden: ein Szenario mit ungebremsten Treibhausgasemissionen „business-as- usual" (RCP8.5) und ein Szenario mit wirksamen Klimaschutzmaßnahmen (RCP4.5).

Wie auch der Österreichische Sachstandbericht Klimawandel (2014) geht auch das ÖKS15 für beide Szenarien in naher und ferner Zukunft im Mittel mit einer signifikanten Zunahme der Temperatur aus. Dabei ist die mittlere Temperaturzunahme im Winter und Sommer, sowie für das gesamte Bundesland annähernd gleich. Im Szenario RCP8.5 (business- as- usual) ist gegen Ende des 21. Jahrhunderts der Temperaturanstieg deutlich stärker als im Szenario RCP4.5 (Klimaschutz- Szenario). In Abbildung 3 werden die beobachteten Werte und simulierten Änderungen der mittleren Lufttemperatur (in °C) für

die beiden Szenarien dargestellt. Bei einem RCP4.5 (Klimaschutz- Szenario) nimmt die mittlere Temperatur in der Periode 2021 bis 2050 um **+1,3 °C**, bei einem RCP8.5 („business- as- usual“) um **+1,4 °C** zu. In der Periode 2071 bis 2100 soll die Temperatur bei einem RCP4.5- Szenario um +2,3 °C und bei einem RCP8.5- Szenario um **+4,2 °C** für das gesamte Bundesland zunehmen (vgl. dazu Abb. 3) (BMNT 2016, S. 5). Der später folgende praktische Teil der Arbeit im Fallbeispiel Patscherkofel wird auf dieser Modellrechnung basieren. Im Zuge eines „Vorsorgeprinzips“ wird dieses RCP8.5-Szenarion, als „worst- case“-Fall gewählt.

Beobachtete Werte und simulierte Änderungen der mittleren Lufttemperatur (in °C)										
	1971- 2000		2021- 2050				2071- 2100			
	Jahreswerte		RCP4.5 (Klimaschutz- Szenario)		RCP8.5 (business- as- usual)		RCP4.5 (Klimaschutz- Szenario)		RCP8.5 (business- as- usual)	
bis	3,1		+1,9		+2,2		+3,7		+5,9	
Mittel	**2,9**		**+1,3**		**+1,4**		**+2,3**		**+4,2**	
von	2,8		+0,9		+1,1		+1,8		+3,5	
	Winter	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**
bis	-4,3	10,9	+1,9	+2,2	+2,4	+2,5	+3,3	+3,9	+5,6	+7,1
Mittel	**-4,7**	**10,6**	**+1,5**	**+1,4**	**+1,5**	**+1,6**	**+2,4**	**+2,4**	**+4,5**	**+4,6**
von	-5	10,4	+0,8	+1,1	+0,8	+1,1	+1,8	+1,8	+3,5	+3,6
Winter: Dezember- Jänner- Februar/ Sommer: Juni- Juli- August										

Abbildung 3: Beobachtete Werte und simulierte Änderungen der mittleren Lufttemperatur (in °C) für Tirol nach dem ÖKS15 Projekt bis 2100 (BMNT 2016, S. 5).

Bisher verzeichnete Tirol durchschnittlich **0,5 Hitzetage**[6] pro Jahr (Periode 1971- 2000). Zur Mitte dieses Jahrhunderts könnten es tirolweit jährlich **1,7 Tage** sein, zu Ende hin sogar **3 bzw. 8 Tage**. Eine Klimaerwärmung hat auch Auswirkungen auf die **Vegetationsperiode**. Derzeit dauert sie im Schnitt ca. 148 Tage. Nach den Simulationen wird sie zum Ende des Jahrhunderts hin sogar um **ca. 34** bzw. um **ca. 65 Tage** im Jahr verlängert (BMNT 2016, S. 3).

Die Auswertung der Klimadaten von 1980 bis 2000 belegen eine Zunahme der heißen Tage bzw. von warmen Nächten. Im 21. Jahrhundert werden **Temperaturextreme**, z.B. die Anzahl der heißen Tage, deutlich mehr werden. Die Häufigkeit von **Hitzewellen** wird dabei von rund fünf auf etwa 15 pro Jahr zu Ende des Jahrhunderts hin ansteigen. Bezüglich des Auftretens von **Trockenheit** lässt sich für die Zukunft eine Verdreifachung der Wahrscheinlichkeit von 2071 bis 2100 feststellen. Zudem verlängert sich die Dauer von **Dürreperioden** und es werden geringere Bodenfeuchtegehalte erreicht als heute. Womit der Trockenstress für die Vegetation steigen wird (APCC 2014, S. 85–88; Haslinger et al. 2019). Die Pflanzen beginnen im Frühling früher auszutreiben und gehen später in die Winterruhe über. Daher entnehmen sie den Böden über einen deutlich längeren Zeitraum mehr Wasser (ZAMG 2020). Der mittlere Bodenfeuchtegehalt wird in Zukunft abnehmen. Dabei wird mit einer geringen Änderung in der Vegetationsperiode bis 2050

[6] **Hitzetage (Jahresmittel):** Als Hitzetage werden Tage bezeichnet, an denen die Tageshöchsttemperatur mehr als 30°C erreicht. Werte bezogen auf das gesamte Bundesland.

gerechnet, jedoch wird für die Periode 2051 bis 2080 mit einer leichten Abnahme in den Monaten März bis August erwartet (APCC 2014, S. 92).

Die sich erwärmenden Temperaturen haben auch Auswirkungen auf die winterliche **Schneedecke** und damit auf die **Lawinenaktivität**, in starker Abhängigkeit mit der Höhenlage. In tieferen Lagen führt die steigende Temperatur zur Abnahme der Schneedeckendauer und andererseits ist zu erwarten, dass mehr Regen- aufgrund der Erwärmung- die Stabilität der Schneedecke negativ beeinflusst. So ist laut dem Klimawandelsachstandsbericht mit einer **Zunahme von Nassschneelawinen-** Ereignissen vor allem in tieferen Lagen zu rechnen. Somit ist auch hier wieder ein stabiler, schutzfunktionaler Wald gefordert (APCC 2014, S. 559).

2.2.3.2 Niederschlag

Nach dem ÖKS15 bzw. dem österreichischen Klimasachstandsbericht ist in naher und ferner Zukunft mit leichter Zunahme im mittleren Jahresniederschlag zu rechnen. Jedoch erst in ferner Zukunft kann mit einer signifikanten Änderung gerechnet werden. In den Simulationen zeigen sich saisonale Unterschiede. So ist generell mit einer Zunahme der Winterniederschläge zu rechnen. In der Periode 2021 bis 2050 wird im Winter etwa 10% (Klimaschutz- Szenario) mehr Niederschlag fallen, in der Periode 2071 bis 2100 ist mit ca. 19% mehr Niederschlag (Klimaschutz- Szenario) zu rechnen (siehe Abb. 4), was zu einer Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Sommer führt. Die Niederschlagsentwicklungen sind aber sehr schwierig zu simulieren und unterliegen großen regionalen Unsicherheiten. Der Niederschlag vor Ort hängt von vielen Faktoren ab, die nicht alle von den Klimamodellen gleichermaßen gut erfasst werden (BMNT 2016, S. 7) bzw. (APCC 2014, S. 83). Hohe Bedeutung hat der Klimawandel für das gebirgige Österreich. So konnte an der Klimamessstation am Hohen Sonnblick (3106 m, Salzburg) repräsentative Daten für das Hochgebirgsklima und in Folge für die Klimaerwärmung erhoben werden. Demnach entspricht die Temperaturänderung im Hochgebirge jener in den Tälern. Dabei wurde eine markante Verschiebung von Schneefall zu Regen festgestellt. Aktuell fällt am Hohen Sonnblick rund 30 % des Niederschlags als Regen. Zudem steigt der mittlere Luftdruck, was als deutliches Zeichen für die Erwärmung der darunterliegenden Luftmassen gewertet wird (APCC 2014, S. 82–83).

Beobachtete Werte (in mm) und simulierte Änderungen der mittleren Niederschlagssummen (in %)										
	1971- 2000		2021- 2050				2071- 2100			
	Jahreswerte		RCP4.5 (Klimaschutz- Szenario)		RCP8.5 (business- as- usual)		RCP4.5 (Klimaschutz- Szenario)		RCP8.5 (business- as- usual)	
bis	1367		+7,1		+10,1		+11,9		+17,0	
Mittel	**1314**		**+2,8**		**+4,8**		**+4,9**		**+6,5**	
von	1260		-2,1		+0,9		-0,4		-2,9	
	Winter	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**	**Winter**	**Sommer**
bis	257	527	+20,8	+8,9	+22,7	+10,8	+23,0	+17,1	+28,8	+20,4
Mittel	**234**	**500**	**+9,7**	**-0,0**	**+13,1**	**+2,8**	**+7,8**	**+3,3**	**+18,6**	**-0,2**
von	211	472	-2,6	-9,2	-4,2	-8,6	-10,7	-10,2	-0,1	-20,8
Winter: Dezember- Jänner- Februar/ Sommer: Juni- Juli- August										

Abbildung 4: Beobachtete Werte (in mm) und simulierte Änderungen der mittleren Niederschlagssummen (in %) nach dem ÖKS15 Projekt. (BMNT 2016, S. 7)

2.2.3.3 Die Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren

Hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren sagen Klimaforscher global eine Häufung extremer Wetterverhältnisse vorher. Die alpinen Regionen wären davon besonders betroffen. Der Trend bezüglich einer Zunahme von Extremereignissen ist derzeit schwierig zu belegen. Ein Extremereignis ist als „Ereignis, das dem maximalen Wert einer Beobachtungsreihe entspricht“ definiert (ONR 24800:2009). Extremereignisse können gewaltige Schäden verursachen. Gegenwärtig ist eine Häufung von Naturkatastrophen zu beobachten. Diese Häufung könnte zufällig sein, durch natürliche langzeitliche Klimavariationen verursacht werden oder eine Folge der anthropogenen Klimaänderung sein. Das heutige Prozessverständnis führt zur Annahme, dass Häufigkeit und Stärke gewisser Extremereignisse (Hitzewellen, Starkniederschläge und Hochwasser im Winterhalbjahr, Trockenheit im Sommer auf der Alpensüdseite und in inneralpinen Tälern, Hangrutschungen) mit der Klimaänderung zunehmen werden. Diese Befürchtung wird auch durch Rechnungen mit Klimamodellen gestützt. Andererseits wird die Häufigkeit von Frosttagen und Kältewellen abnehmen (Patek 2007). Für Naturgefahrenprozesse sind die indirekten Wirkungen, die durch die steigenden Temperaturen ausgelöst werden können, wesentlich bedeutsamer. So wird dem Parameter Niederschlag (Summe und Intensität) für die meisten Prozesse (Rutschungen, Hochwasser, Murgänge etc.) die höchste Bedeutung zugemessen (Andrecs et al. 2010)[7].
Auf den Wald, insbesondere den Schutzwald könnte die Klimaänderung und ihre Folgen starke Auswirkungen haben. Ein derzeitiger Wissensstand der Auswirkungen, welcher aus verfügbarer Literatur recherchiert wurde, wird im Folgenden aufgelistet:

2.2.3.3.1 Starkniederschläge, Rutschungen, Hangmuren und Murgänge

Aussagen über den Trend bisheriger **Extremniederschläge** sind nach derzeitigem Wissenstand mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Großräumige Extremniederschläge haben seit 1980 eher zugenommen (APCC 2014). Die Klimamodelle lassen für die Zukunft noch mehr Extremereignisse erwarten. Dabei ist mit einer Verlagerung der Extremniederschlagsereignisse von Herbst bis Frühling zu rechnen. Bei zunehmenden Starkniederschlägen, langanhaltenden Niederschlagsereignissen sowie Warmlufteinbrüchen bei vorhandener Schneedecke kann die Rutschungsgefährdung in Zukunft zunehmen. Von besonderer Bedeutung ist jedoch die jeweilige Landbedeckung (z.B. Wald, Ackerfläche, Grasland), da diese eine primäre Beeinflussung auf Rutschungseinflüsse haben. Insbesondere für die Schutzwaldwirkung könnte dies problematisch werden. Da diese Starkniederschläge außerhalb der Vegetationsperiode fallen, findet keine Evapotranspiration statt und durch das fehlende Laub von laubwaldreichen Beständen findet eine sehr geringe Interzeptionsverdunstung statt (APCC, 2014). Vermehrte Winterniederschläge haben noch einen weiteren Effekt: Ist der Frühling nass, können Böden diese Feuchtigkeit bis in den Sommer hin an die Luft abgeben, was die Bildung von Schauern und Gewittern unterstützt (ZAMG 2020). Das könnte sich wiederum auf die Aktivierung von Rutschungen und Murgängen auswirken.

[7] Für genauere Ergebnisse zur Frage „Wie verändern sich Naturgefahrenprozesse unter dem Klimawandel?“ sei auf die Arbeit von Andrecs et al. (2010) verwiesen.

Für (mehrtägige) Starkniederschläge, die wegen der Sättigung des Bodens mit Wasser ein ganz besonderes Hochwasser-, Muren- und Rutschungsrisiko darstellen können, lässt sich laut dem österreichischen Klimasachstandsbericht bisher jedoch kein einheitliches Vorzeichen erkennen (APCC 2014). Auch (ONERC 2008) bestätigen, dass es keinen Trend bei den Murereignissen in den Alpen gibt.

Zusammengefasst besteht die Tendenz, dass es in Zukunft zu mehr Extremniederschlagereignissen kommen kann, jedoch bestehen große Unsicherheiten, ob es dadurch zu mehr **Rutschungen** kommt. Bei Muren wird vermutet, dass durch lokale Zunahme von Wärmegewittern es zu einem Ansteigen der Murentätigkeit kommen kann (APCC 2014). Unter anderem wurde auch im ACRP- Projekt des BfW die Auswirkungen des Klimawandels auf Murgänge untersucht. Ihre Untersuchungen gehen davon aus, dass sich aufgrund der Verschiebung der Niederschlagsmuster in Richtung erhöhter Niederschläge im Winter/ Frühling und verminderter Niederschläge im Sommer/ Herbst, die Murgangaktivität eher mehr in Richtung Frühjahr verschieben wird. Neben dem vorhergesagten allgemeinen Temperaturanstieg können Schneeschmelze und kombinierte Schneeschmelz- und Niederschlagsereignisse als potenzielle Auslöser für Murgänge an Bedeutung gewinnen. Weiterhin wird erwartet, dass die variable Disposition gegen Murgänge im Frühjahr aufgrund der vorhergesagten, immer feuchteren Bedingungen (Schneeschmelze, die die vorhergehende Bodenfeuchte beeinflusst, steigende Niederschlagssummen) zunehmen wird. (RIMES 2013) Diese Erkenntnisse decken sich auch mit denen von Stoffel et al.in der Schweiz (Stoffel et al. 2014).

2.2.3.3.2 Stürme

Eine langfristige Zunahme der Sturmereignisse, abgleitet aus homogenisierten täglichen Luftdruckdaten, konnte trotz einiger herausragender Sturmereignisse in den letzten Jahren durch das APCC nicht nachgewiesen werden. Auch für die Zukunft ist derzeit keine Veränderung ableitbar. Modelle deuten eine schwache Abnahme der Windgeschwindigkeiten bei 20-jährigen Ereignissen der täglichen Windmaxima an. Allerdings sind die Ergebnisse im Detail unsicher und reichen je nach Modell von +10 % bis −10 %. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass **Sturmschäden**[8] auch in Österreich, somit auch in Tirol, in Zukunft **zunehmen werden**, jedoch unter starker dekadischer Variabilität. (APCC 2014) Vor allem kommt es dabei zu Schäden im Wald, wodurch andere Naturgefahren (wie z.B. Rutschungen und Lawinen) intensiviert werden können (APCC 2014, S. 92). Auch Usbeck et al. (2010) zeigen in ihren Untersuchungen, dass seit dem 19. Jahrhundert und speziell während der letzten 40 Jahre die Windgeschwindigkeit und Windstärken in der Schweiz zugenommen haben. Parallel dazu nahm auch der Waldvorrat zu. Währenddessen kam es zu einer Zunahme der durchschnittlichen Temperatur und des Niederschlags in den Wintermonaten, wodurch das Auftauen der Böden und die Anfälligkeit der Wälder gegenüber Sturmschäden begünstigt wurde. Die Kombination aus all diesen Faktoren erkläre, so Usbeck et al., die

[8] Speziell nach dem 2. Weltkrieg wurden großflächig Fichten aufgeforstet. Diese sind nun in eine sturminstabile Situation hineingewachsen und daher besonders sturmanfällig. (Wohlgemuth et al. 2019, S. 158–159.

heutige Anfälligkeit der Wälder gegenüber Winterstürmen (Usbeck et al. 2010, S. 53). Diese Anfälligkeit wird vor allem durch die fichtendominierten Bestände mit großen Oberhöhen begründet. (Wohlgemuth et al. 2019). Bei **Hagel** und **Gewittern** zeigt sich für die letzten Jahrzehnte eine schwache, aber statistisch signifikante Zunahme des Potentials. Lokal wird mit einer Zunahme von Wärmegewittern gerechnet (APCC 2014).

2.2.3.3.3 Steinschlag

Steinschlag reagiert in der Regel sehr kurzfristig auf Schwankungen von Temperatur und Wasser. Er ist somit ein Ergebnis eines Zusammenspiels verschiedener komplexer Wirkungsparameter. Aufgrund dessen lassen sich laut dem Klimasachstandsbericht die Auswirkungen des Klimawandels auf die Steinschlagaktivität schwer abschätzen. Durch die Klimaerwärmung werden sich die Zonen maximaler Frostwechselintensität (Frost als auslösender Faktor) nach oben verschieben. Extreme Minimaltemperaturen werden eher abnehmen. "Eine durchgreifende, monokausale Ab- oder Zunahme verwitterungsaktiver Wetterlage (APCC 2014) ist angesichts des komplexen Zusammenspiels von Feuchte und Temperatur jedoch nicht zu erwarten." Felsstürze, die reliefbedingt die besiedelten Tallagen gefährden, werden weiterhin auftreten, für eine langfristige Zunahme gibt es aber derzeit keine Belege. Des Weiteren ist durch die Erwärmung mit einem Auftauen des Permafrostes in hochalpinen Lagen zu rechnen. Dadurch ist eine erhöhte Steinschlaggefährdung zu erwarten. Da diese Entstehungsgebiete oberhalb der Waldgrenze liegen, sind sie aber für die Schutzwaldwirkung nur bedingt relevant (APCC 2014, S. 568–570; Bebi et al. 2016).

2.2.3.3.4 Lawinen

Nach derzeitigem Stand des Wissens lässt sich in den letzten Jahrzehnten kein Trend einer Zunahme der Lawinenaktivität feststellen (APCC 2014; Perzl und Walter 2012). Auch Untersuchungen aus der Schweiz (Laternser und Schneebeli 2003) haben keine Zunahme der Lawinenaktivität über die letzten 50 Jahre festgestellt, obwohl eine Zunahme der Niederschlagsaktivität dies vermuten ließe. Jedoch konnte belegt werden, dass Nassschneelawinen gegenüber Trockenschneelawinen aufgrund der Temperaturerwärmung zunehmen (APCC 2014).

Die Lawinenbildung ist ein sehr komplexes und lokales Ereignis, das aus Wechselwirkungen von Gelände, Schneedeckenverhältnissen und meteorologischen Bedingungen resultiert, die auch von der Vegetation beeinflusst werden. Aufgrund einzelner klimatischer und meteorologischer Parameter (z.B. max. Schneehöhe) kann keine Aussage über die lokale Lawinenbildung gemacht werden. Nach den Autoren muss jedoch zwischen Lawinenaktivität und der Lawinenanbruchs- Grunddisposition unterschieden werden. Es ist dabei über die zukünftige Lawinenaktivität unter dem Klimawandel keine Aussage möglich (ONERC 2008). Jedoch kann über die Lawinenanbruchs- Grunddisposition folgendes festgehalten werden:

In den Waldbereichen mit erhöhter Bodenrauhigkeit ist die Schneehöhe ein entscheidender Faktor für die Grunddisposition. Die Trendanalysen und Modellen deuten parallel zur Erwärmung auf eine Zunahme von Perioden mit unterdurchschnittlichen

mittleren und maximalen Schneehöhen vor allem in den tieferen, sub- bis tiefmontanen Lagen hin. Diese werden jedoch immer wieder von Jahren mit regional großen Schneehöhen in den tiefmontanen und hochmontanen bis nivalen Lagen unterbrochen. Daraus folgt eine Abnahme der Grunddisposition in tieferen Lagen, in denen aber auch bis jetzt die Lawinenaktivität relativ gering war. Theoretisch bedeutet eine Abnahme der Grunddisposition auch eine Abnahme der Lawinenaktivität, die jedoch nicht qualifiziert werden kann (ONERC 2008).

Aufgrund der Klimaerwärmung ist mit einer Erhöhung des flüssigen Niederschlags in den tief- und hochmontanen Lagen zu rechnen. Dadurch könnte es dort häufiger zu durchfeuchteten Schneedecken kommen. Die tendenzielle Abnahme der Grunddisposition könnte dadurch kompensiert werden. Es wird mit einer Verschiebung der Lawinendisposition in Richtung Nassschnee- und Gleitschneelawinen gerechnet. Ob daher eine Veränderung der Lawinenaktivität stattfindet, ist sehr fraglich und auch vom Waldzustand abhängig. In den Hochlagen liegt kein Trend der Lawinenanbruchs-Grunddisposition vor und ist auch in Zukunft nicht in Form der Lawinenaktivität messbar (Perzl & Walter, 2012; vgl. Andrecs et al., 2010; BfW, 2013; APCC, 2014).

2.2.3.3.5 Hochwasser

Im Alpenraum ist derzeit mit einer Zunahme der Niederschläge im Winter als Folge der Klimaänderung wahrscheinlich. In tiefen bis mittleren Lagen wird es vermehrt regnen und weniger schneien, weshalb die Wahrscheinlichkeit für Winterhochwässer zunehmen wird. Im Frühling entstehen Hochwässer, wenn die Schneeschmelze mit Niederschlägen zusammentrifft (vgl. Frühjahr 2019). Die Wärmezufuhr im Frühjahr wird sich wahrscheinlich wenig ändern. Deshalb gehen die Klimaforscher davon aus, dass die Veränderung der Niederschläge einen größeren Einfluss auf Hochwässer haben als die Schneeschmelze. Die Zunahme der mittleren Winterniederschläge führt in den hochalpinen Lagen zwar zu größeren Schneemengen. Gleichzeitig wird aber die Schneemenge in tieferen Lagen abnehmen. Das Hochwasserpotential setzt sich schließlich aus der mengenmäßigen Zunahme der Winterniederschläge, der Höhengliederung des Einzugsgebietes und der Häufigkeit von Wechseln zwischen Schneefall und Schneeschmelze ab. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine erhöhte Hochwassergefahr in jenen Gebieten herrscht, in denen bereits zurzeit Winterhochwässer maßgebend sind. Die vorhergesagten höheren Winterniederschläge und ein geringerer Schneeanteil in Höhenlagen zwischen 1000 und 1500 m lassen das Hochwasserrisiko steigen. In hochalpinen Lagen mit typischen Sommerhochwässern kann der Anstieg der Nullgradgrenze zu einer Verlängerung der Periode führen, in der Niederschlag ohne Schneeanteil fällt und Hochwassergefahr besteht (Patek 2007).

2.3 Gebirgswald als Schutzwald

2.3.1 Relevanz des Gebirgswaldes als Schutzwald

Rund 48 % der Gesamtfläche Österreichs sind mit Wald bedeckt, was etwa einer Waldfläche von 4 Mio. Hektar entspricht. Durch die Lage Österreichs in den Ostalpen stocken ein Großteil der heimischen Wälder in gebirgigen Regionen, speziell im Bundesland Tirol. Im Gebirgswald herrschen härtere Bedingungen durch Kälte, hohe und lang andauernde Schneedecke, Frost, kurze Vegetationsperioden usw., als in tieferen Lagen. Die Bewirtschaftung der Wälder ist durch die Steilheit und geringe Erschließungsdichte deutlich erschwert. Zudem beeinflusst die derzeitige Wilddichte (vgl. dazu Tiroler Waldbericht 2019 Kap. 4 (Amt der Tiroler Landesregierung 2019)) die Gebirgswaldbestände stark. Gebirgswälder sind einer hohen Disposition gegenüber Naturereignissen, wie Lawinen, Rutschungen, Windwürfen oder auch Steinschlägen ausgesetzt, welche im alpinen Raum vergleichsweise häufig auftreten. Daher ist neben der Nutz-, Wohlfahrts- und Erholungsfunktion die Schutzfunktion ein bedeutender Faktor. Gebirgswälder nehmen eine nachhaltige und resiliente Rolle im Schutz vor Naturgefahren ein. Dies geschieht dadurch, dass sie die Gefahrenprozesse verhindern oder deren Auswirkungen reduzieren. „Grundsätzlich hat ein Baumbestand, der auf einem Standort stockt, von dem eine Naturgefahr ausgeht, eine Schutzfunktion inne. Inwieweit er imstande ist, diese zu erfüllen, hängt von seinem aktuellen Bestandesaufbau ab. Dies wird als Schutzwirkung bezeichnet.“ (Oettel et al. 2017).

Laut österreichischem Forstgesetz wird dabei zwischen Standortsschutzwald und Objektschutzwald[9] (Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019a) unterschieden. In beiden Kategorien sind spezielle Pflegemaßnahmen vorgesehen. Ein Bannwald ist eine spezielle Form des Schutzwaldes. Dieser wird per Bescheid ausgeschieden und seine Ausscheidung verpflichtet die direkten Begünstigten zur Erhaltung der Schutzwirkung (Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019a). Der hohe Schutzwaldanteil in den alpinen Regionen ist daher nicht erstaunlich: Die Tiroler Waldfläche beträgt derzeit 521.000 ha Wald, davon werden 250.000 ha (48%) als Schutzwald ausgewiesen (Rechnungshof 2015). In Abbildung 5 sind der Waldentwicklungsplan mit den verschiedenen Leitfunktionen dargestellt. Man erkennt deutlich den hohen Flächenanteil mit der Leitfunktion „Schutzfunktion“ (rot).

---

[9] **Standortsschutzwald:** „Standortschutzwälder (Wälder auf besonderen Standorten) im Sinne dieses Bundesgesetzes sind Wälder, deren Standort durch die abtragenden Kräfte von Wind, Wasser oder Schwerkraft gefährdet ist und die eine besondere Behandlung zum Schutz des Bodens und des Bewuchses sowie zur Sicherung der Wiederbewaldung erfordern. […]“ Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019b
Objektschutzwälder: „Objektschutzwälder im Sinne dieses Bundesgesetzes sind Wälder, die Menschen, menschliche Siedlungen oder Anlagen oder kultivierten Boden insbesondere vor Elementargefahren oder schädigenden Umwelteinflüssen schützen und die eine besondere Behandlung zur Erreichung und Sicherung ihrer Schutzwirkung erfordern.“ Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort 2019b
Bannwälder: Bannwälder sind mit Bescheid definierte Wälder zur direkten Abwehr bestimmter Gefahren.

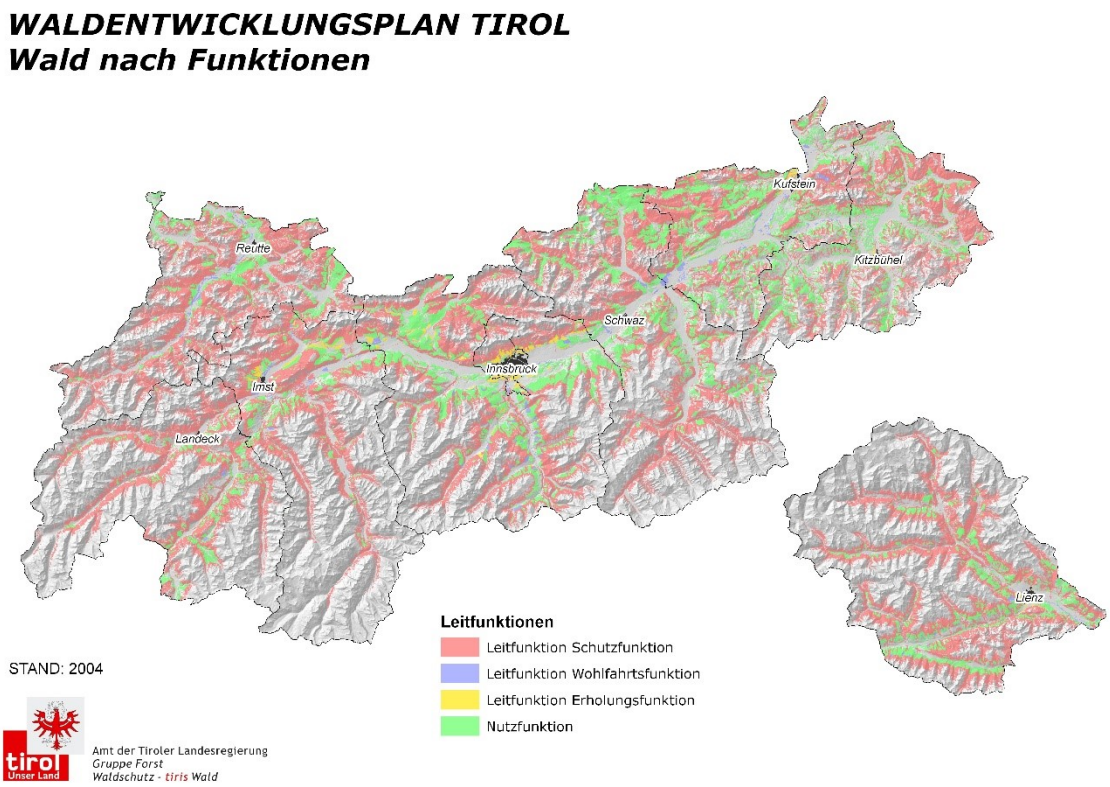


Abbildung 5: Waldentwicklungsplan Tirol. Deutlich zu erkennen ist der hohe Anteil an Waldflächen mit Schutzfunktion (rot). (Amt der Tiroler Landesregierung, 2004).

Aus den Daten (Tab. 2) erkennt man deutlich, dass der Schutzwald einen hohen Stellenwert in der Tiroler Waldbewirtschaftung hat.

Tabelle 2: Wald und Schutzwald in Tirol (verändert nach: (Rechnungshof 2015).

Wald und Schutzwald in Tirol	
	in ha
Fläche	1.264.000
Wald gesamt	521.000
davon Schutzwald	250.000
Anteil Wald an Landesfläche [%]	41,2
Anteil Schutzwald an der Waldfläche [%]	48,0

Der überwiegende Teil der Wälder ist in Privatbesitz bzw. im Eigentum der österreichischen Bundesforste AG (ÖBf). Die genauen Besitzverhältnisse stellen sich wie folgt dar:

Tabelle 3: Eigentumsverhältnisse der Tiroler Waldfläche mit Anteil an Schutzwaldfläche [ha], Gesamtwaldfläche [%] und Schutzwaldfläche [%]. Verändert nach: Rechnungshof, 2015.

Eigentumsverhältnisse in Tirol	
	Schutzwaldfläche in ha
ÖBf	63.000
Privatwald	186.000
Gebietskörperschaften	21.000
	Anteil an Gesamtwaldfläche in %
ÖBf	20,5
Privatwald	73,5
Gebietskörperschaften	6,0
	Anteil an Schutzwaldflächen in %
ÖBf	25,2
Privatwald	66,4
Gebietskörperschaften	8,4

Ein Objektschutzwald bedingt das Vorhandensein (1) eines Gefahrenpotentials (z.B. einer instabilen Felswand), (2) eines Schadenspotenzials (z.B. eine Siedlung oder ein Verkehrsweg) und (3) eines Waldes, welcher eine Schutzwirkung gegen die Naturgefahr entfalten kann (Brang et al. 2001). Schutzwälder können in Wälder unterteilt werden, welche eine direkte Schutzwirkung bieten und solche mit indirekter Schutzwirkung (Brang et al. 2006). Eine direkte Schutzwirkung ist gegeben, wenn die Wirkung von der Anwesenheit eines Waldes an einem bestimmten Ort, in der Regel oberhalb eines Schadenspotenzials, abhängt. Ein typisches Beispiel hierfür ist ein Lawinenschutzwald oberhalb einer Siedlung. Die indirekte Schutzwirkung hängt hingegen von der Anwesenheit eines bestimmten Waldanteils auf der Landschaftsskala ab und nicht von der genauen Lage eines Waldes. Dieser Umstand macht es schwierig, die Schutzwirkung eines solchen Waldes in Bezug zum Schadenspotenzial zu setzen. Beispiele für Wälder mit indirekter Schutzwirkung finden sich häufig in Einzugsgebieten von Gerinnen, wo sie zur Reduktion von Erosionsprozessen oder Überflutung beitragen können (Brang et al.,2006).

Die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit des Schutzes durch einen Wald hängt von den Naturgefahren, der Häufigkeit und Intensität von Schadensereignissen ab. Der Schutzwald muss insbesondere vor Massenbewegungen (vgl. Kap. 2.1) oder Hochwässern schützen, die er hauptsächlich durch die Regulierung des Wasserhaushalts beeinflusst. Diese Schutzwirkung hängt aber stark vom Zustand der Schutzwälder ab, welcher durch prozessorientierte Schutzwaldpflege verbessert werden kann. Die Vollzugshilfe „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (**NaiS**)“ (Frehner et al. 2005) listet dafür sieben Grundsätze der Schutzwaldpflege auf:

1. **Auf das Schutzziel ausgerichtet:** Pflegemaßnahmen in Schutzwäldern dienen ausschließlich der Verminderung von Naturgefahrenprozessen.
2. **Am richtigen Ort:** Pflegemaßnahmen werden dort ausgeführt, wo der Wald die Wirkung von Naturgefahrenprozessen auf Menschen oder Sachwerte verhindern oder verringern kann.

3. **Zur richtigen Zeit:** Pflegemaßnahmen werden dann ausgeführt, wenn eine optimale Wirkung mit minimalem Aufwand erzielt werden kann.
4. **Im Einklang mit den natürlichen Lebensabläufen:** Pflegemaßnahmen sind auf die Standortverhältnisse abgestimmt. So lassen sich die Kräfte der natürlichen Waldentwicklung nutzen.
5. **Objektbezogen, transparent, nachvollziehbar und kontrollierbar:** Pflegemaßnahmen werden durch Fachleute an Ort und Stelle festgelegt. Damit wird man den kleinräumig wechselnden Verhältnissen gerecht. Der Entscheidungsprozess verläuft immer gleich. Er wird dokumentiert und damit transparent, nachvollziehbar und kontrollierbar gemacht.
6. **Wirksam:** Pflegemaßnahmen führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Ziel.
7. **Ziel mit verhältnismäßigem Aufwand erreichbar:** Pflegemaßnahmen stehen in einem angemessenen Kosten- Nutzen- Verhältnis.

In vielen Fällen schützen Schutzwälder effektiv vor Naturgefahrenprozessen. Jedoch kann es vorkommen, dass die Restrisiken bzw. das Schadenspotential zu hoch sind. In diesen Fällen muss zusätzlich mit technischen Verbauungen geschützt werden (Brang et al. 2006). Obwohl die Schutzwirkung unter bestimmten Bedingungen ergänzt werden muss, sind Wälder im Allgemeinen ein sehr wirksames Mittel im Rahmen des integralen Risikomanagements. Sie können auf großen Flächen gleichzeitig Schutz gegen verschiedene Naturgefahrenprozesse bieten, müssen aber auf den Leitprozess ausgerichtet sein. Eine solche Überlagerung von mehreren Naturgefahrenprozessen kommt recht häufig vor. Daher haben Schutzwälder einen klaren Vorteil gegenüber technischen Maßnahmen, welche oft nur gegen einzelne Naturgefahren wirksam sind (z.B. gegen Lawinen oder Steinschlag, aber nicht gegen beide Naturgefahrenprozesse) (Wehrli et al. 2007).

So führte beispielsweise der Rechnungshof Österreichs eine monetäre Bewertung der Schutzfunktion durch: Er verglich die Kosten einer technischen Schutzeinrichtung mit den Kosten der Erhaltungsmaßnahmen im Schutzwald. Das Verhältnis der Kosten für Erhaltungsmaßnahmen des Schutzwalds zu jenen von Sanierungsmaßnahmen (Verjüngung) und zu technischen Maßnahmen ergab damit eine Relation von 1:15:146. Das heißt, dass der Einsatz von 1.000 EUR für die Erhaltung eines Schutzwalds 146.000 EUR an technischen Maßnahmen ersetzt, die notwendig sind, wenn der Schutzwald seine Funktion nicht mehr erfüllen kann. Dazu kommen noch die Kosten für die Wiederbewaldung, um den Schutz auch nach Ende der technischen Lebensdauer der Anlage sicherzustellen (Rechnungshof 2015, S. 61–62).

2.3.2 Die wichtigsten Baumarten des Schutzwaldes

Neben dem allgemeinen Zustand des Schutzwaldes ist für eine optimale, prozessorientierte Schutzwirkung die Wahl der geeigneten Baumart wichtig. Eine Übersicht über die wichtigsten Schutzwaldbaumarten und ihre Eigenschaften gibt die Tabelle 15 im Appendix.

2.3.3 Schutzwaldfunktionen

Der Wald kann Naturgefahrenprozesse verhindern oder vermindern. Eine schutzfunktionale Waldbewirtschaftung im Sinne eines prozessorientierten Waldbaus ist daher von hoher Relevanz. Unter diesen Bewirtschaftungsvoraussetzungen erlangen Schutzwälder als langzeitwirksame, flächenhafte Schutzmaßnahme große volkswirtschaftliche Bedeutung. Wie der Schutzwald vor den jeweiligen Naturgefahrenprozessen schützt und wie der Schutzwald charakterisiert sein soll, wird in den folgenden Teilkapiteln erläutert und baut dabei auf das Kap. 2.1 auf.

2.3.3.1 Schutz vor Massenselbstbewegungen wie Rutschungen und Fließbewegungen

Massenselbstbewegungen werden vielfach durch die Wirkungen des Wassers im Hang sowie durch die oberflächlichen Abflüsse, speziell Hochwasserabflüsse in Wildbächen (Hangunterschneidungen) ausgelöst. Die Prozesse greifen oft ineinander und beeinflussen sich gegenseitig. Daher ist die vorbeugende Wirkung des Waldes auf Hochwässer in Wildbächen besonders wichtig. Bei Niederschlagsereignissen kommt dem Schutzwald hinsichtlich der Prävention von Hochwasserspitzen eine große Bedeutung zu. Der Wald puffert dabei den Abfluss über den Interzeptionsspeicher, Oberflächenspeicher, Oberbodenspeicher und Grundwasser- und Hangwasserspeicher und verhindert/vermindert dadurch Hochwässer in Wildbächen, welche die Voraussetzung für Rutschungen und Muren sind. Zudem wird die Rauigkeit die Fließgeschwindigkeit am Hang signifikant reduziert, sodass Abflussspitzen aus bewaldeten Teileinzugsgebieten verzögert werden können. Bei langandauerndem Regen hoher Intensität über große Flächen nimmt die Wirkung des Waldes im Sinne der Verhütung der Hochwasserabflüsse bzw. -spitzen ab (vgl. Bunza,1992 und (Weinmeister 2003)).

