

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 152 (2001)

**Heft:** 6

**Artikel:** Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg : Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort

**Autor:** Senn, Josef / Schönenberger, Walter

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1098294>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 01.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort

JOSEF SENN und WALTER SCHÖNENBERGER

**Keywords:** Afforestation; microsite; tree line; tree survival; pine; larch; canton of Grisons, Switzerland. FDK 11 : 174.7 *Larix* : 174.7 *Pinus* : 181 : 23 : (494.26)

**Abstract:** In an experimental afforestation (Stillberg near Davos) close to the subalpine tree line, we studied mortality and height development of planted Swiss stone pines, mountain pines and European larches, and their relationship to microsite parameters such as exposure, soil type and duration of snow cover in spring, as well as to meteorological parameters.

The most important cause of mortality among the planted trees was the pathogenic fungus *Gremmeniella abietina*, which particularly occurred on sites with prolonged snow cover in spring. This study revealed changes in the ranking order among the species three times within twenty years, both for survival and for tree height, which demonstrates the necessity of long-term studies.

**Abstract:** In einer Versuchsaufforstung nahe an der subalpinen Waldgrenze (Stillberg bei Davos) wurde während zwanzig Jahren die Entwicklung von gepflanzten Arven, Bergföhren und Lärchen hinsichtlich ihrer Mortalität und Baumhöhen in Abhängigkeit von kleinstandörtlichen Bedingungen wie Exposition, Bodentyp und Dauer der Schneebedeckung im Frühling und von meteorologischen Einflüssen untersucht. Wichtigste Ursache für die teilweise hohen Ausfälle unter den gepflanzten Bäumen war der pathogene Pilz *Gremmeniella abietina*, welcher vor allem an Standorten auftrat, die im Frühling lang von Schnee bedeckt blieben. Die Studie weist sowohl bei den Überlebensprozenten als auch bei den mittleren Baumhöhen dreimalige Rangänderungen zwischen den Baumarten im Laufe der zwanzig Jahre nach und demonstriert damit die Notwendigkeit von Langzeituntersuchungen.

## Einleitung

Der katastrophale Lawinenwinter 1951/52 führte in der Schweiz zu breiten Diskussionen über die Ursachen der grossen Schäden und über mögliche Massnahmen, solche Schäden in Zukunft zu vermeiden. Um biologisch und technisch geeignete und finanziell tragbare Verfahren für Aufforstungen in Lawinenanrissgebieten innerhalb der Wald- und Kampfzone zu entwickeln, wurde das interdisziplinäre Forschungsprogramm «Wiederherstellung der oberen Waldgrenze» geschaffen, welches allgemein als «Gebirgsprogramm» bekannt wurde (TURNER, 1985). Der Schwerpunkt der Feldarbeiten zu diesem Programm lag seit 1955 im Untersuchungsgebiet Stillberg bei Davos.

Das Gebirgsprogramm sollte vor allem die folgenden aufforstungsökologischen Fragen für die obere subalpine Stufe beantworten:

- Welches sind die wichtigsten Standortsfaktoren, die Erfolg oder Misserfolg von Aufforstungen unter den teilweise schwierigen Bedingungen bestimmen?
- Welche Kleinstandorte sind günstig, welche ungünstig, wo sind die Grenzen der Aufforstbarkeit?
- Was sind die wichtigsten Schäden und Ursachen für die Ausfälle und wie ändern sich die Gefährdungen in Raum und Zeit, d.h. in Abhängigkeit von Standort und Witterung?

Für die Forschung sind diese Fragestellungen deshalb besondere Herausforderungen, weil in der subalpinen Stufe einerseits die kleinstandörtlichen Bedingungen sehr stark variieren, andererseits aber auf dieser Höhenstufe für Aufforstungen nur noch eine kleine Zahl von Baumarten zur Verfügung steht.

Für die Praxis ist vor allem die Frage wichtig, ob die Resultate Verallgemeinerungen erlauben, welche sich an vergleichbaren Standorten anwenden lassen.

Eine Bilanz der ersten zehn Jahre der Versuchsaufforstung Stillberg wurde 1988 publiziert (SCHÖNENBERGER und FREY, 1988). Eine detaillierte Darstellung der Vorgeschichte sowie

der Versuchsanlage kann dort gefunden werden. Deshalb soll im Folgenden auf diese Punkte nur noch kurz eingegangen werden.

## Material und Methoden

### Das Versuchsgebiet Stillberg

Bei der Versuchsaufforstung Stillberg handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt der ehemaligen Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV, heute WSL) und des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF).

Das Versuchsgebiet liegt in einem Nordost exponierten Hang auf einer Höhe zwischen 2000 und 2230 m ü.M. Die Neigung beträgt 60 bis 100%. Das Gebiet ist in mehrere Lawinenkammern unterteilt und dadurch topographisch reich strukturiert. Es lassen sich die sechs Hauptgeländetypen Rippe, Nordhang, Runse, Osthang, Hangschulter und Hangfuss unterscheiden. Daraus ergibt sich eine grosse kleinstandörtliche Variation, die sich auch im Mosaik verschiedener Zwergstrauchgesellschaften und Reitgrasrasen sowie unterschiedlich ausgeprägter Podsolböden ausdrückt.

In der Untersuchungsfläche befindet sich eine Klimastation, in der seit 1975 kontinuierlich Wetterdaten erhoben werden. Der Stillberg liegt im gemässigt kontinentalen Klimagebiet der Inneralpen mit relativ warmen Sommern (mittlere Juli-Temperatur 9,4 °C) und relativ kalten Wintern (mittlere Januar-Temperatur -5,8 °C). Die mittlere Jahrestemperatur von 1,4 °C ist typisch für das Verbreitungsareal des Lärchen-Arvenwaldes. Der Jahresniederschlag beträgt rund 1050 mm. Die maximale Schneehöhe beträgt im Mittel 146 cm und variiert von 60 cm auf windexponierten Rippen bis über 420 cm in Leelagen. Auf der Versuchsfläche wurden in der Periode 1959 bis 1982 im Durchschnitt 42 Lawinen pro Winter (24 bis 77) beobachtet. Alle Arten von Lawinen ausser grossen Staublawnen sind vorgekommen. Wegen der starken Neigung des Geländes ist der grösste Teil der Versuchsfläche anfällig auf Gleit- und Kriech-

bewegungen der Schneedecke. Detailliertere Angaben zu Lage, Geologie, Klima, Vegetation und Böden im Versuchsgebiet können in SCHÖNENBERGER (1975) und in SCHÖNENBERGER und FREY (1988) gefunden werden.

## Die Versuchsanlage

Die Versuchsfläche wurde vor der Bepflanzung in quadratische Einheitsflächen mit einer Seitenlänge von 3,5 m eingeteilt. Dann wurden für jede dieser Einheitsflächen die langjährigen Mittelwerte kleinstandörtlicher Parameter bestimmt, u.a. die Höhe über Meer, die globale Hangbestrahlung, die Windgeschwindigkeit, die Anzahl schneefreier Tage im Winter, das Ausaperungsdatum, die Lawinenfrequenz und, als Integral aller kleinstandörtlichen Bedingungen, der Bodentyp, die Humusform sowie die Pflanzengesellschaft. Zusätzlich wurden in allen Einheitsflächen die Konkurrenzverhältnisse zwischen der Kraut- und Strauchschicht und den gepflanzten Bäumchen aufgenommen. In SCHÖNENBERGER und FREY (1988) finden sich kartographische Darstellungen der meisten dieser Standortparameter. Auffallend ist die sehr ausgeprägte horizontale Strukturierung aller dieser Standortparameter, das heisst, in der Horizontalen wechseln die Standortseigenschaften sehr stark innerhalb kurzer Distanzen, während sich die Standortbedingungen in der Vertikalen über grössere Distanzen nur relativ wenig ändern.

Die Einheitsflächen wurden 1975 nach einem festen Schema bepflanzt: In jede Fläche wurden fünf Reihen zu je fünf Bäumen gepflanzt, also total 25 Bäume im Abstand von 70 cm, soweit dies nicht durch ungünstige Bedingungen z.B. durch Steine oder Wege unmöglich war. Es wurden die drei Baumarten Arve (*Pinus cembra* L.), aufrechte Form der Bergföhre (*Pinus uncinata* Ramond) und Lärche (*Larix decidua* Mill.) verwendet. Jede Einheitsfläche erhielt Bäume einer Art, und die Arten wurden in einem regelmässigen Muster angeordnet, so dass schliesslich das ganze Versuchsgebiet völlig regelmässig mit den drei Baumarten bepflanzt war (Farbtafel 1a). Auf etwa 5 ha wurden rund 92 000 Bäumchen (alles Topfpflanzen) in 4052 Einheitsflächen gepflanzt.