In Bezug auf an oberflächliche Hangbereiche gebundene Massenselbstbewegungen (speziell in Lockergesteinen), kann die Vegetation diese in hohem Maße über den Wasserhaushalt beeinflussen. Jedoch in Bezug auf die Wirkung des Wassers im Hang hat die Schutzwirkung des Waldes seine Grenzen. Bei kurzzeitigem Starkregen kommt es zu sehr geringer Evapotranspirationswirkung, dadurch kommt es in Folge zu einem raschen Aufbau des Porenwasserdruckes unter dem Wald infolge der hohen Wasseraufnahmekapazität. Bei sehr lang anhaltenden Starkregen oder auch vorangegangener Schneeschmelze kommt es so zur Erschöpfung der Wasseraufnahmekapazität- der Boden ist gesättigt. Auch bei tiefgreifenden Talzuschüben sind dem Wald Grenzen gesetzt, da hier hauptsächlich geologische Faktoren entscheidend sind. Schutzfunktionale Wirkungen kann ein Wald vor allem in den Stirnbereichen der tiefgreifenden Massenbewegungen entfalten, in dem er den Systemzustand des Teilabschnittes über die Pumpleistung beeinflusst und damit Eintrittswahrscheinlichkeiten und Ausmaß von Stirnrutschungen vermindert. Langfristig kann ein intakter, standortgerechter Wald durch seinen regulierenden Einfluss auf den Wasserhaushalt auf mehr oder weniger stabilen Hangbereichen dazu beitragen, Massenselbstbewegungen und auch tiefgreifenden Talzuschüben bzw. deren Bewegungsintensivierung vorzubeugen bzw. deren Aktivität zu verringern (Bunza 1992).

Die kombinierte Wirkung des Waldes, nämlich Hochwasservorbeugung und Schutz gegen Massenselbstbewegungen werden ergänzt durch eine präventive und stabilisierende Wirkung der Vegetation gegen oberflächennahe Hangbewegungen labiler Standorte und von Anbruchsflächen. Dies geschieht durch (Bunza 1992):

- den aktiven Wasserverbrauch durch die Transpiration der Pflanzen
- die Niederschlagszurückhaltung und die Interzeption an der Pflanzenoberfläche; auch verzögerte Schneeschmelze
- die mechanische Festigung des Bodens durch die Wurzeln
- die Verbesserung der Bodenstruktur und Steigerung der Infiltration und Porosität (hohes Porenvolumen bei entsprechender Wurzelmasse)

All diese Einflussgrößen hängen von Klima-, Standorts- und Bestandesfaktoren, insbesondere vom Waldzustand ab. Letzterer setzt sich aus dem Grad der Überschirmung, Schichtung, Altersklassenaufbau, Vitalität und Verjüngung zusammen. Menschliches Handeln durch Straßen- und Skipistenbau, sowie ganz allgemein durch Versiegelung der Oberfläche kann dabei einen großen Einfluss besitzen. Diese Einflüsse machen sich schließlich durch die Erhöhung in den Oberflächenabflüssen bemerkbar (Bunza, 1992). Alle Eingriffe, die entweder Speicherglieder am Weg des Wassers durch das Ökosystem entfernen oder Oberflächenabfluss produzieren, beschleunigen den Abfluss und in weiterer Folge den Abtrag. Die Forstwirtschaft kann dabei über folgende Faktoren auf den Abfluss einwirken (ergänzt, nach Bunza, 1992):

- Baumartenwahl
- Betriebsform: z.B. Kahlschlagbetrieb (Transpirations- und Interzeptionswirkung geht durch fehlenden Bestand zurück)
- „Verfichtung“ in Folge hoher Wildbestände und forstwirtschaftlichen Maßnahmen (Stabilitätsminderung, fehlender Unterwuchs)
- Waldweide (Bodenverdichtung, Narbenversatz)
- Erschließungsdichte
- Holzernte (Bodenverdichtung)

Baumartenwahl zum Schutz vor Massenselbstbewegungen wie Rutschungen

In Schutzwäldern mit Wirkung auf Massenselbstbewegungen ist die Wahl der richtigen Baumarten besonders entscheidend. Allgemein soll dabei ein hoher Anteil immergrüner Baumarten mit hoher Interzeptionswirkung, welche zudem eine tiefgründige Durchwurzelung des Bodens ermöglichen, vorhanden sein. Dadurch kann einerseits eine gute Armierung des Bodens und andererseits die Infiltrationsrate sowie die Aufnahmekapazität des Bodens erhöht werden. Auf gut durchlässigen Böden ist dies in der Regel kein Problem, schwierig wird es hingegen auf schweren, verdichteten oder vernässten Böden. Die Baumart nimmt über ihr Wurzelsystem Einfluss auf die Bodenstruktur und somit auf die Infiltration und das unterirdische Abflussgeschehen. Generell eignen sich folgende Baumarten für dichte, vernässte Lehmböden durch ihre gute Tiefenerschließung (vgl. Englisch 2016; Frehner et al. 2005):

- **Laubbäume:** Esche, Weide, Ulme, Eiche, Zitterpappel, Schwarzerle
- **Nadelbäume:** Tanne, Kiefer, Waldkiefer, Douglasie

Auf Bestandesebene kann eine intensive Durchwurzelung am besten durch kleinflächig ungleichaltrige Bestände mit möglichst hohem Deckungsgrad erfolgen. Solche Strukturen begünstigen auch die nachhaltige Verjüngung, und im Falle eines teilweisen Bestandeszusammenbruches durch Störungen (z.B. Windwurf) ist die Wiederbewaldung bereits gesichert. Am schlechtesten wirken sich große Kahlschläge aus, da hier die Transpirationswirkung durch den geschlägerten Bestand fehlt. Schlussfolgernd sollten Bestandesöffnungen nur kleinflächig erfolgen. Große, schwere Bäume, welche windwurfgefährdet sind, sollten jedenfalls entfernt werden (Frehner et al. 2005).

Das **Liegenlassen von (gegen Borkenkäfer behandeltem) Holz** ist nur dann sinnvoll, wenn der rutschgefährdete Hang nicht im Einflussbereich eines Wildbacheinzugsgebietes liegt. Dadurch würde nur Wildholz[10] als Ausgangsmaterial für Verklausungen oder zu Schwemmholz in Murgängen geschaffen werden (Frehner et al., 2005).

[10] **Wildholz:** „Das bereits im Bach liegende oder beim Hochwasserereignis frisch eingetragene Holz.“ ONR 24800:2009.

Im Folgenden wird ein **Anforderungsprofil** des Waldes bezüglich Rutschungen und Hangmuren nach Frehner et al. (2005) dargestellt:

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
Entstehungsgebiet	**Gross** bei flachgründigen Rutschungen (Rutschhorizont bis 2 m tief) und bei Oberflächenerosion	**Gefüge horizontal** Lückengrösse[3] max. 6a, bei gesicherter Verjüngung[1] max. 12a. **Gefüge horizontal** Deckungsgrad[2] dauernd ≥ 40% Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt Mischung Bei Übergängen im Standortstyp ist die Baumarten-Zusammensetzung des feuchteren / stärker vernässten Typs anzustreben	**Gefüge horizontal** Lückengrösse[3] max. 4a, bei gesicherter Verjüngung[1] max. 8a. **Gefüge horizontal** Deckungsgrad[2] dauernd und kleinflächig ≥ 60% Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt Mischung Bei Übergängen im Standortstyp ist die Baumarten-Zusammensetzung des feuchteren / stärker vernässten Typs anzustreben **Stabilitätsträger** keine schweren und wurfgefährdeten Bäume
Infiltrationsgebiet	**Mittel** bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen (Rutschhorizont tiefer als 2 m), wenn der Wasserhaushalt im Bereich des Rutschhorizonts beeinflusst werden kann	**Gefüge horizontal** Deckungsgrad[2] dauernd ≥ 30% Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	**Gefüge horizontal** Deckungsgrad[2] dauernd ≥ 50% Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt
	Gering bei mittel- und tiefgründigen Rutschungen (Rutschhorizont tiefer als 2 m), wenn der Wasserhaushalt im Bereich des Rutschhorizonts nur wenig beeinflusst werden kann	**Verjüngung** nachhaltige Verjüngung gesichert	**Verjüngung** nachhaltige Verjüngung gesichert Anforderungen auf Grund des Standortstyps ideal erfüllt

[1] Gesicherte Verjüngung: Aufwuchs oder Dickung in zielgemässer Mischung vorhanden. Subalpin sind grössere Flächen zulässig, wenn sie schlitzförmig angelegt werden; Schlitzbreite max. 20 m.

[2] Deckungsgrad der Bäume ab Stangenholzalter (d.h. ohne Berücksichtigung von Jungwuchs und Dickung).

[3] Lücke: Öffnung von Kronenrand zu Kronenrand im Stangenholz und Baumholz

Abbildung 6: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen und Hangmuren. (Frehner et al. 2005, S. 9). Anmerkung: 1a≙ $100\ m^2$.

2.3.3.1.1 Schutz vor Rutschungen und Hangmuren unter Klimawandel

Aufgrund der erwarteten Zunahme der Temperatur, somit steigenden Schneefallgrenzen und der daraus resultierenden Abnahme des Anteils festen Niederschlags (Schnee) in den tiefmontanen bis hochmontanen Lagen wird in Zukunft mit einer erhöhten Gefährdung von Rutschungen und Muren im gesamten Jahresverlauf gerechnet (siehe Kap. 2.2.3.3.1). Bebi et al. (2016) nehmen daher an, dass aufgrund dieser Zusammenhänge die Anforderungen an eine Schutzfunktion des Waldes gegenüber Erosion, flachgründigen Rutschungen und Murgängen unter dem Einfluss des Klimawandels zunehmen werden. Deshalb ist es für die Bewirtschaftung auch hier wichtig, wenn heterogene Waldstrukturen gefördert werden. Speziell tiefwurzelnde Baumarten, wie die Tanne, haben einen stabilisierenden Effekt auf die Hangstruktur und sind daher zu fördern.

2.3.3.1.2 Schutz vor Hochwasserabflüssen unter Klimawandel

Die Waldwirkung gegenüber Hochwasser ist ausschlaggeben zur Vorbeugung von Rutschungen und Kriechbewegungen und wird in der Folge des Klimawandels weiter an Bedeutung gewinnen. Da wegen geringerer und kürzerer Schneebedeckung in Zukunft mit einer längeren Hochwassersaison und größeren Hochwasserspitzen gerechnet werden muss (Bebi et al. 2016 zit. n. Köplin et al. 2013). Durch eine klimawandelbedingte Baumartenzusammensetzung kann eine veränderte Schutzwirkung des Waldes erwartet werden. Zum Beispiel kann die erwartete stärkere Verbreitung der Buche in heutigen Nadelwäldern in Zukunft die Wasserspeicherkapazität, durch ihre bodenverbessernden Wirkungen, erhöhen. Bezogen auf das ganze Jahr nimmt aber die Gesamt- Interzeption bei einem höheren Laubbaumanteil ab, was sich wiederum negativ auf die Schutzwaldwirkung gegenüber Lawinen auswirkt (Laubfall im Winter). Großflächige Störungen (z.B. Wind und anschließender Borkenkäferbefall) können die Gefahr von Hochwasser erhöhen. Durch das großflächige Fehlen der Bäume verringert sich zum einen die Interzeption, zum anderen nimmt auch die Transpirationsleistung ab. Der Boden ist dadurch bei einem Niederschlagsereignis rascher gesättigt (Bebi et al. 2016). Es kommt zu vermehrtem Oberflächenabfluss und das Risiko für Hochwasser, Rutschungen und Erosion steigt. Um unter veränderten klimatischen Bedingungen eine dauerhafte Schutzwirkung zu erreichen, sind eine möglichst gute Durchwurzelung des Bodens sowie stabile Bestände anzustreben. Beide Ziele sind mit einer großen Heterogenität bezüglich Bestandesstruktur und Baumarten erreichbar (Bebi et al. 2016 zit. n. Lange et al. 2012). Daher ist darauf zu achten eine möglichst hohe Baumartenvielfalt an immergrünen, jedoch klimawandelresistenten Baumarten im Bestand zu schaffen und die Lückengröße gering zu halten.

2.3.3.1.3 Wald im Bereich von Gerinnen

Die positiven Wirkungen des Waldes können in unmittelbaren Einzugsgebieten von Wildbächen auch negative Auswirkungen haben. So können Bäume durch Hochwasser oder Murgängen mitgerissen werden und so zu Verklausungen im Gerinnebereich führen. Verklausungen sind äußerst ungünstig, da sich hinter ihnen eine Akkumulation von Geschiebe ergeben kann, das später in Form eines Murgangs mobilisiert werden kann. Wodurch infolge die Seitenerosion gefördert wird, welche wiederum auslösende Faktoren für die Aktivierung von Rutschungen oder Kriechhängen darstellt. Bei Hochwasser kann dies auch zu einem Gerinneausbruch und anschließender Überschwemmung oder Übermurung führen. Deshalb müssen die Verklausungungspotentiale durch gezielte Bewirtschaftung der Gerinneeinhänge minimiert werden (Frehner et al. 2005). Unter Wald im Gerinnebereich ist nach Frehner et al. (2003) jene Waldfläche gemeint, von welcher aus Holz in den unmittelbaren Gerinnebereich gelangen kann. Daher besteht das primäre waldbauliche Ziel darin, eine stabile Bestockung zu erhalten, damit kein Holz in das Gerinne gelangt, welches zu Verklausungen führen könnte. Wichtigste Maßnahme dabei ist, die gezielte Entfernung instabiler, schwerer Bäume (und Wurzelstöcke). Niederwaldartige oder strauchartige Strukturen eignen sich für diese Bereiche besonders. Durch eine stabile Beststockung kann hier zudem oftmals eine Destabilisierung der Böschung durch Oberflächenerosion, sowie Seitenerosion durch hochwasserführende

Wildbäche verhindert werden. Zusätzlich wird dadurch der Geschiebeeintrag in Wildbäche vermindert (vgl. Kap. 2.1.2).

2.3.3.1.4 Schutz vor Lawinen

Grundsätzlich muss man zwei Schutzwirkungen des Waldes vor Lawinen unterscheiden (Perzl und Walter 2012):

- Die Schutzwirkung gegen Lawinenanbrüche im Anbruchsgebiet
- Die Bremswirkung auf die Lawine in der Sturzbahn bzw. Auslaufstrecke

Im bewaldeten Anbruchsgebiet kommt es durch die Interzeptionswirkung der Bäume zu geringeren Schneeakkumulationen am Boden. Der Wald wirkt damit dem Aufbau einer instabilen Schneedecke entgegen. Bei kleinen Schneefällen (70 % Interzeption) wirkt die Interzeptionsleistung stärker als bei großen Schneefällen (30 % Interzeption) (Frehner et al. 2005). Die Verringerung der Schneehöhe am Boden durch die Kroneninterzeption ist nur in dichten Beständen mit über 50 % wintergrüner Deckung oder in tieferen (schneeärmeren) lagen ein schutzwirksamer Mechanismus (Perzl und Walter 2012). Mit zunehmender Seehöhe nimmt bei gleichen Deckungsgrad der Baumkronen die Schneeinterzeption ab (Perzl und Walter 2012). Dies ist wahrscheinlich eine Folge der tieferen Temperaturen, von stärkeren Schneeentladungen durch Wind in Kombination mit Schneeeintrag durch Verfrachtung in den höheren Lagen und der Kronenform. Die Schneeinterzeption wird allgemein in der Literatur oft als wichtiger Schutzwirkungsmechanismus des Waldes beschrieben. Bei Starkschneefällen an sehr kalten und windigen Tagen sowie bei nasser Schneedecke durch Regen, Wärmezufuhr und Strahlung ist aber die Interzeption nur eingeschränkt wirksam (Perzl und Walter 2012).

Eine entscheidende Wirkung hat die Überschirmung der Baumkronen (v.a. im immergrünen Wald) auf die Abstrahlung aus der Schneedecke und somit auf deren Temperatur. Dadurch erwärmt sich untertags die Schneedecke weniger und sie strahlt in der Nacht dementsprechend geringer aus. Es kommt weniger zur Bildung von Schwimmschnee und Oberflächenreif, die Schwachschichten in der Schneedecke ausbilden. Jedoch können bei feuchten Verhältnissen kleine Lawinen und Schneerutsche im Waldgebiet entstehen, bei glatter Oberfläche (z.B. hohes Gras in Waldschneisen) können sich Gleitschneelawinen bilden (Perzl und Walter 2012; Frehner et al. 2005).

Ebenso wirkt sich die Bestandesstruktur in Bodennähe auf den Wind aus, was sich vice versa wieder auf das Bestandesinnenklima auswirkt. Durch diesen abbremsenden Effekt auf den Wind wird weniger Schnee verfrachtet. Jedoch kann es in größeren Bestandeslücken zu konzentrierten Ablagerungen kommen. Durch die Erhöhung der Bodenrauigkeit z.B. durch Stämme und Stöcke, aber auch liegende Bäume kommt es zu geringeren Schneebewegungen, somit wirkt der Wald stabilisierend auf die Schneedecke ein (Frehner et al. 2005).

Des Weiteren wird durch die Bestandesstruktur z.B. durch Kolke („schneefreie“ Bereiche um Stämme oder Baumstümpfe) oder herabfallenden Schnee von Kronen der Aufbau

einer durchgehenden Schichtung verhindert. Der meist lockere und raue Waldboden vermindert den Stau von Schmelzwasser und damit die Bildung von Gleitschichten (Frehner et al. 2005; Perzl und Walter 2012).

Die **Bremswirkung des Waldes** hängt stark von der Größe und Geschwindigkeit der Lawine ab. Da große Lawinenanbrüche meist oberhalb der Waldgrenze entstehen und in ihrer Sturzbahn große Geschwindigkeiten und Fließhöhen (z.B. Staublawine) aufbauen, kann der Schutzwald diese kaum abbremsen. Es kommt infolge der hohen kinetischen Energien zur Zerstörung der Waldbestände und häufig zur Ausbildung charakteristischer Lawinenschneisen. Bei kleineren Lawinen und Schneerutschen kann jedoch der Wald durchaus eine abbremsende Wirkung ausüben. Die Bäume wirken v.a. bei geringen Fließhöhen von 1- 2 m, die nur den Stamm betreffen, abbremsend. Dies hängt aber, wie erwähnt, sehr stark von ihrer Geschwindigkeit ab. Im Auslaufgebiet sind die Geschwindigkeiten oft gering, so dass der Wald eine bessere Bremswirkung hat und somit die Reichweite von Lawinen reduzieren kann (Frehner et al. 2005; Perzl und Walter 2012). **Totholz** auf der Fläche (z.B. nach Windwürfen) wirkt in den ersten Jahren sehr effizient gegen Schneebewegungen und somit als Gleitschnee- und Lawinenschutz, wenn die Bäume quer zum Hang liegen, die Bäume hoch abgestockt werden und die Schneehöhen gering sind. Die Wirkung ist vor allem bei Hangneigungen von etwa 30 bis 40° und normalen Schneehöhen in der Waldzone gut. Bei sehr steilen Lagen und hohen Schneedecken ist eine Stabilität des Totholzes nicht ausreichend. Es ist hier auch nicht auszuschließen, dass das Holz durch den Schneedruck in Bewegung gerät. Durch den Abbau des Holzes nimmt die positive Wirkung kontinuierlich ab. Durch eine Räumung der Windwurfflächen wird dieser Effekt dementsprechend vermindert (Frehner et al. 2005). Im Folgenden wird ein Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen dargestellt (Abb. 7):

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
Enstehungsgebiet Subalpine und hochmontane Nadelwälder	**Gross** In Lärchenwäldern ab 30° (58 %) Hangneigung In immergrünen Nadelwäldern[1] ab 35° (70 %) Hangneigung	**Gefüge horizontal** **Hangneigung** **Lückenlänge[2] in Fallinie** ≥30° (58 %) → kleiner als 60 m ≥35° (70 %) → kleiner als 50 m ≥40° (84 %) → kleiner als 40 m ≥45° (100 %) → kleiner als 30 m Falls Lückenlänge[2] grösser als oben angegeben, muss Lückenbreite < 15 m sein Deckungsgrad > 50 % Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	**Gefüge horizontal** **Hangneigung** **Lückenlänge[2] in Fallinie** ≥30° (58 %) kleiner als 50 m ≥35° (70 %) kleiner als 40 m ≥40° (84 %) kleiner als 30 m ≥45° (100 %) kleiner als 25 m Falls Lückenlänge[2] grösser als oben angegeben, muss Lückenbreite < 15 m sein Deckungsgrad > 50 % Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt
Entstehungsgebiet Ober- und untermontane Laub- und Mischwälder	**Mittel** ab 35° (70 %) Hangneigung	**Gefüge horizontal** **Hangneigung** **Lückenlänge[2] in Fallinie** ≥35° (70 %) → kleiner als 50 m ≥40° (84 %) → kleiner als 40 m ≥45° (100 %) → kleiner als 30 m Falls Lückenlänge[2] grösser als oben angegeben, muss Lücken-breite < 5 m sein Deckungsgrad > 50 % Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	**Gefüge horizontal** **Hangneigung** **Lückenlänge[2] in Fallinie** ≥35° (70 %) → kleiner als 40 m ≥40° (84 %) → kleiner als 30 m ≥45° (100 %) → kleiner als 25 m Falls Lückenlänge[2] grösser als oben angegeben, muss Lücken-breite < 5 m sein Deckungsgrad > 50 % Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt

Abbildung 7: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen. (Frehner et al. 2005, S. 3)

2.3.3.1.5 Lawinenschutz unter Klimawandel

Wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt ist die Schneeinterzeption ein wichtiger Schutzmechanismus gegen Lawinenbildung. Diese kann jedoch durch zwei Bedingungen vermindert werden: hohe Luftfeuchtigkeit und Durchfeuchtung der Schneedecke infolge von Regen. Die durch den Klimawandel erwartete Zunahme der mittleren Jahrestemperatur (vgl. Kap. 2.2.3.1) könnte das allgemeine Niveau der Luftfeuchtigkeit und die Häufigkeit von Regen in die alte Schneedecke erhöhen. Betroffen wären vor allem die heute hochmontanen bis tiefsubalpinen Lagen. Dadurch könnte der Wald in diesen Lagen an Schutzwirkung verlieren (Perzl und Walter 2012).

In Bezug auf den Lawinenschutz könnte der Klimawandel einen Einfluss auf die Schutzwald- Eigenschaften haben. Nach Untersuchungen von Lexer und Seidl (2007) bezüglich möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichischen Wälder kamen diese zum Ergebnis, dass vor allem Laubbaumarten von einer Klimaerwärmung profitieren, während durch trockenere und wärmere Bedingungen die Produktivität (und somit Schutzwirkung) der Fichte sinkt. Das Hauptproblem für die Fichte stellt allerdings nicht die abnehmende Produktivität, sondern ihre extreme Kalamitätsanfälligkeit bei wärmeren und trockeneren Bedingungen dar (Lexer und Seidl 2007). Der wesentliche Nachteil von Laubbaumarten: sie schützen wesentlich weniger effektiv vor Lawinen wie Nadelbäume.

Im Zuge des Projektes MANFRED geben Perzl und Walter (2012) ein Fazit der zu erwartenden Änderungen der Lawinenschutzwirkungen des Waldes im Klimawandel:

- Die beobachteten und prognostizierten Änderungen des Klimawandels führen dazu, dass in den submontanen und tiefmontanen Lagen die klimatische Grunddisposition für Lawinenanbrüche im und außerhalb des Waldes abnimmt. Mit Ausnahme von extrem steilen Standorten ist in diesen Lagen mit einer geringeren Lawinenaktivität zu rechnen ist. Die Autoren geben als Hauptursache den Rückgang der Schneehöhen bzw. dass weniger häufige Auftreten von großen Schneehöhen an.
- Vor allem in sub- und tiefmontanen Lagen werden vermehrt Gleit- und nasse Lockerschneelawinen entstehen, während trockene Schneebrettlawinen weniger häufig auftreten werden. Da der Wald gegen nasse Lockerschneelawinen eine geringere Schutzwirkung hat[11], nimmt die potenzielle Schutzwirkung in diesen Lagen ab. Allerdings wird erwartet, dass dies wahrscheinlich nicht zu einem erhöhten Schadensrisiko führt, da die in Frage kommenden Hänge oft sehr dicht

[11] Bei starker Einstrahlung nach Schneefällen können sich Bäume innerhalb weniger Stunden voll entladen. Durch den herabfallenden feuchten, schweren Schnee wird die Schneedecke verpresst und die Dichte erhöht sich. Diese Verdichtung wirkt primär verfestigend. Regen und Schmelzwasser durch Strahlung und Temperaturerhöhung führt rasch zur Wassersättigung in der Schneedecke. Durch das Wasser wird die Schneedecke schwerer homogenisiert und verliert an Festigkeit. Es entstehen bindungslose Schneemassen, die auch in dichten Beständen abrutschen können (Perzl und Walter 2012).

bewaldet oder bereits technisch gesichert sind. Es könnten jedoch häufiger Bodenrutschungen im Winter auftreten, deren Sturzmassen mit Nassschnee durchmischt sind.

- In den schneereichen mittel- bis hochmontanen Lagen wird eine Zunahme von Gleitschnee-, feuchte und nasse Schneebrett- sowie nasse Lockerschneelawinen erwartet. Dadurch besteht auch die Gefahr von Schäden an der Verjüngung und die Schutzwirkung des Waldes nimmt ab.
- Die Klimaänderungen führen dazu, dass die Überschirmung (der Nadelholzanteil) als Schutzmechanismus an Bedeutung verliert. Die **Oberflächenrauhigkeit (Totholz, Jungwuchs, Stammzahl)** wird vor allem in den montanen Lagen zum entscheidenden Faktor der Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinenanbrüche.

2.3.3.2 Schutz vor Steinschlägen

Wälder erfüllen eine wichtige Schutzfunktion gegenüber Steinschlagprozessen, insbesondere durch ihre abbremsende Wirkung. Die Schutzwirkung ist dabei nur schwer wahrzunehmen, wenn bei spektakulären Schadereignissen mit großen Blockvolumina die Widerstandswirkung des Waldes nicht ausreicht. Es lässt sich dabei nur schwer abschätzen, wie oft der Schutzwald seine Funktion erfüllt, in dem er kleinere Steinschlagereignisse oder Blockschläge vermindert oder verhindert (Perzl et al. 2017).

Steine rollen, springen oder gleiten nach ihrer Mobilisierung aus dem Entstehungsgebiet. Auf ihrem Weg in tiefere Lagen treffen Steine auf Hindernisse wie Bäume und verlieren dabei an Energie.

Ist das **Entstehungsgebiet** im bewaldeten Gebiet hängt die Wirkung des Waldes generell von der Geologie, der Topografie, der Baumart, dem Baumgewicht, dem Baumschwerpunkt und der Baumhöhe ab (Frehner et al., 2005). Häufig ist jedoch die Schutzwirkung gegen die Mobilisierung mittel bis gering. Häufig sind Bäume die Auslöser von Steinschlägen. Es ist daher wichtig instabile und schwere Bäume auf exponierten Standorten oberhalb von sensiblen Infrastruktureinrichtungen zu entfernen, da sie durch die Sprengkraft der Wurzeln und durch die Hebelwirkung bei großen Windgeschwindigkeiten eine Gefährdung darstellen bzw. die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sturzereignisse und damit das Risiko erhöhen. Durch eine entsprechende prozessorientierte Bewirtschaftung kann die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sturzereignisse deutlich verringert werden. Auch Windwürfe sind aus Sicht der Steinschlagprävention rasch aufzuarbeiten, da die sich zersetzenden Wurzelteller ebenso Steine mobilisieren können (vgl. Kap. 2.1.1.1; Fels- und Schuttsturz).

Im **Transitgebiet** kann der Schutzwald abbremsend auf die mobilisierten Steine wirken. Dadurch kommt es zum Energieabbau und es wird neben der Geschwindigkeit auch die Sprunghöhe reduziert. Beim Auftreffen auf die Bäume kann es zu sogenannten Schlagmarken kommen, welche stumme Zeugen für die Sprunghöhe und Geschwindigkeit der mobilisierten Steine sind. Die Waldwirkung ist abhängig von der Grundfläche, auf welcher ein Stein auf seiner Sturzbahn begegnet. Diese Grundfläche

wird wiederum von der Bestockungsdichte und der Größe der Bäume bestimmt. Zusätzlich spielt die Energie und die Größe der Steine eine Rolle (Frehner et al., 2005):

- Durch das Auftreffen der Steine auf die Bäume werden diese verletzt oder gebrochen (vgl. Kap. 2.1.1; Steinschlag), jedoch kommt es dadurch zum Energieverlust. Steine können dadurch zum Stillstand kommen oder in ihrer Richtung abgelenkt werden.
- Bei sehr dünnen Bäumen ist eine signifikante Bremswirkung vor allem dann gegeben, wenn die Steine vorher schon auf dickere Bäume gestoßen sind. Bei niedriger Steinenergie kann vor allem eine niederwaldartige Struktur aus z.B. Haselsträuchern eine hohe Steinschlagwirkung erzielen.
- Gute Dämpfungswirkung bieten zudem eine erhöhte Bodenrauigkeit nach aufgearbeiteten Störungsereignissen oder Nutzungen, wenn die Stöcke mind. 1,3 m hoch sind.

Die **waldbaulichen Ziele** im Transit- und Ablagerungsgebiet sehen wie folgt aus:

- Hohe Stammzahl (min. 400 Bäume pro ha) und folglich geringe Lückengröße im Bestand
- Weite Durchmesserverteilung
- Lückengröße unter 20 m
- Hohe Bodenrauhigkeit (Unterschicht, Totholz)
- Mehrschichtige und gestufte Bestände
- Stabile Bäume (Mischwald, Laubholz, keine Fäule)
- Grobborkige Bäume mit hoher Resistenz und hohem Wundausheilvermögen (z.B. Lärche, Ahorn)

Laubbäume sind im Allgemeinen resilienter gegenüber Steinschlägen. Jedoch besitzen sie eine geringere Wirkung gegenüber Lawinen (Kap. 3.2). Daher ist es unbedingt notwendig genau abzuschätzen, welche Naturgefahren im Gebiet die Leitprozesse darstellen und ggf. einen stabilen Mischwald aufzubauen, der aus Baumarten mit gutem Wundausheilvermögen besteht. Dadurch kann ein effektiver Beitrag Schutz vor Naturgefahren gewährleistet werden. Als geeignete Baumarten werden Laubbäume mit hartem Holz, wie Ahorn angesehen (vgl. Tab. 15, Appendix). In Hochlagen und steilerem Gelände gelten Beimischungen von Nadelholz, wie der Lärche (Larix decidua) oder Waldkiefer (Pinus sylvestris), aufgrund der höheren Sprunghöhen der Steine und des rascheren Wachstums werden als vorteilhaft (Perzl 2006 zit. nach Bebi et al.,2016).

Das **Auslauf-** und **Ablagerungsgebiet** ist mit dem Transitgebiet überlappend, daher wirkt der Schutzwald hier auf dieselbe Weise. In diesem Bereich nimmt die Hangneigung zudem für gewöhnlich ab und die Steine würden auch ohne Einwirkungen des Waldes von selbst zur Ablagerung kommen und geschieht meist bei einer Hangneigung ab 40°. Nach der erfolgten Ablagerung setzen sich Steine meist nicht mehr erneut in Bewegung.

Auch durch **liegendes und gegen Käfer behandeltes Holz** (gezielt deponiert) kann eine Steinschlagschutzwirkung erzielt werden. Vorausgesetzt es besteht keine Absturzgefahr

für das liegende Holz. Besonders effektiv ist dies im Auslaufgebiet, da hier die Steine von einer springenden in eine rollende Bewegung übergehen. Die Absturzgefahr für das Holz nimmt mit zunehmender Hangneigung und Schneewirkung zu. Allenfalls muss das Holz technisch gesichert, jedoch jedenfalls gegen Borkenkäfer behandelt und regelmäßig auf dessen Schutzwirkung kontrolliert werden. Der Haupteffekt liegt in der Vergrößerung der Oberflächenrauigkeit, dabei soll der Stammdurchmesser gleich groß oder größer als der Durchmesser des maßgebenden Blockes sein. Im Idealfall sollte das Holz rund 70° zur Falllinie liegen, wodurch die Trefferwahrscheinlichkeit erhöht wird. So werden die Steine gebremst und in ihrer Trajektorie abgelenkt, bis sie sich schließlich ablagern (Frehner et al. 2005).

Ein generelles Anforderungsprofil eines Waldes bezüglich Steinschlags ist wie folgt:

Ort	potenzieller Beitrag des Waldes	minimale Anforderungen aufgrund der Naturgefahr	ideale Anforderungen aufgrund der Naturgefahr
Entstehungsgebiet	**mittel**	**Stabilitätsträger** keine instabilen, schweren Bäume	
Transitgebiet	**gross** Steine bis 0.05 m³ (Durchmesser etwa 40 cm)	**Gefüge horizontal** mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 12 cm	**Gefüge horizontal** mind. 600 Bäume/ha mit BHD > 12 cm
		evtl. auch Stockausschläge	
		Gefüge vertikal Zieldurchmesser[1] angepasst	
	Steine 0.05 bis 0.20 m³ (Durchmesser etwa 40 bis 60 cm)	**Gefüge horizontal** mind. 300 Bäume/ha mit BHD > 24 cm	**Gefüge horizontal** mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 24 cm
		Gefüge vertikal Zieldurchmesser[1] angepasst	
	Steine 0.20 bis 5.00 m³ (Durchmesser etwa 60 bis 180 cm)	**Gefüge horizontal** mind. 150 Bäume/ha mit BHD > 36 cm	**Gefüge horizontal** mind. 200 Bäume/ha mit BHD > 36 cm
	zusätzlich für alle Steingrössen	**Gefüge horizontal** bei Öffnungen[2] in der Falllinie Stammabstand < 20 m liegendes Holz und hohe Stöcke: als Ergänzung zu stehenden Bäumen, falls keine Sturzgefahr	
		minimale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt	ideale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt
Auslauf- und Ablagerungsgebiet	**gross** Der wirksame Mindest-durchmesser der Bäume ist deutlich geringer als im Transitgebiet und liegendes Holz ist immer wirksam.	**Gefüge horizontal** mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 12 cm	**Gefüge horizontal** mind. 600 Bäume/ha mit BHD > 12 cm
		Gefüge horizontal bei Öffnungen[2] in der Falllinie Stammabstand < 20 m evtl. auch Stockausschläge	
		Gefüge vertikal Zieldurchmesser[1] angepasst liegendes Holz und hohe Stöcke: als Ergänzung zu stehenden Bäumen	
		minimale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt	ideale Anforderungen aufgrund des Standortstyps erfüllt

Abbildung 8: Anforderungsprofil eines Waldes bezüglich Steinschlags. [1]Zieldurchmesser angepasst: Der Zieldurchmesser ist so zu wählen, dass die erforderliche Stammzahl mit dem wirksamen Mindestdurchmesser nachhaltig möglich wird. [2] Öffnungen von Stamm zu Stamm im Stangenholz und Baumholz. Zitiert n.: (Wehrli et al. 2007, S. 148)

2.3.3.2.1 Steinschlagschutz unter Klimawandel

Bezüglich einer klimabedingten Änderung der Steinschlaggefährdung gibt es derzeit noch keine ausreichende Datenlage. Eine Erhöhung der Gefährdung wird weit oberhalb der Waldgrenze erwartet und daher außerhalb der Schutzwaldwirkung (Bebi et al. 2016).

Insbesondere durch die erwarteten höheren Niederschläge in den Wintermonaten und häufigeren Frost-/ Tauwechselperioden könnte mit einer höheren Steinschlaggefährdung gerechnet werden. Bebi et al. (2016) erwarten sich durch den Klimawandel in vielen Gebieten nicht nur langfristige Verschiebungen der Ausbreitungsareale der Baumarten (siehe Kap. 2.5), sondern auch einen größeren Spielraum um nach Nutzungseingriffen oder natürlichen Störungen Baumarten mit einer größeren Resistenz gegenüber Steinschlag gezielt zu fördern. Die Wirkung des Waldes ist insbesondere unter heterogenen Waldstrukturen am höchsten (Bebi et al. 2016). Daher empfiehlt es sich bei der Pflege von Steinschlagschutzwäldern auf eine laubholzreiche Mischbaumartenzusammensetzung zu achten.

2.3.4 Schutzwald im Klimawandel

Sollten die klimatischen Bedingungen in Zukunft für die Wälder ungünstiger werden, ist mit einer zunehmenden **Vulnerabilität** von Bäumen und Waldbeständen gegenüber Störungen und Stressfaktoren zu rechnen, was sich zwingend auf die Waldleistungen, insbesondere der der Schutzfunktion auswirkt (Frehner et al. 2018). In trockenheitslimitierten Schutzwäldern wird hingegen besonders in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Mortalität der Bäume zunehmen (Etzold et al. 2016). Stark steigt das Risiko dann an, wenn das Störungsregime in Form von Stürmen, Trockenheit etc. oder biologische Störungen (Borkenkäfer) zu negativen Rückkoppelungen führt (vgl. dazu Kap. 2.2) (Frehner et al. 2018). Diese Faktoren werden jedenfalls die Veränderungen im Wald stark beschleunigen. (Allgaier Leuch et al. 2017). Die Gebirgswälder weisen durch ihre langfristigen Lebenszyklen grundsätzlich eine hohe Klimaabhängigkeit auf. Zusätzlich haben sie durch ihre Leistungen insbesondere der Schutzleistung eine enorme gesellschaftliche Bedeutung. Deshalb werden die Wälder als **hoch vulnerabel** gegenüber Klimaänderungen betrachtet. Bei rechtzeitiger Umsetzung von integralen Anpassungsmaßnahmen kann die Vulnerabilität, längerfristig gesehen, wahrscheinlich positiv beeinflusst werden (Anonymous 2012, S. 60–61).

Seidl et al. (2019) haben bei ihren Simulationen im Stubaital (Österreich, Tirol) festgestellt, dass auf Grund der längeren Wachstumsperiode unter den erwartetet Klimawandelszenario die Kronenüberschirmung zunehmen wird. Des Weiteren zeigte sich, dass der mittlere Stammdurchmesser als Folge der zunehmenden Störungen durch Wind und Borkenkäfer abnehmen wird. (Seidl et al. 2019), wodurch die Schutzwirkung abnehmen kann. Generell wird jedoch erwartet, dass die Trockenheit auf jenen Waldstandorten am stärksten zunehmen wird, die bereits heute relativ trocken sind (Allgaier Leuch et al. 2017).

Neben der graduellen Temperaturänderung ist zudem mit Temperaturextremen (Hitzewellen) zu rechnen (Kap. 2.3). Diese stellen deshalb für Bäume eine zusätzliche Stressquelle dar. Aus physiologischer Sicht werden sich vor allem die limitierenden Wirkungen von Trockenheit bemerkbar machen, was letztendlich zu Wachstumseinschränkungen und erhöhter Mortalität führen wird. Baumarten reagieren aber höchst unterschiedlich auf Trockenheit. Es wird deshalb damit gerechnet, dass sich zukünftig artspezifische Konkurrenzverhältnisse und Verbreitungsgrenzen wahrscheinlich

zugunsten trockenheitstoleranter Arten verschieben werden. Beispielsweise wurde in den inneralpinen Trockentälern der Schweiz bereits jetzt eine verstärkte Mortalität der Waldkiefer (*Pinus sylvestris L.*) und ihren Ersatz durch die tolerantere Flaumeiche (*Quercus pubescens WILLD.*) festgestellt. In den alpinen Hochlagen dürfte eine Klimaerwärmung jedoch das Baumwachstum begünstigen (Verschiebung in höhere Lagen). (Arend et al. 2016; Zimmermann et al. 2016b; Seidl et al. 2011; Lindner et al. 2010). Es ist somit anzunehmen, dass die prognostizierte Erwärmung die Baumartenverbreitung und die Artenzusammensetzung des Waldes verändern wird. Man vergleiche dazu Kapitel (2.2) als im Tiroler Inntal im Präboreal und Boreal Eichenmischwälder bis in 1000 m. S.H. vorkamen. Lexer und Seidl (2007) weisen darauf hin, dass eine durch klimatische Änderungen ausgelöste schlechtere Anpassung der Baumarten in manchen Bereichen zu einer Destabilisierung der Schutzwälder führen könnte. Verjüngungshemmung und Artenentmischung durch Wildtiereinfluss könnte das verstärken. Biotische Faktoren wie Borkenkäfer könnten auch in montanen und subalpinen Bereichen zunehmend zu Schäden führen und so die Schutzwirkung gefährden (Lexer und Seidl 2007).

In höheren Lagen, wo heute die Fichte dominiert, werden auch bald die Buche und andere Laubhölzer nicht nur auf Sonderstandorten (z.B. südexponierte Lawinenbahnen) konkurrenzfähig. Dies aber nur, wenn sich die Spätfröste ähnlich wie die Temperaturmittelwerte abschwächen (siehe Kap. 2.3 “Frosttage“) und somit keine Gefahr für das „Höherwandern“ der Baumarten darstellen (Oberhuber et al. 2020b; Zimmermann et al. 2016b). Bei starken oder zunehmenden Spätfrösten ist laut Zimmermann et al. (2016) mit Rückschlägen oder sogar mit einer Umkehr der Trends zumindest vorübergehend zu rechnen (Zimmermann et al. 2016b). Für die Schutzwaldwirkung, insbesondere für die Lawinenschutzwirkung könnte sich ein höherer Laubanteil als ungünstig erweisen, da Laubhölzer einen schlechteren Lawinenschutz bieten als Nadelhölzer. Insbesondere bei der erwarteten Zunahme der Nass- und Gleitschneelawinen in den tief- bis hochmontanen Lagen könnte dies problematisch sein (vgl. Kap. 2.3.3.1.5, Lawinenschutz unter Klimawandel).

Die drei wichtigsten Auswirkungen des Klimawandels auf den Schutzwald teilen Bebi et al. (2016) in ihrer Arbeit ein. Diese drei beeinflussen sich gegenseitig und können sich bei zunehmendem Klimawandel verändern (positiv oder negativ):

1. Erhöhter Trockenstress auf trockenheitslimitierte Standorte
2. Stärkeres Wachstum auf kältelimitierten Standorten
3. Zunahme der Wirkung von natürlichen Störungen auf mittleren Standorten, wo weder Kälte noch Trockenheit als eindeutige und großflächig wachstumslimitierende Faktoren wirken

Speziell die Fichte wird durch die Folgen des Klimawandels in den trockensten Lagen an ihre physiologischen Grenzen stoßen, was vermehrt in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu einer starken Reduktion der Schutzwirkung gegenüber Naturgefahren führen könnte (Bebi et al. 2016 zit. n. Elkin et al. 2013; vgl. auch Lexer & Seidl, 2007). Bei

der Fichte spielen vermehrt sekundäre Faktoren eine Rolle, wenn es zu Mortalität kommt: so sind Borkenkäfer nach Störungen (z.B. Starkwindereignisse) mit unter der Hauptgrund für das Absterben der Bäume (Etzold et al. 2016). Es wird davon ausgegangen, dass besonders auf flachgründigen kalkhaltigen Böden, insbesondere im montanen Höhengürtel, mit zunehmendem Trockenstress und erhöhter Störanfälligkeit bei Fichte zu rechnen ist (Seidl et al. 2011). Die Auswirkungen natürlicher Störungen auf die Schutzleistungen sind nach Bebi et al. (2016) je nach Art, Intensität und Flächenausdehnung unterschiedlich zu werten. Kleine Streuschäden durch Windwürfe und Borkenkäfer wirken sich so ohne größere Folgestörungen meist nicht negativ auf die Schutzwirkung des Waldes aus. Fallen die Störungen durch Wind und Borkenkäfer jedoch größer aus, so ist die Stabilität der Schutzwälder gefährdet und die Schutzfunktion nimmt ab (Bebi et al. 2016). Es wird im Allgemeinen mit zukünftig höheren Schäden durch Störungen (insbesondere Wind und Borkenkäfern) gerechnet (Lindner et al. 2010). Vor allem das regelmäßige Auftreten von Störungsereignissen schwächt die Schutzfunktion der Wälder langfristig (Sebald et al. 2019). Gebirgswälder weisen generell sehr langsame Entwicklungszeiträume auf, die jedoch durch Störungen innerhalb kürzester Zeit vernichtet werden können (Seidl et al. 2019). Störungen können aber auch eine Chance bieten, um sich an den Klimawandel anzupassen, wenn im Anschluss schutzfunktionale Baumarten gefördert werden. "Je großflächiger und intensiver die Störungen und je kleiner die Resilienz (im Sinn von zerstörter und nicht vorhandener Verjüngung), desto größer werden die Einbußen im Naturgefahrenschutz, welche die Restbestockung nicht genügend kompensieren kann" (Bebi et al, 2016).

2.3.4.1 Verjüngung im Klimawandel

Ob Bäume unter Klimawandel an einem Standort weiterbestehen können, oder wie rasch sie wandern, hängt von verschiedenen Verjüngungsprozessen ab. Diese sind stark von klimatischen Gegebenheiten, Störungen (vgl. Kap. 2.3.3.1.4) aber auch vom lokalen Wildeinfluss abhängig. Wohlgemuth et al. (2016) haben durch ihre Simulationen für die Verjüngung der Fichte und Buche **in der Schweiz** festgestellt, dass (simuliert bei einem mittleren Emissionsszenario A1B) natürliche Fichtenverjüngung für Bestände mit halb offenen Kronenschluss in der obermontanen und hochmontanen Stufe zukünftig fehlen wird. Auch in trockenen Föhntälern wurde die Verjüngung als fehlend berechnet. Auch werden geeignete Keim- und Anwuchsbedingungen in Folge häufig werdender Trockenheit vor allem in den Tieflagen abnehmen und so besonders in großflächigen Waldöffnungen die Verjüngung verzögern. Schlussfolgernd stellen die Autoren fest, dass sich die Verjüngungsnischen für die simulierte Buche und Fichte deutlich in höhere Lagen verschieben wird. Ergo werden sich diese beiden Baumarten aus den Tieflagen zurückziehen. Dennoch werden sie auch in Zukunft an günstigen Standorten (Wasserversorgung) weiter bestehen können. In den Hochlagen werden sich die Baumarten stärker ausbreiten können als heute. Hier dürfte das Potenzial für natürliche Waldverjüngung groß sein (Wohlgemuth et al. 2016).

2.3.4.1.1 Baumartenverbreitung im Klimawandel am Beispiel von Artverbreitungs- und Klimahüllenmodellen

Entscheidend wird sein, welche Baumartenverbreitung und Standortseignung unter dem Einfluss des Klimawandels zu erwarten ist. Naturgemäß ist diese Prognose schwierig. Jedoch können statistische Modelle die Verbreitung unter den prognostizierten Klimabedingungen vorhersagen. Kernaussage dieser Modelle ist es, dass viele Baumarten im Zuge des erwarteten Klimawandels in höhere Lagen „wandern“ werden, da es ihnen in ihren derzeitigen Verbreitungsgebieten zu trocken und zu warm ist. Hingegen könnten trockenheitstolerante Baumarten ihre Verbreitungsgebiete ausdehnen. Zimmermann et al. (2016) weisen aber darauf hin, dass „Wo das Klima ungünstig wird, heißt dies nicht zwingend, dass eine Baumart nicht mehr gedeiht, sondern nur, dass heute die Art nicht unter solchen Bedingungen beobachtet wird.“ Ein Unschärfefaktor besteht, wie rapide sich eine Baumart an neue Umweltbedingungen anpassen kann. Es wird vermutet, dass dieser Prozess im Laufe von Baumgenerationen geschehen wird, auch wenn Waldeingriffe oder Störungen diese lokal beschleunigen könnten. Vor allem Klimaextreme werden eine Anpassung auslösen, weniger die sich verändernden Mittelwerte (Zimmermann et al. 2016b; Zimmermann et al. 2016a; Wohlgemuth et al. 2016). Jedoch sind Extremwerte noch schwieriger zu prognostizieren als Mittelwerte (vgl. APCC,2014).

Im Zuge der Literaturrecherche wurden zwei unterschiedliche Zugänge zu Modellierungen gefunden, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen, da sie auch im praktischen Teil dieser Masterarbeit Verwendung finden. Diese beiden Modelle sollen als Literaturbasis dienen, wie sich die Baumartenmischung im Untersuchungsgebiet unter dem erwarteten Klimawandel verhalten könnten.

(1) PorTree- Artverbreitungsmodelle nach Zimmermann, Normand et al. 2016

Die Hauptziele des PorTree-Projekts waren: (1) die Kalibrierung von Modellen zur Habitateignung für wichtige Waldbäume in der Schweiz und Umgebung; (2) die Anpassung von Modellen auf Daten, die alle aus dem gesamten europäischen Alpenraum (Schweiz, Frankreich, Liechtenstein, Deutschland, Italien, Österreich und Slowenien) verfügbaren Waldinventaren stammen, um die Umweltnische der Art vollständiger zu erfassen; und (3) die Projektion der Habitateignung dieser Arten unter dem Klimawandel auf die Skala der Schweiz, um die wahrscheinlichen Auswirkungen auf die Umverteilung geeigneter Habitate abzuschätzen (Zimmermann et al. 2016a).

Die Verbreitungsmodellierung im PorTree- Projekt erklärt die heutige Verbreitung mittels statistischer Methoden anhand von Klima- und anderen ökologischen Größen. Die Daten entstammen aus den nationalen Waldinventaren des gesamten europäischen Alpenraums. Für diese Gebiete wurden auch Klimadaten aufbereitet, um die Baumartenverbreitung zu erklären. Jedoch waren hier nicht überall Boden- und andere Erklärungsgrößen aufbereitet. Es wurden daher die einzelnen Baumarten **nur in der Schweiz** kalibriert. In Summe wurden für dieses Projekt sechs statistische Modelle und Datensätze von sechs regionalen Klimamodellen für das **A1B- Klimaszenario** (vgl. Kap.

2.3) verwendet. Aufgrund dieser sechs statistischen Modelle wurden die heutigen Verbreitungsareale der Baumarten als Funktion des heutigen Klimas erklärt (Kalibrierung der Modelle). Darauffolgend wurden die sechs statistischen Modelle auf das zukünftige Klima projiziert. Jedes Modell erzeugt dabei eine Karte der Wahrscheinlichkeiten für geeignete Standorte von 27 modellierten Baumarten. Dadurch konnte ein Trend der zukünftigen Verbreitung der Baumarten abgeleitet werden. (Zimmermann et al. 2016b). Selbstredend ist so eine Modellierung mit großen Unsicherheiten behaftet. Unter anderem ist es unklar, welches Klimaszenario in Zukunft tatsächlich eintritt (Zimmermann et al. 2016b).

Ergebnisse des PorTree Projektes:

Die Simulation der Baumarten- Verbreitung nach (Zimmermann et al. 2016a) für das A1B-Szenario ergaben deutliche Verschiebungen der heute geeigneten Standorte. **Viele montane und subalpine Baumarten** werden im Zuge des erwarteten Klimawandels nur mehr in höheren Lagen vorkommen, da es ihnen in ihren derzeitigen Verbreitungsgebieten zu trocken und zu warm wird. Dazu gehören **Fichte, Buche, Tanne, Bergahorn, Zirbe und Bergulme.** Hingegen könnten kollin/ submontane bzw. trockenheitstolerante Baumarten ihre Verbreitungsgebiete ausdehnen. Dazu gehören **Eichen, Waldkiefer, Feldahorn** und die **Lärche.** „Die Lärche, als obersubalpine Art, profitiert wohl vor allem von den projizierten trockeneren Bedingungen unter dem Klimawandel.“ (Zimmermann et al. 2016b). Im Appendix ist als Beispiel ein Artverbreitungsmodell für Buche und Fichte angefügt (s. Abb. 22). Diese Ergebnisse fließen auch in den praktischen Teil dieser Masterarbeit ein.

(2) Klimahüllenmodelle für Baumarten

Klimahüllen sind Darstellungen der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung von Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlagssumme. Sie können für Areale von Baumarten und für beliebige geografische Einheiten erstellt werden (Kölling 2007; Schadauer 2019) Klimahüllen werden vermehrt als Beurteilungsgrundlage für die Anpassungsfähigkeit einzelner Baumarten an den laufenden Klimawandel verwendet. (Bolte et al. 2008) Kölling modellierte Klimahüllen für 27 Waldbaumarten für Deutschland für das Klimawandelszenario B1 (Kölling 2007).

Für Österreich wurde durch das BFW ein Klimahüllenmodell für die Fichte erstellt. Dabei wurde modelliert, wo die Fichte nach der ÖWI (österreichische Waldinventur) ab 3/10 der Grundfläche vorkommt. Im nächsten Schritt wurde versucht darzustellen, wo die Fichte unter einem gewissen Klimawandelszenario im Jahr 2100 liegen würde. Hierbei wurde im Vergleich zu Kölling das in der Klimawandelforschung gerne verwendete pessimistischere Szenario RCP 8.5 verwendet (vgl. Kap. 2.3.1) (Schadauer et al. 2019).

Klimahüllen stehen jedoch seit Bestehen in der Diskussion, da es bei der Interpretation eine Kenntnis über die Unsicherheiten dieser Modelle benötigt. Es ist wichtig zu wissen, dass diese Modelle auf Basis von Langzeitmittelwerten modelliert werden. Diese vernachlässigen den Einfluss des Bodens auf das Wasserangebot und berücksichtigen

keine Extremwetterereignisse wie Trockenperioden, Stürme und Starkregen. Auch werden Einflussfaktoren wie Grundwasser oder Spätfrostgefahr vernachlässigt. Es stellt sich auch die Frage, ob die Klimahüllenmodelle in die Zukunft versetzt werden können, da unterstellt wird, dass es zu keinerlei Anpassung der Bäume an das Klima kommt (Bolte et al. 2008; Schadauer et al. 2019).

Ergebnisse der Klimahüllenmodelle

Ähnlich wie bei Ergebnissen des PorTree- Projektes wird auch bei den Modellierungen von Kölling 2007 bei einem B1- Szenario für Deutschland davon ausgegangen, dass Baumarten wie **Fichte, Tanne, Lärche, Buche, Wald- Kiefer, Bergulme** und **Bergahorn** (Zirbe nicht aufgeführt) bis zum Jahr 2100 in Klimaverhältnissen vorkommen, in denen sie heute nicht beobachtet werden. Das bedeutet, dass es ihnen in Zukunft vermutlich zu warm und zu trocken sein wird. **Trockenheitstolerantere** Arten wie **Eichenarten, Feldahorn** und **Linden** weisen geringere Probleme mit dem Klimawandel auf (Kölling 2007).

Die Ergebnisse des Klimahüllenmodells der **Fichte** des BFW zeigen ein ähnliches Bild. Die untenstehende Abbildung (Abb. 9) zeigt, wo die Fichte in Österreich nach der ÖWI ab 3/10 Grundflächenanteil vorkommt (grün). Die Fichte gedeiht in einem Temperaturbereich zwischen 2 und 10 °C bei einem Niederschlagsbereich zwischen 500 und 2400 mm. Das Wuchsoptimum liegt dabei zwischen 800 und 1200 mm Niederschlag. Unter einem modellierten **RCP 8.5 Klimawandelszenario**[12] im Jahr 2100 (Kölling verwendete hingegen ein optimistischeres B1- Szenario) befinden sich rund 75 % der beobachteten Fichtenstandorte in Klimaverhältnissen, unter denen die Fichte derzeit nicht beobachtet wird (orange). Der Bereich überlappt sich aber mit dem derzeitigen optimalen Wachstumsbereich. Dieser wird dann zukünftig in einem Seehöhenbereich von 1600-1800 m zu erwarten sein. (Schadauer et al. 2019). Zusammenfassend ist festzustellen, dass es **der Fichte** in Zukunft auch in Österreich auf den meisten derzeit beobachteten Standorten - vor allem tiefere Lagen- **zu warm und zu trocken sein wird**. Es wird erwartet, dass dabei die Fichte in höhere Lagen ausweicht und der optimale Bereich in einer Seehöhe von 1600 bis 1800 m liegen könnte. Dieses Ergebnis wird auch im Rahmen des praktischen Teils dieser Masterarbeit verwendet.

[12] **Hinweis:** Hier wurde mit einem RCP 8.5 Szenario für Österreich modelliert, das von einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur von +4,8 °C (gegenüber dem vorindustriellen Wert) ausgeht. Für Tirol wird bei einem RCP 8.5 Szenario „nur“ mit einer Zunahme von +4,2 °C gerechnet.

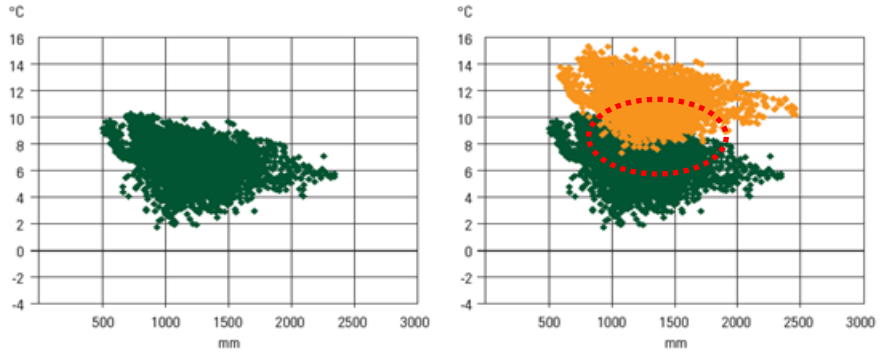


Abbildung 9: Klimahüllen der Fichte: aktuelles Vorkommen laut ÖWI 07/09 (links, grün) und mit dem Klimawandelszenario RCP 8.5 im Jahr 2100 (rechts, orange). Der modellierte Bereich deckt zum Teil das optimale Wachstum ab, das nach den Autoren vielleicht auf 1600 bis 1800 m Seehöhe erwartet werden könnte (rot). Verändert nach Schadauer et al. 2019.

2.3.4.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Waldgrenze

Die bereits seit Jahrzehnten messbare Klimaerwärmung (+2 °C seit 1880; Kap. 2.2.1), lässt vermuten, dass bereits messbare Veränderungen der Waldgrenze erkennbar sind. Dies war jedoch nicht der Fall: so wurde seit 1960 in der Schweiz ein Anstieg der **Waldgrenze** von „nur“ 30 – 35 m beobachtet. Der Anstieg „hinkt“ somit der Klimaerwärmung hinterher (Dullinger et al, 2012 zit. n. Zimmermann et al. 2016). Die Forscher erklären das damit, dass Bäume grundsätzlich langsam auf sich verändernde Klimabedingungen reagieren, da sie einerseits eine gewisse Toleranz aufweisen und weil andererseits ihre demographischen Prozesse sehr langsam ablaufen. Jedoch ist dieser Umstand stark von der Veränderung der Landnutzung abhängig (Aufgabe von Almen). Auch Oberhuber et al. (2020) konnten in ihren Untersuchungen in Tirol keine Nachweise für eine konsistente Wachstumsreaktion der Bäume an der Waldgrenze unter sich erhöhenden Sommertemperaturen nachweisen (Oberhuber et al. 2020a). Langfristig ist jedoch ein Anstieg der klimatischen Waldgrenze und der Biomasse zu erwarten.

2.3.4.3 Wo verbessert sich am ehesten die Schutzwirkung?

Höhere Lagen sind unter anderem durch ihr kälteres Klima gekennzeichnet. Diese Umweltbedingungen führen zu einer offenen heterogenen Waldstruktur. Die Wärme ist in diesen Lagen, vor allem an der Baumgrenze, der wichtigste Wachstums- und entwicklungslimitierende Faktor. Ein Wärmemangel schränkt die Zellteilung und Gewebeerneuerung, sowie die Photosynthese (= CO_2- Fixierung) ein (Oberhuber et al. 2020b). Mit zunehmender Temperaturerhöhung im Zuge des Klimawandels in diesen Lagen wird daher mit einer Verbesserung der Schutzwaldwirkung durch Erhöhung der Biomasse und Dichte, insbesondere an der oberen Waldgrenze, gerechnet (Bebi et al. 2016; Lindner et al. 2010). Auch (Seidl et al. 2019) konnten in ihren Untersuchungen nachweisen, dass es durch die längere Vegetationszeit im Klimawandel und der Zunahme des Baumwachstums zu einer Zunahme der Kronenüberschirmung kommt. Dies bewirkt eine höhere Interzeptionsleistung der Bäume und steigert somit die Schutzwaldwirkung (Seidl et al. 2019). Allerdings konnten Oberhuber et al. (2020) bei ihren Untersuchungen and Fichte, Lärche und Zirbe in der subalpinen Zone für zwei Phasen der Klimaerwärmung im letzten Jahrhundert nur eine Zunahme des Wachstums an der Fichte und Lärche

nachweisen. Das Fehlen einer adäquaten Wachstumsreaktion auf die jüngste Klimaerwärmung erklären die Autoren durch eine verstärkte Konkurrenz um Ressourcen (Nährstoffe, Licht, Wasser) und durch Frosttrocknungsverletzungen bei immergrünen Baumarten an der Krummholzgrenze (Oberhuber et al., 2020).

Bisher weisen kältelimitierte, offene Wälder mit vielen inneren Waldrändern (z.B. Rottenstrukturen, Anm.) eine hohe Resilienz auf, da sie Störungen absorbieren können, ohne dass sich dadurch die Schutzwirkung wesentlich vermindert (Bebi et al. 2016). Die Autoren merken jedoch an, dass wenn Biomasse und Dichte durch verbessertes Wachstum in solchen Wäldern stark zunehmen, kann sich die Resilienz vermindern, dann…

1. die Regenerationsfähigkeit und damit auch die Anpassungsfähigkeit des Systems bei starker Konkurrenz um Licht abnehmen und da…
2. durch zunehmende Verbindungen und Interaktionen zwischen dicht stehenden Bäumen bereits kleinere Störungen Kaskaden von weiteren Störungen auslösen können. Auch Seidl et al. (2011) weisen auf diese erhöhte Anfälligkeit gegenüber Störungen hin.

Um die Schutzwirkung in Zukunft auch unter dem Aspekt des Klimawandels zu erhalten, ist es deshalb wichtig, mehr über die Wechselwirkungen zu wissen und die Prioritäten im Schutzwaldmanagement so zu optimieren, dass sich die Schutzwirkung nicht großflächig verschlechtert, dazu im nächsten im Kapitel „Anpassungskonzepte“ (Bebi et al. 2016).

2.3.4.4 Anpassungskapazität in den Gebirgswäldern

Die Anpassungskapazität besteht aus zwei Komponenten: die *inhärente* Anpassungskapazität, welche die natürliche Anpassung von Bäumen und Waldökosystemen an sich veränderte Umweltbedingungen beschreibt (vgl. Lindner et al. 2010) und die *sozio- ökonomische* Anpassungskapazität. In diesem Unterkapitel wird themenbezogen auf die ökonomische Anpassungskapazität, die durch klima- und naturgefahrenangepasste Maßnahmen im Waldbau erreicht werden können, eingegangen:

Waldbauliche Maßnahmen sollen die Waldentwicklungen so lenken, dass der Wald die von ihm geforderten Leistungen (in unserem Fall die Schutzwaldleistung) optimal erfüllt. Dabei ist dieser immer mit großen Unsicherheiten konfrontiert. Durch den Klimawandel werden die Unsicherheiten noch verstärkt. Wir können heute nur abschätzen, wie sich das Klima bis zum Ende des Jahrhunderts hin verändert und welche möglichen Folgen sich daraus entwickeln (z.B. Auswirkungen auf Naturgefahren). Klar ist aber die Richtung: es wird zunehmend wärmer. Die Folgen für den Wald und seine Leistungen sind daher ebenso schwer abzuschätzen. Deshalb sind Strategien gefragt, die die natürlichen Anpassungen **(Adaptionen)** des Waldes unterstützen, um die Einbußen bei den Waldleistungen gering zu halten (Allgaier Leuch et al. 2017). Das heißt nichts anderes als den Wald „klimafit“ zu machen und die Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels zu verringern und somit Schäden zu mindern. Bedingt durch die langen Produktionszeiträume müssen jetzt schon Bestände geschaffen werden, die auch mit dem

erwarteten Klima am Ende des 21. Jahrhunderts gut zurechtkommen und dort auch die Schutzfunktion erfüllen. Daher sind frühzeitige Adaptionsmaßnahmen unerlässlich. Jedoch ist es nicht möglich Wälder an hypothetische zukünftige Bedingungen „maßgeschneidert“ anzupassen. Deshalb ist es notwendig, die natürlichen Selbstregulierungsmechanismen durch Adaptionsmaßnahmen und somit die Flexibilität der Wälder zu fördern (Anonymous 2012). Adaption kann darauf abzielen, die **Resistenz** der Wälder gegenüber Störungen und deren **Resilienz**[13] nach Störungen oder deren Anpassungsfähigkeit in einem sich ändernden Klima zu erhöhen. Die Resistenzerhöhung soll die Widerstandsfähigkeit der Wälder gegen Auswirkungen des Klimawandels verbessern. Die *Resilienzerhöhung* soll die Fähigkeit der Wälder fördern, nach Störungen zu erwünschten Zuständen zurückzukehren und die *Erhöhung der Anpassungsfähigkeit* der Wälder soll den Übergang in neue Waldbestände erleichtern (Brang et al. 2016a), womit in Summe die Vulnerabilität verringert wird. In der Arbeit von Brang et al. (2016) wird dazu eine Grafik angeführt, welche die möglichen Strategien zur Adaption an den Klimawandel zeigen (Abb. 10):

Abbildung 10: Adaption im Wald im Klimawandel: Ziele, strategische Stossrichtungen [sic!], Adaptionsprinzipien und waldbauliche Maßnahmen (Brang et al. 2016a).

Dabei werden die Adaptionsstrategien wie folgt beschrieben:

- [13] **Resilienz Wohlgemuth et al. 2019:** „Resilienz ist die Eigenschaft von Ökosystemen, sich wieder von Störungen zu erholen bzw. Störungen zu absorbieren, ohne dabei die systemimmanenten Strukturen und Prozesse zu verändern [...].“
- **Resistenz (Wikipedia 2019):** „ist die Widerstandsfähigkeit eines Lebewesens gegen schädliche Einflüsse der Umwelt (wie z.B. Parasiten, Infektionen, Krankheiten oder **Klimaeinflüsse**)

1. **Erhöhung der Baumartenvielfalt:** mit zukunftsfähigen Arten, weil Mischbände störungs- und stressresistenter sind, sich nach Störungen rascher erholen und gegen ungewisse zukünftige Bedingungen besser abgesichert sind als Reinbestände
2. **Erhöhung der Strukturvielfalt:** weil reich strukturierte Wälder weniger störanfällig sind und sich dank vorhandener Vorverjüngung besser abgesichert sind als Reinbestände
3. **Erhöhung der genetischen Vielfalt:** da sie die Anpassungsfähigkeit der jeweiligen Baumart an das sich verändernde Klima fördert
4. **Erhöhung der Störungsresistenz der Einzelbäume:** weil stabile Bäume weniger anfällig auf Stürme und Schneedruck sind
5. **Reduktion der Umtriebszeit:** beziehungsweise des Zieldurchmessers oder die vorzeitige Verjüngung, weil dies den Anteil besonders störanfälliger älterer Bäume und Bestände vermindert und einen rascheren Baumartenwechsel erleichtert. Der Vorteil hierbei ist die Verkürzung des Zeitraums, in dem die Bestände durch zunehmende Trockenheit gefährdet sind. Dies trifft besonders für heutige Fichten-Stangenhölzer zu, die so bereits wieder verjüngt sein könnten, wenn ab etwa 2050 ausgeprägtere sommerliche Trockenzeiten auftreten.

Ad 1: Besonders wichtig bei den Adaptionsstrategien ist die **Erhöhung der Baumartenvielfalt**. Ändern lässt sich die Baumartenzusammensetzung am einfachsten **in der Verjüngungsphase** durch Natur- oder Kunstverjüngung (Pflanzungen). Pflanzungen sind vor allem dann sinnvoll, wenn die gewünschten Zielbaumarten fehlen und Naturverjüngung fehlt oder unzureichend ist. Sie sollten aber nur als Ergänzung gewählt werden. Hierbei sind aber Baumarten und Herkünfte zu wählen, die ein wärmeres und trockeneres Klima ertragen (Provenienz) (Brang et al. 2016a). Daher ist es erforderlich von vornherein Baumarten zu wählen, welche die gewünschte Schutzfunktionalität gegenüber einem Leitprozess erfüllen und zudem gegenüber einem wärmeren und trockeneren Klima tolerant sind.

Ad 2: Homogene Waldstrukturen gelten im Allgemeinen als vulnerabler gegenüber Störungen. Deshalb ist eine **erhöhte Strukturvielfalt** wichtig, weil diese die Wälder gegen Störungsereignisse und Stress absichert. Allein schon deshalb, da Störungen oft nur Baumindividuen einer bestimmten Größen- bzw. Altersklasse betreffen. Beispielsweise nimmt die Sturmanfälligkeit mit einer gewissen Baumhöhe zu, oder gewisse Schadinsekten befallen nur Bäume einer bestimmten Altersklasse. Bei einer erhöhten Strukturvielfalt verbessert sich die Bestandsstabilität, da nach einer Störung noch einige Individuen verbleiben und diese somit weiterhin einen Teil der Schutzwirkung gewährleisten. In strukturierten Wäldern stellt sich oft eine Verjüngung „unter Schirm“ der alten Bäume ein (sogenannte Vorverjüngung), die Störungsresilienz des Bestandes ist somit erhöht (Brang et al. 2016a).

Ad 3: Die **Erhöhung der genetischen Vielfalt** drückt sich unter anderem dadurch aus, dass Baumpopulationen an die lokalen Standortverhältnisse in gewissem Maße angepasst sind, was sich in ihrer Phänologie und ihrem Wachstum zeigt. Die

Naturverjüngung stellt dabei einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der genetischen Vielfalt dar. Bei Kunstverjüngungen ist die richtige Herkunft des Saatgutes entscheidend (Brang et al. 2016).

Ad 4: Durch die **Erhöhung der Störungsresistenz** der Einzelbäume erhöht sich die Überlebenswahrscheinlichkeit bei Störungsereignissen. Sie stellt somit auch ein Kernelement der Resistenz der Bestände gegenüber Störungen dar und dient daher der Sicherung der Waldleistungen. Somit ist der Bestand nur so stark wie seine einzelnen Bäume. Brang et al. (2016) merken jedoch an, dass „bei fortschreitendem Klimawandel die Erhöhung der Störungsresistenz lediglich zu einer Verzögerung negativer Reaktionen um einige Jahrzehnte führen kann, das heißt, man gewinnt damit Zeit, löst das grundlegende Problem aber nicht." Eine einfache, jedoch wirksame Maßnahme zur Erhöhung der Störungsresistenz der Einzelbäume ist eine sorgfältige Holzernte, welche Stamm- und Wurzelverletzungen vermeidet. Des Weiteren sind Durchforstungen, insbesondere die Z- Baum (Z= Zukunft) -Durchforstung ein wirksames Mittel, um die Bestandesstabilität zu erhöhen (Brang et al. 2016).

Ad 5: Eine **Reduktion der Umtriebszeiten** bzw. des Zieldurchmessers in gleichförmigen Wäldern kann aus ökologischer Sicht vorteilhaft sein, da dadurch der Anteil der störungsanfälligen Bäume bzw. Bestände vermindert wird und so das Risiko geringer wird. Auch hier spielt wieder der Effekt einer geringeren Baumhöhe durch eine verkürzte Umtriebszeit eine entscheidende Rolle. Kürzere Umtriebszeiten erlauben auch einen rascheren Baumartenwechsel. Aus ökonomischer Sicht vermindert eine Reduktion der Umtriebszeit auch den durchschnittlichen Holzvorrat, der prinzipiell durch Störungen gefährdetes Kapital darstellt. Allerdings stehen laut Brang et al. (2016) die kürzeren Umtriebszeiten im Widerspruch zu anderen Adaptionsstrategien wie der Förderung der Strukturvielfalt. Auch sei es möglich, dass durch die Entnahme stabiler Bäume die Bestandesstabilität generell abnimmt (Brang et al. 2016).

2.3.4.4.1 Mögliche Hemmfaktoren der Anpassungsmaßnahmen

Neben der gegenwärtigen Unsicherheit, wie sich das Klima bis zum Ende des Jahrhunderts hin entwickelt und welche Folgen es auf Niederschlag, Temperatur, Naturgefahrenprozesse und schlussendlich auf den Gebirgswald hat gibt es noch weitere Probleme in den Anpassungsstrategien, die in Folge kurz dargestellt werden sollen.

Ausgangslage ungenügend

Um in Zukunft einen möglichst stabilen Schutzwald zu haben, welcher möglichst „klimafit" ist und seine Leistung optimal erfüllt ist es wichtig frühzeitig Maßnahmen zu setzen. Solche Maßnahmen sind jedoch u.a. abhängig von der Ausgangslage, in der sich der Schutzwald befindet. Die österreichische Waldinventur (ÖWI) 2007/09 liefert interessante Ergebnisse zum aktuellen Zustand der österreichischen Schutzwälder. Demnach sind sie nach wie vor überaltert. So befinden sich derzeit rund 40 % der Schutzwälder in der Terminalphase. Des Weiteren wurde in der ÖWI 07/09 die Stabilität der Schutzwälder gegenüber Störungen (Sturm, Schnee, Waldbrand und Immissionen) mit der Beurteilung „stabil" bewertet. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die **Verjüngungssituation** des Waldes.

Hier sind, abgesehen von den gesicherten Jungwuchsbeständen, alle anderen Bestände verjüngungsnotwendig (67 %). Davon sind aber nur 23 % mit einer ausreichenden Verjüngung gesichert. Verantwortlich dafür ist die hohe Wildbelastung und Waldweide. Auch der dominierende, anthropogen geförderte Fichtenanteil mit rund 52 % an der aktuellen Waldgesellschaft in den österreichischen Schutzwäldern erhöht die Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel. Jedoch zeichnet sich ein abnehmender Trend zu zugunsten der Buche und anderen Laubbäumen ab (Niese 2011).

Wildeinfluss

Schalenwild kann am Wald durch Verbiss, Schälen, Schlagen oder Verfegen enorme schutzfunktional wirksame, wirtschaftliche und/ oder ökologische Schäden anrichten. Die Ursachen hierfür sind vielfältig: Neben jagdlich bedingten Ursachen können auch forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. großflächige Altersklassenwälder ohne entsprechendes Äsungsangebot) sowie Beunruhigung durch Tourismus und Erholungssuchende, Siedlungstätigkeiten oder Verkehr zu Stress für das Wild führen. Mangels Ausweichmöglichkeiten in unserer intensiv genutzten Kulturlandschaft kommt es so zu regional (stark) überhöhten Schalenwildbeständen und in Folge zu Schädigungen. Hohe Wildschäden gefährden die Regenerationsfähigkeit (Verjüngung) und Stabilität von Ökosystemen. Der selektive Verbiss einzelner bevorzugter Baumarten (Laubbäume, Tanne) führt zur Entmischung (→ „Verfichtung“) (natürlicher) Waldgesellschaften, zum Verlust ökologisch wertvoller Baumarten und somit zur Senkung der Schutzwaldleistung (Anonymous 2017). Auch wird dadurch die geforderte Baumartenvielfalt im Angesicht des Klimawandels gefährdet. Auswertungen des Wildeinflussmonitorings (WEM) ergaben beispielsweise für Tirol, dass der Anteil der Stichproben mit starkem Wildeinfluss bei 43,2 %[14] liegt (Amt der Tiroler Landesregierung 2019). Daher scheint es dringend notwendig Maßnahmen zur wirkungsvollen Reduktion der Schalenwildbestände umzusetzen. Dadurch wird es unweigerlich zu Konflikten mit der Jägerschaft oder möglicherweise mit dem Tierschutz kommen. Aber durch die Umsetzung ist mittel- bis langfristig eine Kostenersparnis für (Schutz-) Waldsanierungen, Verjüngungspflege (Verbissschutz) und technischen Schutzmaßnahmen zu erwarten (Anonymous 2017), wodurch sich ein gesamtvolkswirtschaftlicher Mehrwert ergibt. In Bezugnahme der in Kap. 2.3.3 angeführten Schutzfunktionen des Waldes wird klar, wie wichtig eine standortsgemäße Verjüngung des Schutzwaldes und die Anpassung der Wildbestände an die Waldverjüngung sind. Dies erlangt durch die zu erwarteten (negativen) Veränderungen im Schutzwald infolge des Klimawandels zusätzlich an Bedeutung.

Öffentliche Akzeptanz

Fast drei Viertel des österreichischen Waldes ist Privatwald und wird auch von Privaten bewirtschaftet. Nur etwa 1 % der Betriebe ist größer als 200 ha (Anonymous 2017). Daher ist es wichtig bei den vielen Kleinwaldbesitzern durch Wissensvermittlung in Form von Beratungstätigkeiten das Bewusstsein für ein proaktives Handeln in der Waldbewirtschaftung gegen die Folgen des Klimawandels zu schaffen. Nur so kann eine

[14] Wert bezieht sich auf die Gesamtwaldfläche Tirols inkl. Schutzwälder.

Basis, einerseits für die Akzeptanz der verändernden Bedingungen für den Wald, und andererseits für einen Willen zum Handeln geschaffen werden. Eine Recherche im Internet ergab, dass es seitens des Bundes, der Länder, der Waldvereine und -verbände bereits einiges an Instrumenten der Wissensvermittlung gibt (eine Auswahl):

- „Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel"- BMFLUW (2017)
- „Wald im Klimawandel- Wie mache ich meinen Wald klimafit?"- www.klimafitterwald.at- Internetplattform welche u.a. das BFW als Partner hat.
- Filmprojekt „GENial- der Wald im Klimawandel" des Waldverband Österreich: www.waldverband.at
- Informationskampagnen des Österreichischen Forstvereins: www.forstverein.at
- Informationskampagnen des Landes Tirols: www.tirol.gv.at/umwelt/wald/

2.3.4.5 Potential von Gastbaumarten bei der Anpassung an den Klimawandel

Gastbaumarten können eine wertvolle Ergänzung für den heimischen (Schutz-) Wald darstellen, deshalb soll das folgende Unterkapitel als kurzer Exkurs bzw. Ausblick für diese Möglichkeit der Anpassung an den Klimawandel dienen. Gastbaumarten sind standortfremde Baumarten, die in einem bestimmten Gebiet von Natur aus nicht vorkommen und durch Menschen gezielt eingeführt wurden. Die **Hauptvorteile** einer Gastbaumart sind laut Brang et al. (2016) ihr rasches Wachstum, ihr wertvolles Holz und ihre hohe Trockenheitstoleranz. Die **Nachteile** sind eine hohe Schädlingsanfälligkeit, negative Auswirkungen auf die Biodiversität und die Gefahr, dass es zu einer invasiven Ausbreitung dieser Baumarten kommt und die heimischen Arten verdrängen. Daher wird empfohlen die Vor- und Nachteile je nach Baumart und Standort differenziert zu beurteilen (Brang et al. 2016b)

Durch den Klimawandel werden bei vielen heimischen Baumarten erhebliche Arealverschiebungen erwartet. Dadurch stellt sich die Frage nach den für ein Gebiet geeigneten Baumarten neu (Brang, Pluess et al. 2016 zit. n. Zimmermann et al. 2016). Ja, es ergeben sich dadurch ganz neue Chancen für die Baumartenzusammensetzung. Zur Sicherstellung der Waldleistungen aber auch zur Erhaltung von Baumarten und ihrer genetischen Vielfalt, könnte auch die Möglichkeit einer unterstützten Wanderung, einer sogenannten „assisted migration", ins Auge gefasst werden. Hierbei sollen Pflanzungen sicherstellen, dass Baumarten die Migration in neue Gebiete mit passendem Klima schaffen (Brang et al. 2016b).