## Erhebungen in der Aufforstung

Seit der Pflanzung wurden bis 1995 alljährlich im Sommer alle noch lebenden Bäume gezählt, so dass auf der gesamten Versuchsfläche das räumliche und zeitliche Überlebensmuster analysiert werden konnte.

In einer festen Stichprobe von 680 Einheitsflächen, die sich über die wichtigsten Standortstypen sowie über den ganzen Höhengradienten verteilten, wurden zusätzlich jedes Jahr für jeden Baum die Höhe, der Zustand des Gipfeltriebes und der Seitentriebe, bis zu drei verschiedene Schadenarten und deren Intensität und bei den frisch abgestorbenen Bäumen die Ursache erhoben. Es wurden sowohl abiotische Schäden wie Frost, Frosttrocknis und durch Schneebewegungen entstandene Verletzungen aufgenommen als auch biotische Schäden, das heisst durch Pilze, Verbiss, Insekten oder Vegetationskonkurrenz verursachte. 1995 wurde bei allen Bäumen die Höhe, die Wuchsform, mögliche Schädigungen an der Stammbasis und der Beschädigungsgrad der Gipfelregion bestimmt.

## Resultate und Diskussion

### Die Entwicklung der Überlebensraten der Bäume von 1975 bis 1995

Bei den Lärchen kam es in den ersten Jahren nach der Pflanzung zu erheblichen Ausfällen, während die Arven und die

Bergföhren in den ersten drei Jahren nur wenig Verluste zu verzeichnen hatten (Abbildung 1). Nach dem dritten Jahr stieg die Mortalitätsrate bei Bergföhren und Arven stark an. Während sich die Verluste bei den Bergföhren in der zweiten Hälfte der Untersuchungsperiode stark verringerten, blieb die Verlustrate bei den Arven konstant hoch. Bei den Lärchen kam es nach den anfänglichen Verlusten aber zu keinen grösseren Ausfällen mehr.

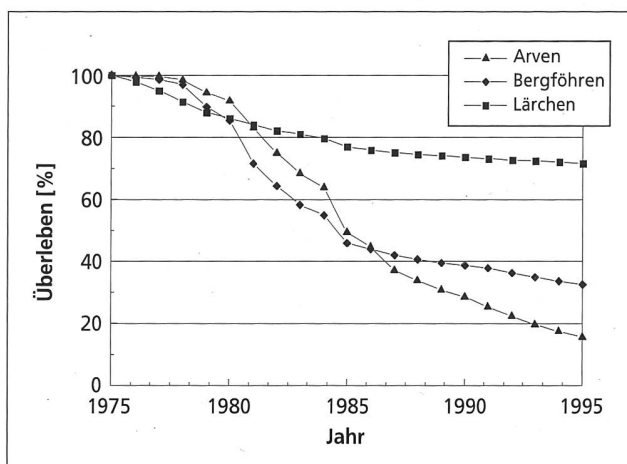


Abbildung 1: Verlauf der Überlebensprozente seit der Pflanzung im Jahr 1975.<sup>1</sup>

Figure 1: Survival rate since plantation in 1975.

Bei der Betrachtung der Überlebenskurven der drei Baumarten fällt auf, dass über den Zeitraum der Untersuchung die Rangordnung der drei Baumarten dreimal gewechselt hat. Drei Jahre nach der Pflanzung war die Lärche die Baumart mit den grössten Ausfällen. Nach sechs Jahren waren die Überlebensraten der Lärche und der Arve etwa gleich hoch, während die der Bergföhre deutlich tiefer lag. Nach zwanzig Jahren, am Ende der Untersuchungsperiode, wies die Lärche mit 71,5% die höchste Überlebensrate auf, während die Überlebensrate der Bergföhre mit 32,5% knapp halb so gross war. Von der Bergföhre zur Arve kam es mit 15,6% überlebenden Bäumen noch einmal zu einer Halbierung der Überlebensrate. Das schlechte Abschneiden der gepflanzten Arven mit der ausgeprägten Tendenz zu weiteren Verlusten steht im krassen Gegensatz zur Tatsache, dass auf den Geländerippen in der Versuchsfläche die Arve als einzige autochthone Art vorkommt.

Diese Datenreihe zeigt, dass zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Anlage des Versuches die Prognosen für die weitere Entwicklung der Aufforstung sehr unterschiedlich ausgefallen wären. Aus kurzfristigen Untersuchungen gezogene Schlüsse zu langfristigen Entwicklungen sollten daher immer kritisch hinterfragt werden. So wird man wahrscheinlich auch in Zukunft nicht umhin kommen, zur Lösung von Problemen zu langfristigen Entwicklungen langfristige Projekte zu initiieren, auch wenn im Moment in der Forschung der Trend allgemein in die Richtung von kurzfristigen Projekten geht.

Aus dem regelmässigen Pflanzmuster im Jahr 1975 hat sich innerhalb von zwanzig Jahren ein sehr differenziertes Bild entwickelt (Farbtafel 1b). Die Darstellung der 1995 lebenden Bäume lässt deutlich zwei einander überlagernde räumliche Muster erkennen. Erstens wird bei allen drei Baumarten der Einfluss der Topographie deutlich. Die grössten Ausfälle traten einerseits in den Lawinenrutschen, andererseits in den schattigen Nordhängen auf. Alle drei Baumarten überlebten

<sup>1</sup> Datengrundlage: jährliche Aufnahme der lebenden Bäume in der gesamten Untersuchungsfläche.

am besten in den Osthängen, also an den Stellen, welche an diesem allgemein Nordost exponierten Hang am meisten Sonne erhielten. Auf den Geländerippen überlebten die Bäume ebenfalls recht gut.

Das zweite räumliche Muster manifestiert sich im sehr unterschiedlichen Überleben der drei Baumarten, wenn die Versuchsfläche als Ganzes betrachtet wird. Während sich die überlebenden Bäume bei der Bergföhre und noch deutlicher bei der Arve auf klar umreissbare Gebiete konzentrieren, überlebten die Lärchen fast über das ganze Versuchsgebiet über ein breites Spektrum von kleinstandörtlichen Bedingungen relativ gut.

Die unterschiedliche Standortseignung der drei Baumarten wird am deutlichsten, wenn die Überlebensraten in den einzelnen Einheitsflächen für jede Baumart geordnet in 10%-Klassen dargestellt werden (Abbildung 2). Bei der Arve war die Klasse ohne überlebende Bäume die grösste, die Klasse mit Überlebensraten zwischen >0 und 10% die zweitgrösste. Weiter nahm die Grösse der Klassen mit zunehmender Überlebensrate ab. Bei der Bergföhre war die Klasse der Einheitsflächen ohne überlebende Bäume ebenfalls die grösste. Die Grössen der weiteren 10%-Überlebensklassen nahmen zwar nicht stetig ab wie bei der Arve. Aber es zeigte sich auch bei der Bergföhre ein Trend, dass die Klassengrössen mit zunehmenden Überlebensraten abnahmen. Im Vergleich zu Arve und Bergföhre zeigte die Verteilung der Überlebensraten bei der Lärche ein umgekehrtes Bild. Bei der Lärche war der Anteil der Einheitsflächen, in denen keine Bäume überlebt haben, der kleinste. Mit zunehmender Überlebensrate nahm die Klassengrösse zu, so dass die Klasse mit 90 bis 100% überlebenden Bäumen die grösste war.

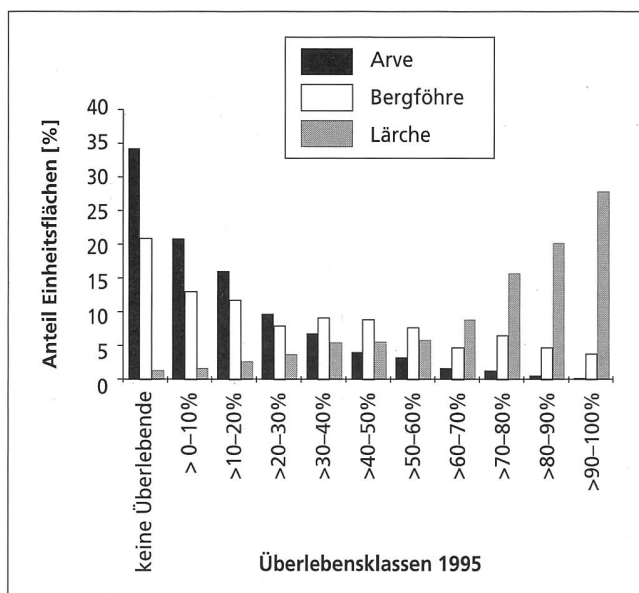


Abbildung 2: Die Verteilung der Überlebensraten der drei Baumarten pro Einheitsfläche (EF) im Jahr 1995.<sup>2</sup>

Figure 2: Frequency distribution of survival of the three tree species per square unit in 1995.