Gastbaumart am Fallbeispiel Douglasie

Der größte Vorteil von Gastbaumarten liegt in ihrer höheren Wuchs- und Wertleistung gegenüber heimischen Baumarten. Ein Musterbeispiel dafür ist die Douglasie (Pseudotsuga menziesii), welche je nach Herkunft des Saatgutes große Unterschiede im Wachstumspotential zeigt und als gute Alternative zur Fichte gilt. Derzeit stocken in Österreich etwa 335.000 Vfm (Englisch 2008). Die Douglasie stammt ursprünglich aus

Nordamerika und wird laut dem US- Forstdienst in zwei Varietäten unterschieden (Englisch 2008):

- Die „grüne“ Küstendouglasie **Pseudotsuga menziesii var. menziesii (viridis)** und
- die „blaue“ Inlandsform **Pseudotsuga menziesii var. glauca**

Ebenso aus ökologischer Sicht gilt die Douglasie (Inland-, sowie Küstenform) als wertvolle Alternativbaumart. So ist sie in der Jugend schattentolerant und unterbaugeeignet. Des Weiteren besitzt sie einen gewissen Pioniercharakter, wodurch sie interessant wird als Baumart nach drastischen Störungen. In Amerika wird die Douglasie als Erosionsschutz empfohlen. (Englisch 2008). Sie weist zudem sehr hohe Bestandestranspirationsraten von 450- 580 mm/a auf, sowie ein Herzwurzelsystem mit relativ hoher Durchwurzelungsenergie, wodurch sie sehr wertvoll als alternative Schutzwaldbaumart gegenüber Rutschungs- und Abflussprozessen sein kann (Englisch, 2008).

Allerdings ist die Douglasie auch kein „Wunderbaum“ und sie hat dementsprechend ihre Schwachstellen. Generell ist die Douglasie bis zum Dickungsalter eine sehr empfindliche Baumart. Speziell kann sie Schäden wie Wurzelaustrocknungen durch die Verpflanzung davontragen, wodurch sich die Bestandesbegründung und Bestandespflege sehr aufwändig gestalten können. Zu den wichtigsten biotischen Schädlingen zählen neben Wild verschiedene Pilze wie Schütten, welche speziell in luftfeuchten Lagen auftreten. Schadinsekten stellen ebenso für junge Pflanzen ein Problem dar. Zukünftig ist damit zu rechnen, dass weitere Schadorganismen aus dem Ursprungsland der Douglasie in Europa eingeschleppt werden. Durch den Klimawandel könnte sich zudem das Verhalten einzelner Schaderreger verändern. Bereits jetzt konnte in Österreich eine Zunahme der Douglasienschütten (*Phaecryptopus gäumanni* und *Rhabdocline pseudotsugae*) registriert werden (Dubach und Queloz 2017).

3 FALLBEISPIEL PATSCHERKOFEL: QUALITATIVE BEWERTUNG DER SCHUTZFUNKTIONALITÄT UND UNTER EINFLUSS DES KLIMAWANDELS

3.1 Projektgebietsbeschreibung

3.1.1 Geografische Lage

Nachdem im Literaturteil ein ausführlicher Einblick in den aktuellen Stand des Wissens über den Schutzwald und seine Funktionen sowie die erwarteten Entwicklungen unter Klimawandel gezeigt wurden, wird nun auf ein praktisches Beispiel eingegangen. Am Fallbeispiel Patscherkofel soll die aktuelle Schutzfunktionalität ausgewählter Schutzwaldbestände und seine „Klimafittness“ auf Basis des Wissens aus der Literaturauswertung bewertet werden.

Das Untersuchungsgebiet „Patscherkofel“ (Patscherkofel: 47,208829 °N/ 11,460608 °E (WGS 1984)) befindet sich am und an den Ausläufern des gleichnamigen Berges in den Gebieten der Gemeinden Lans, Patsch, Sistrans, und Innsbruck (vertreten durch die Katastralgemeinden Vill und Igls) im Bundesland Tirol/ Österreich (Abb.12). Der Patscherkofel ist ein 2246 m hoher Gipfel der Tuxer Alpen. Er liegt nur wenige Kilometer südlich der Tiroler Landeshauptstadt Innsbruck und ist somit der Hausberg der Innsbrucker. Durch seine exponierte Lage, charakteristische abgerundete Form und dem auf dem Gipfel befindlichen Sendemasten ist der Patscherkofel von weitem zu sehen. Die Nachbargipfel sind die Viggarspitze (2306 m) und die Neunerspitze (2285 m) (Anonymous, 2016). An den westlichen bis nördlichen Flanken des Patscherkofel schließt das sogenannte Tiroler Mittelgebirge an. Es handelt sich hier um eiszeitlich geformte Terrassen des Tiroler Inntales, die den Talboden um etwa 100- 500 m überragen (Anonymous 2016b).

Das Untersuchungsgebiet wurde deshalb hier gewählt, weil die Schutzwälder am Patscherkofel die Siedlungsräume sowie (internationale) Verkehrsinfrastrukturen wie Brennereisen- und Autobahn vor Naturgefahren, insbesondere Rutschungen und Muren schützen. Speziell die Einhänge der Sill, welche das Wipptal entwässert und in Innsbruck in den Vorfluter Inn mündet, weisen im Projektgebiet eine Vielzahl von Rutschungen im Stirnbereich einer großräumigen Massenbewegung auf. Die Schutzwälder haben hier vor allem eine präventive Wirkung, um die Einhänge oberhalb der Landeshauptstadt zu entwässern und somit den Feststoff und Wildholzeintrag zu minimieren. Es ist deshalb enorm wichtig, dass die Schutzwälder jetzt und in Zukunft, d.h. auch unter den Einwirkungen des Klimawandels, ihre Schutzfunktionalität erfüllen.

Um abzuschätzen, in welchem aktuellen Zustand die Schutzwälder im Untersuchungsgebiet sind und wie die Bestände unter dem erwarteten Klimawandel angepasst werden sollen, wurden Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet in verschiedenen Höhen- und prozessrelevanten Bereichen (submontan bis tiefsubalpin) ausgewählt und auf ihre Schutzfunktionalität hin überprüft. In der gegenständlichen Masterarbeit wurde neben der Beurteilung der aktuellen Tauglichkeit eine Entwicklungsprognose der Bestände auf ein RCP8.5- Klimawandelszenario für Tirol hin

durchgeführt. Dazu wurden auf Basis einer Naturgefahrenprozesskarte[15] (EGAR[16], Regionalplanung Wipptal Nordost 2003) Probeflächen in den relevanten Prozessflächen ausgewiesen. Die Lage der Probeflächen erstreckt sich vom Gipfelbereich des Patscherkofel in nordwestlicher Richtung bis hinunter zum Sill- Fluss. Die Höhenspanne liegt hierbei bei rund 630 m ü. N.N. bis auf 1900 m ü. N.N (Abb.12). Die Gesamtgröße des Untersuchungsgebietes beträgt rund **1000 Hektar, 60 %** davon sind mit Wald bedeckt**.** Zur Auswahl und genaueren Beschreibung der ausgewählten und untersuchten Schutzwaldbestände wird auf das Kapitel Methodik verwiesen.

Abbildung 11: Die Lage des Untersuchungsgebietes südlich von Innsbruck (rot). Patscherkofels (2246 m, roter Pfeil) Tirol/ Österreich. Quelle: verändert nach tirisMaps, 2020.

[15] **Prozesskarte:** siehe Appendix

[16] **EGAR:** „**E**inzugs**g**ebiete in **a**lpinen **R**egionen"- ein Planungsinstrument für das Naturraummanagement. Link: https://www.tirol.gv.at/umwelt/wald/schutzwald/egar/ (abg. am 17.05. 2020)

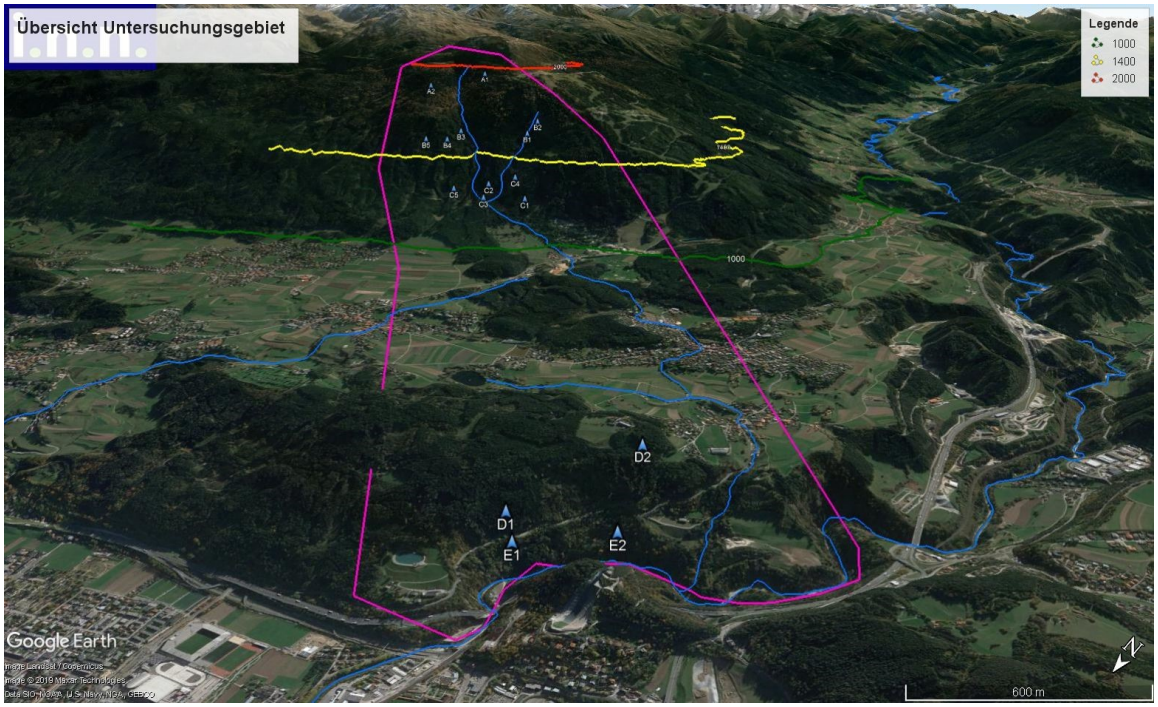


Abbildung 12: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes (lila), die wichtigsten Bäche (blau) mit der Sill (unten), die 1000m Höhenlinie (grün), 1400m Höhenlinie (grün), 2000 m Höhenlinie (rot). Die Stadt Innsbruck befindet sich am unteren linken Bildrand. Im unteren Bereich sind die Brennerautobahn und Brennereisenbahn erkennbar. Somit ist in dieser Darstellung die Relevanz der Schutzwaldbestände gut ersichtlich. Des Weiteren ist die Terrassen-ähnliche Form des Tiroler Mittelgebirges erkennbar. Blickrichtung Patscherkofel, Südost. Quelle: Google Earth, i.n.n. GmbH (2019).

3.1.2 Beschreibung des Standortes

3.1.3 Klima

Großräumig betrachtet liegt das Untersuchungsgebiet im Bereich des subkontinentalen Innenalpenklimas mit sommerlichem Niederschlagsmaximum. Die Jahresmitteltemperatur beträgt aktuell an der Messstation am Patscherkofel- Gipfel 0,3 °C, der Niederschlag im Jahresmittel 871 mm (Tab. 6). Die Häufigkeit von Föhnstürmen, bedingt durch die geographische Lage am Eingang des Wipptales, ist eine klimatologische Besonderheit. Durchschnittlich werden hier Windgeschwindigkeiten von 4- 5 m/s gemessen. Starkwinde erreichen regelmäßig Geschwindigkeiten von 15- 20 (30) m/s, wobei hier die Süd- und Westlagen des Berges am stärksten betroffen sind. Das Untersuchungsgebiet, mit seiner NW- Ausrichtung ist hier in einer eher begünstigten Lage. Der Föhn hat starke Auswirkung auf die Schneelage und Schneeverteilung im Gebiet. Exponierte Lagen werden dabei abgeblasen und sind deshalb auch oft während der Wintermonate schneefrei. Leeseitig und damit oberhalb des Siedlungsgebietes, aber speziell in Muldenlagen, wird der Schnee schließlich abgelagert und führt zu hohen Schneedecken bis ins späte Frühjahr. Nach starken Schneefällen kann bei darauf folgendem Föhneinfluss Schneebruch an Wipfeln, Ästen und Stämmen auftreten. Der Föhn hat zudem dementsprechend eine stark prägende Funktion für die Vegetation am Patscherkofel, in dem er durch Windwurf und Windbruch die Waldbestände schädigt.

Physiologisch beeinflusst der Föhn die Vegetation in dem er die relative Luftfeuchtigkeit verringert, womit die Verdunstung steigt. Bei niedrigem Niederschlag wirkt sich das ungünstig auf den Boden und den Wasserhaushalt aus. Davon besonders betroffen sind im Gebiet seichtgründige SW- W- Hänge. Die Niederschlagswerte liegen bei 800- 900 mm/ Jahr die zur Waldgrenze hinauf leicht ansteigen; das Klima ist in Summe sehr ausgeglichen (Anonymous 2015, 2007, 2010c, 2010b, 2011).

Basiswerte ausgewählter Messtationen für das Untersuchungsgebiet des hydrographischen Dienstes (Adler et al. 2015):

Tabelle 4: Klimadaten für das Untersuchungsgebiet Patscherkofel. Als Referenzwerte sind die Messstationen Rinn und Innsbruck/ Universität angegeben, welche sich nur wenige Kilometer außerhalb des Untersuchungsgebietes befinden.

Ort mit Seehöhe	**Temperatur (Jahresmittel)**	Niederschlag (max. Jahressumme)	Niederschlag (minimale Jahressumme)	**Niederschlag (Mittlere Jahressumme)**
Innsbruck/ Universität (578 m)	9,3 °C	1116,9	736	**882 mm**
Rinn (900 m)	7,1 °C	1261 mm	707 mm	**892 mm**
Patscherkofel (2246 m)	0,3 °C	1108,6 mm	692 mm	**871 mm**

3.1.3.1 Exposition des Untersuchungsgebietes gegenüber dem Klimawandel

Die Exposition des Untersuchungsgebietes gegenüber dem Klimawandel für den Zeitraum der Prognose (bis 2100) basieren auf der sogenannten Instrumentalperiode (1971- 2000. Die gemessenen bzw. simulierten Werte für das Bundesland Tirol sind in den Abbildungen 3 und 4 (BMNT 2016) (Kapitel 2.2.3) dargestellt. Eine regional bezogene Klimawandelprognose direkt für das Untersuchungsgebiet konnten im Zuge der Literaturrecherche nicht gefunden werden. Deshalb werden dafür die Prognosen für Tirol herangezogen (BMNT 2016), da angenommen wird, dass sich die Klimaveränderungen für das Untersuchungsgebiet nicht wesentlich von den Klimaveränderungen des Bundesland Tirols unterscheiden werden. Für genauere Informationen zum Klimawandel und seinen Folgen, wird auf Kapitel 2.2.3 verwiesen. Auf Basis dieser Information werden die aktuellen Basiswerte der Messstationen (Tabelle 6) mit den Werten (+4,2°C und +6,5 % Zunahme des Jahresniederschlags) des RCP 8.5 Szenarios für Tirol (Abb. 3) für die Perioden 2071- 2100 durch den Bearbeiter aufgerechnet. Diese Berechnung dient somit als Basis für die Bewertung der Untersuchungsflächen hinsichtlich des Klimawandels.

Tabelle 5: Temperatur- und Niederschlagswerte der Periode 2071- 2100 nach dem Klimawandelszenario RCP 8.5 für die Messstationen Innsbruck/ Universität, Rinn und Patscherkofel. Die Jahresmittel- Temperatur erhöht sich dabei um +4,2 °C; der Jahresmittel- Niederschlag nimmt um 6,5 % zu. Quellen: www.alpenklima.eu (Adler et al. 2015), und ÖKS15 (BMNT 2016).

Ort	Temperatur aktuell (Jahresmittel)	Niederschlag aktuell (Mittlere Jahressumme)	**Temperatur (Jahresmittel) 2071- 2100 RCP8.5**	**Niederschlag (Jahresmittel) 2071- 2100 RCP8.5**
Innsbruck/ Universität (578 m)	9,3 °C	882 mm	**13,5**	**939 mm**
Rinn (900 m)	7,1 °C	892 mm	**11,3**	**950 mm**
Patscherkofel (2246 m)	0,3 °C	871 mm	**4,5**	**928 mm**

Aus Mangel an vorhanden Messstationen wurden auf Basis der Werte aus Tabelle 6 für zwei weitere Punkte im Untersuchungsgebiet, Heiligwasser (1200 m) und Igler Alm (1500 m) die aktuellen Werte, sowie die der erwarteten Werte unter dem RCP 8.5 durch den Bearbeiter berechnet. Dabei wurde die aktuelle Jahresmitteltemperatur für die jeweiligen Geländepunkte über der Temperaturabnahme (Temperaturgradient) von -0,7°C/ 100 m Seehöhe berechnet. Die aktuellen Jahresmittel- Niederschläge wurde als Mittel der Werte der drei Messstationen Innsbruck/ Universität, Rinn und Patscherkofel berechnet. Durch diese Berechnungen wurde der Informationsgrad für die Schutzwaldbewertung auf den Probeflächen erhöht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 ersichtlich:

Tabelle 6: Berechnete Jahresmittelwerte für Temperatur und Niederschlag für die Geländepunkte im Untersuchungsgebiet Heiligwasser (1200 m), Igler Alm (1500 m) für aktuell und unter dem Klimawandel- Szenario RCP8.5 für die Periode 2071- 2100.

Ort	Temperatur aktuell (Jahresmittel)	Niederschlag aktuell (Mittlere Jahressumme)	**Temperatur (Jahresmittel) 2071- 2100 RCP8.5**	**Niederschlag (Jahresmittel) 2071- 2100 RCP8.5**
Heiligwasser (1200 m)	5,0 °C	882 mm	**9,2 °C**	**939 mm**
Igler Alm (1500 m)	2,9 °C	882 mm	**7,1 °C**	**939 mm**

3.1.4 Geologie

Das Untersuchungsgebiet Patscherkofel wird größtenteils von den unterostalpinen Gesteinen des Innsbrucker Quarzphyllits (IQP) aufgebaut. Im Kamm- und Gipfelbereich des Patscherkofel bis zum Glungezer überlagern mittelostalpine Gesteine des Patscherkofelkristallins (Stubaikristallin) den Innsbrucker Quarzphyllit. Auflagernd auf dem Festgestein treten östlich der Sill und im Bereich des sogenannten Mittelgebirges Terrassensedimente auf.

Der Innsbrucker Quarzphyllit zeigt nördlich des Patscherkofel eine phyllitische Ausprägung mit Einschaltungen von Grünschiefern, Para- und Orthogneiskörpern und Marmoren. Der mittlere Bereich, geprägt durch höhere Metamorphosebedingungen, weist Glimmerschiefer und Granatglimmerschiefer mit lokalen Gneis-, Quarzit-, Amphibolit- und

Chloritschiefereinschaltungen auf vgl. (Nowotny 1996; Rockenschaub 1996, 1998; Kolenprat 1998). Erklärt werden können die unterschiedlichen Metamorphosebedingungen des weiteren Umfelds durch eine große liegende Isoklinalfalte (Abtauchen der Achsenebene nach N bis NW), deren aufrechter Schenkel im Bereich des Untersuchungsgebietes liegt. Der Faltenkern wird von den höhermetamorphen Gesteinen gebildet, an den im Südende des Untersuchungsgebietes der schwächer metamorphe, inverse Liegenschenkel anschließt (vgl. (Rockenschaub 1996).

Auf dem aufrechten Faltenschenkel des IQP liegt die Deckscholle des Patscherkofelkristallins (Stubaikristallin), hauptsächlich bestehend aus unterschiedlich ausgeprägten Glimmerschiefern, Quarziten, Gneisen und Amphiboliten, auf. Die Grenze zum unterliegenden IQP ist aufgrund der teilweise ähnlichen Ausprägung der Gesteine nicht immer klar erkennbar (vgl.(Kolenprat 1998, 2000; Rockenschaub 1996).

Der Untersuchungsbereich ist durch diverse Gebirgsbildungsprozesse stark geprägt, die neben einer sehr starken Verfaltung zur Ausbildung etlicher Störungs- und Kluftsysteme geführt haben. Diese sind u.a. durch die relativ jungen Abschiebungs- und Bruchtektonik (Brennerabschiebung), welche vor allem im Westen des Untersuchungsgebietes erkennbar sind, gekennzeichnet. Die quartären Sedimente sind in den Talbereichen des Wipptales und im Bereich des Mittelgebirges durch Moränenablagerungen und darauf aufliegenden Terrassensedimenten vertreten (Nowotny 1996).

Eine geologische Karte des Untersuchungsgebietes ist in Abbildung 22 im Appendix enthalten.

3.1.5 Geomorphologie

Die Geomorphologie ist neben der geologisch-/ tektonischen Situation von der Gletschertätigkeit geprägt. Vorwiegend in den Karbereichen sind Moränenauflagen und reliktische Blockgletscher erhalten. Die flach ausgeprägten Tal- bzw. Mittelgebirgsbereiche (Inntal, Wipptal) werden von Terrassensedimenten aufgebaut, in die sich im Bereich des Wipptales die Sill eingeschnitten und damit das Gebirge wiederum freigelegt hat. Teilweise sind noch Terrassenkanten (alte Ufererosion der Sill) erhalten. Durch die erodierende Wirkung des Gletschers entstanden zudem übersteilte Talflanken, die nach Abschmelzen der Gletscher über weite Bereiche mit großräumigen Kriechbewegungen (Talzuschübe) auf das Fehlen des stützenden Hangfußes reagiert haben. Verstärkt wird diese Situation durch die tektonische Auflockerung des tieferen Untergrundes im Talbereich in Form von Brennerabschiebung und Inntalstörung. Die durch Talzuschübe geprägten Hänge des Patscherkofels an seiner Nord- und Westseite weisen in den oberen Regionen ausgedehnte Zerrungszonen (etliche Spaltensysteme) auf. Die unteren Bereiche zur Sillschlucht und zur Sillschlucht und zum Inntal bilden eine Druckzone aus, die durch die Übersteilung vermehrte Quellaustritte aufweist und durch aktuelle Gleit- und Sturzprozesse geprägt sind. Aktuelle Prozesse können hauptsächlich in den Einhangbereichen der Sillschlucht im Stirnbereich der großen Talzuschübe beobachtet werden (Sönser und Ploner 2019).

3.1.6 Naturgefahrenprozesse im Untersuchungsgebiet

Die Grundlage für die flächige Ausweisung des Naturgefahrenpotentials bildet die flächendeckende Kartierung **(Prozesskarte)** der aktuellen und reliktischen morphodynamischen Prozesse bzw. der Hinweise auf derartige Prozesse. Die Erhebung erfolgte durch Interpretation von Echtfarbluftbildern. Die Gesamtauswertung der Daten und Erstellung der Naturgefahrenprozesskarte wurden durch das Ingenieurbüro **i.n.n.**, mit dessen Zusammenarbeit diese Masterarbeit entstand, erstellt und die Informationen daraus für die Arbeit herangezogen und daher nicht vom Autor selbst erstellt. Dennoch soll im Folgenden die Methodik dazu beschrieben werden:

Einführend wurden entsprechend Bunza (1982) drei übergeordnete Prozessgruppen mit anschließend weiterer Untergliederung festgelegt:

- Massenschurf
- Übergangsbereich- quasiviskoses Fließen
- Massenselbstbewegungen

Diese wurden bereits im Kapitel 2.1 ausführlich beschrieben. Bei Massenschurf wurde zwischen Schurf durch Wasser, Schnee und Massenbewegungen unterschieden. Der Übergangsbereich beinhaltet die Gebiete mit Hinweisen auf Murenentwicklungen. Am intensivsten wird der Bereich Massenselbstbewegungen untergliedert. Charakteristische Hinweise auf Stürzen (Bruchnischen und Ablagerungsmassen von Fels- und Bergstürzen), Gleiten (Anbruchsflächen und Ablagerungen von Rutschungen) und Fließ- und Kriechprozesse (Talzuschübe mit Spalten und Nackentälern, Stauchwülsten und Stirnrutschungen; Gletscher) wurden in der Datenbank festgehalten und der jeweilige Prozessbereich kartografisch definiert.

Für die unterschiedlichen Prozesstypen werden generelle Hinweise zur Unterschneidung des Aktualitätsstandes nach folgenden Kriterien ausgewertet:

- Als **„aktuell“** wird ein Prozess dann eingestuft, wenn es sich um eine nachweisliche aktive Erscheinungsform handelt oder der Erhaltungszustand seiner Merkmale und Spuren als frisch bezeichnet werden kann. Dabei sind Kriterien wie frische Ablösespuren in der Felswand, unbewachsene frische Sturzschutthalden, offene Anbruchsflächen, Risse oder aufgelöste Stirnbereiche, frische Rutschmassen etc. sowie vorhandene Messdaten aus Beobachtungssystemen ausschlaggebend.

- Als **„alt“** werden die Prozesse dann bezeichnet, wenn ihr Zustand als inaktiv, abgeschlossen oder fossil beschrieben werden kann und der Anbruchbereich (Abriss und Gleitfläche) verwittert und/oder mit Vegetation bedeckt ist.

- Innerhalb der Prozessgruppe Kriechen/ Fließen wird zusätzlich noch die Aktualitätsstufe **„alt, vermutet“** berücksichtigt. Damit können Flächen belegt

werden, wo aufgrund der geologisch- tektonischen und morphologischen Verhältnisse Bewegungen vermutet werden.

Die Prozessauswertung aus den Echtfarbluftbildern wurden mit Hilfe der Programme **ArcView GIS** (ESRI Version 3.3; mit firmeneigener Programmerweiterung) und **ArcMap** (Version 10.6.1) durchgeführt. Der Zielmaßstab 1:25.000 bedingt, dass für Prozesse eine Mindestausdehnung von 250 m in einer Richtung gegeben sein muss, um erfasst zu werden. Damit wird einerseits gewährleistet, dass die kartographische Darstellung im regionalen Maßstab „lesbar“ und der personelle und finanzielle Aufwand für die Kartierung und Weiterbearbeitung der Daten in vertretbarer Höhe bleibt. Für das Untersuchungsgebiet ergeben sich daher folgende Prozessbereiche (vgl. Prozesskarte Abb. 20, Appendix):

Wie bereits im Kapitel 3.1.5 bereits beschrieben ist das Untersuchungsgebiet durch einen tiefgreifenden Talzuschub und den damit verbunden Folgen geprägt. Durch die ausgeprägten Nackental- und Spaltenbildungen (ersichtlich im Übergangsbereich zum südlich gelegenen Viggartal) entsteht im Oberhang kaum Oberflächenabfluss, wodurch auch kaum Grabenbildungen erkennbar sind. Der aktuelle Hauptprozess ist hier der Massenschurf durch Wasser. Die Detailprozesse sind Grabenentwicklungen, welche als Folge des Transportprozesses über Tiefen- und Seitenerosionen erfolgen und sich in den Bereichen des Igler- Almgraben- sowie am Lansergrabenbach auftreten.

Die unteren Hangbereiche zur Sillschlucht und zum Inntal bilden eine Druckzone aus, die durch Übersteilung vermehrte Quellaustritte aufweist und durch aktuelle sowie alte Gleit- und Sturzprozesse geprägt ist. Aktuelle Prozesse können hauptsächlich in den Einhangbereichen der Sillschlucht im Stirnbereich der großen Talzuschübe beobachtet werden. Beispiele sind hierbei die Sturzprozesse oberhalb der Igler Landesstraße, oder auch stellenweise Senkung der Straße selbst. Die Massenschürfe durch die Sill, d.h. ihre Tiefen- und Seitenerosion dienen zudem als vorbereitende Kräfte und auslösende Faktoren für Massenbewegungen (Abtrag des Stützfußes) im Untersuchungsgebiet und als Bildner von Feststoffherden für das Wildbachgeschehen (vgl. dazu Kap. 2.1). In den Steilbereichen des ganzen Untersuchungsgebietes kann es lokal zu Lawinen, Schneegleiten oder Schneerutschen kommen. Daher zeigt sich deutlich die wichtige Rolle der Prozessprävention der Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet.

3.1.7 Gewässer

Das Untersuchungsgebiet Patscherkofel entwässert über den Viller Bach (gebildet aus Igler- Alm- Graben- Bach, Lanser- Graben- Bach, Lanser- See- Bach), welcher in den Vorfluter Sill einfließt. Die Sill, aus dem Wipptal kommend, mündet bei Innsbruck in den Vorfluter Inn.

3.1.8 Forstliche Charakterisierung

3.1.8.1 Wuchsgebiet, Relief, Höhenerstreckung

Die Wälder des Untersuchungsgebietes unterhalb von 1000 m Seehöhe, das sind v.a. jene in den Bereich der Katastralgemeinde Vill, liegen im Bereich des Wuchsgebietes „2.1 Nördliche Zwischenalpen“. Die Übrigen Bereiche (Patsch, Lans, Igls) liegen in den Übergangsbereichen zwischen 2.1 und „1.2 Subkontinentale Innenalpen“. Klimatisch stellt dieser Bereich den Übergang vom kontinental getönten Gebirgsinnenklima zum subkontinentalen Innenalpenbereich bzw. kühl humiden Randalpen dar.

Die Höhenerstreckung reicht von ca. 600 m ü. N.N. (Niveau des Sill- Flusses im Bereich Autobahnbrücke Bergisel) bis zum Gipfel des Patscherkofels (2246 m). Sie reicht somit von der submontanen bis zur hochsubalpinen Höhenstufe (nach: (Kilian et al. 1993)). Das Relief reicht von eben bis sanft bis stark geneigt mit einzelnen Felsköpfen (Anonymous 2007, 2010c, 2010b, 2015, 2011).

3.1.8.2 Vorkommende Bodentypen

Im hochmontanen und subalpinen Wald sind die vorherrschenden Bodentypen saure bis podsolige Braunerden. Über der derzeitigen Waldgrenze im Bereich der Gipfelkuppe befinden sich stark saure Braunerden die laut Anonymous (2016) auf eine ehemals höher liegende Waldgrenze hinweisen, sowie Eisenhumuspodsole (Anonymous 2016a). Im Bereich von Lans und Vill treten auf Hangschuttdecken auch Rohböden (Ranker) auf. Aufgrund der schwer zersetzbaren Nadelholzstreuauflagen bilden sich besonders in kälteren, schattigen Lagen mächtige Rohhumusdecken heraus. Je nach Intensität der Beerensträucher, Besenheide und Alpenrose bilden sich unterschiedlich starke Rohhumusauflagen (Anonymous 2011, 2007, 2010c, 2010b, 2015).

3.1.8.3 Forstliche Charakterisierung

Das Untersuchungsgebiet wird zu Teilen durch die *Agrargemeinschaft Lans, Agrargemeinschaft Patsch, Agrargemeinschaft- Waldinteressenschaft Igls, der Gemeinde Sistrans, sowie* der *Agrargemeinschaft- Gemeinschaftswald Vill* verwaltet. Die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes beträgt 1000 Hektar, davon sind 599 Hektar Wald. Die Flächenanteile [ha] der Eigentümer im Untersuchungsgebiet sind in Tabelle 8 angegeben :

Tabelle 7: Die Waldkategorien mit ihren jeweiligen Flächenanteilen [ha] der Eigentümer für das Untersuchungsgebiet. Für die Kategorien „Schutzwald außer Ertrag (= SaE)“ und „Schutzwald im Ertrag (= SiE)“ wurden Standortschutzwald und Objektschutzwald zusammengefasst. Als Wirtschaftswald wurde v.a. auf Hängen von unter 60 % Neigung ausgeschieden, auch leichte Blockstandorte sowie mäßig vernässte Standorte wurden dieser Kategorie zugewiesen (SW= Schutzwald) (Anonymous 2019a).

Flächen nach Waldkategorie [ha]	**Innsbruck**	**Lans**	**Patsch**	**Sistrans**	**Summe**
Nichtholzbodenflächen	6,9	3,9	0,1	0,2	11,1
SaE (Standortschutzwald + ObjektSW)	31,6	44,9	5	0	81,3
SiE (Standortschutzwald + ObjektSW)	47,1	62,1	0	0	109,1
Wirtschaftswald	170,6	124,3	0	4,3	299,2
Wirtschaftswald- mittlere Schutzfunktion	56,2	40,7	0	0	96,9
Gesamt	**312,4**	**275,9**	**5,1**	**4,5**	**597,6**
Anteil in %	**52,3**	**46,1**	**<1%**	**<1%**	**100,0**

Von diesen 597,6 Hektar sind 190,6 Hektar Schutzwald (SaE + SiE), das entspricht einem Anteil von 32%. Die Stadt Innsbruck mit ihren Katastralgemeinden ist mit einem Gesamtanteil von 52 % der größte Bewirtschafter im Untersuchungsgebiet.

Die Leitgesellschaft in der submontanen und montanen Stufe bilden Fichten- und Fichten-Tannenwälder, wobei hier häufig anthropogen- bedingte Fichtenersatzgesellschaften zu finden sind. Die Tanne wurde durch die Förderung der Fichte und dem hohen Wilddruck zunehmend verdrängt. Entlang von Bachläufen, Lawinenzügen und in talnahen Waldbeständen treten Laubwaldgesellschaften mit bspw. Bergahorn, (Grau-) Erlen, Bergulmen, Buche, Eichen und Eschen auf. Im tiefsubalpinen Bereich dominiert der Fichtenwald, an den der hochsubalpine Lärchen- Zirbenwald anschließt. Im Gipfelbereich befindet sich die Krummholzzone bestehend aus Latschen und Grünerlen, welche häufig durch Lawinen beeinflusst sind. Besonders dem Wind exponierte Latschen und Grünerlen besitzen eine verkümmerte Wuchsform.

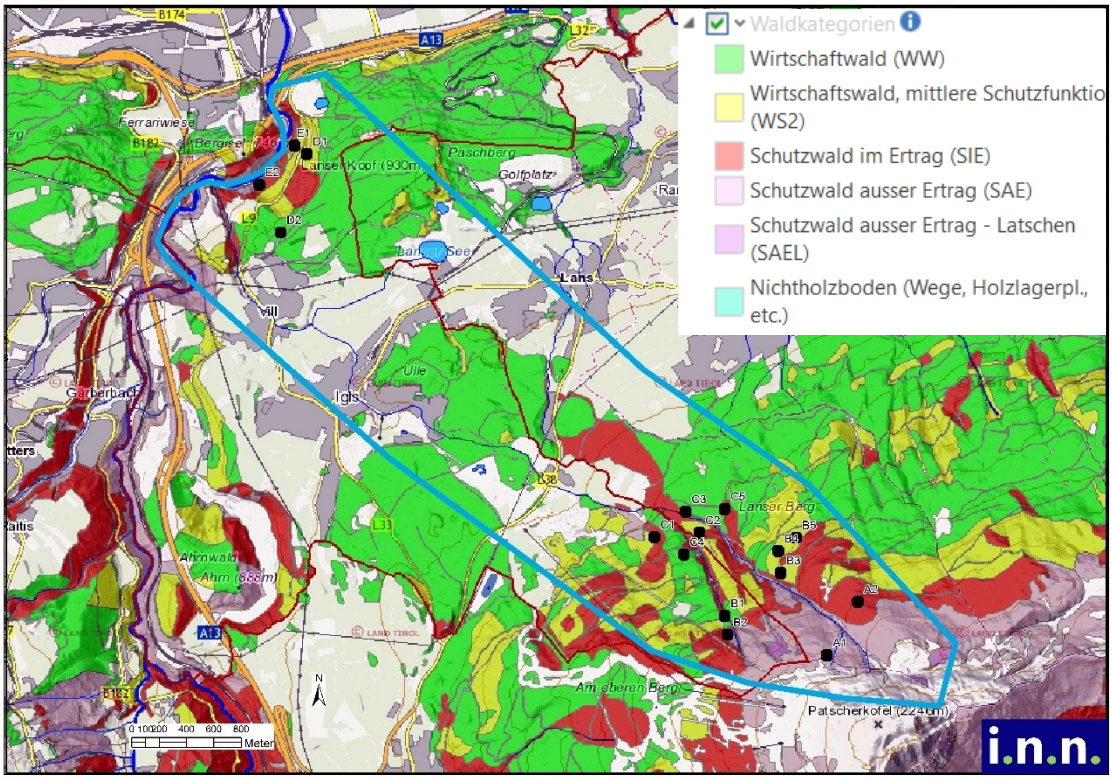


Abbildung 13: Karte der Waldfunktionen im Untersuchungsgebiet mit den Probeflächen (schwarz). Mit Ausnahme der Probefläche D2 befinden sich alle Probeflächen auf ausgewiesenen Beständen mit Schutzfunktion (siehe Legende). Die Fläche D2 wurde aufgrund ihrer vorgelagerten Rolle der Schutzfunktion für die Sill- Schlucht in diesem Bereich ausgewählt. (N.N. 2019c).

Die derzeitige Bewirtschaftung im gesamten Untersuchungsgebiet orientiert sich vor allem an der Nutzfunktion. Dabei werden die im Mittel- und Oberhang durch Forststraßen erschlossenen Flächen durch Kahlschläge bewirtschaftet.

3.1.9 Nutzungsansprüche und Tourismus

Neben der forstlichen Nutzung hat das Untersuchungsgebiet auch noch eine hohe Erholungsnutzung u.a. für Wanderer, Radfahrer, Skitourengeher und Skifahrer. Diese kommen seit 1928 mit der Patscherkofel- Gondelbahn bis unterhalb des Gipfels. Die neue 10er Gondelbahn ist seit 2017 in Betrieb. Demzufolge charakterisieren Pistenanlagen das Erscheinungsbild des Berges, welche sich zum Teil mit dem Untersuchungsgebiet überschneiden (Anonymous 2010a, 2019b).

Landwirtschaftlich wird der Berg ebenso genutzt und es befinden sich mehrere Almen im Gebiet. Talseitig sind weitere landwirtschaftliche Flächen bzw. Betriebe zu finden.

3.2 Methoden zur Bewertung der Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet

Eine zentrale Erkenntnis der Literaturrecherche ist, dass sich das Klima bis zum Ende des Jahrhunderts hin deutlich erwärmt und es zu dadurch zu markanten Auswirkungen auf den Gebirgswald und seine Schutzwirkung auch im Untersuchungsgebiet kommen wird. Es kann derzeit nicht mit ausreichender Sicherheit gesagt werden, wie und ob sich Naturgefahrenprozesse in ihrer Frequenz und Magnitude im Laufe der erwarteten Klimaerwärmung verändern werden (vgl. Kap 2.2.3.3). Daher wird in der vorliegenden Masterarbeit davon ausgegangen, dass sich die Naturgefahrenprozesse für das Untersuchungsgebiet im Beobachtungszeitraum im Laufe des Klimawandels nicht wesentlich verändern werden. Jedoch wird erwartet, dass der Klimawandel den Schutzwald im Untersuchungsgebiet und seine Bewirtschaftung verändern wird. Es ergeben sich dafür Arbeit folgende zu beantwortende Fragestellungen:

1) Beeinflussen die durch den Klimawandel ausgelösten Änderungen in den Wäldern des Untersuchungsgebietes auch deren Schutzwirkung?
2) In welchen Bereichen kann sich die Schutzleistung am stärksten verändern?
3) Kann durch eine prozess- und klimawandelorientierte Adaptionsstrategie die Schutzfunktion dieser Wälder aufrechterhalten werden bzw. verbessert werden?