## Die Entwicklung der Baumhöhen von 1975 bis 1995

Die Baumhöhe resultiert nicht nur aus dem Wachstum, sondern ist eine Funktion der Ausgangshöhe bei der Pflanzung, des Zuwachses, der Höhenreduktion durch Schäden und sogar teilweise der Ausfälle, denn bei hohen Ausfällen sind nur mehr die Bäume der günstigsten Standorte beteiligt, bei ge-

ringeren Ausfällen, zum Beispiel bei der Lärche, hingegen auch die kleineren Bäume von ungünstigen Standorten.

Die Arven und die Bergföhren waren bei der Pflanzung im Schnitt 14 bzw. 10 cm hoch (Abbildung 3). Die Durchschnittshöhe der Lärchen betrug nur gerade 2 cm. Nach zwanzig Jahren erreichte die Arve im Durchschnitt der noch Überlebenden eine Höhe von 74 cm, die Bergföhre von 85 und die Lärche von 88 cm. Diese geringen mittleren Baumhöhen nach zwanzigjährigem Wachstum zeugen vom harten Existenzkampf der Jungbäume unter den extremen Bedingungen nahe der Waldgrenze.

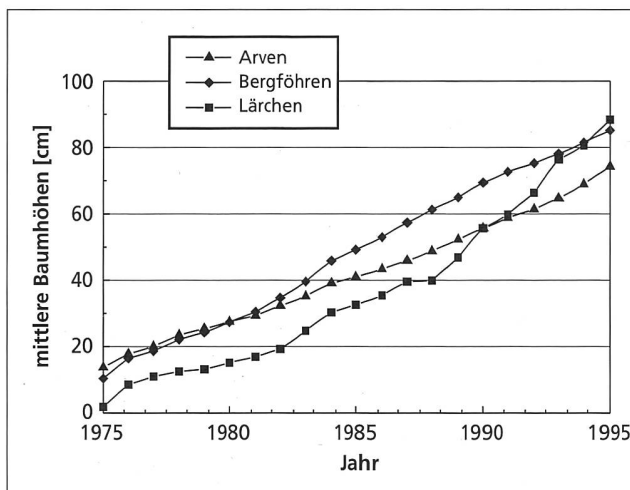


Abbildung 3: Die Entwicklung der Baumhöhen seit der Pflanzung im Jahr 1975.<sup>3</sup>

Figure 3: Height development since plantation in 1975.

Die Entwicklung der mittleren Baumhöhe in der Stichprobe verlief für die drei Baumarten sehr ähnlich. Allerdings kam es auch hier während der Untersuchungsperiode dreimal zu Rangänderungen zwischen den Arten. Die Arve, welche bei der Pflanzung die grösste Durchschnittshöhe aufwies, verlor diesen Vorsprung nach den ersten fünf Jahren an die Bergföhre. Die Bergföhre wies danach während des grössten Teils der Untersuchungsperiode die grösste Durchschnittshöhe auf, bis sie schliesslich von der Lärche überholt wurde.

Während sich die Durchschnittshöhen von Arven und Bergföhren sehr gleichmässig entwickelten, war diese Entwicklung bei der Lärche weniger stetig. Die Lärche konnte von günstigen Sommern profitieren und mit starkem Wachstum reagieren. Spät- und Frühfröste konnten aber in einzelnen Jahren zu empfindlichen Rückschlägen führen, so dass in diesen Jahren die Höhe nicht oder nur sehr geringfügig zunahm.

Wie häufig das Höhenwachstum im Untersuchungsgebiet durch äussere Einflüsse gestört wurde, zeigt sich in der Tatsache, dass im Laufe der zwanzigjährigen Beobachtungsperiode bei 94,5% der Bäume in der Stichprobe mindestens einmal Verletzungen des Gipfeltriebes festgestellt wurden. Nur gerade 5,5% der Bäume blieben über diesen Zeitraum ohne Verletzungen. Allerdings variierte dieser Anteil stark zwischen den drei Baumarten. Bei der Arve blieben 22,2%, bei der Bergföhre 5,3% und bei der Lärche 2,3% ohne Gipfelschäden.

Sowohl der Verlauf der Überlebensraten als auch der mittleren Baumhöhen und die bescheidenen Endresultate nach zwanzigjähriger Entwicklung lassen den Schluss zu, dass auch die überlebenden Bäumchen noch keine gesicherte Zukunft haben.

<sup>2</sup> Anzahl EF mit Arven = 1351, mit Bergföhren = 1350, mit Lärchen = 1351.

<sup>3</sup> Datengrundlage: feste Stichproben von insgesamt 680 Einheitsflächen.

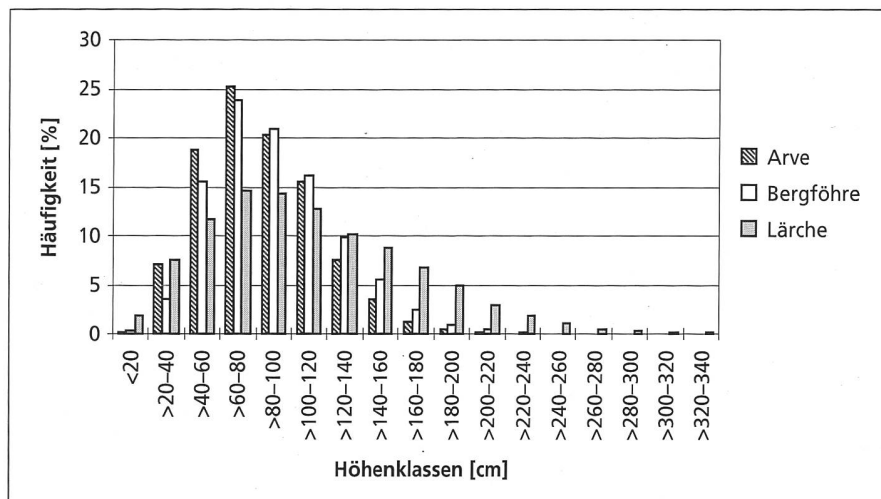


Abbildung 4: Höhenverteilung der Einzelbäume im Jahr 1995 in der gesamten Versuchsfläche.<sup>4</sup>  
 Figure 4: Frequency distribution of heights of all trees alive in 1995.

Ein Vergleich der Verteilungen der Höhen aller 1995 in der gesamten Versuchsfläche noch lebenden Bäume zeigt, dass alle drei Baumarten ihre «Optima» in der gleichen Höhenklasse hatten (Abbildung 4). Das heisst, bei allen drei Arten enthielt die Klasse (>60–80 cm) im Vergleich zu den anderen Klassen die meisten Individuen. Das zeigte sich schon in den ähnlichen Durchschnittshöhen der drei Baumarten zwanzig Jahre nach der Pflanzung (Abbildung 3). Die drei Baumarten unterschieden sich aber deutlich in den Häufigkeiten in den kleinen und vor allem in den grösseren Höhenklassen. Die Lärche war sowohl in der kleinsten Höhenklasse (<20 cm Höhe) als auch in allen Höhenklassen über 120 cm am häufigsten vertreten. In der Klasse mit mehr als 240 cm Höhe kamen nur noch Lärchen vor.

Diese sehr unterschiedlichen Bereiche, über welche sich die Höhen bei den drei Baumarten verteilten, erklären sich aus den Unterschieden im Überlebensmuster beziehungsweise aus den unterschiedlichen Toleranzbereichen der drei Baumarten. Die Arven und ähnlich, wenn auch nicht so ausgeprägt, die Bergföhren, verschwanden im Lauf der zwanzig Jahre an vielen Stellen des Versuchsgeländes vollständig oder weitgehend. Die überlebenden Bäume dieser beiden Arten standen in der überwiegenden Mehrheit an den klimatisch günstigen Osthängen. Deshalb kamen bei diesen beiden Baumarten relativ wenige sehr kleine Bäume vor. Die Lärche andererseits erwies sich als die Art mit der grössten Anpassungsfähigkeit; sie überlebte auf sehr unterschiedlichen Standorten. An Standorten mit ungünstigen Bedingungen blieb die Lärche klein. Ihre Durchschnittshöhe wird also durch eine grössere Anzahl kleinerer Bäume bestimmt. Andererseits wies die Lärche an den für das Wachstum günstigsten Osthängen von den drei Baumarten die höchsten Bäume auf. Die Lärche konnte also einerseits unter ungünstigen Bedingungen, welche nur geringes Wachstum erlauben, gerade noch überleben, andererseits konnte sie von günstigen Bedingungen am besten profitieren und mit starkem Wachstum reagieren.