Daher sollen ausgewählte Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet Patscherkofel mit Hilfe der Wegleitung „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS)“ (Frehner et al. 2005) auf ihre aktuelle Schutzfunktionalität hin überprüft und dabei ihre Entwicklung unter den erwarteten Folgen des Klimawandels bewertet werden. Auf Basis dieser Bewertung soll Adaptionsstrategien (Handlungsempfehlungen) vorgeschlagen werden, um die Schutzwälder „klimafit“ zu machen.

Da die Methode nach **NaiS den Faktor Klimawandel** für die Waldentwicklung (in 10 Jahren und in 50 Jahren) **nicht berücksichtigt**, wird diese Methode mit einer Einschätzung der Entwicklung der Schutzwaldbestände (in 10 Jahren und in 50 Jahren) unter dem Klimawandel erweitert. Diese Einschätzung auf den Klimawandels erfolgt auf Basis der in den vorderen Kapiteln erläuterten Literaturauswertung. Anschließend wird je ein Handlungsbedarf (nach NaiS und Klimawandel) daraus abgeleitet. Schlussendlich kommt es zu einer Gesamtbeurteilung und Kombination der beiden Handlungsbedarfe für die jeweilige Probefläche. Es wird erwartet, dass durch diese Bewertung die Dringlichkeit für Klimawandel- aktive Bewirtschaftung (z.B. Erhöhung der Baumarten- und Strukturvielfalt) dieser Wälder aufgezeigt wird, um so die Schutzfunktionalität der Schutzwaldbestände am Patscherkofel nachhaltig zu sichern.

3.2.1 Die Schutzwaldbewertung nach NaiS

Die allgemeine Bewertung der Schutzfunktionalität basiert auf der Wegleitung bzw. Vollzugshilfe „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald“ (in Folge: NaiS) von Frehner et al. (2005). NaiS ist ein Instrument für die Praxis und wurde in Zusammenarbeit von Forschern und Praktikern in der Schweiz entwickelt. Ziel dieses Instruments ist es, einen nachhaltig wirksamen Schutzwald mit minimalem Aufwand sicherstellen zu können. „Gestützt auf die Annahme, dass der Waldzustand entscheidend ist für die Wirkung des

Waldes gegenüber Naturgefahren, werden waldbauliche Anforderungsprofile für die verschiedenen Waldstandorte beschrieben.“ (Frehner et al. 2005). Nach den Autoren besteht das Ziel der nachhaltigen Schutzwaldpflege demnach darin, „den Wald in einen Zustand zu bringen, bei dem die Wirkung auf die Gefahrenprozesse möglichst groß und das Risiko von Schadensereignissen möglichst gering wird. Der angestrebte Waldzustand orientiert sich an den Kenntnissen über Naturgefahren und über lokale Standortverhältnisse.“ Dafür werden sogenannte Anforderungsprofile angelegt. Die Anforderungsprofile setzen sich aus den Merkmalen Baumartenmischung, Gefüge, Stabilitätsträger und Verjüngung zusammen.

3.2.1.1 Die Herleitung des Handlungsbedarfs für die Schutzwaldbestände

Die Herleitung des Handlungsbedarfs für die Schutzwaldbestände erfolgt durch den Vergleich des gegenwärtigen Waldzustandes mit dem Anforderungsprofil (Minimalprofil und Idealprofil). Das Minimalprofil ergibt sich aus der minimalen Anforderung auf Grund der Naturgefahr(en) und der minimalen Anforderung auf Grund des Standorttyps. Beim gegenwärtigen Waldzustand wird zusätzlich eine Prognose für die Entwicklung ohne Eingriffe (und ohne Berücksichtigung des Klimawandels) während der nächsten 10 und 50 Jahren getätigt. Es ist somit ein Soll- Ist- Vergleich und wird für alle wichtigen Bestandesmerkmale durchgeführt. **Es besteht Handlungsbedarf, wenn der erwartete Waldzustand schlechter ist als das festgelegte Minimalprofil.** Die Herleitung des Handlungsbedarfes erfolgt dabei auf sogenannten Weiserflächen (Frehner et al. 2005) (vgl. Abb.15).

Die Anforderungsprofile beschreiben Waldzustände, die eine hohe Schutzwirkung gegenüber Naturgefahren erwarten lassen. Sie setzen sich dabei aus den minimalen Anforderungen auf Grund der Naturgefahr(en) und aus den minimalen Anforderungen auf Grund des Standorttyps zusammen (vgl. Abb. 16). Die Profile geben Auskunft über die Anforderungen an den Bestand (Mischung, Gefüge, Stabilitätsträger), an die Verjüngung (An- und Aufwuchs) und an das Keimbett. Frehner et al. (2005) geben dabei zwei Anforderungsprofile an. Einerseits das langfristige Waldbauziel (Idealprofil) und zum anderen einen Richtwert für den Handlungsbedarf (Minimalprofil).

Eine weitere Komponente der Anforderungsprofile ist die **Anforderung auf Grund des Standortstyps**. Dabei wird angenommen, dass Naturwald- nahe Wälder die stabilsten Wälder darstellen. Je anthropogener beeinflusst (z.B. homogene sekundäre Fichtenbestände), umso anfälliger sind sie gegenüber Störungen (z.B. Wind und anschließender Borkenkäferbefall).

Die **Anforderungen auf Grund der Naturgefahr(en)**: hier wird angegeben, welche minimalen Anforderungen an den Bestand gestellt werden, damit die Auswirkungen gravitativer Naturgefahren verhindert, oder möglichst vermindert werden. Hier sind vor allem Stammzahl, Lückengröße und Deckungsgrad wichtig. Die genauen Anforderungen auf Grund der Naturgefahr(en) sind dem Anhang 1 der Arbeit von Frehner et al. (2005) zu entnehmen.

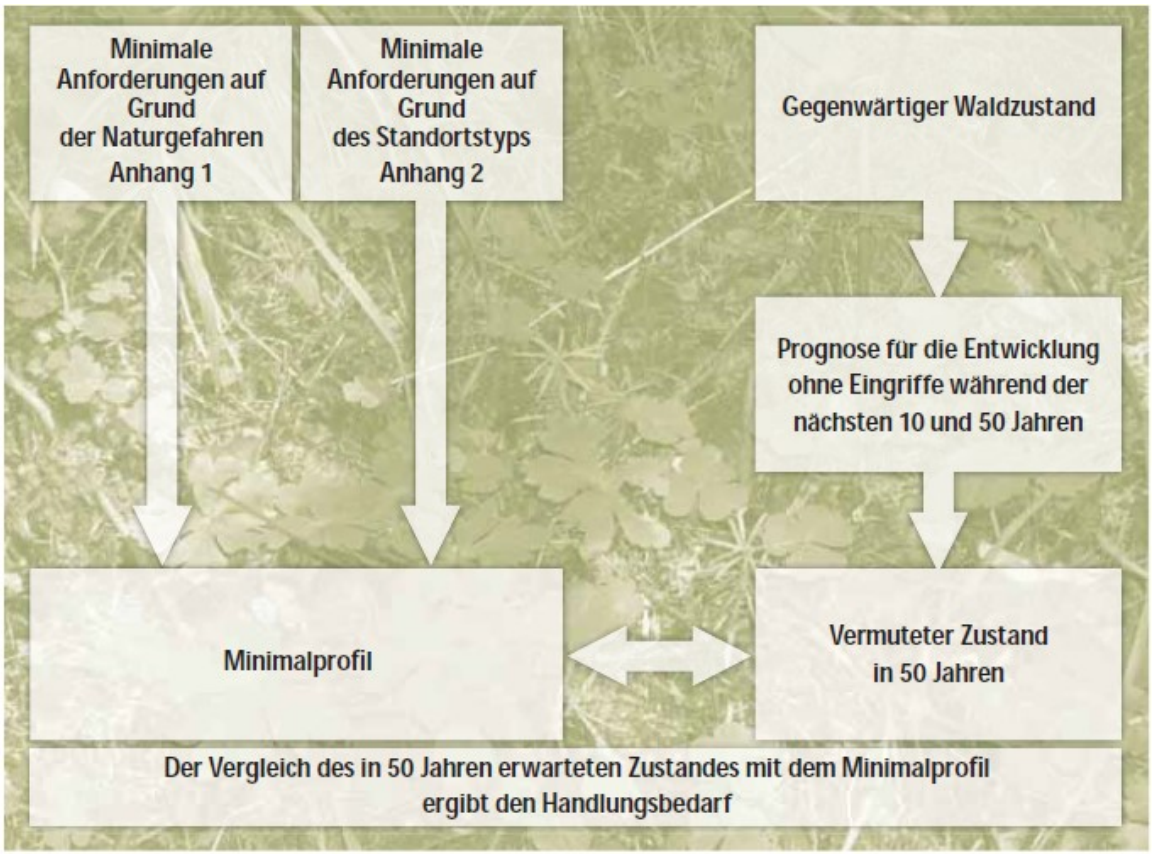


Abbildung 14: Herleitung des Handlungsbedarfs für die Weiserflächen nach der Methode NaiS (Frehner et al. 2005).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich das **Minimalprofil** aus den Anforderungen (minimal) an die Naturgefahr und aus den Anforderungen (minimal) an den Standortstyp zusammensetzt. Das Minimalprofil ist somit ein Soll- Wert (Messlatte) nachdem sich ein Handlungsbedarf ableiten lässt.

Das **Idealprofil** wiederum setzt sich dementsprechend analog dazu aus den Anforderungen an die Naturgefahr(en) (ideal) und an die Anforderungen an den Standortstyp (ideal) zusammen. Das Idealprofil ist somit ein Referenzwert und beschreibt einen Waldzustand, der langfristig die höchste Schutzwirkung erwarten lässt.

Auf der Weiserfläche (siehe 4.3) wird der gegenwärtige Waldzustand beurteilt, eine Prognose für die Entwicklung ohne Eingriffe während der nächsten 10 und 50 Jahre getätigt. Ein Vergleich des vermuteten Waldzustands in 50 Jahren mit dem Minimalprofil ergibt den Handlungsbedarf.

3.2.2 Auswahl der Untersuchungsbestände (Weiserflächen)

Um festzustellen, welches Anforderungsprofil an den Schutzwald auf Grund der Naturgefahrenprozesse gestellt werden soll, wurden zunächst die maßgebenden Naturgefahrenprozesse für das Untersuchungsgebiet in Form einer Prozesskarte dargestellt. Diese Prozesskarte (vgl. Kap. 3.1.6) diente gleichzeitig zur Auswahl der Probeflächen (Weiserflächen).

Auf Basis Naturgefahrenprozesskarte wurde die Auswahl der Untersuchungsbestände getroffen. Ziel war es die Untersuchungsbestände in Bereiche mit „aktivem“ Prozessgeschehen zu legen und dort die Schutzfunktionalität zu bewerten. Die Auswahl erfolgte GIS unterstützt und orientierte sich dabei nach den Vorgaben von NaiS. Die Anforderungsprofile gelten nicht nur für einen Einzelbestand, sie können auch auf größere Flächen mit vergleichbaren Verhältnissen projiziert werden. Demnach gehören alle Flächen mit einem gleichen Anforderungsprofil (Standortstyp und Naturgefahrenprozess), zum gleichen **Zieltyp** (z.B. „Fi/Ta- Wald mit Naturgefahr Rutschung/ Erosion/ Murgang“). Die Informationen für den Standortstyp wurden dabei von der Waldtypisierung Tirol herangezogen (Anonymous 2019c). Da im Anhang 2C im NaiS (Frehner et al. 2005) eine etwas andere Bezeichnung für die Standorttypen vorzufinden war, wurden die dementsprechenden Äquivalente zu den Standortstypen nach der Waldtypisierung ausgewählt (vgl. dazu Tab. 12, Appendix).

Innerhalb dieses Zieltyps werden in weiterer Folge **Behandlungstypen** ausgewiesen. Diese sind Bestände, die sich in einem ähnlichen Zustand befinden und eine gleiche Behandlung erfordern (z.B. Fichten- Tannen- Wald im Stangenholz). An die Auswahl der Ziel- und Behandlungstypen anschließend wurden für die Behandlungstypen die Probeflächen (≙**Weiserflächen**) ausgewählt, für die der Handlungsbedarf hergeleitet wurde. Eine Weiserfläche ist laut Frehner et al. (2005) eine „repräsentative Fläche für einen Behandlungstyp. Im allgemeinen Sprachgebrauch der Arbeit wird der Begriff Probefläche verwendet. Die Flächengrösse [sic] ist abhängig von der Homogenität des Bestandes (1/2 bis 1 ha).“ Vgl. dazu Abb. 15 unten. Sinn und Zweck dieser Weiserflächen ist es, einerseits die gewonnenen Erkenntnisse auf alle Flächen des repräsentierten Behandlungstyps projizieren zu können und andererseits dienen sie einer späteren Erfolgskontrolle. Diese Erfolgskontrolle wird aber für diese gegenständige Masterarbeit ausgeklammert und soll zu einem späteren Zeitpunkt mit den Waldeigentümern unter der Leitung der Landesforstinspektion weitergeführt werden.

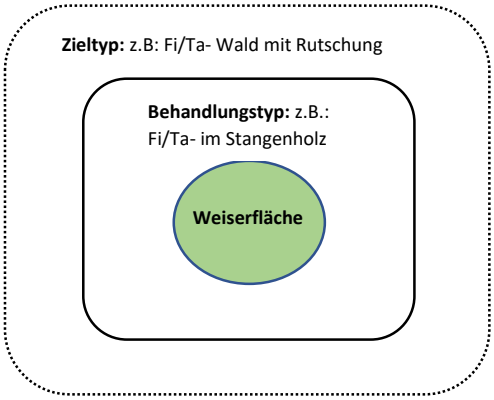


Abbildung 15: Arbeitsschritte zur Auswahl der Weiserflächen.

Im Untersuchungsgebiet sind die maßgebenden Naturgefahrenprozesse. **Rutschungen, Erosionen und Murgänge.** Dabei treten Stirnrutschungen und Sturzprozesse aus der tiefgreifenden Massenbewegung vor allem in den Grabenbereichen des Igler- Alm-

Graben, Lanser- Graben und im Bereich der Sill- Schlucht auf. In diesen Bereichen gibt es naturgemäß eine Vielfalt von Standortstypen. Die Standortsinformationen standen flächendeckend für das Gebiet zur Verfügung (Anonymous 2019c). Dadurch entstehen viele Zieltypen. Eine Überlagerung mit den Wuchsklassen des Gebietes (Anonymous 2019d) ergibt eine sehr große Anzahl von Behandlungstypen. Deshalb wurden Standorttypen mit ähnlichen Baumartenmischungen und Wuchsbedingungen zusammengefasst. Insgesamt wurden für das Untersuchungsgebiet **5 Zieltypen, 16 Behandlungstypen** und somit **16 Probeflächen** (≙**Weiserflächen**) ausgeschieden (vgl. Tab.5, Appendix). Die fünf Zieltypen sind Zirben- und Lärchenwälder, Subalpiner-Fichtenwald, Fichten- Tannenwald und Fichtenwälder, im Bereich der Sill finden sich Buchenmischwälder der submontanen Stufe und Laubwälder der collinen Stufe. Die Behandlungstypen wurden nach Wuchsklasse (Altholz, Baumholz, Stangenholz, Dickung, ungleichaltrig) ausgewählt. Eine Übersicht über die 5 Zieltypen und den 16 Probeflächen ist in Abb. 19 ersichtlich.
Des Weiteren wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass die Probeflächen von der Gipfelregion bis zur Sill- Schlucht gleichmäßig über die **Höhenstufen** verteilt sind. Um einerseits bei der Datenauswertung die Klimawirkung über die verschiedenen Höhenstufen einschätzen zu können und andererseits das Schutzwirkungsspektrum der Bestände von oben nach unten besser abschätzen zu können. Es ergibt sich somit ein Transekt (Tab. 8). Denn es wird angenommen, dass es für die Prävention des Talzuschubs und der Rutschungen im Untersuchungsgebiet wesentlich ist, dass bereits in den Hochlagen der Niederschlagseintrag durch den Schutzwald verdunstet und/ oder retentiert wird, um so einem erhöhtem Hangwasserzug zur Sill hin entgegenzuwirken. Das Untersuchungsgebiet wurde in drei Höhenzonen unterteilt:

Tabelle 8: Lage der Probeflächen über die Höhenzonen und im Text verwendete Synonyma.

Höhenzone im Untersuchungsgebiet	**Höhenbereich [m]**	**Höhenstufen nach (Kilian et al. 1993)**	**Synonyma**	**Probeflächen**
1	1400- 2000	hochmontan, tiefsubalpin	Oberhang	A1, A2, B1-B5
2	1000- 1399	mittel-hochmontan	Mittelhang	C1-C5
3	650- 999	submontan	Unterhang	D1, D2, E1, E2

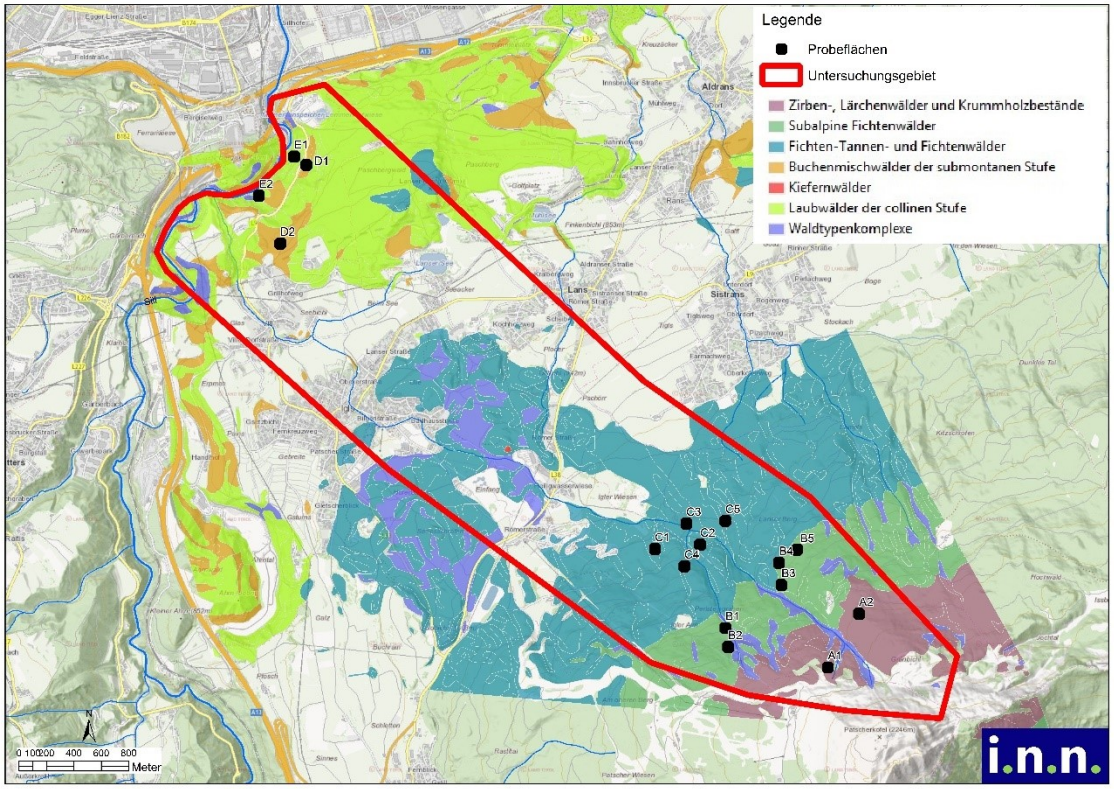


Abbildung 16: Die fünf zusammengefassten Zieltypen im Untersuchungsgebiet: Zirben-, Lärchenwälder und Krummholzbestände (lila; Probeflächen A1, A2), subalpine Fichtenwälder (grün; Probeflächen B1- B5)), Fichten-Tannen und Fichtenwälder (petrol; Probeflächen C1- C5), Buchenmischwälder der submontanen Stufe (orange; Probeflächen D1, D2) und Laubwälder der kollinen Stufe (hellgrün; Probeflächen E1, E2). Zur Vollständigkeit sind Kiefernwälder und Waldtypenkomplexe angegeben. (N.N. 2019c)

3.3 Herleitung des Handlungsbedarfs auf der Probefläche

Nach vorheriger Bestimmung des Behandlungstyps konnte ein Ideal-, sowie Minimalprofil mit Hilfe eines Excel- Tools (Frehner et al. 2005), welches automatisch in das „Formular 2“ für die jeweilige Probefläche eingetragen wurde, erstellt werden. Das Formular 2 diente somit der Herleitung des Handlungsbedarfs und der Dokumentation der Entscheidungsfindung. Das Minimal- und Idealprofil gab somit die Messlatte für verschiedene Bestandes- und Einzelbaummerkmale vor. Dazu zählten Mischung (Art und Grad), Gefüge vertikal (BHD- Streuung), Gefüge horizontal (Deckungsgrad, Stammzahl, Lückenbreite), Stabilitätsträger (Kronenentwicklung, Schlankheitsgrad, Zieldurchmesser), Verjüngung (Keimbett), Verjüngung (Anwuchs, 10 bis 40 cm Höhe), Verjüngung (Aufwuchs, bis Dickung, 40 cm Höhe, bis 12 cm BHD).

Die zuvor nach den Kriterien bestimmten Probeflächen wurden zunächst im GIS in die Karte eingetragen und im Anschluss im Gelände GPS- unterstützt aufgesucht und die Merkmale (Mischung, Gefüge, Stabilitätsträger etc.) mit dem „Formular 2“ nach Frehner et al. (2005) beurteilt. Die Geländeerhebungen mit der Beurteilung fanden im Herbst 2019

statt, während die Bäume noch im Laub waren. Eine Kontrollbegehung nach Auswertung der Daten wurde im Juni 2020 durchgeführt. Die Herleitung des Handlungsbedarfs wurde für alle 16 Probeflächen erbracht. Des Weiteren wurden die GPS- Koordinaten des Probeflächenmittelpunktes und Meereshöhe mittels Smartphones (Samsung Galaxy J3 2017), die ungefähre Größe (Abschätzung über Schrittmaß), eine Lageskizze der jeweiligen Probefläche angefertigt, sowie eine Fotodokumentation (ebenso mit Smartphone) durchgeführt. Anschließend wurden die Formulare digitalisiert und der weiteren Bearbeitung mittels Microsoft Office im Büro zugeführt.

Zusätzlich wurde eine Prognose für die natürliche (d.h. ohne Eingriffe) Entwicklung in den nächsten 10 und 50 Jahren getroffen, da der Wald naturgemäß auch ohne menschlichen Einfluss einer ständigen Veränderung unterworfen ist. Die prognostizierte Entwicklung wurde durch Pfeile dargestellt. Mit diesem Vorgehen wird die natürliche Dynamik des Waldes beim Entscheid, ob ein Handlungsbedarf nötig ist oder nicht, berücksichtigt. Ist der Zustand in 50 Jahren schlechter als das Minimalprofil, wurden wirksame Maßnahmen vorgeschlagen, um eine Verbesserung des Schutzwaldwirkung zu erreichen. Wurden diese Maßnahmen als verhältnismäßig beurteilt, so besteht Handlungsbedarf. Dieser Handlungsbedarf ist normalerweise an das Minimalprofil ausgerichtet. Handlungsbedarf besteht, wenn alle folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

1. Das Minimalprofil ohne Eingriffe auch langfristig nicht erreicht wird.
2. Wirksame Maßnahmen durchgeführt werden können, die die Bestandesentwicklung in die gewünschte Richtung lenken.
3. Der Aufwand verhältnismäßig ist.

Zur Entscheidung ob Maßnahmen verhältnismäßig sind, können folgende Fragen helfen (Frehner et al. 2005, NaiS, Anhang 04):

- Ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Maßnahme zum Ziel führt, groß?
- Sind mit der Maßnahme große Risiken für Menschen, für Sachwerte oder für den verbleibenden Bestand verbunden?
- Könnte das Ziel mit kostengünstigeren Maßnahmen erreicht werden?
- Übersteigen die Kosten für die Maßnahme die Kosten eines möglichen Schadens?

Durch die Feststellung der Dringlichkeit dient der Prioritätensetzung innerhalb des Projektes. Sie muss nur dort beurteilt werden, wo ein Handlungsbedarf besteht (Frehner et al., 2005, Anhang 04). Die Dringlichkeit wird dabei in „klein“, „mittel“ und „groß“ unterteilt. Hinweise für <u>große</u> Dringlichkeit können sein:

- Eine rasche Verschlechterung bei der Mischung, den Stabilitätsträgern oder beim Gefüge wird erwartet.
- Die Verjüngung fehlt.
- Die Verjüngung ist zwar vorhanden, aber ohne Eingriffe nicht gesichert.
- Das Keimbett ist ungünstig.

Hinweise für <u>kleine</u> Dringlichkeit können sein:

- Bei der Mischung, den Stabilitätsträgern oder beim Gefüge wird keine oder eine langsame Verschlechterung erwartet.
- Verjüngung ist vorhanden und gesichert.
- Das Keimbett ist günstig.

3.4 Erweiterung der Schutzwaldbewertung nach NaiS mit dem Faktor Klimawandel

Neben der klassischen Schutzwaldbewertung nach NaiS, wurde auch eine Bewertung der Schutzfunktionalität unter dem Einfluss eines angenommenen Klimawandelszenarios für jede Probefläche durchgeführt, da NaiS bisher den Faktor Klimawandel nicht explizit berücksichtigt.

Es wird dabei eine langfristige Entwicklung (bis 2100) des Bestandeszustandes ohne forstliche Maßnahmen unter den möglichen Auswirkungen eines Klimawandelszenarios beurteilt. Angenommen wird ein RCP8.5- Szenario, welches von einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur von bis zu 4,2 °C (vgl. Kap. 2.3, Abb. 3) für Tirol ausgeht. Es wird dabei angenommen, dass dieselben Klimaentwicklungen auch im Großen und Ganzen auch für das regional kleinere Untersuchungsgebiet gelten. Eine Beurteilung der Waldentwicklung für den Zeitraum 2050- 2071 scheint für die verwendete Methodik zu ungenau, womit nur der Zeitraum bis 2100 ohne Differenzierung betrachtet wird. Dafür wird der im Rahmen des RCP8.5 Szenarios modellierte Zeitraum 2071- 2100 verwendet. Das „pessimistische“ RCP 8.5- Szenario wurde gewählt um im Sinne eines „Vorsorgeprinzips“ von einem „worst- case“ auszugehen.

Die Beurteilungen der Entwicklung der Bestände unter dem Klimawandel basieren dabei hauptsächlich auf den Arbeiten „PorTree“ (Zimmermann et al. 2016a), und den Klimahüllenmodellen von (Schadauer et al. 2019) sowie ergänzend nach Kölling (Kölling 2007). Diese drei Arbeiten beschreiben die Standorteignung von Baumarten unter zukünftigen Klimaszenarien. Sie unterscheiden sich aber in ihren Ansätzen, in ihrer Modellart, ihrer geographischen Bezugseinheit (Schweiz, Deutschland und Österreich) und in ihrem verwendeten Klimawandelszenario (vgl. Tab. 9). Tirol als geographische Einheit für das Untersuchungsgebiet, weist aktuell ein sehr ähnliches Klima zur Schweiz und zum Alpenbereich Deutschlands auf und somit ähnliche Standortsbedingungen für Baumarten. Die für die Modellierungen verwendeten Klimawandelszenarien gehen von einer ähnlichen Temperaturzunahme bis zum Jahr 2100, wie das RCP 8.5- Szenario für Tirol (Kap. 2.3, Abb. 3). Daher wird angenommen, dass sich die Klimawandel-Auswirkungen auf die Baumarten und Waldbestände in Tirol und im Untersuchungsgebiet ähnlich verhalten, als wie in der Schweiz und im Alpenbereich Deutschlands.

Tabelle 9: Übersicht der für die Klimawandel- Bewertung verwendeten Baumartenverbreitungsmodell unter verschiedenen Klimawandelszenarien.

Autor(en)	Modellart	Verwendetes Klimaszenario bis 2100	Geographische Bezugseinheit	Baumarten
Zimmermann, Normand et al. (2016)	Artverbreitungsmodell	A1B (+4,1°C)	Schweiz (mit Daten aus dem gesamten Alpenraum)	mehrere
Schadauer et al. (2019)	Klimahülle	RCP 8.5 (+4,8°C)	Österreich	Fichte
Kölling (2007)	Klimahüllen	B1 (+1,8°C)	Deutschland	mehrere

Für die Beurteilung der Schutzwaldfunktion unter dem Klimawandel wurde vom Bearbeiter ein eigenes Bewertungsformular, basierend auf dem Formular 2 nach Frehner et al. (2005) entwickelt. Dieses Formular ist im Appendix Abb. 25 angehängt. In diesem Formular wird für die Beurteilung die Flächen- Nummer, die durchschnittliche Hangneigung (< 28° oder >28°), die Seehöhe, die Frage nach dem gefährdeten Seehöhenbereich (unter 1000 m SH gilt als gefährdet, über 1000 m SH als gering gefährdet), das Minimal- und das Idealprofil eingetragen. Minimal- und Idealprofil werden dabei direkt auf Grund des Standorttyps und Naturgefahr von NaiS übernommen und wird für die Bestandes- und Einzelbaummerkmale Mischung (Art und Grad), Gefüge (vertikal-BHD Streuung) und Verjüngung (Keimbett, Lücken) eingetragen. Die Auswahl der Indikatoren wurden ebenso aus NaiS übernommen. Durch diesen Arbeitsschritt ergibt sich ein Soll- Zustand.

Im nächsten Schritt wird für die Merkmale der heutige Zustand (Ist- Zustand) angegeben. Der Ist- Zustand ergibt sich aus der Bestandserhebung vor Ort. Für das Merkmal Mischung (Art und Grad) soll zusätzlich abgeschätzt werden, ob die Baumartenwahl im Bestand an den Klimawandel abgestimmt ist. Die Baumartenwahl ist beispielsweise nicht an den Klimawandel angepasst, wenn sich der Bestand in einer gefährdeten Höhenlage befindet (unter 1000 m SH) und einen sehr hohen Fichten- Anteil besitzt und somit weit vom vorgegebenen Minimalprofil abweicht.

Für jedes der Merkmale wird dabei eine Entwicklung ohne Maßnahmen unter dem angenommenen Klimawandelszenario, ausgehend vom heutigen Zustand, abgeschätzt. Ob der heutige Ausgangszustand „sehr schlecht“, „minimal“ oder „ideal“ ist, ergibt sich aus dem Vergleich des Soll- mit dem Ist- Zustand. Für die Entwicklung des Merkmals Gefüge (vertikal, BHD- Streuung) wird das Ergebnis aus der Studie von Seidl et al. (2019) verwendet, wonach der mittlere Stammdurchmesser als Folge der zunehmenden Störungen unter dem Klimawandel durch Starkwindereignisse und darauffolgende Borkenkäfer- Gradation abnehmen wird. Es wird daher für die Beurteilung angenommen, dass je homogener d.h. gleichmäßiger und gleichaltriger der Bestand aktuell ist, desto eher ist er anfällig gegenüber Störungen (z.B. Wind und Borkenkäfer). Damit ist zu

erwarten, dass im Umkehrschluss die Schutzfunktionalität zukünftig vermindert wird. Dadurch wird auch die Empfehlungen von Brang et al. (2016) (siehe Kap. 2.5.6, Punkt 2) nach reich strukturierten Wäldern bestätigt, da diese als weniger störanfällig gelten.

Die Beurteilung der mittel- bis langfristigen Entwicklung erfolgt in Anlehnung an das „Formular 2“ zur Beurteilung „Entwicklung ohne Maßnahmen“ nach NaiS (Frehner et al. 2005) und wird über Pfeile dargestellt (Abb. 19; vgl. Frehner et al. 2005, Anhang 04). Ein Handlungsbedarf ergibt sich, die Entwicklung bis 2100 schlechter als das Minimalprofil ist. Als Beurteilungsbasis wird das Minimalprofil nach NaiS herangezogen, welches sich individuell für jede Fläche ergibt (siehe Kap. 4.2).

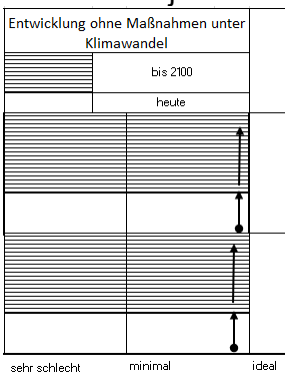


Abbildung 17: Darstellung der Entwicklungsprognose innerhalb von 10 Jahren, und 50 Jahren durch den Einfluss des erwarteten Klimawandels unter dem RCP 8.5 Szenario für Tirol. Die Zeilen dienen zur optischen Abgrenzung.

Folgende Fragen sind bei der Beurteilung der langfristigen Entwicklung (bis 2100) ohne forstliche Maßnahmen bei den erwarteten Klimawandelveränderungen unter einem RCP 8.5 Szenario für Tirol (Kap. 2.5) für den Schutzwald zu beantworten:

1) Befindet sich der Bestand in einem gefährdeten Seehöhenbereich (kollin bis submontan)?
2) Ist die durchschnittliche Neigung >28° oder <28°?
    a. Wenn die Neigung > 28° ist, so besteht ein höheres Risiko für Schneerutsche und Kleinlawinen. Waldbauliche Maßnahmen (Öffnungen des Bestandes) müssen darauf abgestimmt werden. Daher sollte hier in Zukunft ein höherer Anteil an klimawandelangepassten Nadelhölzern vorhanden sein, da ein Laubholz- reicher Bestand zu wenig Überschirmung (→ Interzeptionsverdunstung) in den Wintermonaten bietet.
3) Entspricht die Baumartenmischung (Art und Grad) dem von NaiS angegebenen Minimalprofil oder gar Idealprofil?
4) Ist die Baumartenwahl auf den Klimawandel abgestimmt?
    a. Ist dies nicht der Fall, so ist mit einer nachteiligen Entwicklung im Laufe des Klimawandels zu rechnen
    b. Denn nur ein Bestand mit einer hohen Baumartenvielfalt ist resilient gegenüber Klimawandel- Folgen.

5) Können wirksame Maßnahmen durchgeführt werden, die die Bestandesentwicklung in die gewünschte klimawandel- angepasste Richtung (vgl. Kap. 2.5.6) lenken können?
    a. Falls diese Frage mit ja beantwortet werden kann, werden die klimawandel-angepassten Maßnahmen beschrieben.
6) Ist der Aufwand verhältnismäßig?
    a. Ja oder nein
    b. Vergleiche dazu auch Frehner et al. (2005) Anhang 04, S.7

7) Entspricht das Gefüge vertikal (BHD- Streuung) dem Minimal- oder gar dem Idealprofil?
    a. Je homogener der Bestand, ums anfälliger ist er (zukünftig) gegenüber Störungen (Wind und Borkenkäfer). Ist erst einmal ein Störungsfall eingetreten, so kann die Schutzfunktion nur mehr eingeschränkt oder überhaupt nicht mehr vorhanden sein.
8) Entspricht die Verjüngungssituation (Keimlinge und Lückensituation) dem Minimal- oder gar dem Idealprofil?
    a. Je besser jetzt schon die Verjüngungssituation ist, umso besser kann im Bedarfsfall ein zukünftiger klimafitter Wald begründet werden, ohne teure und von außen eingebrachte Kunstverjüngungen.
    b. Die Lückensituation hat eine Einwirkung auf die Verjüngung (ein zu dunkler Wald verhindert eine Verjüngung).
9) Handlungsbedarf besteht, wenn alle folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind (nach Frehner et al. (2005):
    a. Wenn der Zustand unter dem Minimalprofil liegt und die Fragen (1-8) mit ja beantwortet wird
    b. Wirksame Maßnahmen durchgeführt werden können, welche die Bestandesentwicklung in die gewünschte Richtung lenken
    c. Der Aufwand verhältnismäßig ist.

Im Anschluss an die Klimawandel- Bewertung wird eine Erörterung des Handlungsbedarfes mit der Angabe seiner Dringlichkeit (klein, mittel, groß) inkl. Vorschlag von Verbesserungsmaßnahmen angegeben, womit die Beurteilung nachvollziehbar wird.

3.5 Kombination der Bewertung nach NaiS und Klimawandel

Im letzten Schritt wird die Klimawandel- Bewertung mit der Bewertung nach NaiS mit Hilfe einer Matrix (Tab. 10 im Appendix) kombiniert. Wie erwähnt, wurde für je beide Bewertung ein Handlungsbedarf mit „kleiner“, „mittlerer“ und „großer“ Dringlichkeit ermittelt. Dabei wurde der ermittelte Handlungsbedarf nach NaiS auf der Abszisse gewählt und mit dem ermittelten Handlungsbedarf auf Grund des Klimawandels auf der Ordinate verknüpft. Der Schnittpunkt ergab die Dringlichkeit des Gesamthandlungsbedarfes für die Fläche. Ergänzt wird dieser Gesamthandlungsbedarf um Gesamt- Handlungsempfehlungen, welche insgesamt zu einer Verbesserung des Zustandes der betroffenen Schutzwaldbereiche führen sollen. Durch diese Kombination wird eine flächige Darstellung in einer Karte des Gesamthandlungsbedarfs im Ampelsystem ermöglicht.

4 ERGEBNISSE DER SCHUTZWALDBEWERTUNG

4.1 Überblick über die Ergebnisse

Durch die Auswahl der Probeflächen als Transekt über alle Höhenstufen ergibt sich ein Überblick der Schutzwaldbestände hinsichtlich ihrer aktuellen und zukünftigen Schutzwirkung gegenüber dem großräumigen Talzuschub zur Sill und den verschiedenen kleinräumigen Naturgefahrenprozessen wie Rutschungen, Sturzprozessen, sowie Lawinen und Schneerutsche. Die Schutzwaldwirkung ist dabei über alle Höhenlagen miteinander verkettet. Jene Schutzwaldbestände, welche auf den Zerrungszonen im Oberhang stocken, befinden sich zwar scheinbar sehr weit von den Stirnbereichen des Talzuschubes entfernt, aber besitzen hinsichtlich der Abflussbildung im Sinne der Infiltration und Abflussgeschwindigkeit bei der Steuerung der Aktivität des Naturgefahrenpotenzials eine große Bedeutung.

Durch die fachübergreifende Beurteilung (Geologie, Klima, Wildbach- und Lawinenkunde, Forstwirtschaft) konnte eine Ableitung der erforderlichen Maßnahmen im Hinblick auf die aktuelle und zukünftige Schutzfunktion unter dem Einfluss des Klimawandels erfolgen. Für die untersuchten Schutzwaldbestände ergibt sich folgender Überblick:

Die derzeitige Bewirtschaftung der Bestände im Untersuchungsgebiet vor allem am Ober- und Mittelhang orientiert sich an der Nutzfunktion, die durch den Kahlschlagbetrieb, hohen Grad der „Verfichtung“ der Bestände und hoher Erschließungsdichte durch Forststraßen gekennzeichnet ist. Sie weisen eine dementsprechend homogene, artenarme Bestandesstruktur auf. Wobei im Wesentlichen die wichtige Schutzwaldbaumart Tanne fehlt. Durch die Kahlschläge werden in der Falllinie offene Flächen mit Konzentration des Oberflächenabflusses und Verkürzung der Fließgeschwindigkeiten am Hang geschaffen. Durch den lokal vermehrten Oberflächenabfluss kann es im Bereich der offenen Spaltensysteme zu einer erhöhten Infiltration kommen, wobei damit die Aktivität der im Unterhang befindlichen Nachböschungsbereiche (Rutschungen und Sturzbereiche) erhöht wird. In den Steilbereichen der Waldbestände kann es lokal zu Kleinlawinen- und Schneerutschen kommen.