### Die Charakterisierung der günstigen und ungünstigen Standorte nach den Überlebensraten und nach den mittleren Baumhöhen im Sommer 1995

Um die günstigen und ungünstigen Kleinstandorte zu charakterisieren, wurden für jede der drei Baumarten sowohl die mittleren Baumhöhen als auch die Überlebensraten der ein-

zelnen Einheitsflächen mit den entsprechenden Werten der einzelnen Standortfaktoren verglichen (Abbildung 5 und Farbtabelle 2).

Für die graphischen Darstellungen wurden die Werte der Überlebensraten und der mittleren Baumhöhen der einzelnen Einheitsflächen entsprechend ihrer Grössen geordnet (Abbildung 5). Am linken Ende der X-Achsen stehen die Einheitsflächen ohne oder mit geringen Überlebensraten bzw. mit geringen Baumhöhen. Diese können als ungünstige, d.h. als «überlebensfeindliche» bzw. «wachstumsfeindliche» Kleinstandorte interpretiert werden. Gegen das rechte Ende der Achsen sind die Einheitsflächen mit hohen Überlebensraten bzw. grossen Baumhöhen platziert,

welche als die günstigen, d.h. die «überlebensfreundlichen» bzw. «wachstumsfreundlichen» Standorte interpretiert werden können. Diese Darstellungsweise mit gleichbleibender X-Achse erlaubt eine synoptische Betrachtung der verschiedenen Einflüsse. Auf den Y-Achsen sind für die quantitativen Standortparameter «Höhe über Meer», «Strahlung», «Windverhältnisse», «Ausaperungsdatum», «Anzahl schneefreie Tage im Winter» und «Lawinhäufigkeit» die Mittelwerte für die einzelnen Einheitsflächen in Punktediagrammen eingetragen.

Die Interaktionen zwischen den Überlebensraten bzw. den Baumhöhen und den quantitativen Standortparametern werden in Abbildung 5a, b und c dargestellt. Da alle quantitativen Standortparameter eng miteinander korreliert waren (siehe Tabelle 1), wurde von einer multiplen Regressionsanalyse abgesehen. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den quantitativen Standortfaktoren und Überleben sowie Baumhöhen im Jahr 1995 sind in Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 1: Korrelationsmatrix der Standortparameter.<sup>5</sup>

Table 1: The correlation matrix of the site parameters.

	Strahlung	Wind	Aperung	Anzahl schneefreie Tage im Winter	Lawinhäufigkeit
Höhe ü.M. N =	r = 0,106 3752	0,543 3154	0,304 4086	0,201 4086	-0,489 4086
Strahlung		0,163 3071	-0,097 3752	0,045 3752	-0,050 3752
Wind			-0,103 3154	0,339 3154	-0,464 3154
Aperung				-0,426 4086	-0,098 4086
Anzahl schneefreie Tage im Winter					-0,135 4086

Zur Darstellung der Einflüsse der qualitativen Standortparameter «Bodentyp», «Humusform», «Pflanzengesellschaft» und «Konkurrenz-Verhältnisse» wurden die Baumhöhen sowie die Überlebensraten entsprechend der Grösse ihrer Werte geordnet (Farbtabelle 2a, b, c). Danach wurden die geordneten Reihen in zehn gleich grosse Gruppen eingeteilt.

<sup>5</sup> Korrelationskoeffizient r; Anzahl EF N. Die Anzahl EF in den Korrelationen variiert, da nicht alle Standortparameter in allen EF aufgenommen wurden.

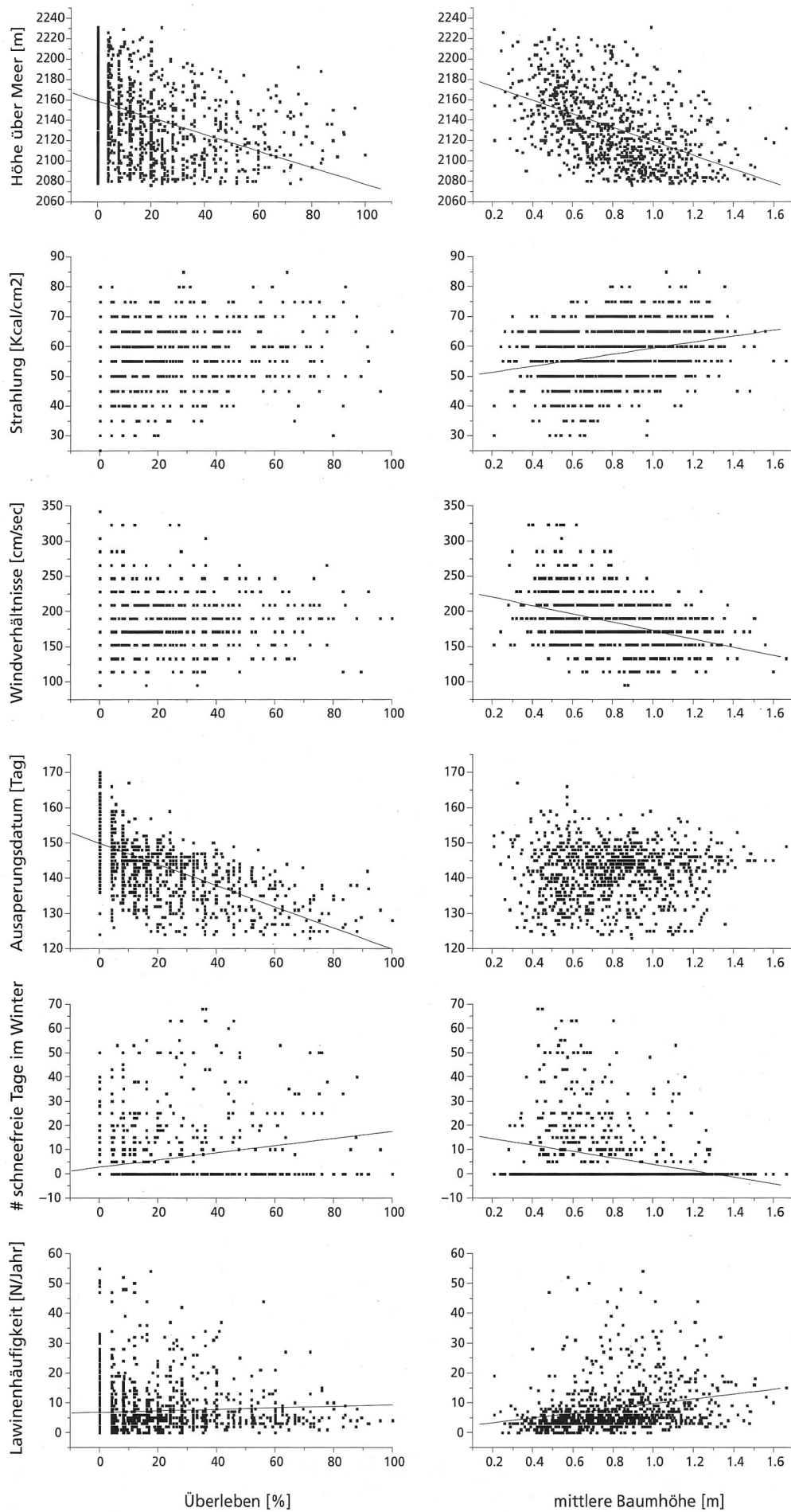


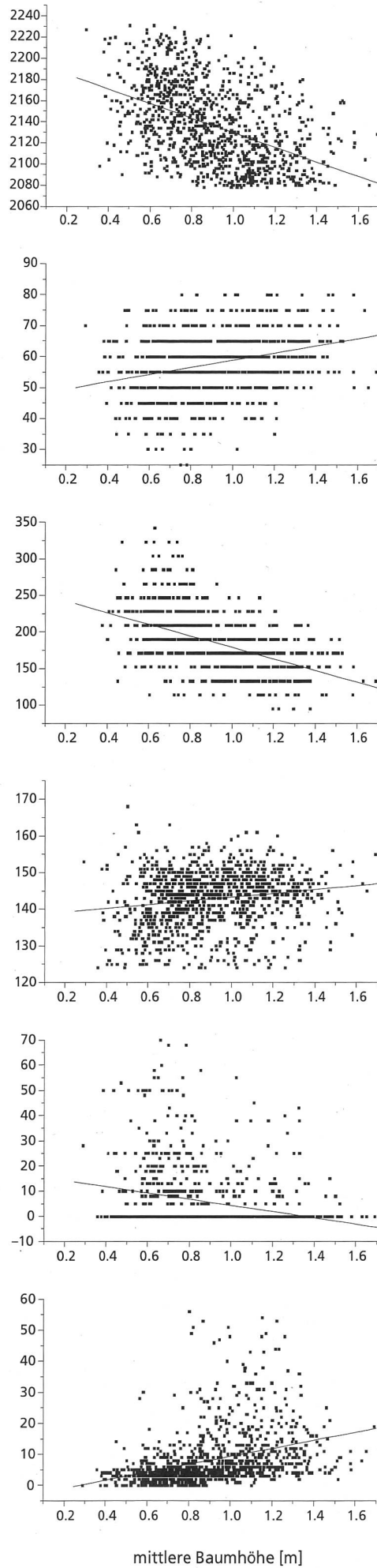
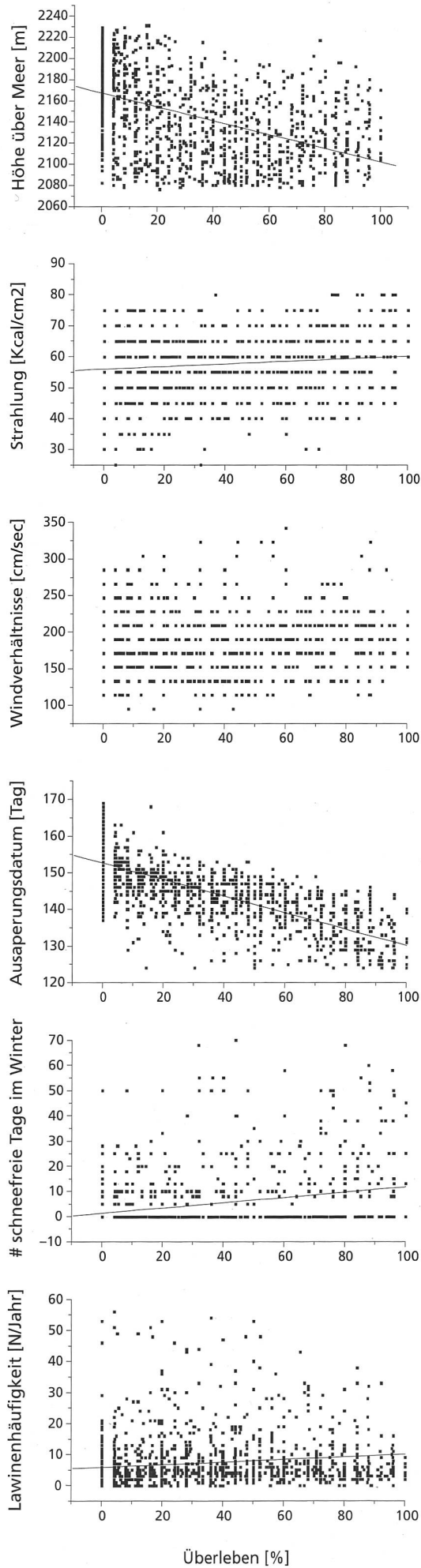
Abbildung 5: Beziehungen zwischen den quantitativen Standortparametern und den Überlebensraten pro Einheitsfläche (EF) (linke Spalte) sowie zwischen den quantitativen Standortparametern und den mittleren Baumhöhen pro EF (rechte Spalte).<sup>6</sup>

a) Arve

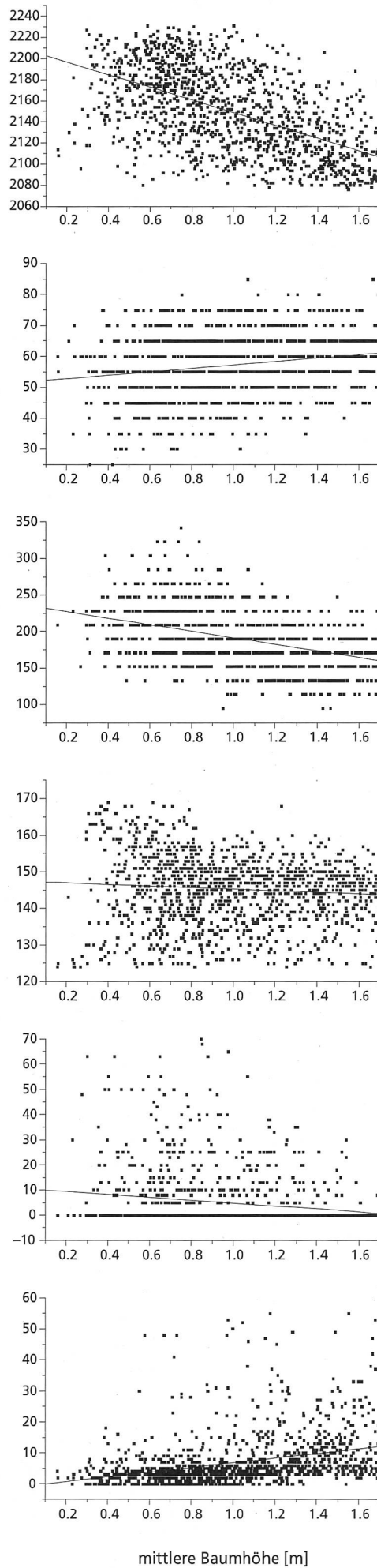
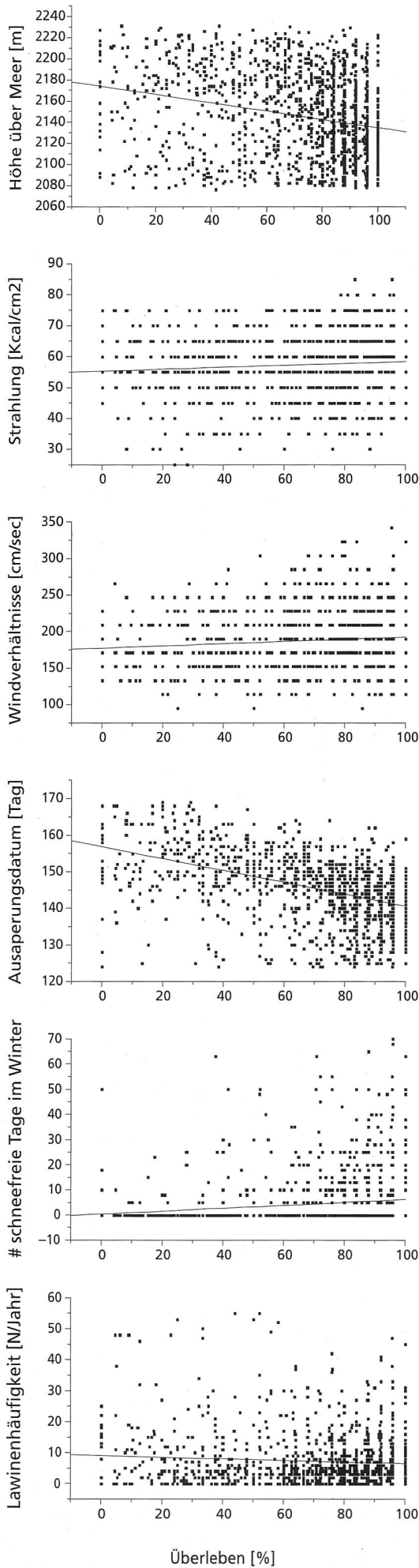
Figure 5: Relationship between quantitative site parameters and survival per square unit (left column), and between quantitative site parameters and average tree height per square unit (right column).

a) Swiss stone pine

<sup>6</sup> Für Korrelationskoeffizienten sowie Signifikanzen gegen Null siehe Tabelle 2; bei signifikanten Korrelationskoeffizienten ( $P < 0,05$ ) wurde die Regressionsgerade gezeichnet.



**b) Bergföhre**  
b) Mountain pine



c) Lärche  
c) European larch

**Tabelle 2:** Korrelationen zwischen den Standortparametern und Überleben sowie Baumhöhen im Jahr 1995.

Table 2: Correlations between site parameters and tree survival, and tree heights in 1995.