Die Bestände im Unterhang (Flächen D und E), welche sich innerhalb der Nachböschungsbereiche (Rutschungen und Sturzbereiche) des Talzuschubes befinden, werden derzeit nicht bzw. nur im Anlassfall bewirtschaftet. Das zeigt sich vor allem am sehr schlechten Zustand an der Fläche D1. Die unmittelbaren Einhänge der Sill (Flächen E1 und E2) sind durch ihre Schluchtlage nährstoffreich und wasserzügig, was sich speziell an den Flächen E1 und E2 durch ihren hohen Laubholzanteil widerspiegelt. Vor allem die Fläche E2 zeigt sich durch ihren hohen Starkholzanteil als risikoreich für potenziellen Wildholzeintrag (Verklausungsgefahr) in die Sill.

Der Gesamthandlungsbedarf ergab sich aus der Kombination der Beurteilung der Flächen nach NaiS und nach dem Klimawandel (siehe Methodik). Gereiht nach der Dringlichkeit haben von den 16 Probeflächen 12,5 % (n= 2) „keinen“, 18,8 % (n= 3) „kleinen“, 43,8 % (n= 7) „mittleren“ und 25 % (n= 4) „großen“ Handlungsbedarf (siehe Tab. 13).

Diese Gesamthandlungsbedarfe sind über alle Höhenstufen verteilt (Abb. 18), wobei die Flächen am Oberhang eine geringere Dringlichkeit zeigen als die Flächen im Mittel- und Unterhang. Das liegt einerseits am besseren allgemeinen Ist- Zustand des Waldes am Oberhang und andererseits an den schwächeren erwarteten Folgen des Klimawandels in diesen Höhenlagen. Im Mittel- und Unterhang, speziell in den Stirnbereichen des Talzuschubes entsprechen die Ist- Zustände nicht den Anforderungen auf Grund der Naturgefahrenprozesse, Standortstyps und den des Klimawandels. Hier finden sich vielfach anthropogen bedingte Fichten(rein)bestände auf Laubholzstandorten mit starken Pflegerückständen. Flächen mit großem Handlungsbedarf finden sich vor allem in den für die Schutzwaldwirkung so wichtigen Grabenbereichen und im Stirnbereich des Talzuschubes. Dass die Bestände am Oberhang in einem besseren allgemeinen Zustand sind, ist positiv zu werten, da sie in der Wirkungskette vorgereiht sind und so die Abflussbildung im Sinne der Abflussgeschwindigkeit und die Infiltration vermindern und damit die Systemzustände verbessern. Dadurch wird auch das Prozessgeschehen im Unterhang (Stirnbereich) in geringem Ausmaß nachhaltig positiv beeinflusst.

Tabelle 10: Gesamthandlungsbedarfe der Probeflächen in Absolutzahlen.

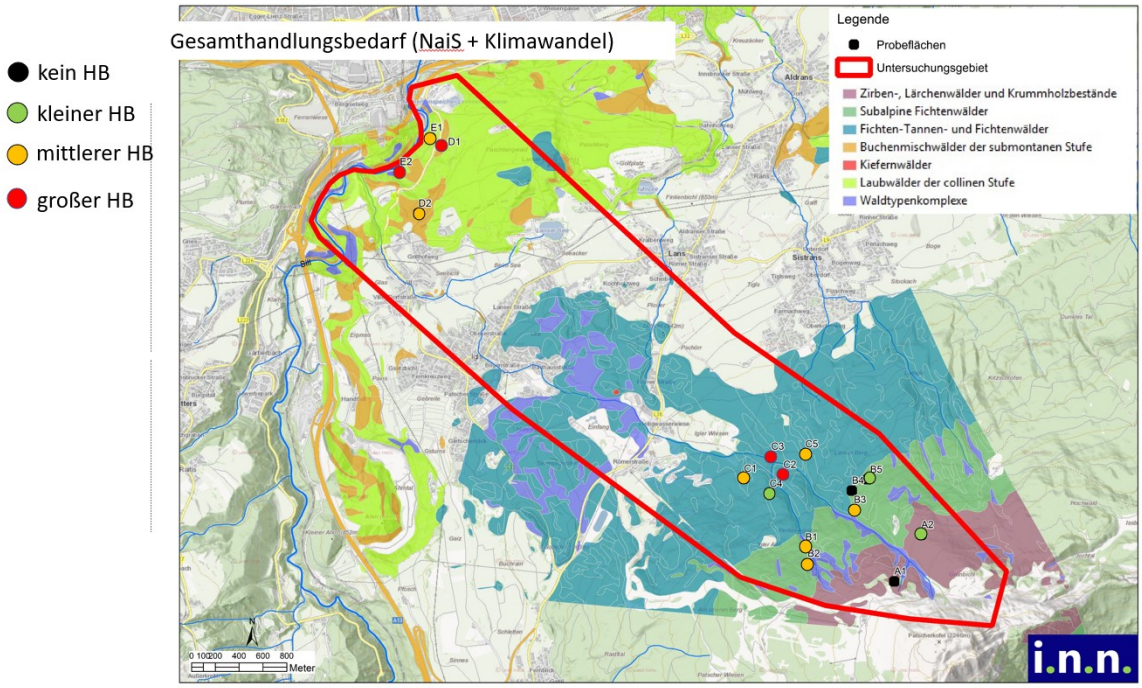


Abbildung 18: Flächige Darstellung des Gesamthandlungsbedarfs gereiht nach Dringlichkeit im Ampelsystem. Es zeigt sich, dass die Flächen im Oberhang einen geringere Dringlichkeit aufweisen als die Flächen im Unter- und Mittelhang.

Im Detailblick auf die Klimawandelbewertung ergibt sich folgendes Ergebnis für das Untersuchungsgebiet: Verknüpft man das erwartete Klimawandelszenario RCP 8.5, für die durch den Bearbeiter berechneten „Klimastationen“ (vgl. Kap. 3.1.3.1, Tab. 8) im Untersuchungsgebiet, mit dem Klimahüllenmodell für die Fichte nach Schadauer et al. (2019) so zeigt sich, dass vor allem Fichtenstandorte im Unterhang, das sind Höhenlagen im Bereich der Klimastationen Innsbruck (578 m SH) und Rinn (900 m SH), gegenüber den Folgen des Klimawandels gefährdet sind (vgl. Abb. 13). Der Fichte wird es vermutlich zu warm und zu trocken, wodurch die Kalamitätsanfälligkeit stark ansteigt. Welche Folgen es hier für die Fichte haben wird, lässt sich mit der hier verwendeten Methodik nur schwer abschätzen und ist vor allem vom jeweiligen Standort und vom derzeitigen Ausgangszustand der Bestände abhängig. Es ergeben sich dadurch für die jeweiligen Flächen unterschiedliche Beurteilungen. Vor allem heute schon trockenheitsgefährdete Standorte (wie z.B. die Flächen D1 und D2) werden zukünftig Probleme mit Trockenheit bekommen. Hingegen werden gut wasserversorgte Standorte in Grabenlagen (z.B. Flächen E1 und E2) geringere Probleme zeigen (vgl. Kap. 2.3.4). Standorte im Mittelhang (1000- 1400 m SH) stellen somit Übergangsbereiche zwischen den gefährdeten und begünstigten Höhenlagen dar. Wie sich hier das das Klima auf die Bestände auswirkt, ist mit Unsicherheiten behaftet. Die verwendete Literatur gibt hier keinen klaren Aufschluss. Vermutlich werden auch hier, je nach Standort, Trockenheitsprobleme v.a. für die Fichte auftreten.

In den Hochlagen (betrifft Flächen A1 und A2) werden hingegen durch die Klimaerwärmung günstigere Bedingungen erwartet, wodurch sich die Schutzfunktionalität in den Zerrungszonen des Talzuschubes verbessern könnte, vorausgesetzt die Nährstoff- und Wasserversorgung ist in Zukunft ausreichend (vgl. Kap. 2.3.4.3).

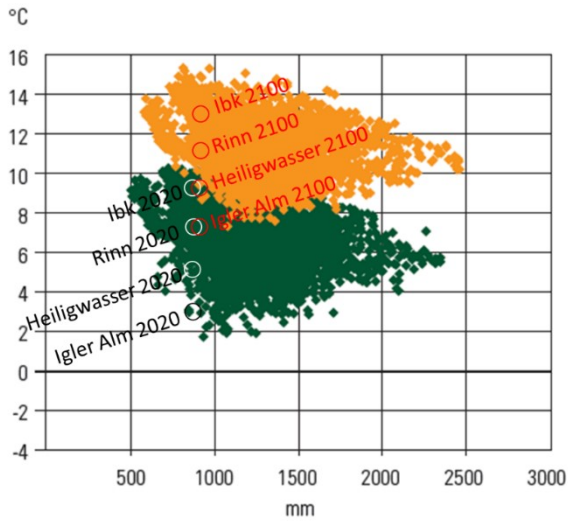


Abbildung 19: Verknüpfung der Klimadaten der Messtationen des Untersuchungsgebietes mit dem Klimahüllenmodell für Fichte nach Schadauer. Werte der ausgewählte Messstellen und der berechneten Punkte für 2020 (schwarz) und Werte unter einem RCP 8.5 Szenario für Tirol für 2100 (rot) (Klimadaten abgerufen und verändert von www.alpenklima.eu, Adler et al. 2015). Klimahüllenmodell: Klimahüllen der Fichte: aktuelles Vorkommen laut ÖWI 07/09 (links, grün) und mit dem Klimawandelszenario RCP 8.5 im Jahr 2100 (rechts, orange). Der modellierte Bereich deckt zum Teil das optimale Wachstum ab, das nach den Autoren vielleicht auf 1600 bis 1800 m Seehöhe erwartet werden könnte (rot). Verändert nach Schadauer et al. (2019).

Generell ist nicht mit einer raschen natürlichen Anpassung der Baumarten im Untersuchungsgebiet auf die Klimaveränderung zu rechnen, was auch das „Höherwandern“ der Baumarten miteinschließt. Allerdings wird auch am Patscherkofel mit einer deutlichen Störungsanfälligkeit (Föhnstürme und Borkenkäfer) aufgrund der homogenen, fichtenreichen Bestände gerechnet, was sich wiederum auf die Schutzfunktionalität negativ auswirkt. Im Allgemeinen weisen die die Bestände einen mittleren Handlungsbedarf auf, was vor allem an der Baumartenarmut, fehlender Verjüngung, Strukturarmut und Pflegerückstände liegt. Es sind daher prozess- und klimawandelorientierte Maßnahmen äußerst wichtig und sollten zeitnah erfolgen Zeitnahe Eingriffe haben einen entscheidenden Vorteil: der Bestand kann bis zum dritten Quartal des Jahrhunderts schon einen Großteil seiner vorbestimmten Schutzwirkung erreichen. Vielfach ist dabei eine prozessorientierte Bestandesumwandlung zur Schaffung eines klimafitten Schutzwaldes notwendig. Die Bestände zeigen aber ein gutes Potenzial um in einen klimafitten Zustand überführt zu werden.

4.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Durch die Beurteilung der Flächen und Auswertung der Daten konnten die Forschungsfragen beantwortet werden. Um die Übersicht einfach zu halten, werden die Forschungsfragen der Reihe nach beantwortet:

1) **Wird durch die Folgen des Klimawandels die Schutzwaldwirkung im Untersuchungsgebiet negativ beeinflusst?**

Ja, vor allem in den vom Klimawandel stark beeinflussten Höhenbereich 3 (Tieflagen), aber auch im Höhenbereich 2 (mittleren Lagen) wird mit negativen Auswirkungen gerechnet. Die Gründe dafür liegen u.a. in der fehlenden Verjüngung, schlechten Allgemeinzustand und im hohen Fichtenanteil in diesen Höhenlagen. Daher wird erwartet, dass es durch den Klimawandel eine Beeinträchtigung der Schutzfunktion gibt. Insgesamt liegt im Untersuchungsgebiet bei 68,7 % (n= 11) der Probeflächen einen Handlungsbedarf aufgrund des Klimawandels vor. Zwei dieser Probeflächen weisen sogar einen „großen“ Handlungsbedarf auf. Es sind dies die Flächen C2, D1. Exemplarisch für die Probeflächen mit „großem“ Handlungsbedarf wird die **Fläche D1** beschrieben: die Fläche D1 (Unterhang, Abb. 18 und Abb. 21) befindet sich im übersteilten Stirnbereich des Talzuschubes oberhalb der Igler- Landesstraße in einer Seehöhe von 650 m. Auf der Fläche befinden sich Anbruchsbereiche für Sturzprozesse. Aufgrund der steilen Geländeverhältnisse reichen die potenziellen Auslauflängen der Sturzprozesse bis an die darunterliegende Igler- Landesstraße. Des Weiteren besteht hier das Risiko von Rutschungen und Kleinlawinen sowie Schneerutschen. Durch die Wirkung des Waldes können die Prozesse erheblich vermindert/ verringert werden. Der Bestand zeigt heute bereits einen trockenheitsgefährdeten Standort (seichtgründig, steil (>28°), föhnbeeinflusst) und liegt zudem in der submontanen Höhenlage und gilt als besonders für die Fichte stark vom Klimawandel gefährdet. Es stocken hier überwiegend Fichten auf einem Laubholzstandort. Die Bestockung entspricht somit nicht dem erforderlichen Minimalprofil eines laubholzreichen Mischbestandes. Der allgemeine Zustand ist ebenso als sehr schlecht zu beurteilen, was sich durch den hohen Totholzanteil äußert. Es findet sich auch keine Verjüngung auf der Fläche. Im Hinblick auf den Klimawandel ist mit einer weiteren Verschlechterung des Zustands bei zukünftigen Trockenperioden oder Störungen zu rechnen. Sollten ehebaldigst keine waldbaulichen Maßnahmen im Sinne einer prozessorientierten Bestandesumwandlung zur Schaffung eines klimafitten Schutzwaldes umgesetzt werden ist mit einem flächigen Zusammenbruch dieses Bestandes zu rechnen und die Schutzfunktion nicht mehr gesichert. Insbesondere Störungen wie Föhnstürme und Borkenkäferbefälle können hier zum Zusammenbruch und somit zur Prozessaktivierung (Stürze und Rutschungen und Erosionen) auf dieser Fläche und somit im Stirnbereich des Talzuschubes führen. Dadurch wird die Objektschutzwirkung für die darunterliegende Igler- Landesstraße gefährdet. Aufgrund der fehlenden Verjüngung wird im Falle des Zusammenbruches des „Altbestandes“ nicht damit gerechnet, dass sich alsbald ein verjüngter Schutzwald ohne anthropogene Maßnahmen entwickelt. Eine Empfehlung von Maßnahmen ist unter 4.2 (3) beschrieben.

Abbildung 20: Der auffallend schlechte Zustand der Fläche D1 (Bauhofer,2019).

2) In welchen Bereichen kann sich die Schutzleistung am stärksten verändern?

Es ist zu erwarten, dass Schutzwaldbestände an der Waldgrenze durch die längeren Vegetationsperioden und Zunahme der Temperaturen ihre Schutzwaldwirkung erhöhen könnten, da insbesondere der Faktor Wärme begrenzend auf das Wachstum wirkt (siehe Kap. 2.3.4.2). Bei einem RCP 8.5 Klimawandelszenario für Tirol wird erwartet, dass die Temperaturen im Zeitraum 2071- 2100 auf bis zu 4,5 °C steigen könnten (vgl. Kap. 3.1.3, Tab. 5). Das bedeutet für das Untersuchungsgebiet, dass insbesondere die Probeflächen A1 (1900 m) und A2 (1785 m) eine Verbesserung der Schutzwaldwirkung erwarten können, vorausgesetzt die Wasser- und Nährstoffversorgung ist ausreichend. Das Wachstum der Zirben- Lärchenbestände könnte hier zukünftig zunehmen, ebenso der Bestockungsgrad, Kronenüberschirmung und die Interzeptionswirkung. In Summe wirkt sich dies auf die primäre Schutzwirkungen vor Rutschungsprozessen, aber auch auf die Lawinen- und Schneerutschprozess im Bereich der Zerrungszone positiv aus.

Eine trockenheitsbedinge Senkung der Schutzwaldleistung wird nur teilweise im Untersuchungsgebiet erwarten (vgl. Kap. 2.5.1). Es ist eine Eigenheit des Untersuchungsgebietes, dass die vor allem durch den Klimawandel gefährdeten Probeflächen in den submontanen Höhenlagen im Einflussbereich der Sill liegen (Schluchtwaldklima/ Hangwasseraustritte an der Talzuschubsstirn). Es ist zu erwarten,

dass hier die kühl- feuchten Bedingungen auch noch in Zukunft vorherrschen und somit die Schutzwaldbestände in diesem Geländeteil einem geringeren Klimawandelrisiko ausgesetzt sind. Dies trifft vor allem auf die Probefläche E1 und E2 zu. Hingegen die etwas außerhalb des Einflussbereichs der Sill liegenden Flächen D1 (650 m) und D2 (825 m) werden durch ihren hohen Fichtenanteil auf einem trockenheitslimitieren Standort eher Probleme mit der Trockenheit bekommen. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Lagen stark den Einflüssen des Föhns aus dem Wipptal ausgesetzt sind, welcher die Trockenheit zusätzlich verschärft. Wie sich die Bedingungen in den Höhenbereichen zwischen 1000 und 1500 m entwickeln werden, ist schwierig einzuschätzen und wird auch in der verwendeten Literatur nicht eindeutig beschrieben. Vermutlich wird, je nach Standort, auch hier vermehrt Trockenstress, vor allem für die Fichte, auftreten. Nach Einschätzungen des Bearbeiters sollte auch in diesen Lagen die Gefahr von Trockenstress für die Fichte in der Bewirtschaftung mit einfließen.

3) ***Kann durch eine prozess- und klimawandelorientierte Adaptionsstrategie die Schutzfunktion dieser Wälder aufrechterhalten werden bzw. verbessert werden?***

Die Gründe für die Gesamthandlungsbedarfe liegen in den schlechten Pflegezuständen, der fehlenden Verjüngung oder dem hohen Fichtenanteil vor allem in den gefährdeten Höhenlagen unter 1000 m SH. Im Folgenden sollen waldbauliche Empfehlungen, basierend auf den Erkenntnissen aus Kap. 2.3.4.4, für die Probeflächen gegeben werden. Durch diese Maßnahmen wird erwartet, dass die Schutzfunktion verbessert werden kann. Die Empfehlungen werden dabei unterteilt auf die Höhenbereiche angegeben. Die Maßnahmenempfehlungen der Probeflächen sind auf die übergeordneten Zieltypen übertragbar.

Im **Höhenbereich 1** in der hochmontanen bis tiefsubalpinen Zone befinden sich die Probeflächen A1, A2 sowie B1- B5. Die Probeflächen **A1- A2** sind in den Lärchen-Zirbenwäldern und zeigen aktuell einen guten Zustand mit wenig Handlungsbedarf auf und werden als gering gefährdet bewertet. Die waldbaulichen Maßnahmen zur Verbesserung der allgemeinen Schutzwaldwirkung und Adaption an den Klimawandel sind daher nur in geringem Umfang notwendig, da sogar mit einer Verbesserung der Wuchsbedingungen in dieser Höhenlage gerechnet wird. Die Handlungsempfehlungen beschränken sich derzeit auf die Unterstützung der allgemeinen Verjüngungssituation durch bspw. Ausschneiden der Vegetationskonkurrenz und evt. plätzeweise Verwundung des Oberbodens, um die Keimbedingungen zu verbessern.

Die Probeflächen **B1- B5** befinden sich im subalpinen Fichtenwald. Diese sind auch hier in einem Höhenbereich, in dem nur geringe negative Auswirkungen durch den Klimawandel erwartet werden. Die Bestände sind im Dickungs-, Stangenholz- und Baumholzalter und stocken Nord- bis Nordwest exponiert auf gut wasserversorgten Standorten. Die Dickungen (B2, B4) sollen entsprechend der üblichen Dickungspflege gepflegt werden. In den Stangenholzbeständen (B1, B3) soll eine Z- Baumauslese durchgeführt werden, um die allgemeine Bestandesstabilität zu erhöhen und sie somit

resilienter gegenüber Störungen zu halten. Dadurch steigt gleichzeitig langfristig die Schutzwaldwirkung. Der Bestand im Baumholzalter (B5) soll einer Verjüngung mittels Femelschlag unterzogen werden. Ziel ist es so die Struktur- und Baumartenvielfalt zu erhöhen. Durch ihre Kleinflächigkeit eignen sich Femelschläge gut, um die Evapotranspirationsleistung im Hinblick auf die Rutschungsprävention und oberflächlichen Massenschurf durch Wasser hoch zu halten. Ebenso wird der Entstehung von Kleinlawinen und Schneerutschen vorgebeugt. Die Lenkung einer vorgeschlagenen zielgerichteten Mischung mit 60 % Fichte, 30 % Tanne und 10 % Lärche soll über die Verjüngung erfolgen. Vor allem die Tanne ist durch ihre tiefe Durchwurzelung, hoher Transpirationsleistung und guter Trockenheitstoleranz eine wertvolle Schutzwaldbaumart. Sollte sich die Tanne nicht natürlich verjüngen, so ist sie künstlich einzubringen und gegen Wild zu schützen.

Im **Höhenbereich 2** in der mittel- bis hochmontanen Höhenstufe befinden sich die Probeflächen C1- C5 in Fichten- und Fichten- Tannenwälder. In diesen Höhenlagen wird auch in Zukunft mit negativen Einflüssen des Klimawandels gerechnet. Im Vergleich zu den Höhenlagen unter 1000 m SH aber eher in geringerem Ausmaße. Die **Probeflächen (C1, C2, C3, C5)** befinden sich im Baumholz- bzw. Altholz und weisen einen schlechten Allgemeinzustand oder hohe „Verfichtung“ auf, was sich negativ auf die Schutzwaldleistung und Anfälligkeit gegenüber Störungen auswirkt. Für sie wird eine Verjüngung ebenso mittels kleinflächigem Femelschlag vorgeschlagen, um auch hier die Baumartenmischung über die Verjüngung zu lenken. Es wird ein langfristiges Bestockungsziel ist ein tannenreicher Mischbestand mit 30- 90 % Tanne, 10- 70 % Fichte, 0- 30 % Lärche vorgeschlagenen. Sollte sich die Tanne auch hier nicht natürlich verjüngen, so ist sie künstlich einzubringen und gegen Wildeinfluss zu schützen. Die **Probefläche C4** mit ihrer Lärchen- Fichtenbestockung befindet sich im Dickungsalter und sollte im Rahmen der normalen Bewirtschaftung durch eine Dickungspflege gepflegt werden. Dabei soll der Lärche ein größerer Standraum eingeräumt werden als der Fichte um ihr mehr Licht zu schaffen. Am Ende der Dickungsphase sollen die Lärchen in Gruppen und Horsten in einem Abstand von rund 2,5 bis 3 m innerhalb dieser stehen. Ebenso sollen die einzelnen Tannen gefördert werden. Mittelfristig ist eine Durchforstung durchzuführen.

Im **Höhenbereich 3** der submontanen Höhenstufe befinden sich die Probeflächen D1- D2 und E1- E2. Diese befinden sich somit in der vom Klimawandel am stärksten negativ beeinflussten Höhenzone. Die **Fläche D1** ist für die Schutzwaldwirkung besonders wichtig und weist einen „großen“ Handlungsbedarf auf. Hier sollen kurzfristig exponierte Einzelbäume auf absturzgefährdeten Standorten entfernt werden. Dadurch wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sturzereignisse deutlich verringert. Mittelfristig soll eine Bestandesumwandlung in einen mehrschichtigen und gestuften Bestand erfolgen, um die verschiedenen Prozesse vermindern/ verhindern zu können. Dabei soll die Oberschicht aus grobborkigen Laubbäumen und immergrünen Nadelbäumen (Tanne) bestehen um in Hinblick auf die Rutschungs- und Kleinlawinenprävention sowie Steinschlagereignisse zu vermindern/verhindern. Wobei der Nadelholzanteil überwiegen sollte, so die Hangneigung über 28° beträgt und somit Kleinlawinen und Schneerutsche auf der Fläche entstehen

können. Ein zu großer Laubholzanteil in der Oberschicht würde sich kontraproduktiv auf die Prävention dieser Prozesse auswirken. Die Unterschicht sollte aus stammzahlreichen Laubhölzern (z.B. Ahorn) um ebenso eine Abbremsung der Steinschläge zu bewirken. Durch diese Maßnahmen wird gleichzeitig die Resilienz des Bestandes gegenüber Störungen gestärkt und den negativen Folgen des Klimawandels entgegengewirkt.

Die **Fläche D2** befindet sich ebenso auf einem Laubwaldstandort und zeigt ebenso eine deutliche „Verfichtung“ mit 70% Fichtenanteil. Der ungleichaltrige Bestand ist zwar durch sein strukturiertes Bestandesgefüge weniger störungsanfällig, jedoch ist er durch seinen hohen Fichtenanteil und dem trocken Standort gefährdet. Es sollte auch hier eine Bestandesumwandlung hin zu einem laubholzreichen Mischbestand erfolgen. Da jedoch die die durchschnittliche Hangneigung über 28% beträgt und der Bestand ein Risiko gegenüber Nassschneelawinen aufweist, sollte auch hier immergrüne Bäume (bspw. Tannen) beigemischt werden. Die Verjüngungssituation erweist sich derzeit als ausreichend und bietet somit eine gute Ausgangsposition für einen zukünftigen Bestand.

Die **Fläche E1** weist ebenso eine „großen“ Handlungsbedarf auf und befindet sich direkt angrenzend an die Sill in einer Seehöhe von 630 m. Die Hänge sind im Stirnbereich des Talzuschubes und den abtragenden Kräften der Sill bei Hochwasser ausgesetzt. Daher ist die Fläche durch Rutsch- und Sturzprozesse geprägt. Primär hat daher der Bestand eine stabilisierende Funktion vor Rutschprozessen und Verminderung des Eintrages von Feststoffen in die Sill. Sekundär wird dadurch der Abtrag des Hangfußes für den großflächigen Talzuschub vermindert. Der Bestand charakterisiert sich durch seinen dickungsähnlichen Aufbau aus verschiedenen Laubhölzern und starker Verunkrautung durch Brombeere und anderen Kleinsträuchern wie Hasel oder Holunder. Vereinzelt finden sich kleinere Laubbäume wie Ahorn, Ulme, Esche. Eine flächendeckende Oberschicht mit ausreichend Stabilitätsträgern fehlt dementsprechend. Zurückgebliebene Drahtkörbe zeugen von Versuchen der künstlichen Verjüngung mit Tanne, Eiche und anderen Edellaubhölzern, die allerdings nicht gepflegt wurden und daher ausgefallen sind. Am unteren Bestandesrand wurde kürzlich eine Nutzung durchgeführt wodurch auch die letzten Stabilitätsträger entfernt wurden. Des Weiteren wurde für eine Nutzung am gegenüberliegenden Hang über die Fläche E1 geseilt, wodurch dementsprechende Bodenverwundung verursacht wurden. Die Schutzwirkung ist daher aktuell nur sehr schlecht und wird sich auch zukünftig ohne Maßnahmen nicht einstellen. Die Klimawirkung wird hier durch die Schluchtwaldlage als gering eingeschätzt.Es werden folgende Maßnahmen empfohlen: Diese Fläche sollte als Dauergesellschaft mit vor allem stockausschlagfähigen Laubhölzern bewirtschaftet werden. Die Vorteile liegen dabei in der hohen Pumpleistung und im Erosionsschutz. Sollten zukünftig dennoch Stirnrutschungen abgehen, kommt es durch diese Art der Bewirtschaftung zu einer deutlich geringeren Verklausungsgefahr für die Sill.

Die **Fläche E2** weist eine ähnliche Schutzfunktion wie E1 auf und charakterisiert sich als ungleichaltriger, gut strukturierte, laubholzreicher Mischbestand direkt an der Sill. Der Bestand weist grundsätzlich eine gute Schutzfunktionalität auf und gilt durch seine Schluchtlage als gering gefährdet gegenüber dem Klimawandel. Die Verjüngungssituation

ist allgemein gesichert. Der Bestand befindet sich direkt angrenzend an die Sill. Die Hänge sind den abtragenden Kräften der Sill bei Hochwasser ausgesetzt. Daher ist die Fläche durch Rutsch- und Sturzprozesse geprägt. Primär hat daher der Bestand eine stabilisierende Funktion vor Rutsch- und Sturzprozessen und Verminderung des Eintrages von Feststoffen in die Sill. Sekundär wird dadurch der Abtrag des Hangfußes für den Talzuschub vermindert. Lediglich die vereinzelt starken Hänger stellen ein Problem dar. Die wirksamen Waldbaumaßnahmen sind an diesem Standort auf die Entfernung von instabilen Einzelbäumen auf absturzgefährdeten Standorten im oberen und mittleren Hangabschnitt. Dadurch wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für Sturzereignisse deutlich verringert. Änderung der Bewirtschaftungsform im Sinne eines nieder-/ mittelwaldartigen Bestandes mit Erhaltung bzw. Erhöhung des ausschlagfähigen Laubholzanteils in den Stirnbereichen/ unmittelbaren Ufereinhängen. Ziel sollen kleinflächig gestufte und geschichtete Bestände sein. Dadurch wird die Abflussbildung im Sinne von Infiltration und Fließgeschwindigkeit verringert.

4.3 Abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Die Beurteilung der Schutzwälder hat einen guten Überblick über die heutige und zukünftige Schutzfunktionalität gegeben: Die Wirkung über den Transekt ist als gut zu werten, da im untersuchten Bereich keine größeren Freiflächen vorhanden sind. Jedoch weisen die Bestände durchwegs Handlungsbedarf aufDie Gründe dafür sind der teilweise auffallend schlechte Waldzustand, hohe Anteil an der Fichte, homogene Bestandesstrukturen, Fehlen der Tanne und von Laubhölzern, sowie das weitgehende Fehlen einer ausreichenden Verjüngung bei bzw. durch vermutlich hohen Wildeinfluss. Aus Sicht des Bearbeiters vernachlässigt die derzeitige Waldbewirtschaftung die vorhandenen Naturgefahrenpotentiale im Untersuchungsgebiet weitestgehend. Vor allem der „große“ Handlungsbedarf an den Probeflächen C3, C2, D1,und E2 hat gezeigt, dass hier Adaptionsstrategien notwendig sind. Gerade die Grabenbereiche und die Bereiche im Stirnbereich des Talzuschubes sind von hoher Bedeutung zur Prävention von Naturgefahrenprozessen. Durch die Beurteilung konnte ein Potential festgestellt werden, die Bestände durch Prozess- und Klimawandel- angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen für die ungewisse Zukunft unter dem Klimawandel zu wappnen. Dies soll vor allem durch ungleichaltrige, gut strukturierten Mischbestände mit trockenheitstoleranten immergrünen Nadelhölzern wie Tannen (nur bei angepassten Wildstand), sowie Laubhölzern erfolgen. Dennoch soll auch die Fichte nicht ausgeschlossen werden. Sie wird auch noch in Zukunft ihre Berechtigung haben, vor allem in den höheren Lagen. In den trockenheitsgefährdeten Standorten der tieferen Lagen und Übergangsbereichen sollte sie nur mehr beigemischt sein.

5 DISKUSSION

5.1 Literatur

Die Ergebnisse der Literaturauswertung zeigen ein einheitliches Bild: die Zunahme der Temperatur im Zuge des Klimawandels ist nur eine Frage der Zeit. Besonders stark davon ist der Alpenraum und somit Tirol und Österreich betroffen. Mit welchem Ausmaß dabei gerechnet werden muss ist eine Frage des gewählten Klimawandelszenarios (BMNT 2016; APCC 2014). Klimaszenarien können aber niemals exakte Vorhersagen liefern, sondern geben nur einen Trendverlauf wieder. Es ist immer darauf zu achten, dass Klimamodelle vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit sind. Fehler, Weiterentwicklungsmöglichkeiten, Schwächen sind stets möglich (vgl. BMNT, 2016).Ein Vergleich der verschiedenen Klimawandelszenarien aus der Literatur zeigt Unterschiede, aber eine deutliche Richtung hin zu zukünftig wärmeren Jahresmitteltemperaturen und eine Verschiebung der Niederschläge von den Sommer- zu den Wintermonaten.

Es wird dabei vermutet, dass die Temperaturveränderungen Auswirkungen auf die Naturgefahrenprozesse haben werden. Die Experten konnten aber in ihren Studien bisher keine eindeutigen Trends bzgl. Veränderungen der Naturgefahrenprozesse feststellen. Es wird aber in vielen Studien erwartet, dass durch die wärmeren Temperaturen vor allem die Lawinenhäufigkeit in den mittleren Lagen abnehmen wird (APCC 2014; Laternser und Schneebeli 2003). Des Weiteren wird von einer Häufung der Extremwetterereignisse ausgegangen. Diese Ereignisse sind aber mit großen Unsicherheiten behaftet und schwierig zu modellieren. Doch gerade diese Informationen wären für das Prozessgeschehen im Wald und bei Naturgefahren und somit für den prozessorientierten Schutzwaldbau wichtig. Hier zeigt sich noch großer Forschungsbedarf.

Klimawandel- sensitive Verbreitungsmodellierungen und Klimahüllenmodelle von Baumarten bieten eine gute Möglichkeit zu zeigen, dass sich die Standorteignungen von vielen Baumarten zukünftig verändern werden und sie vermutlich in höhere Lagen wandern, wo die Bedingungen geeigneter sind. Vor allem kolline und montane Lagen sind daher zukünftig für trockenheitssensitive Baumarten wie die Fichte ungünstig (Zimmermann et al. 2016a; Kölling 2007; Schadauer et al. 2019). In Hochlagen hingegen wird von wärmebedingt günstigeren Wuchsbedingungen für die dort verbreiteten Baumarten ausgegangen (Zimmermann et al. 2016a; Bebi et al. 2016). Jedoch zeigt die Studie von Oberhuber et al. (2020), dass das Wachstum in den Hochlagen (subalpine Zone) v.a. von der Verfügbarkeit der Ressourcen wie Nährstoffe, Licht und Wasser abhängig ist. Wie sich der Klimawandel auf die mittleren Lagen (von ca. 1000 bis 1500 m SH) auswirkt, wird in der verwendeten Literatur nicht eindeutig beschrieben und stellte auch für den praktischen Teil der Arbeit eine Beurteilungshürde dar. Nach Einschätzung des Bearbeiters wird es auch hier, je nach Standort für die Fichte und andere trockenheitsgefährdete Baumarten zu Stress und Kalamitätsbefällen kommen.

Die Verbreitungsmodellierungen weisen große Unsicherheiten auf, wie es in der Natur von Modellen liegt. Die wichtigsten Unsicherheiten stammen von 1) den Klimaszenarien, da unklar ist, welches Szenario die Zukunft am besten beschreibt; 2) den Klimamodellen, da nicht jedes genau die gleiche Zukunft simuliert; 3) den statistischen Modellen, da nicht

jedes dieselbe Standorteignung anhand der gleichen Inputdaten simuliert; und 4) den Verbreitungsdaten, deren Qualität, den Modellfehler beeinflusst (Zimmermann et al. 2016b). Zudem stehen auch die Klimahüllen für Baumarten seit jeher in der Kritik, da diese Modelle auf Basis von Langzeitmittelwerten erstellt werden. Diese vernachlässigen dabei den Einfluss des Bodens auf das Wasserangebot und berücksichtigen keine Extremwetterereignisse Es stellt sich auch die Frage, ob die Klimahüllenmodelle in die Zukunft versetzt werden können, da unterstellt wird, dass es zu keinerlei Anpassung der Bäume an das Klima kommt (vgl. (Bolte et al. 2008; Schadauer et al. 2019). Somit sind Verbreitungsmodellierungen und Klimahüllenmodelle nur als Richtungsweiser zu verstehen und nicht als fixe Vorhersage.

Vor allem berücksichtigen sie keine mögliche Anpassungsfähigkeiten der Bäume, da beide Faktor nicht bzw. sehr schwierig zu modellieren sind. Beobachtungen von Wissenschaftlern zeigen, dass Baumarten tatsächlich deutlich langsamer auf Umweltbedingungen reagieren als die Modelle zeigen. Beispielsweise ist die reale Waldgrenze (vgl. Zimmermann et al. 2016 nach Dullinger et al. 2012) unter der modellierten. Die Experten vermuten, dass die physiologischen Grenzen von Bäumen durch Klimaextreme, nicht durch langjährige Mittelwerte bestimmt werden. Jedoch spielt auch die veränderte Landnutzung eine entscheidende Rolle (Almschwende). Auch hier scheinen bei den Wissenschaftlern noch große Unsicherheiten zu herrschen, v.a. wegen der ungenügenden Wissenslage zu Klimaextremen (Zimmermann et al. 2016b; APCC 2014).

Kommt es zu keiner Anpassungsfähigkeit, so rechnen die Experten mit erhöhter Mortalität der trockenheitssensitiven Baumarten. Besonders Fichte in den tieferen Lagen ist von erhöhter Störanfälligkeit gegenüber Wind, Borkenkäfer gekennzeichnet (Seidl et al. 2011). Jedoch zeigen z.B. Etzold et al. (2016), dass die Fichten- Mortalität nicht primär durch die Trockenheit bedingt ist, sondern durch sekundäre Faktoren wie Borkenkäfer, die an Störungen (z.B. Starkwinde, Schneebrüche, oder Lawinenereignisse) gekoppelt sind. Es wird erwartet, dass es dadurch zu Einbußen in der Schutzwaldwirkung kommen kann. Diese sind aber nach ihrer Art und Intensität differenziert zu beurteilen (Bebi et al. 2016). Zusammenfassend zeigt sich, dass sich die Experten einig sind, dass es zu Veränderungen in den Naturgefahrenprozessen und im (Schutz-) Wald kommen wird, aber es noch große Unsicherheiten gibt, wie diese gestaltet sind.

Die Literaturauswertung ergab zudem auch viele Vorschläge zu den Anpassungskapazitäten in der Forstwirtschaft, speziell auf den fokussierten Schutzwaldbereich. Durch Naturgefahrenprozess- und Klimawandel- orientierte Waldbaumaßnahmen kann dabei jedenfalls die Vulnerabilität gesenkt werden. Eine „Maßschneiderung“ der Schutzwälder ist dabei jedoch nicht möglich. Jedoch können Adaptionen darauf abzielen die Resistenz und Resilienz der Wälder gegenüber Störungen zu erhöhen und somit die ökologischen und ökonomischen Schäden zu verringern.

All die mögliche Adaptionsstrategien in der Literatur sind aber nutzlos, wenn es nicht zur öffentlichen Akzeptanz und Bereitschaft der Waldbewirtschafter kommt, auch diese

Maßnahmen umzusetzen um „klimafitte“ Schutzwälder zu schaffen. Es ist dabei auch das Einbringen von fremdländischen Baumarten wie die Douglasie zu diskutieren. Die traditionellen Bewirtschaftungsmuster sind daher jedenfalls zu hinterfragen. Vor allem großflächige Fichtenbestände in den Tieflagen werden zukünftig keine Chance mehr haben, das zeigen nicht nur die enormen Schadholzmengen der Vergangenheit. Es muss jedenfalls das Umdenken in der Forstwirtschaft, speziell im Schutzwaldbereich gefördert werden. Ein Hindernis in den Anstrengungen um einen „klimafitten“ Schutzwald ist jedenfalls die seit Jahrzehnten herrschende Wildproblematik. Das Wild kann hier enorme ökonomische und ökologische Schäden verursachen. Die Forstwirtschaft wird auch noch in Zukunft mit diesen Problemen zu kämpfen haben. Wenn wir schon heute „klimafitte“ Wälder schaffen, dann sind sie bis zum Ende des 21. Jahrhunderts soweit, dass sie zumindest den Großteil ihrer geforderten Schutzwirkung erfüllen können.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass es große Unsicherheiten in der Forschung gibt, wie sich einerseits der Klimawandel tatsächlich entwickelt und welche Auswirkungen dieser auf Naturgefahrenprozesse und den (Schutz-) Wald hat. Wie so oft liegt die Wahrheit irgendwo in der Mitte. Wenn wir es aber schaffen, den Wald möglichst Prozess- und Klimawandel- angepasst zu gestalten, so können die Risiken für den Wald gesenkt und seine Schutzwirkungen erhalten werden.