		Überleben			Baumhöhe		
		Arve	Bergföhre	Lärche	Arve	Bergföhre	Lärche
	N	1351	1350	1351	886	1067	1332
Meereshöhe	R	-0,39	-0,47	-0,25	-0,49	-0,46	-0,62
	P	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Strahlung	R	0,003	0,13	0,08	0,27	0,30	0,23
	P	0,92	0,0001	0,006	0,0001	0,0001	0,0001
Windgeschwindigkeit	R	-0,05	-0,03	0,10	-0,39	-0,5	-0,47
	P	0,13	0,33	0,002	0,0001	0,0001	0,001
Ausaperungsdatum	R	-0,65	-0,75	-0,46	0,04	0,17	-0,10
	P	0,0001	0,0001	0,0001	0,2	0,0001	0,0003
Anzahl schneefreie Tage im Winter	R	0,24	0,27	0,13	-0,25	-0,25	-0,21
	P	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Lawenhäufigkeit	R	0,06	0,15	-0,08	0,25	0,37	0,38
	P	0,03	0,0001	0,006	0,0001	0,0001	0,0001

Innerhalb dieser Gruppen wurden die prozentualen Anteile der einzelnen Klassen des jeweiligen Standortparameters berechnet. Mit dieser Anordnung konnte die «Günstigkeit» der Standorte innerhalb der Versuchsfläche in zehn Stufen von sehr ungünstig (1) bis günstig (10) beschrieben werden.

Die Werte der mittleren Baumhöhen der Einheitsflächen liessen sich auf der X-Achse gut in zehn 10%-Gruppen einteilen, da die mittleren Baumhöhen eine sehr fein abgestufte Werte-Reihe ergaben. Die Werte der Überlebensraten liessen sich nicht immer in 10%-Gruppen aufteilen. Einerseits ist bei den Arven und bei den Bergföhren der Anteil der Einheitsflächen mit Totalausfall deutlich grösser als 10%, andererseits sind die Werte der Überlebensraten weniger fein abgestuft. Deshalb treten häufig grössere Gruppen mit gleichen Überlebensraten auf. Diese Gruppen wurden als Ganzes einer sogenannten 10%-Gruppe zugeordnet, wodurch diese nicht mehr genau 10% der Werte umfassen. Es wurden aber mit den Überlebensraten Gruppen gebildet, welche möglichst nahe an 10% kamen. Wegen der zwischen den Arten sehr unterschiedlichen Verteilung der Häufigkeiten der Überlebensraten (Abbildung 2) und der mittleren Baumhöhen umfassen die 10%-Gruppen der verschiedenen Baumarten sehr unterschiedliche Bereiche. Die absoluten Bereiche der einzelnen 10%-Gruppen sind für die verschiedenen Baumarten in den entsprechenden Abbildungslegenden angegeben.

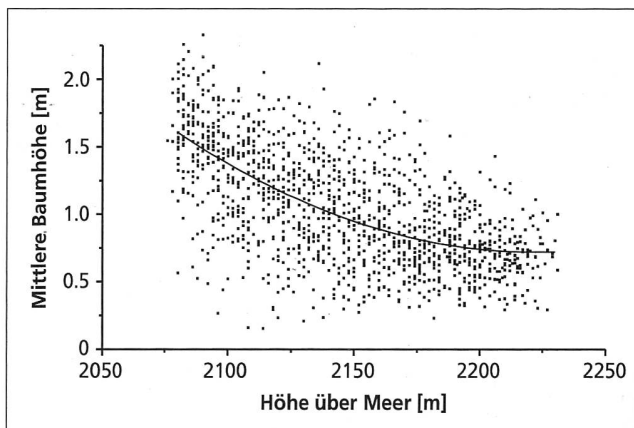
## Die Rolle der Meereshöhe

Sowohl das Überleben der Bäume pro Einheitsfläche als auch die mittlere Höhe der im Sommer 1995 noch lebenden Bäume waren bei allen drei Baumarten negativ mit der Meereshöhe korreliert (Abbildung 5). Trotz der starken durch die Topographie bedingten vertikalen Differenzierung der Standortbedingungen zeigten sich bei allen drei Baumarten klare Tendenzen, dass die überlebens- und wachstumsfeindlichen Kleinstandorte überproportional häufig in hohen Lagen zu finden sind. Allerdings war die negative Korrelation zwischen Baumhöhen und Höhen über Meer enger als zwischen Überlebensraten und Höhen über Meer (Tabelle 2).

Bei der Lärche, wo die Beziehung zwischen Meereshöhe und mittlerer Baumhöhe am stärksten war, reduzierte sich die während der zwanzig Jahre erreichten Baumhöhe innerhalb der rund 150 Höhenmeter vom unteren Rand der Versuchsfläche, wo die Bäume durchschnittlich rund 1,7 m hoch waren bis zum oberen Rand, wo sie durchschnittlich noch

70 cm hoch waren, um rund 60%. Allerdings zeigten die Baumhöhen vor allem im mittleren Bereich der Versuchsfläche bei konstanter Meereshöhe eine breite Streuung, welche der horizontalen, topographisch bedingten Variation der Kleinstandortsbedingungen entspricht (siehe SCHÖNENBERGER und FREY, 1988).

Die quadratische Regressionsgleichung, welche die Beziehung zwischen Höhe der Bäume und der Höhe über Meer am besten beschreibt, zeigt für alle drei Baumarten für den oberen Teil der Versuchsfläche einen zunehmend flacheren Verlauf der Kurve [für die Arve:  $y = 102,30 - 0,09x + (2,05 \cdot 10^{-5})x^2$ ,  $R^2 = 0,25$ ; für die Bergföhre:  $y = 52,22 - 0,04x + (9,73 \cdot 10^{-6})x^2$ ,  $R^2 = 0,22$ ; für die Lärche siehe Abbildung 6]. Die geringere Abnahme der Baumhöhe gegen die Baumgrenze hin lässt sich physiologisch damit erklären, dass die Bäume mit zunehmender Meereshöhe ihr Wachstum nicht beliebig reduzieren, also nicht kontinuierlich «kleiner» werden können. Da es im Bereich der subalpinen Waldgrenze immer wieder zu Rückschlägen im Wachstum kommt, zum Beispiel durch Früh- oder Spätfröste oder durch kalte Sommer, muss ein Baum in Jahren mit durchschnittlichen Bedingungen und ohne klimatische Extremereignisse genügend Phytomasse produzieren können, um gegen Rückschläge gewappnet zu sein, um längerfristig wachsen und damit überleben zu können. Das Wachstum kann also gegen die Waldgrenze (oder Baumgrenze) hin nicht beliebig reduziert werden.



**Abbildung 6:** Baumhöhen der Lärche in Abhängigkeit von den Meereshöhen.<sup>7</sup>

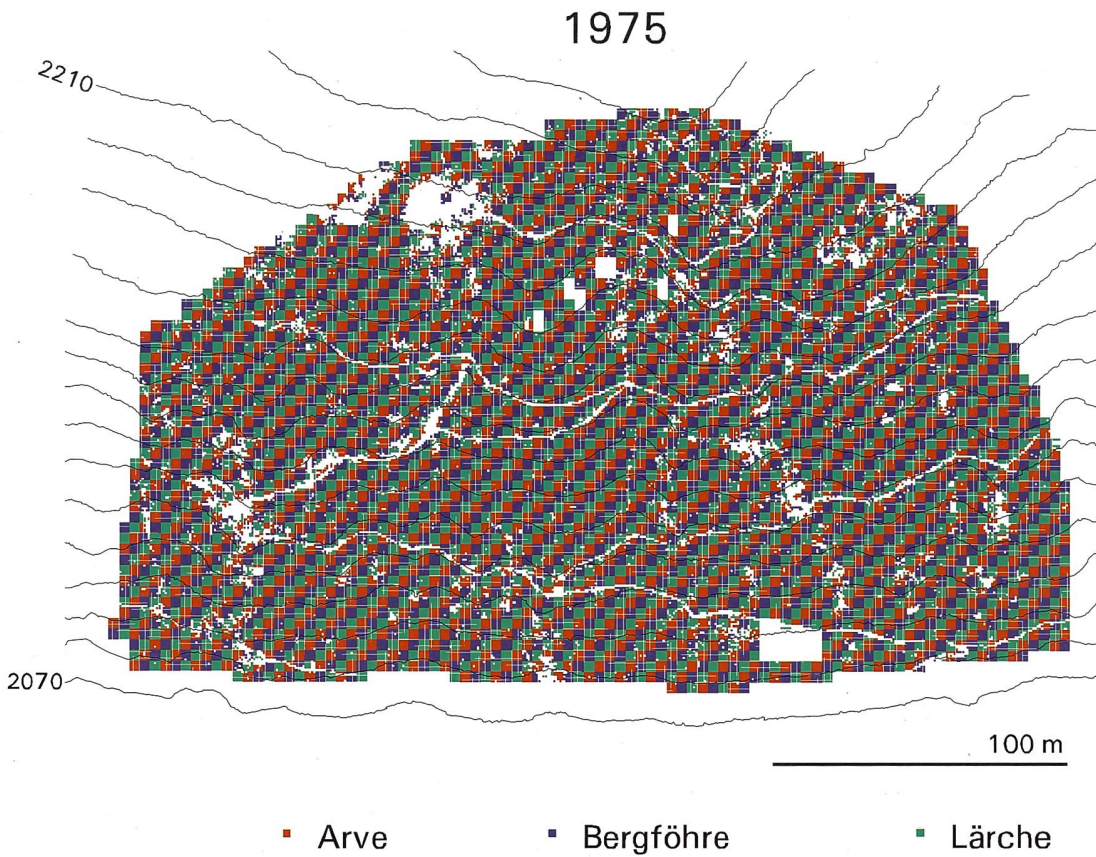
Figure 6: The relationship between altitude and tree height in European larch.