5.2 Methodik

Es zeigte sich im Zuge dieser Masterarbeit, dass das Schutzwaldbewertungsinstrument NaiS eine wertvolle, da praxisorientierte, Methode darstellt, um die Schutzfunktionalität von Wäldern zu beurteilen. Allerdings fehlt bis dato ein Modul zur Bewertung des Klimawandels. Nach einer gewissen Anlernzeit der Methode konnte relativ einfach ein Handlungsbedarf auf den Flächen hergeleitet werden. Schwierigkeiten bereitete am ehesten die Einschätzung der „Entwicklung ohne Maßnahmen“ für den Zeitraum „in 50 Jahren“, da hier viele Faktoren, wie z.B. Störungen (z.B. Wind) die Entwicklungen beeinträchtigen können, jedoch aber schwierig zu prognostizieren sind. Hierbei stellt sich auch die Frage, ob es realistisch ist, dass 50 Jahre lang keine Maßnahmen am Bestand durchgeführt werden.

Als weiterer Kritikpunkt ist anzusehen, dass die Methode NaiS die ineinandergreifenden Wirkungsmechanismen von Naturgefahrenprozessen zu wenig berücksichtigt. Als Beispiele sind der Massenschurf durch Seitenerosion durch Hochwasser genannt, welche sich beide als auslösende Mechanismen für Rutschungen- oder Kriechprozesse auswirken können. Erst dieses Verständnis zeigt die hohe Schutzwirkung der Bergwälder gegenüber diesen Prozessen auf.

Nach Einschätzung des Bearbeiters fehlen im NaiS Aufnahmeformular Bestandesparameter wie „Totholzanteil“, oder „Vitalität“. Speziell die Aufnahme des Totholzanteils ist für die Steinschlagschutzwirkung (Abbremsung des Sturzprozesses) von hoher Bedeutung. Eine Beurteilung der Vitalität könnte hingegen hilfreich für die zukünftige Entwicklung des Bestandes sein.

Die Erweiterung nach NaiS mit dem Faktor Klimawandel stellte sich quasi als Erfordernis heraus, um die „Klimafitness“ der Schutzwaldbestände zu bewerten. Die drei Bestandes- und Einzelbaummerkmale (Mischung, Gefüge und Verjüngung) wurden sorgfältig gewählt, da hier eine Bewertung der zukünftigen Entwicklung dieser Merkmale als möglich und zumutbar erachtet wird. Im Gegensatz scheint es aus Sicht des Bearbeiters nicht möglich bspw. die Entwicklung des Merkmals „Stabilitätsträger“ mit den Ausprägungen Kronenentwicklung, Schlankheitsgrad und Ziel- Durchmesser bis zum Jahr 2100 zu beurteilen. Die Unsicherheiten sind hier zu groß, wodurch die Qualität der Bewertung leiden würde.

Auch in der im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit erstellten Erweiterung spielen große Unsicherheiten bezüglich der Klimaeinflüsse auf die Schutzwälder eine wesentliche Rolle. Aufgrund der unsicheren allgemeinen Wissenslage, ob und wie das gewählte Klimawandelszenario eintreten wird (APCC, 2014) und welche Auswirkungen dieses auf den Wald haben wird (z.B. Zimmermann et al. 2016), ist eine Beurteilung bzw. Prognose abzugeben recht schwierig. Vor allem die für die Waldynamik wichtigen Trigger der Extremereignisse (Störungen) sind laut Literatur kaum zu modellieren (APCC, 2014), aber beeinflussen sehr stark die Schutzwaldwirkung (z.B. Seidl et al. 2019; Sebald et al. 2019). Die Beurteilungen wurden jedenfalls nach bestem Wissen durchgeführt und können zumindest als Leitfaden für eine klimafitte Schutzwaldbewirtschaftung angesehen werden.

Generell sind dieser Methodik in ihrer Genauigkeit Grenzen gesetzt und unterliegen immer den persönlichen Einschätzungen des Bearbeiters. Beispielsweise Einschätzungen ob die Dringlichkeit „mittel“ oder „groß“ ist, ist oft fließend. Könnte aber bspw. über ein definiertes Punktesystem verbessert werden, wodurch sich diese Methode in ihrer Genauigkeit erhöhen könnte. Dem Bearbeiter ist bewusst, dass die Möglichkeit einer simulationsbasierten Bewertung mit einem hohen Dateninput wie bspw. Klima, Naturgefahrenprozesse und Bestandesdaten die Genauigkeit im Allgemeinen steigern würde. Dadurch ergäbe sich die Möglichkeit von integralen Szenarienbetrachtungen und damit eine verbesserte Aussagemöglichkeit in der Festlegung der erforderlichen Handlungsschritte.

6 CONCLUSIO

Der Klimawandel stellt einen Stresstest für die alpinen Schutzwälder dar. Wie stark dieser ausfällt und welche Folgen er für den Schutzwald, seine Funktion und auf die Naturgefahrenprozesse haben wird lässt sich aus heutiger Sicht nur schwer einschätzen. Jedoch können die Risiken durch prozess- und klimawandelorientierte Adaptionsstrategien im Schutzwaldbau präventiv gesenkt werden. Die Beurteilung der ausgewählten Schutzwaldbestände im Untersuchungsgebiet Patscherkofel hat gezeigt, dass derzeit die vorhandenen Naturgefahrenpotentiale in der Bewirtschaftung nicht oder zumindest zu wenig beachtet werden. Ebenso werden derzeit noch kaum klimawandelorientierte Maßnahmen umgesetzt und wenn, dann werden häufig prozessorientierte Parameter zu wenig berücksichtigt. Jedoch zeigen die Bestände im Untersuchungsgebiet ein gutes Ausgangspotential um diese „klimafit“ zu bewirtschaften. Die Anpassungen sollten aber zeitnah erfolgen, damit die Schutzwaldbestände ihre Schutzfunktion bis zum Ende des Jahrhunderts erhalten bzw. voll entwickeln können. Denn nur unter der Voraussetzung, dass die Schutzwälder prozess- und klimawandelorientiert bewirtschaftet werden, erlangen sie als permanente, flächige Schutzmaßname eine nachhaltig wirksame Bedeutung für die Bevölkerung.

7 APPENDIX

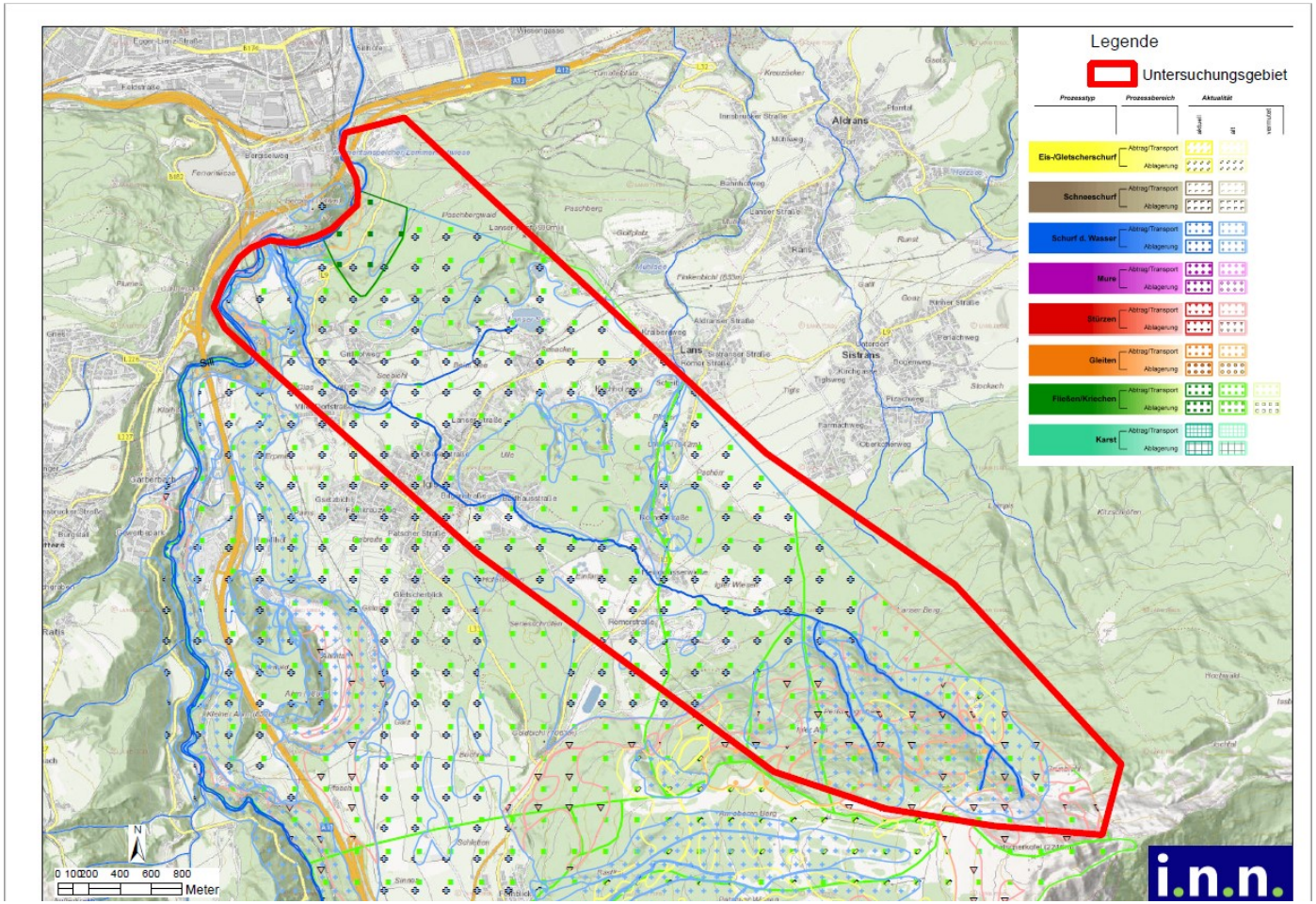
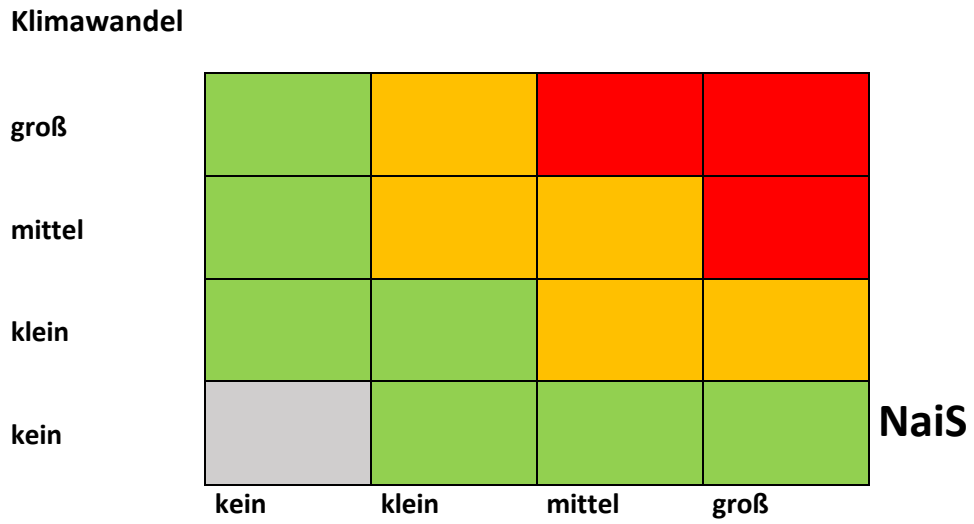


Abbildung 21: Die Naturgefahrenprozesskarte des Untersuchungsgebietes (auf Basis EGAR). Die maßgebenden Naturgefahrenprozesse für das gesamte Untersuchungsgebiet sind laut der Kartierung Rutschungen, Erosionen und Murgänge. Dabei treten Stirnrutschungen und Sturzprozesse aus der tiefgreifenden Massenbewegung vor allem in den Grabenbereichen des Igler- Alm- Graben, Lanser- Graben und im Bereich der Sill- Schlucht auf. Speziell hier soll der Wald diese Prozesse verhindern oder deren Schäden vermindern (Quelle: i.n.n., 2019).

Tabelle 11: Ziel- und Behandlungstypen, sowie Probeflächen für das Untersuchungsgebiet Patscherkofel.

Zielt.-N	Standortseinheit	Anmerkung	Standortstyp nach Waldtypenhandbuch Tirol	Standortstyp nach NaiS	Behandlungstyp	Probefläche	Höhenstufe
1	**Lärchen- Zirbenwald**	Deutsch	Armer Silikat Lärchen- Zirbenwald	Lärchen- Arvenwald mit Alpenrose	A1: SaE Hochwald A2: Altholz	A1, A2	tiefsubalpin: (1500) 1700- 2000 (2100) m
	Schutzfunktion: Rutschung/ Erosion/ Murgang und Lawinen	*Latein*	*Larici- Pinetum cembrae rhododendretosum ferruginei, Vaccinio- Pinetum cembrae*	*Larici- Pinetum cembrae typicum; Nr. 59*			Höhenzone 3
2	**Subalpiner- Fichtenwald**	Deutsch	Subalpiner frischer Silikat Fichten- Wald	Alpenlattich- Fichtenwald mit Wollreitgras	B1: Stangenholz B2: Dickung B3: Baumholz B4: Dickung B5: Baumholz	B1- B5	hochmontan: 1400- 1700 (1850) m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Homogyno- Piceetum luzuletosum sieberi*	*Homogyno- Piceetum calamagrostietosum villosae; Nr. 57C*			Höhenzone 3
3a	**Fichten- Tannen- Wald**	Deutsch	Hochmontaner Karbonat Fichten- Tannenwald	Karbonat- Tannen- Fichten- Wald mit Weisssegge	C1: Altholz	C1	mittel- hochmontan: 1100- (1400)- 1700 m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Adenostylo glabrae- Abietetum caricetosum ferrugineae*	*Adenostylo glabrae- Abieti- Piceetum caricetosum albae; Nr. 52*			Höhenzone 2
3b,e	**Fichten- Tannen- Wald**	Deutsch	Frischer Silikat- Fichten- Tannenwald	Farnreicher Wollreitgras- Tannen- Fichtenwald	C2: Altholz	C2, C5	mittel- hochmontan: 1100- (1400)- 1700 m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Calamagrostio villosae- Abietetum calamagrostietosum arundinaceae*	*Calamagrostio- villosae- Abieti- Piceetum dryopteridetosum; Nr. 60**	C5: Dickung		Höhenzone 2
3c	**Fichten- Tannen- Wald**	Deutsch	Reicher Silikat Fichten Tannenwald	Typischer Labkraut- Tannen- Fichtenwald	C3: Stangenholz	C3	mittel- hochmontan: 1100- (1400)- 1700 m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Galio rotundifolii- Abietetum (Oxali- Abietetum) dryopteridetosum*	*Galio- Abieti- Piceetum typicum; Nr. 51*			Höhenzone 2
3d	**Fichten- Tannen- Wald**	Deutsch	Montaner frischer Silikat- (Lärchen) Fichten- Wald	Ehrenpreis- Fichtenwald	C4: Dickung	C4	mittel- hochmontan: 1100- (1400)- 1700 m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Veronico latifoliae- Piceetum typicum*	*Veronico latifoliae- Piceetum; Nr. 55*			Höhenzone 2
4a,b	**Buchenmischwälder der submontanen Stufe**	Deutsch	Frischer basischer Edellaubholz- Buchen- Wald	Typischer Waldmeister Buchenwald	D1, D2: ungleichaltrig	D1, D2	Submontan: 650- 900 (1000) m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Galio odorati- Fagetum typicum, luzuletosum; Tilio cordatae- Fagetum*	*Galio- Fagetum typicum; Nr. 7a*			Höhenzone 1
5a	**Laubwälder der collinen Stufe**	Deutsch	Armer Silikat- Kiefern- Eichenmischwald	Hainsimsen Eichenwald	ungleichaltrig	E1	Submontan: 650- 900 (1000) m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Genisto germanicae- Quercetum roboris vaccinietosum myrtili*	*Luzulo- Quercetum; Nr. 41**			Höhenzone 1
5b	**Laubwälder der collinen Stufe**	Deutsch	Reicher Silikat- Eschen- Linden- Mischwald	Ahorn- Lindenwald/ Trockener Turinermeister- Lindenwald	ungleichaltrig	E2	Submontan: 650- 900 (1000) m
	Schutzfunktion: Rutschung/Erosion/ Murgang	*Latein*	*Arunco- Tilietum cordatae, Aceri- Tilietum festucetosum altissimae*	*Aceri-Tilietum/ Asperulo taurinae- Tilietum tametosum; Nr.25**			Höhenzone 1

Tabelle 12: Gesamthandlungsbedarfe der Probeflächen durch Kombination der Bewertung NaiS (Abszisse) und Klimawandel (Ordinate), dargestellt über eine Risikomatrix bzw. Ampelsystem.



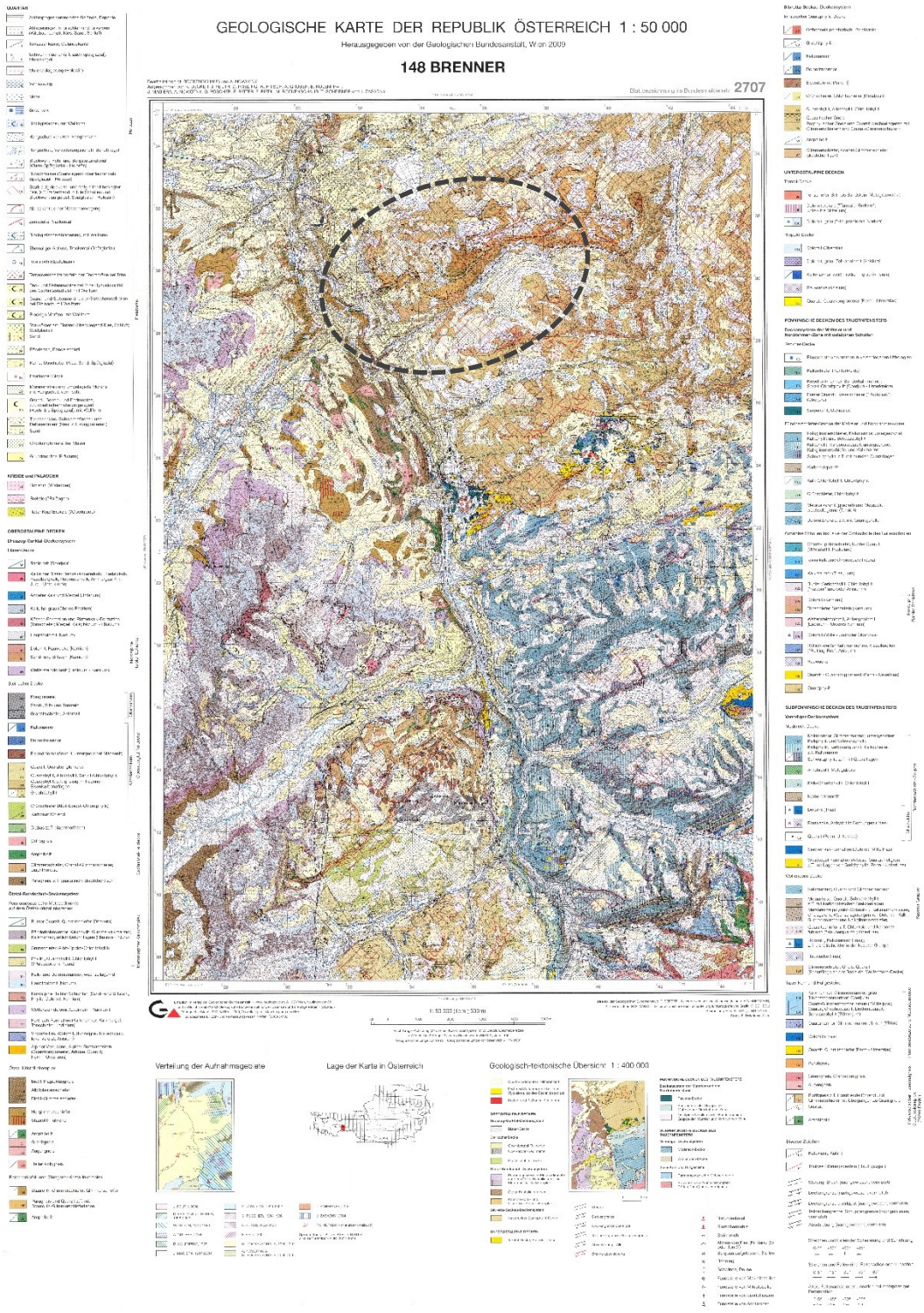


Abbildung 22: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes (schwarz- gestrichelte Ellipse) im Maßstab 1: 50.000, Blatt 148 Brenner herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt. Quelle: (Rockenschaub und Nowotny 2009)

Tabelle 13: Die wichtigsten Schutzwaldbaumarten und ihre Eigenschaften:

Baumart	Schutzwald Eigenschaften		Geeignet für folgende Schutzwaldfunktionen:
	Pro	Contra	
Ahorn (Acer spp)	Pionierbaumart- stabilisiert feucht- humose Kalksteinschutthalden, intensiv verzweigtes, flaches Herz-Senkerwurzelsystem (ähnlich der Buche), schneebruchresistent, hartes Holz, hohes Wundausvermögen (Steinschlag) (2)	Geringe, aber intensive Durchwurzelung auf Pseudogleyböden; spätfrostgefährdet in der Jugend, sehr stark gefährdet durch Verbiss, Schälung und Verfegen (2)	Steinschlag, (Lawine) (1)
Fichte (Picea abies)	Hohe Interzeption, stammzahlreiche Schutzwaldbestände, Eignung für den Nebenbestand, langanhaltende Leistungsfähigkeit, Kleinflächenverjüngung möglich (1)	Geringe Stabilität, Tendenz zum Schichtungsverlust, gegen Wind- und Schneekatastrophen anfälliger, verletzungsempfindlich (1)	(Hochwasservorbeugung), Lawine, (Steinschlag), (1)
Kiefer (Pinus spp)	Pionierbaumart für ärmere und trockener Standorte, tiefwurzelnd (Herzwurzelsystem); sturmfest, widerstandsfähig gegen Winter- und Spätfrost, Vorwaldbaumart, relativ dürreresistent (Tieflagenkiefer, nicht Höhenkiefer!) (2)	Schneebruch und Schneedruck gefährden Dickungen (2)	Steinschlag, Rutschungen bzw. Erosion (1)
Lärche (Larix decidua)	durch tiefe Bewurzelung Förderung der Infiltration und Erhöhung der Bestandesstabilität; langlebig und relativ schadensresistent, Überhälterfähigkeit, reichliche Naturverjüngung, rasche Bodenbedeckung in der Jugend, als Lichtbaumart schichtungserhaltend (1)	Geringe Interzeption, Relative Stammzahlarmut, rasche Verlichtung, geringe Leistungsfähigkeit, keine Kleinflächenverjüngung möglich (1)	Hochwasservorbeugung, Lawine, Rutschungen bzw. Erosion (1)
Tanne (Abies alba)	Tiefe Durchwurzelung (Pfahlwurzel). Auf staunassen Pseudogley wurzelt Tanne tiefer als andere heimische Nadelbäume; ziemlich winterfrosthart; auffallend windhart; weniger anfällig auf Rindenverletzungen als Fichte (2)	Stark gefährdet durch Wildeinfluss (2)	Hochwasservorbeugung, Lawine, Steinschlag, Rutschungen bzw. Erosion (1)
Zirbe (Pinus cembra)	Maximale Interzeption, durch flaches, weites Wurzelsystem geringere Förderung der Niederschlagsversickerung, langlebig, sehr widerstandsfähig gegenüber Beschädigungen; hohe Stabilität, Schichtung, Mischung, maximale Zuwachsleistung; sehr langlebig (1)	Reduzierte Standfestigkeit in der Altersphase durch zurücksterben der Randwurzeln (Windwurfgefahr), durch (Halb-) Schattbaumartcharakter keine nachhaltige Schichtung im geschlossenen Bestand; sehr ausgeprägte Langsamwüchsigkeit in der Jugend (1)	Hochwasservorbeugung, (Lawine), Steinschlag, Rutschungen bzw. Erosion (1)
Quelle: (1): (Mayer 1976); (2): (Mayer 1984)			

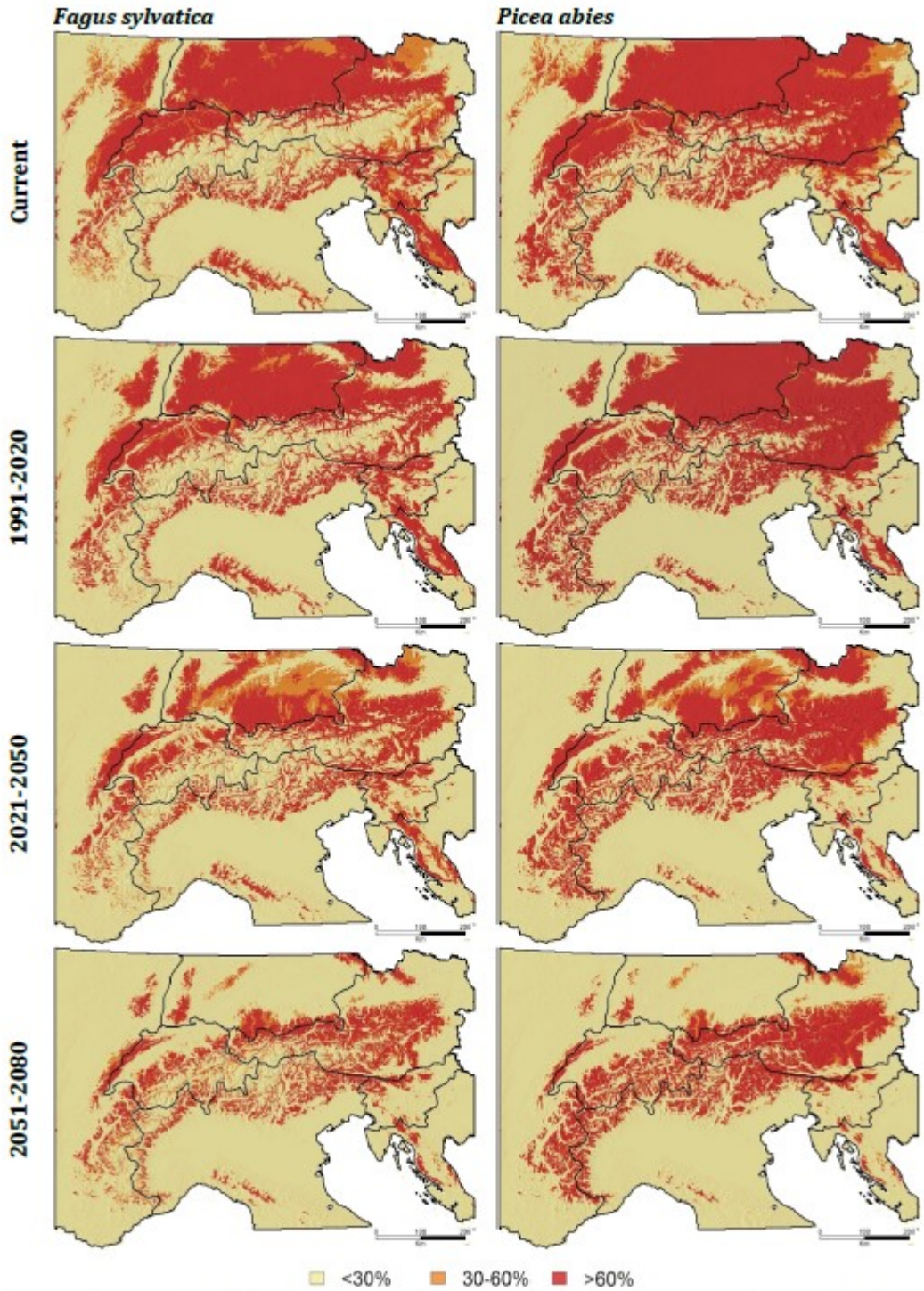


Figure 10: Projected future habitat suitability from ensemble SDM modeling of *Fagus sylvatica* and *Picea abies* for current and projected future climate in three time periods. Dark red colors represent high agreement that models suggest presence, respectively from six statistical and six climate models. Beige colors indicate high agreement that the species is absent, while intermediate orange colors indicate high uncertainty whether the species is present or absent for the given time period.

Abbildung 23: Projizierte Modellierung zukünftiger Habitateignung von Buche und Fichte für das heutige und zukünftige Klima in drei Zeitperioden. Man erkennt deutlich eine Abnahme der Habitateignung auf Grund des Klimawandels. Quelle: Zimmermann, Normand et al. 2016.

Tabelle 14: Bewertungsformular für die Beurteilung der Fläche bezüglich des Klimawandels. Formular basiert auf dem „Formular 2“ nach Frehner et al. (2005), wurde aber nach den Erfordernissen des Autors verändert. Minimal- und Idealprofil ergeben sich auf Grund des Standortstyps und der Naturgefahr und wurden direkt von Frehner et al. (2005) übernommen.

8. Zustand, Entwicklungstendenz unter Klimawandel und Massnahmen							
Flächen- Nr.:		**Durchschnittlich Neigung:**	☐ <28° ☐ >28				
Seehöhe:		**Gefährdeter Seehöhenbereich?**	☐ ja ☐ nein				
Bestandes- und Einzelbaum-merkmale	**Minimalprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	**Idealprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	Zustand heute	Baumartenwahl auf Klimawandel abgestimmt	Entwicklung ohne Maßnahmen unter Klimawandel: bis 2100 / heute	wirksame Massnahmen	verhältnis-mässig
Mischung - **Art und Grad**				☐ ja ☐ nein			☐ ja ☐ nein
Gefüge, vertikal -**BHD Streuung**							☐ ja ☐ nein
Verjüngung -**Keimbett** -**Lücken**							☐ ja ☐ nein
					sehr schlecht / minimal / ideal		
Handlungsbedarf:	☐ ja ☐ nein	**Dringlichkeit:**	☐ klein ☐ mittel		☑ gross		

Erörterung Handlungsbedarf aufgrund des Klimawandels:

Exemplarisches Aufnahmeformular für die Probeflächen E2:

NaiS - Formular 2 — **Herleitung Handlungsbedarf**

Ort: Innsbruck/ Igls/ Sill- Schlucht (Sill- Schlucht- Wanderweg); Fläche E2, **Datum:** 23. Oktober 2019 **Bearbeiter/-i** Lukas Bauhofer

1. Standortstyp(en) 25* Ahorn-Lindenwald / Trockener Turinermeister-Lindenwald; ungleichaltrig aber mit Dickungscharakter

2. Naturgefahr Rutschungen, Erosion, Murgänge: Infiltrationsgebiet: mittel- und tiefgründig; mittlerer potentieller Beitrag des Waldes — **Wirksamkeit** mittel

3. Zustand, Entwicklungstendenz und Massnahmen

Bestandes- und Einzelbaum-merkmale	**Minimalprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	**Idealprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	Zustand heute	Entwicklung ohne Massn. in 50 Jahren / in 10 Jahren / heute	wirksame Massnahmen	verhältnis-mässig	**6. Etappenziel mit Kontrollwerten:** Wird in .... Jahren überprüft
Mischung - Art und Grad	Li, Ah, Er, Ei, Ki, Mb, andere Lbb 90 - 100 %	Li, Ah, Er, Ei, Ki, Mb, andere Lbb 100 %	Ba 20 %, Harel 20 %, Ul 20 %, Er 20 %, Fi 10 %, rauntige Lbb 10 %			☐ ja ☐ nein	
Gefüge, vertik - BHD Streuung	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Ø-Klassen pro ha	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Ø-Klassen pro ha	2 Durchmesserklasse <12 cm, 12 - 30 cm			☐ ja ☐ nein	
Gefüge, horizontal - Deckungsgrad - Stammzahl - Lückenbreite	*DG deutlich < 50 %; minimale Anforderungen auf Grund der Standortstyps erfüllt*	Schlussgrad normal - lucker *DG deutlich > 50 %; ideale Anforderungen auf Grund der Standortstyps erfüllt*	Deckungsgrad über 50 %, Lückengrüße unter 50 m², keine schueren Bäume; Stz: > 400 Stk/ ha			☐ ja ☐ nein	
Stabilitäts-träger - Kronenentw. - Schlankheitsg. - Ziel-Ø	Meistens Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger	Stämme mit guter Verankerung, keine starken Hänger	Stabilitätsträger stark unterrepräsentiert, da Dickungscharakter; Minimalprofil nicht erfüllt		Stabilitätsträger fördern! Starke Überhänger entfernen -> wirken sich negativ auf Hangschutz im Sill-Bereich aus	☐ ja ☐ nein	
Verjüngung - Keimbett	Vor Schutzbewegung geschützte Kl'Stan vorhanden. Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz für Esche < 1/3	Vor Schutzbewegung geschützte Kleinstandorte vorhanden. Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz für Er < 1/10	sehr starke Vegetationskonkurrenz durch Brom- und Himbeeren und Vergrasung da Luftfeuchtigkeit in Schluchtlage hoch ist		Vegetationskonkurrenz entfernen; Verjüngung fördern	☐ ja ☐ nein	
Verjüngung - Anwuchs (10 bis 40 cm Höhe)	In Lücken vorhanden	In allen Lücken vorhanden	Anwuchs mit Fi, Ul, Bah flächendeckend vorhanden, aber nicht gesichert (Vegetationskonkurrenz)		Anwüchse und Aufwüchse durch Pflegeeingriffe fördern; Vegetationskonkurrenz entfernen	☐ ja ☐ nein	
Verjüngung - Aufwuchs (bis und mit Dickung, 40 cm Höhe bis 12 cm BHD)	Pro ha mind. 2 Trupps (2 - 5 a, im Ø alle 75 m) oder Deckungsgrad mind. 4 %; Mischung zielgerecht	Pro ha mind. 3 Trupps (2 - 5 a, im Ø alle 60 m) oder Deckungsgrad mind. 9 %; Mischung zielgerecht	Aufwuchs flächendeckend vorhanden aber nicht gesichert (vegetationskonkurrenz)			☐ ja ☐ nein	

sehr schlecht — minimal — ideal

4. Handlungsbedarf ☑ ja ☐ nein **5. Dringlichkeit** ☐ klein ☐ mittel ☑ gross **Nächster Eingriff:** _____

Tabelle 15: Beurteilung des Bestandes E1 unter dem Klimawandel.

8. Zustand, Entwicklungstendenz unter Klimawandel und Massnahmen

Flächen- Nr.:	E1	**Durchschnittlich Neigung:**	☐ <28° ☑ >28°				
Seehöhe:	620 m	**Gefährdeter Seehöhenbereich?**	☑ ja ☐ nein				
Bestandes- und Einzelbaum-merkmale	**Minimalprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	**Idealprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	Zustand heute	Baumartenwahl auf Klimawandel abgestimmt	Entwicklung ohne Maßnahmen unter Klimawandel (bis 2100 / heute)	wirksame Massnahmen	verhältnis-mässig
Mischung - **Art und Grad**	Li, Ah, Es, Ei, Ki, Mb, andere Lbb 90 - 100 %	Li, Ah, Es, Ei, Ki, Mb, andere Lbb 100 %	Ah 20 %, Fi 20 %, Li 20 %, Ul 20 %, Ki 10 %, Es < 10 %, Bu < 10 %	☑ ja ☐ nein		Tanne einbringen	☑ ja ☐ nein
Gefüge, vertikal **-BHD Streuung**	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Ø-Klassen pro ha *0*	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Ø-Klassen pro ha *0*	gut strukturierter Bestand in 2 Durchmesserklassen, <12 cm, 12- 30 cm				☐ ja ☐ nein
Verjüngung **-Keimbett** **-Lücken**	Vor Schuttbewegung geschützte Kl'Stao vorhanden. Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz für Esche < 1/3; **Lücken:** **DG dauernd ≥ 30 %, minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt**	Vor Schuttbewegung geschützte Kleinstandorte vorhanden. Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz für Es < 1/10; **Lücken:** DG dauernd ≥ 50 %, ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Wenig Vegetationskonkurrenz; gute Verjüngung durch verschiedene Lbb; **Lücken:** LG< 50 m²; DG> 60 %; StZ >400 Stk/ha				☐ ja ☐ nein

sehr schlecht — minimal — ideal

Handlungsbedarf: ☑ ja ☐ nein **Dringlichkeit:** ☑ klein ☐ mittel ☐ gross

Tabelle 16: Exemplarische Aufnahmeformular für die Probefläche D1.

Ort: Innsbruck/ Igls/ oberhalb Igler Landesstraße; Fläche D1; ungleichaltrig **Datum:** 23. Oktober 2019 **Bearbeiter/-i** Lukas Bauhofer

1. Standortstyp(en) 7a Typischer Waldmeister-Buchenwald

2. Naturgefahr Rutschungen, Erosion, Murgänge: Infiltrationsgebiet: mittel- und tiefgründig; mittlerer potentieller Beitrag des Waldes + Steinschlag **Wirksamkeit** #NV

3. Zustand, Entwicklungstendenz und Massnahmen

Bestandes- und Einzelbaum-merkmale	**Minimalprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	**Idealprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	Zustand heute	Entwicklung ohne Massn. / in 50 Jahren / in 10 Jahren / heute	wirksame Massnahmen	Verfahrens-nutzung	**6. Etappenziel mit Kontrollwerten:** Wird in .... Jahren überprüft
Mischung - Art und Grad	Lbb 70 - 100 % Bu 30 - 100 % Fi 0 - 10 %	Lbb 100 % Bu 50 - 90 % Sw: BAh 10 - 20%	Fi 70 %, Ki 20 %, Lbb (Bu, Bah, Ul) 10 %		mittelfristig standortsgerechte Baumarten fördern bzw. künstlich verjüngen z.B. mit Femelschlag oder Streifenhieb	☑ ja ☐ nein	
Gefüge, vertika - BHD Streuung	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Ø-Klassen pro ha	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Ø-Klassen pro ha	genügend entwicklungsfähige Bäume in 2 Durchmesserklassen 12- 30 cm und 31- 50 cm			☐ ja ☐ nein	
Gefüge, horizontal - Deckungsgrad - Stammzahl - Lückenbreite	*DG dauernd< 30 %; minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt*	Schlussgrad normal - locker *DG dauernd< 50 %; ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt*	Überschirmung dauernd > 50 %; Lückengröße unter 200 m², vereinzelt Totholz längs zur Falllinie liegend			☐ ja ☐ nein	
Stabilitäts-träger - Kronenentw. - Schlankheitsg. - Ziel-Ø	Mind. die Hälfte der Kronen gleichmässig geformt Lotrechte Stämme mit guter Verankerung, nur vereinzelt starke Hänger	Nur wenige Kronen stark einseitig; lotrechte Stämme mit guter Verankerung, keine starken Hänger	lotrechte Stämme, einzelne Überhänger, wenig starke Bäume, Kronenprozent bei 40 %, schlechte Verankerung		Z- Baum. Durchforstung; Stämme quer zum Hang liegen lassen	☑ ja ☐ nein	
Verjüngung - Keimbett	Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz < 1/3	Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz < 1/10	kaum Vegetationskonkurrenz, kaum Keimlinge		Langfristig: Femelhiebe-> Mischbaumarten fördern!	☑ ja ☐ nein	
Verjüngung - Anwuchs (10 bis 40 cm Höhe)	Bei Deckungsgrad < 0.8 mind. 10 Bu pro a (im Ø alle 3 m) vorhanden	Bei Deckungsgrad < 0.8 mind. 50 Bu pro a (im Ø alle 1.5 m) vorhanden	weniger als 10 Bäumchen vorhanden		Langfristig: Femelhiebe-> Mischbaumarten fördern!	☑ ja ☐ nein	
Verjüngung - Aufwuchs (bis und mit Dickung, 40 cm Höhe bis 12 cm BHD)	Pro ha mind. 1 Trupp (2 - 5 a, im Ø alle 100 m) oder Deckungsgrad mind. 3 %; Mischung zielgerecht	Pro ha mind. 2 Trupps (je 2 - 5 a, im Ø alle 75 m) oder Deckungsgrad mind. 7 %; Mischung zielgerecht	einzelne Lbb aber unter Minimalprofil		Langfristig: Femelhiebe-> Mischbaumarten fördern!	☑ ja ☐ nein	

sehr schlecht — minimal — ideal

4. Handlungsbedarf ☑ ja ☐ nein **5. Dringlichkeit** ☐ klein ☐ mittel ☑ gross **Nächster Eingriff:** _____

Aufnahmeformulare

Tabelle 17: D2: Beurteilung des Bestandes unter dem Klimawandel.