Die Beziehung zwischen den Überlebensraten der Bäume in den einzelnen Einheitsflächen und der Meereshöhe war etwas weniger eng als zwischen Baumhöhe und Meereshöhe. Dies kommt dadurch zustande, dass kleinstandörtliche Faktoren eine ebenso wichtige Rolle für das Überleben der Bäume spielen wie die absolute Meereshöhe. Diese Tatsache wird durch Farbtatel 1 illustriert: die horizontale Variation der Überlebensraten widerspiegelt deutlich die Topographie der Versuchsfläche. Während zum Beispiel auf den nordexponierten Hängen nur wenige Bäume überlebten, hat auf den südostexponierten Hängen ein grosser Teil überlebt.

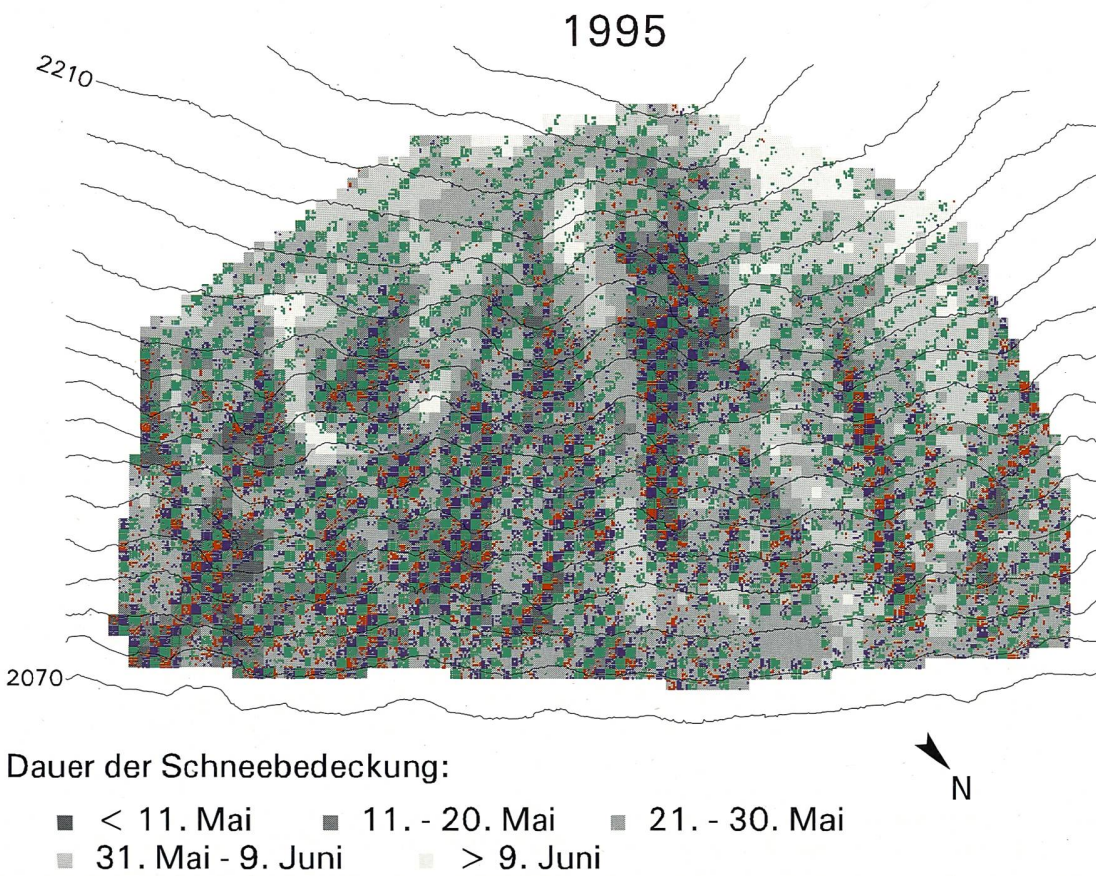
## Die Rolle der Strahlung

Die Berechnung der Strahlung basiert auf Messungen der Globalstrahlung bei wolkenfreiem Wetter für 49 Expositionen innerhalb der Versuchsfläche und anschliessender Berech-

<sup>7</sup> Mit quadratischer Regressionsgleichung:  $y = 215,46 - 0,19x + (4,34 \cdot 10^{-5})x^2$ ;  $r^2 = 0,41$ ,  $N = 1332$ .



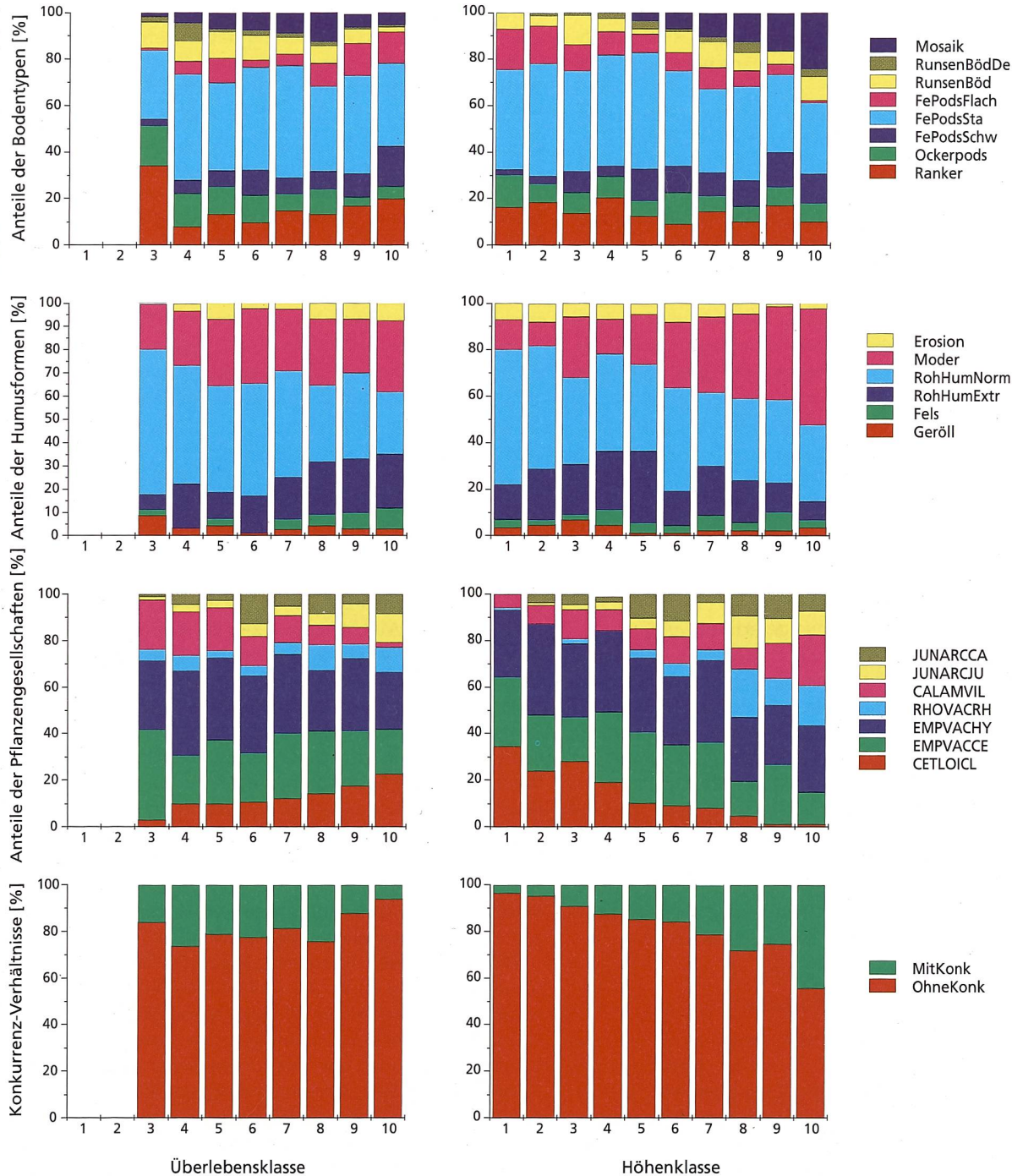
**Farbtafel 1a:** Karte der Aufforstung nach der Pflanzung im Jahr 1975.<sup>8</sup>  
*Colour plate 1a: Map of afforestation after planting in 1975.*



**Farbtafel 1b:** Karte der überlebenden Bäume zwanzig Jahre nach der Pflanzung.<sup>9</sup>  
*Figure 1b: Map showing trees surviving twenty years after plantation.*

<sup>8</sup> Äquidistanz 10 m. Je ein Drittel der total 4052 Einheitsflächen (EF) wurden mit maximal 25 Arven, Bergföhren oder Lärchen bepflanzt.