Flächen- Nr.:	D1- ungleichaltrig	Durchschnittlich Neigung:	☐ <28° ☑ >28°				
Seehöhe:	650 m	**Gefährdeter Seehöhenbereich?**	☑ ja ☐ nein				
Bestandes- und Einzelbaum-merkmale	**Minimalprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	**Idealprofil:** Standortstyp *Naturgefahr*	Zustand heute	Baumartenwahl auf Klimawandel abgestimmt	Entwicklung ohne Maßnahmen unter Klimawandel (bis 2100 / heute)	wirksame Massnahmen	verhältnis-mässig
Mischung **- Art und Grad**	Lbb 70 - 100 % Bu 30 - 100 % Fi 0 - 10 %	Lbb 100 % Bu 50 - 90 % BAh 10 - 20%	Fi 70 %, Ki 20 %, Lbb (Bu, Bah, Ul) 10 %	☐ ja ☑ nein		Bestandesumbau hin zu einem gut strukturierten, laubholzreichen Mischbestand aber mit Tannenanteil	☑ ja ☐ nein
Gefüge, vertikal **-BHD Streuung**	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 2 verschiedenen Ø-Klassen pro ha 0	Genügend entwicklungsfähige Bäume in mind. 3 verschiedenen Ø-Klassen pro ha 0	genügend entwicklungsfähige Bäume in 2 Durchmesserklassen 12- 30 cm und 31- 50 cm				☐ ja ☐ nein
Verjüngung **-Keimbett** **-Lücken**	Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz < 1/3; **Lücken:** DG dauernd ≥ 30 %, minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Fläche mit starker Vegetationskonkurrenz < 1/10; **Lücken:** Schlussgrad normal- locker; DG dauernd ≥ 50 %, ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	kaum Vegetationskonkurrenz, kaum Keimlinge; Lücken: Überschirmung dauernd >50 %; Lückengröße unter 200 m², vereinzelt Totholz längs zur Falllinie über den gesamten Bestand verteilt.				☐ ja ☐ nein

sehr schlecht — minimal — ideal

Handlungsbedarf: ☑ ja ☐ nein **Dringlichkeit:** ☐ klein ☐ mittel ☑ gross

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Die drei Haupttypen von Schäden an Bäumen durch Stein- oder Blockschläge: (A) Entwurzelung, (B) Stammbruch und (C) Wipfelbruch durch den "Hula-Hoop"- Effekt (Dorren et al., 2005, S. 9). 14
Abbildung 2: Die drei Arten von Baumtreffern: frontaler Treffer (frontal impact), seitlicher Treffer (lateral) und Kratzer (Streifung) (scratch). (Dorren et al., 2005, S. 6) 14
Abbildung 3: Ablenkung der Steintrajektorie durch das Auftreffen auf den Baum. (1) frontaler Treffer, (2) seitlicher Treffer, (3) Kratzer oder (Dorren et al., 2005, S. 8). 14
Abbildung 4: Anomalien der Jahresmittel der Lufttemperatur zum Mittel des 20. Jahrhunderts für Österreich (schwarz, 1768 bis 2011) und für das globale Mittel (rot, 1850 bis 2011). Einzeljahre und 20-jährig geglättet (Gauß'scher Tiefpass) (APCC, 2014, S. 81). 30
Abbildung 5: Waldentwicklungsplan Tirol. Deutlich zu erkennen ist der hohe Anteil an Waldflächen mit Schutzfunktion (rot). (Amt der Tiroler Landesregierung, 2004). 42
Abbildung 6: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Rutschungen und Hangmuren. (Frehner et al., 2005, S. 9). Anmerkung: 1a$\triangleq 100\ \mathrm{m}^2$. 48
Abbildung 7: Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen. (Frehner et al., 2005, S. 3) 51
Abbildung 8: Anforderungsprofil eines Waldes bezüglich Steinschlags. [1]Zieldurchmesser angepasst: Der Zieldurchmesser ist so zu wählen, dass die erforderliche Stammzahl mit dem wirksamen Mindestdurchmesser nachhaltig möglich wird. [2] Öffnungen von Stamm zu Stamm im Stangenholz und Baumholz. Zitiert n.: (Wehrli et al., 2007, S. 148) 55
Abbildung 9: Klimahüllen der Fichte: aktuelles Vorkommen laut ÖWI 07/09 (links, grün) und mit dem Klimawandelszenario RCP 8.5 im Jahr 2100 (rechts, orange). Der modellierte Bereich deckt zum Teil das optimale Wachstum ab, das nach den Autoren vielleicht auf 1600 bis 1800 m Seehöhe erwartet werden könnte (rot). Verändert nach Schadauer et al. 2019. 62
Abbildung 10: Adaption im Wald im Klimawandel: Ziele, strategische Stossrichtungen [sic!], Adaptionsprinzipien und waldbauliche Maßnahmen (Brang, Küchli et al., 2016). . 64
Abbildung 11: Die Lage des Untersuchungsgebietes südlich von Innsbruck (rot). Patscherkofels (2246 m, roter Pfeil) Tirol/ Österreich. Quelle: verändert nach tirisMaps, 2020. 71
Abbildung 12: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes (lila), die wichtigsten Bäche (blau) mit der Sill (unten), die 1000m Höhenlinie (grün), 1400m Höhenlinie (grün), 2000 m Höhenlinie (rot). Die Stadt Innsbruck befindet sich am unteren linken Bildrand. Im unteren Bereich sind die Brennerautobahn und Brennereisenbahn erkennbar. Somit ist in dieser Darstellung die Relevanz der Schutzwaldbestände gut ersichtlich. Des Weiteren ist die Terrassen- ähnliche Form des Tiroler Mittelgebirges erkennbar. Blickrichtung Patscherkofel, Südost. Quelle: Google Earth, i.n.n. GmbH (2019). 72
Abbildung 13: Karte der Waldfunktionen im Untersuchungsgebiet mit den Probeflächen (schwarz). Mit Ausnahme der Probefläche D2 befinden sich alle Probeflächen auf ausgewiesenen Beständen mit Schutzfunktion (siehe Legende). Die Fläche D2 wurde aufgrund ihrer vorgelagerten Rolle der Schutzfunktion für die Sill- Schlucht in diesem Bereich ausgewählt. (N.N. 2019c). 80

Abbildung 14: Herleitung des Handlungsbedarfs für die Weiserflächen nach der Methode NaiS (Frehner et al. 2005). 83
Abbildung 15: Arbeitsschritte zur Auswahl der Weiserflächen. 84
Abbildung 16: Die fünf zusammengefassten Zieltypen im Untersuchungsgebiet: Zirben-, Lärchenwälder und Krummholzbestände (lila; Probeflächen A1, A2), subalpine Fichtenwälder (grün; Probeflächen B1- B5)), Fichten- Tannen und Fichtenwälder (petrol; Probeflächen C1- C5), Buchenmischwälder der submontanen Stufe (orange; Probeflächen D1, D2) und Laubwälder der kollinen Stufe (hellgrün; Probeflächen E1, E2). Zur Vollständigkeit sind Kiefernwälder und Waldtypenkomplexe angegeben. (N.N. 2019c) 86
Abbildung 17: Darstellung der Entwicklungsprognose innerhalb von 10 Jahren, und 50 Jahren durch den Einfluss des erwarteten Klimawandels unter dem RCP 8.5 Szenario für Tirol. Die Zeilen dienen zur optischen Abgrenzung. 90
Abbildung 18: Flächige Darstellung des Gesamthandlungsbedarfs gereiht nach Dringlichkeit im Ampelsystem. Es zeigt sich, dass die Flächen im Oberhang einen geringere Dringlichkeit aufweisen als die Flächen im Unter- und Mittelhang..... 94
Abbildung 19: Verknüpfung der Klimadaten der Messtationen des Untersuchungsgebietes mit dem Klimahüllenmodell für Fichte nach Schadauer. Werte der ausgewählte Messstellen und der berechneten Punkte für 2020 (schwarz) und Werte unter einem RCP 8.5 Szenario für Tirol für 2100 (rot) (Klimadaten abgerufen und verändert von www.alpenklima.eu, Adler et al. 2015). Klimahüllenmodell: Klimahüllen der Fichte: aktuelles Vorkommen laut ÖWI 07/09 (links, grün) und mit dem Klimawandelszenario RCP 8.5 im Jahr 2100 (rechts, orange). Der modellierte Bereich deckt zum Teil das optimale Wachstum ab, das nach den Autoren vielleicht auf 1600 bis 1800 m Seehöhe erwartet werden könnte (rot). Verändert nach Schadauer et al. (2019). 95
Abbildung 21: Der auffallend schlechte Zustand der Fläche D1 (Bauhofer,2019). 97
Abbildung 23: Die Naturgefahrenprozesskarte des Untersuchungsgebietes (auf Basis EGAR). Die maßgebenden Naturgefahrenprozesse für das gesamte Untersuchungsgebiet sind laut der Kartierung Rutschungen, Erosionen und Murgänge. Dabei treten Stirnrutschungen und Sturzprozesse aus der tiefgreifenden Massenbewegung vor allem in den Grabenbereichen des Igler- Alm- Graben, Lanser-Graben und im Bereich der Sill- Schlucht auf. Speziell hier soll der Wald diese Prozesse verhindern oder deren Schäden vermindern (Quelle: i.n.n., 2019). 0
Abbildung 24: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes (schwarz- gestrichelte Ellipse) im Maßstab 1: 50.000, Blatt 148 Brenner herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt. Quelle: (Rockenschaub & Nowotny, 2009) 1
Abbildung 25: Projizierte Modellierung zukünftiger Habitateignung von Buche und Fichte für das heutige und zukünftige Klima in drei Zeitperioden. Man erkennt deutlich eine Abnahme der Habitateignung auf Grund des Klimawandels. Quelle: Zimmermann, Normand et al. 2016. 0

9 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Lawinenklassifikation- systematische Einteilung von Lawinen gemäß dem „Lawinen- Atlas“. Vereinfachte Darstellung, gekürzt. Quelle: Austrian Standards Institute, 2010. 23
Tabelle 2: Wald und Schutzwald in Tirol (verändert nach: (Rechnungshof, 2015). 42
Tabelle 3: Eigentumsverhältnisse der Tiroler Waldfläche mit Anteil an Schutzwaldfläche [ha], Gesamtwaldfläche [%] und Schutzwaldfläche [%]. Verändert nach: Rechnungshof, 2015. 43
Tabelle 4: Klimadaten für das Untersuchungsgebiet Patscherkofel. Als Referenzwerte sind die Messstationen Rinn und Innsbruck/ Universität angegeben, welche sich nur wenige Kilometer außerhalb des Untersuchungsgebietes befinden. 73
Tabelle 5: Temperatur- und Niederschlagswerte der Periode 2071- 2100 nach dem Klimawandelszenario RCP 8.5 für die Messstationen Innsbruck/ Universität, Rinn und Patscherkofel. Die Jahresmittel- Temperatur erhöht sich dabei um +4,2 °C; der Jahresmittel- Niederschlag nimmt um 6,5 % zu. Quellen: www.alpenklima.eu (Adler et al., 2015), und ÖKS15 (BMNT, 2016). 73
Tabelle 6: Berechnete Jahresmittelwerte für Temperatur und Niederschlag für die Geländepunkte im Untersuchungsgebiet Heiligwasser (1200 m), Igler Alm (1500 m) für aktuell und unter dem Klimawandel- Szenario RCP8.5 für die Periode 2071- 2100. 74
Tabelle 7: Die Waldkategorien mit ihren jeweiligen Flächenanteilen [ha] der Eigentümer für das Untersuchungsgebiet. Für die Kategorien „Schutzwald außer Ertrag (= SaE)“ und „Schutzwald im Ertrag (= SiE)“ wurden Standortschutzwald und Objektschutzwald zusammengefasst. Als Wirtschaftswald wurde v.a. auf Hängen von unter 60 % Neigung ausgeschieden, auch leichte Blockstandorte sowie mäßig vernässte Standorte wurden dieser Kategorie zugewiesen (SW= Schutzwald) (Anonymous, 2019a). 79
Tabelle 8: Lage der Probeflächen über die Höhenzonen und im Text verwendete Synonyma. 85
Tabelle 9: Übersicht der für die Klimawandel- Bewertung verwendeten Baumartenverbreitungsmodell unter verschiedenen Klimawandelszenarien. 89
Tabelle 11: Gesamthandlungsbedarfe der Probeflächen in Absolutzahlen. 93
Tabelle 12: Ziel- und Behandlungstypen, sowie Probeflächen für das Untersuchungsgebiet Patscherkofel. 1
Tabelle 10: Gesamthandlungsbedarfe der Probeflächen durch Kombination der Bewertung NaiS (Abszisse) und Klimawandel (Ordinate), dargestellt über eine Risikomatrix bzw. Ampelsystem. 0
Tabelle 13: Die wichtigsten Schutzwaldbaumarten und ihre Eigenschaften: 0
Tabelle 14: Bewertungsformular für die Beurteilung der Fläche bezüglich des Klimawandels. Formular basiert auf dem „Formular 2“ nach Frehner et al. (2005), wurde aber nach den Erfordernissen des Autors verändert. Minimal- und Idealprofil ergeben sich auf Grund des Standortstyps und der Naturgefahr und wurden direkt von Frehner et al. (2005) übernommen. 0
Tabelle 15: Beurteilung des Bestandes E1 unter dem Klimawandel. 1
Tabelle 16: Exemplarische Aufnahmeformular für die Probefläche D1. 3
Tabelle 17: D2: Beurteilung des Bestandes unter dem Klimawandel. 0

10 LITERATURVERZEICHNIS

Adler, Silke; Chimani, Barbara; Drechsel, Susanne; Haslinger, Klaus; Hiebl, Johann; Meyer, Vera et al. (2015): Das Klima von Tirol- Südtirol- Belluno. Vergangenheit- Gegenwart- Zukunft. Hg. v. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Abteilung Brand- und Zivilschutz - Autonome Provinz Bozen und Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV). Innsbruck. Online verfügbar unter www.alpenklima.eu, zuletzt geprüft am 09.07.2019.

Allgaier Leuch, Barbara; Streit, Kathrin; Brang, Peter (2017): Der Schweizer Wald im Klimawandel: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? Hg. v. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (Merkblatt für die Praxis, 59).

Amt der Tiroler Landesregierung (Hg.) (2019): Tiroler Waldbericht 2019. Bericht an den Tiroler Landtag über das Jahr 2018. Unter Mitarbeit von Josef Fuchs, Manfred Kreiner, Gerhard Müller, Christian Oberndorfer, Christian Schwaninger, Dieter Stöhr et al. Gruppe Forst. Innsbruck. Online verfügbar unter https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/wald/waldzustand/downloads/waldbericht2019.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2019.

Andrecs, Peter; Hagen, Karl; Fromm, Reinhard; Gauer, Peter; Höller, Peter; Klebinder, Klaus et al. (2010): AdaptEvent. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW. Hg. v. Peter Andrecs und Karl Hagen. BfW- Bundesforschungszentrum für Wald. Wien.

Anonymous (2007): Waldwirtschaftsplan. Agrargemeinschaft Patsch für die Jahre 2008 bis 2027. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck.

Anonymous (2010a): Patscherkofel. Hg. v. Universität Innsbruck. Innsbruck. Online verfügbar unter https://www.uibk.ac.at/alpinerraum/siteinfo/patscherkofel/index.html.de, zuletzt aktualisiert am 24.08.2010, zuletzt geprüft am 05.09.2019.

Anonymous (2010b): Waldwirtschaftsplan. Agrargemeinschaft Lans für die Jahre 2011 bis 2030. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck.

Anonymous (2010c): Waldwirtschaftsplan. Agrargemeinschaft Waldinteressenschaft Igls für die Jahre 2011 bis 2030. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck.

Anonymous (2011): Waldwirtschaftsplan für die Jahre 2012 bis 2031. Agrargemeinschaft- Gemeinschaftswald Vill. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck.

Anonymous (2012): Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 2- Aktionsplan: Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. Vorlage zur Annahme im Ministerrat. Unter Mitarbeit von Barbara Kronberger, Maria Balas und Andrea Prutsch. Hg. v. BMLFUW. Abteilung V/4: Immissions- und Klimaschutz. Wien.

Anonymous (2015): Waldwirtschaftsplan. Gemeindegutsagrargemeinschaft Ellbögen für die Jahre 2016 bis 2035. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck.

Anonymous (2016a): Alpengarten Patscherkofel: Klima,Geologie und umgebende Vegetation. Hg. v. Universität Innsbruck. online. Online verfügbar unter https://www.uibk.ac.at/botany/alpine-garden/allgemeine-informationen/klima/index.html.de, zuletzt aktualisiert am 10.02.2016.

Anonymous (2016b): Mittelgebirge, AEIOU. Hg. v. das Wissensnetz. Austria Forum. Online verfügbar unter https://austria-forum.org/af/AEIOU/Mittelgebirge, zuletzt aktualisiert am 25.03.2016, zuletzt geprüft am 13.01.2020.

Anonymous (2017): Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 2- Aktionsplan: Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. Aktualisierte Fassung Jänner 2017. Unter Mitarbeit von Barbara Kronberger-Kießwetter und Maria Balas. Hg. v. BMLFUW. Wien.

Anonymous (2019a): Operatsdaten der Forstplanung des Landes Tirol. Informationen aus internen GIS- Daten zur Verfügung gestellt von der Abteilung Forstplanung. Stand Februar 2019. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck.

Anonymous (2019b): Patscherkofel. Hg. v. Wikipedia. Online. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Patscherkofel, zuletzt aktualisiert am 29.07.2019, zuletzt geprüft am 05.09.2019.

Anonymous (2019c): Waldtypisierung Tirol. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung. Innsbruck.

Anonymous (2019d): Waldtypisierung Tirol. GIS- Datensätze zur Verfügung gestellt von der Abteilung Forstplanung. Stand 2013- 2015. Hg. v. Amt der Tiroler Landesregierung. Abteilung Forstplanung, Fachbereich Waldwirtschaft. Innsbruck, zuletzt geprüft am 10.01.2019.

Anonymous (2020a): Globale Klimamodelle — ZAMG. Online verfügbar unter https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/globale-klimamodelle, zuletzt aktualisiert am 23.08.2020, zuletzt geprüft am 23.08.2020.

Anonymous (2020b): Lufttemperatur — ZAMG. Online verfügbar unter https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/alpenraum/lufttemperatur, zuletzt aktualisiert am 23.08.2020, zuletzt geprüft am 23.08.2020.

APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel (AAR14). Hg. v. Helga Kromp-Kolb, Nebosja Nakicenovic, Karl Steininger, Andreas Gobiet, Herbert Formayer, Angela Köppl, et al. Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien.

Arend, Matthias; Braun, Sabine; Buttler, Alexandre; Siegwolf, Rolf T.W.; Signarbieux, Constant; Körner, Christian (2016): Ökophysiologie: Reaktionen von Waldbäumen auf Klimaänderungen. In: *Wald im Klimawandel- Grundlagen für Adaptionsstrategien*, S. 77–91.

Bebi, Peter; Bugmann, Harald; Lüscher, Peter; Lange, Benjamin; Brang, Peter (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren.

BMNT (Hg.) (2016): ÖKS15 Klimafactsheet: Klimaszenarien für das Bundesland Tirol bis 2100. Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus (Version 2.0). Online verfügbar unter https://www.bmnt.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie/klimaszenarien.html, zuletzt geprüft am 09.07.2019.

Böhm, Reinhard (2008): Harte und weiche Fakten zum Klimawandel. In: *Der Sachverständige* (4), S. 170–177. Online verfügbar unter https://pluslucis.univie.ac.at/FBW0/FBW2010/Material/2008-12-Boehm-Sachverst-Artikel.pdf, zuletzt geprüft am 01.10.2019.

Bolte, Andreas; Ibisch, Pierre; Menzel, Annette; Rothe, Andreas (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. Anpassung der Wälder an den Klimawandel. In: *AFZ- Der Wald* (15), S. 800–803. Online verfügbar unter www.afz-derwald.de.

Bortenschlager, Sigmar (1984): Beiträge zur Vegetationsgeschichte Tirols I. Inneres Ötztal und unteres Inntal. Hg. v. Natur- medizinischer Verein Innsbruck. Institut für Botanik der Universität Innsbruck, Abteilung Palynologie. Innsbruck (Band 71). Online verfügbar unter https://www.zobodat.at/pdf/BERI_71_0019-0056.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2019.

Brang, Peter; Küchli, Christian; Schwitter, Raphael; Bugmann, Harald; Ammann, Peter (2016a): Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: *Wald im Klimawandel- Grundlagen für Adaptionsstrategien*, S. 341–364.

Brang, Peter; Pluess, Andrea R.; Bürgi, Anton; Born, Julia (2016b): Potenzial von Gastbaumarten bei der Anpassung an den Klimawandel. In: *Wald im Klimawandel- Grundlagen für Adaptionsstrategien*, S. 385–404.

Brang, Peter; Schönenberger, Walter; Frehner, Monika; Schwitter, Raphael; Thormann, Jean- Jaques; Wasser, Berchthold (2006): Management of protection forests in the European Alps: an overview. In: *For. Snow Landsc. Res.* (80 (1)), S. 23–44.

Brang, Peter; Schönenberger, Walter; Ott, Ernst; Gardner, Barry (2001): Forests as Protection from Natural Hazards, S. 53–81.

Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (2019a): Bundesgesetz vom 3. Juli 1975, mit dem das Forstwesen geregelt wird (Forstgesetz 1975), FG 1975, vom 19.07.2019. In: StF: BGBl. Nr. 440/1975 (NR: GP XIII RV 1266 AB 1677 S. 150. BR:

1392 AB 1425 S. 344.). Online verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371, zuletzt geprüft am 19.07.2019.

Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (2019b): Forstgesetz 1975 idgF. ForstG 1975, vom 19.07.2019. In: *Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort*. Online verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371, zuletzt geprüft am 15.07.2019.

Bunza, Günther (1982): Systematik und Analyse alpiner Massenbewegungen, In. Geologisch- morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. Hg. v. Günther Bunza, Johann Karl, Joachim Mangelsdorf und Peter Simmersbach. München (Schriftenreihe des bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 17).

Bunza, Günther (1992): Instabile Hangflanken und ihre Bedeutung für die Wildbachkunde. Zugl.: Innsbruck, Univ., Habil.-Schr., 1990 u.d.T.: Bunza, Günther : Geologie und Morphologie instabiler Hangflanken und ihre Bedeutung für die Wildbachkunde, dargestellt am Beispiel des Halblechs bei Füssen (Ostallgäu). München: Dt. Alpenverein (Forschungsberichte des Deutschen Alpenvereins, Bd. 5).

Dorren, Luuk K.A.; Berger, Frederic; Le Hir, Celine; Mermin, Eric; Tardif, Pascal; Berger, Frédéric; Le Hir, Céline (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. In: *Forest ecology and management* 215 (1-3), S. 183–195. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.012.

Dubach, Vivianne; Queloz, Valentin (2017): Douglasie: weniger robust als erhofft. In: *Wald und Holz* 98 (5), S. 28–30.

Englisch, Michael (2008): Die Douglasie- Für und Wider aus standortskundlicher Sicht. In: *BFW- Praxisinformation* (16), S. 6–8.

Etzold, Sophia; Wunder, Jan; Braun, Sabine; Rohner, Brigitte; Bigler, Christoph; Abegg, Meinrad; Rigling, Andreas (2016): Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends. In: *Wald im Klimawandel- Grundlagen für Adaptionsstrategien*, S. 177–195.

Frehner, Monika; Brang, Peter; Kaufmann, Geri; Küchli, Christian (2018): Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. Hg. v. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Birmensdorf (WSL Berichte, 66).

Frehner, Monika; Wasser, Brächt; Schwitter, Raphael (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Anhang 01. Hg. v. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern. Online verfügbar unter http://www.gebirgswald.ch/de/nais-download.html, zuletzt geprüft am 23.07.2019.

Freitag, Winfried (2012): Wald, Waldnutzung. Hg. v. Historisches Lexikon Bayerns. Online verfügbar unter <http://www.historisches-lexikon-

bayerns.de/Lexikon/Wald,_Waldnutzung>, zuletzt aktualisiert am 07.05.2019, zuletzt geprüft am 08.07.2019.

Haslinger, K.; Hofstätter, M.; Kroisleitner, C.; Schöner, W.; Laaha, G.; Holawe, F.; Blöschl, G. (2019): Disentangling Drivers of Meteorological Droughts in the European Greater Alpine Region During the Last Two Centuries. In: *Journal of geophysical research: Atmospheres* 124 (23), S. 12404–12425. DOI: 10.1029/2018JD029527.

Hübl, Johannes (2015): Vorlesung "Wildbach- und Lawinenverbauung". Gefahrenarten. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren. Wien, 2015.

Kilian, Walter; Müller, Ferdinand; Starlinger, Franz (1993): Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. Hg. v. BfW- Bundesforschungszentrum für Wald. Wien. Online verfügbar unter https://bfw.ac.at/300/pdf/1027.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2019.

Kolenprat, Bernd (1998): Bericht 1997 über geologische Aufnahmen im Altkristallin und Unterostalpin im Raum Glungezer auf Blatt 148 Brenner. Jhb. d. GHB. Wien.

Kolenprat, Bernd (2000): Bericht 1998 über geologische Aufnahmen im Raum Mislkopf auf Blatt 148 Brenner. in Jhb.d. GBA. Wien.

Kölling, Christian (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. In: *AFZ- Der Wald* 62 (23), S. 1242–1245. Online verfügbar unter www.afz-derwald.de.

Kral, Friedrich (1995): Nacheiszeitliche Waldentwicklungstypen in den Alpen 132, S. 1–12. Online verfügbar unter www.zobodat.at, zuletzt geprüft am 08.07.2019.

Küster, Hansjörg (1998 // 2013): Geschichte des Waldes. Von der Urzeit bis zur Gegenwart. 3. Auflage 2013 // 3. Aufl. der brosch. Ausg. München: C.H. Beck oHG; Beck.

Laternser, Martin; Schneebeli, Martin (2003): Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99) // Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99). In: *Int. J. Climatol.* 23 (7), S. 733–750. DOI: 10.1002/joc.912.

Lexer, Manfred; Seidl, Rupert (2007): Der österreichische Wald im Klimawandel. Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. In: *Ländlicher Raum: Online- Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft* Jahrgang 2007, S. 1–14.

Lindner, Marcus; Maroschek, Michael; Netherer, Sigrid; Kremer, Antoine; Barbati, Anna; Garcia-Gonzalo, Jordi et al. (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. In: *Forest ecology and management* 259 (4), S. 698–709. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.023.

Mayer, Hannes (1976): Gebirgswaldbau - Schutzwaldpflege. Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz. Stuttgart: G. Fischer.

Mayer, Hannes (1984): Waldbau: auf soziolog.-ökolog. Grundlage. 185 Abbildungen und 25 Tabellen. 3., neu bearb. Aufl. Stuttgart usw.: Fischer.

Niese, Gerhard (2011): Österreichs Schutzwald ist total überaltert. In: *BFW-Praxisinformation* (24), S. 29–31.

Nowotny, Axel (1996): Bericht 1994 über geologische Aufnahmen auf Blatt 148 Brenner. in Jhb.d. GBA 193/3. Wien.

Oberhuber; Bendler; Gamper; Geier; Hölzl; Kofler et al. (2020a): Growth Trends of Coniferous Species along Elevational Transects in the Central European Alps Indicate Decreasing Sensitivity to Climate Warming 11 (2), S. 132. DOI: 10.3390/f11020132.

Oberhuber, Walter; Gruber, Andreas; Wieser, Gerhard (2020b): Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum an der Waldgrenze. BFW Praxistag 2020. BfW-Bundesforschungszentrum für Wald. Innsbruck, 22.01.2020.

Oettel, Janine; Lipp, Sebastian; Steiner, Herfried; Frank, Georg (2017): Steinschlagschutz am Beispiel des Naturwaldreservates Waben. Österreichs Schutzwald: neue Grundlagen für die forstliche Raumplanung. In: *BFW- Praxisinformation* (45), S. 8–12. Online verfügbar unter http://bfw.ac.at.

ONERC (Hg.) (2008): Climate Change in the Alps: Impacts and natural hazards. Rapport Technique N°1 de l'ONERC. ClimChAlp Interreg III B Alpine Space.

Patek, Maria (2007): Klimawandel und Naturgefahren. In: *Ländlicher Raum* 2007, S. 1–20.

ONR 24805, 01.06.2010: Permanenter technischer Lawinenschutz- Benennung und Definition sowie statische und dynamische Einwirkungen. Online verfügbar unter https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/362911/ONR_24805_2010_06_01, zuletzt geprüft am 14.05.2020.

Perzl, Frank; Huber, Andreas; Fromm, Reinhard; Hagen, Karl; Rössel, Monika; Den Outer, Jennifer (2017): Wald mit Steinschlag- Objektschutzfunktion in Österreich. In: *BFW-Praxisinformation* (45), S. 8–12. Online verfügbar unter www.bfw.ac.at, zuletzt geprüft am 01.05.2019.

Perzl, Frank; Walter, Dagmar (2012): Die Lawinen- Schutzwirkung des Waldes im Klimawandel. Literaturüberblick über gegenwärtige Klimatrends in den Alpen, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Schneedeckenparameter, die Lawinenaktivität und die Lawinen- Schutzwirkung des Waldes. Hg. v. BfW-Bundesforschungszentrum für Wald. BfW- Institut für Naturgefahren. Innsbruck (Projekt MANFRED). Online verfügbar unter www.manfredproject.eu.

Rechnungshof (2015): Bericht des Rechnungshofes. Schutz- und Bannwälder in Salzburg, Tirol und Vorarlberg. Hg. v. Rechnungshof. Wien (Reihe Tirol 2015/8). Online verfügbar unter http://www.rechnungshof.gv.at, zuletzt geprüft am 23.07.2019.

RIMES. Climate Change and Natural Hazard Risk Management in Energy Systems. ACRP, 1st call for proposals (2013). Unter Mitarbeit von Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape (BFW). Online verfügbar unter

https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/20171016CHC-FloodSACRP6EBB368584KR13AC6K11102.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2019.

Rockenschaub, Manfred (1996): Bericht 1995 über geologische Aufnahmenim Innsbrucker Quarzphyllit und im Patscherkofelkristallin auf Blatt 148 Brenner. in Jhb.d.GBA. Wien.

Rockenschaub, Manfred (1998): Bericht 1997 über geologische Aufnahmen in der Quarzphyllitzone und im Tauernfenster auf Blatt 148 Brenner. in Jhb. d. GBA. Wien.

Rockenschaub, Manfred; Nowotny, Axel (2009): Blatt 148 Brenner. Geologische Karte im Maßstab 1:50.000. Hg. v. BMBWF- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. Geologische Bundesanstalt. Wien. Online verfügbar unter https://opac.geologie.ac.at/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=GK0148_000_A.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2019.

Schadauer, Klemens (2019): Österreichische Waldinventur. Hg. v. BfW-Bundesforschungszentrum für Wald. Wien. Online verfügbar unter https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=9449, zuletzt geprüft am 15.07.2019.

Schadauer, Klemens; Freudenschuss, Alexandra; Ledermann, Thomas; Kindermann, Georg (2019): Gefährdete Fichtenstandorte: Modelle, Zahlen und Fakten. In: *BFW-Praxisinformation* (49), S. 3–7. Online verfügbar unter https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=10548, zuletzt geprüft am 11.02.2019.

ONR 24800:2009, 15.02.2009: Schutzbauwerke der Wildbachverbauung- Begriffe und ihre Definitionen und Klassifizierungen. Online verfügbar unter www.austrian-standards.at, zuletzt geprüft am 13.05.2020.

Sebald, Julius; Senf, Cornelius; Heiser, Micha; Scheidl, Christian; Pflugmacher, Dirk; Seidl, Rupert (2019): The effects of forest cover and disturbance on torrential hazards: large-scale evidence from the Eastern Alps. In: *Environ. Res. Lett.* 14 (11), S. 114032. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4937.

Seidl, Rupert (2019): Vorlesung "Spezieller Waldbau für Schutzwälder". Schutzwirkungen von Wald gegen Lawinen. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wald- und Bodenwissenschaften. Wien, 06.03.2019.

Seidl, Rupert; Albrich, Katharina; Erb, Karlheinz; Formayer, Herbert; Leidinger, David; Leitinger, Georg et al. (2019): What drives the future supply of regulating ecosystem services in a mountain forest landscape? In: *Forest ecology and management* 445, S. 37–47. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.047.

Seidl, Rupert; Rammer, Werner; Lexer, Manfred J. (2011): Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. In: *Climatic Change* 106 (2), S. 225–254. DOI: 10.1007/s10584-010-9899-1.

Sönser, Thomas; Ploner, Alexander (2019): Geomorphologische Informationen aus div. laufenden und abgeschlossenen Projekten. Hg. v. i.n.n. Ingenieurgesellschaft für Naturraummanagement GmbH & Co KG. Innsbruck.

Stoffel, M.; Tiranti, D.; Huggel, C. (2014): Climate change impacts on mass movements — Case studies from the European Alps // Climate change impacts on mass movements--case studies from the European Alps. In: *The Science of the total environment* 493, S. 1255–1266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.102.

ONR 24810, 15.02.2017: Technischer Steinschlagschutz. Online verfügbar unter www.austrian-standards.at/webshop.

Tinner, Willy; Van der Knaap, W.O. (Pim); Conedera, Marco; Ammann, Brigitta (2018): Invasionen und Zusammenbrüche von Baumarten nach der Eiszeit. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* (169), S. 60–68. Online verfügbar unter www.forstverein.ch, zuletzt geprüft am 10.07.2019.

Usbeck, Tilo; Wohlgemuth, Thomas; Dobbertin, Matthias; Pfister, Christian; Bürgi, Anton; Rebetez, Martine (2010): Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (150 // 1), S. 47–55. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.08.010.

Wehrli, André; Brang, Peter; Maier, Bernhard; Duc, Philippe; Binder, Franz; Lingua, Emanuele et al. (2007): Schutzwaldmanagement in den Alpen – eine Übersicht | Management of protection forests in the Alps – an overview. In: *Swiss Forestry Journal (Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen)* 158 (6), S. 142–156. DOI: 10.3188/szf.2007.0142.

Weinmeister, Wolfgang (2003): Fähigkeiten des Waldes zur Verminderung von Hochwasser und Erosionsschäden. In: *LWF- Berichte aus der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (40), S. 15–29. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/w40-hochwasserschutz-in-wald.pdf, zuletzt geprüft am 28.07.2019.

Wohlgemuth, Thomas; Gallier, Laure; Zimmermann, Niklaus E. (2016): Verjüngung von Buche und Fichte im Klimawandel. In: *Wald im Klimawandel- Grundlagen für Adaptionsstrategien*, S. 115–135.

Wohlgemuth, Thomas; Jentsch, Anke; Seidl, Rupert (2019): Definitionen und Quantifizierungen. In: *Störungsökologie*, S. 21–42.

ZAMG (Hg.) (2020): Neue Studie zu Dürren im Alpenraum. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). online. Online verfügbar unter https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/neue-studie-zu-duerren-im-alpenraum, zuletzt geprüft am 17.06.2020.

Zimmermann, Niklaus E.; Normand, Signe; Psomas, Achilleas (2016a): PORTREE Final Report. A project founded by the BAFU- WSL program on "Forests and Climate Change" in Switzerland. Unter Mitarbeit von Dirk R. Schmatz, Eliane Meier, Matthias Dobbertin, Peter B. Pearman, Esther Thürig, Janine Bolliger und Felix Kienast. Hg. v. Swiss Federal Research Institute WSL. Birmensdorf. Online verfügbar unter www.wsl.ch/lud/portree, zuletzt geprüft am 11.02.2020.

Zimmermann, Niklaus E.; Schmatz, Dirk R.; Gallien, Laure; Körner, Christian; Huber, Barbara; Frehner, Monika et al. (2016b): Baumartenverbreitung und Standorteignung. In: *Wald im Klimawandel- Grundlagen für Adaptionsstrategien*, S. 199–219.

11 GLOSSAR

Sukzession (S. 7)	zeitliche Aufeinanderfolge der an einem Standort einander ablösenden Pflanzen- und Tiergesellschaften
Störung (S. 7)	zeitlich und räumlich diskrete Ereignisse, die zum Verlust von lebender Biomasse führen und die Verfügbarkeit von Ressourcen in Lebensgemeinschaften verändern
Naturgefahr (S. 7)	Naturereignis, welches für Menschen zum Schaden werden kann
Disposition (S. 28)	bestimmte Veranlagung, Empfänglichkeit, innere Bereitschaft zu etwas
Stocken (S. 28)	Wachsen (forstwirtschaftlich)
Integrales Risikomanagement (S. 30)	**Risikomanagement** ist die Gesamtheit der Maßnahmen und Methoden, mit denen die angestrebte Sicherheit erreicht werden soll. Es umfasst die periodische **Erfassung und Bewertung** von Risiken hinsichtlich ihrer **Akzeptanz**. Daraus werden der **Handlungsbedarf** und die **Prioritäten** abgeleitet. **Integral** ist das Risikomanagement, wenn **alle** Naturgefahren betrachtet werden, sich **alle** Verantwortungsträger an der Planung und Umsetzung von Maßnahmen beteiligen und **alle** Arten von Maßnahmen in die Maßnahmen Planung einbezogen werden.
Interzeption (S. 31)	Verdunstungsverlust bei Niederschlägen durch Abgabe von Feuchtigkeit an die Luft über die Pflanzenoberfläche
armieren (S. 37)	etw. bewehren, durch Einlage oder Auflage von festem Material verstärken
Evapotranspiration (S. 37)	die Summe aus Transpiration und Evaporation, also der Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen
Vulnerabilität (S. 43)	Verwundbarkeit oder Verletzbarkeit
Vfm (S. 53)	Der Vorratsfestmeter (Vfm) gibt den Holzvorrat eines Baumes oder eines Waldes inklusive der Rinde an. Entspricht einem Kubikmeter fester Holzmasse.