<sup>9</sup> Unterlegt durch die mittlere Dauer der Schneebedeckung (Durchschnitt von 1975 bis 1982) der einzelnen EF.



**Farbtafel 2:** Beziehungen zwischen den qualitativen Standortparametern und den Überlebensraten (linke Spalte) sowie den mittleren Baumhöhen (rechte Spalte).<sup>10</sup> 2a) Arve

Colour plate 2: Relationship between qualitative site parameters and survival (left column), and average tree height (right column). 2a) Swiss stone pine

<sup>10</sup> Zur Charakterisierung der Standorte wurden sowohl die Überlebensraten als auch die mittleren Baumhöhen in den einzelnen Einheitsflächen (EF) ihrer Grösse nach von den kleinsten bis zu den grössten Werten sortiert und in zehn möglichst gleich grosse Gruppen eingeteilt. In den Histogrammen sind die prozentualen Anteile der Gruppen innerhalb eines qualitativen Standortparameters dargestellt.

a) Arve

Überlebensklassen: 3 = 0%; 4 = 4%; 5 = 4,2 – 8%; 6 = 8,3 – 12%; 7 = 12,5 – 20%; 8 = 20,8 – 28%; 9 = 28,6 – 44%; 10 = 45 – 100%

Höhenklassen: 1 = 21 – 47 cm; 2 = 47,5 – 55,7 cm; 3 = 56 – 63,2 cm; 4 = 63,5 – 72 cm; 5 = 72,3 – 78,8 cm; 6 = 79 – 86,5 cm; 7 = 86,6 – 93,1 cm; 8 = 93,3 – 102,9 cm; 9 = 103 – 114,5 cm; 10 = 115,5 – 166 cm

b) Bergföhre

Überlebensklassen: 2 = 0%; 3 = 4 – 7,1%; 4 = 8 – 15,8%; 5 = 16 – 24%; 6 = 25 – 36,8%; 7 = 37,5 – 48%; 8 = 50 – 60%; 9 = 60,9 – 79,2%; 10 = 80 – 100%

Höhenklassen: 1 = 29 – 59 cm; 2 = 59,2 – 67 cm; 3 = 67,3 – 74 cm; 4 = 74,1 – 81,3 cm; 5 = 81,4 – 87,3 cm; 6 = 87,5 – 95,8 cm; 7 = 95,9 – 104,4 cm; 8 = 104,5 – 112,3 cm; 9 = 112,4 – 124,3 cm; 10 = 124,5 – 188,6 cm

c) Lärche

Überlebensklassen: 1 = 0 – 30,8%; 2 = 31,8 – 48%; 3 = 50 – 63,6%; 4 = 64 – 73,7%; 5 = 73,9 – 80%; 6 = 80,9 – 84%; 7 = 84,2 – 88%; 8 = 88,2 – 92%; 9 = 92,9 – 95,8%; 10 = 96 – 100%

Höhenklassen: 1 = 15,6 – 53,5 cm; 2 = 53,7 – 66,4 cm; 3 = 66,5 – 76,4 cm; 4 = 76,5 – 85,4 cm; 5 = 85,5 – 98,8 cm; 6 = 99 – 113 cm; 7 = 113,3 – 127,8 cm; 8 = 128 – 145,5 cm; 9 = 145,6 – 163,5 cm; 10 = 163,8 – 233 cm

Pflanzengesellschaften

CETLOICL = *Cetrario-Loiseleurietum cladonietosum*; EMPVACCE = *Empetro-Vaccinietum cetrarietosum*; EMPVACHY = *Empetro-Vaccinietum hylocomietosum*; RHOVACRH = *Rhododendro-Vaccinietum rhododendretosum*; CALAMVIL = *Calamagrostietum villosae adenostyletosum*; JUNARCJU = *Junipero-Arctostaphyletum juniperetosum*; JUNARCCA = *Junipero-Arctostaphyletum callunetosum*

nung der Summenwerte für die ganze Vegetationsperiode für jede Einheitsfläche entsprechend ihrer Neigung, Himmelsrichtung und orographisch möglichen Sonnenscheindauer (TURNER, 1966).

Bei allen drei Baumarten wurden positive Beziehungen zwischen den Baumhöhen und den Strahlungswerten gefunden (Tabelle 2). Dies zeigt deutlich, dass die an einem Standort empfangene Energiemenge trotz allen biotischen und abiotischen Einflüssen, welche nahe der Waldgrenze immer wieder zu Rückschlägen im Baumwachstum führen oder sogar die Baumhöhen reduzieren, eine überragende Bedeutung für die Höhenentwicklung eines Baumes hat. Zudem sind stark bestrahlte Standorte wesentlich wärmer als schwach bestrahlte, was insbesondere die Bodentemperatur erhöht und die Stoffwechsellvorgänge begünstigt. Zwischen den Überlebensraten der Bäume und der Strahlung wurden bei der Bergföhre und bei der Lärche, nicht aber bei der Arve, schwache positive Beziehungen gefunden.

### Die Rolle der Windgeschwindigkeit

NÄGELI (1971) berechnete aufgrund der Meereshöhe, der Exposition und der Hangneigung die Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe über dem Boden für die ganze Versuchsfläche, welche dann für die Einheitsflächen umgerechnet wurden.

In den Korrelationsanalysen wurden für alle drei Baumarten signifikante negative Zusammenhänge zwischen den mittleren Windgeschwindigkeiten und den Baumhöhen gefunden. Die Baumhöhen nahmen also mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten ab. Dies könnte einerseits mit der kühlenden Wirkung der Winde zu tun haben, welche das Wachstum verlangsamt. Andererseits wird an Standorten mit starken Winden im Winter der Schnee weggeweht. Bei den Analysen der Überlebensraten wurde nur bei der Lärche ein positiver Zusammenhang zwischen Überleben und Windgeschwindigkeit gefunden. Die Lärchen überlebten also an windigeren Standorten besser als an windgeschützteren.

### Die Rolle des Ausaperungsdatums

Das Ausaperungsdatum erklärte von allen gemessenen Parametern den grössten Anteil der Variation der Überlebensraten in den Einheitsflächen. Bei allen drei Baumarten war das Überleben negativ mit dem durchschnittlichen Ausaperungsdatum korreliert (SENN, 1999). Diese Beziehung war bei der Arve und bei der Bergföhre enger als bei der Lärche. Die Bäume überlebten also am besten auf den Standorten, an denen der Schnee im Frühling früh schmilzt. Mit zunehmender Dauer der Schneedecke im Frühling sanken die Überlebenschancen von Arven und Bergföhren rasch. Auf Standorten, welche im Durchschnitt länger als bis zum 10. Juni schneebedeckt sind, überlebten praktisch keine Arven und Bergföhren mehr. Lärchen überlebten zwar auch auf länger schneebedeckten Standorten immer noch relativ gut, doch zeigte sich auch bei dieser Baumart ein negativer Zusammenhang zwischen der Dauer der Schneedecke und dem Überleben.

Bei den Wirkungen des Ausaperungsdatums auf die Baumhöhen war das Bild weniger deutlich. Bei der Arve wurde kein Zusammenhang zwischen Baumhöhe und Ausaperungsdatum gefunden. Bei der Bergföhre besteht ein positiver Zusammenhang, die Bäume waren also auf früh ausapernden Standorten kleiner als auf länger schneebedeckten. Dies könnte damit zusammenhängen, dass Bergföhren auf früh ausapernden Standorten sehr stark von Birkhühnern (*Tetrao tetrix*) genutzt werden. Sie ernähren sich hauptsächlich von den leicht erreichbaren Knospen und Nadeln und verhindern damit bei der Bergföhre sehr wirksam das Höhenwachstum (STREULE, 1973).

Bei der Lärche wurde ein negativer Zusammenhang zwischen Baumhöhe und Ausaperungsdatum gefunden. Lärchen auf früh ausapernden Standorten waren also etwas grösser als Lärchen auf später schneefrei werdenden Standorten. Sie wurden zwar auch durch Birkwild verbissen, allerdings in weit geringerem Mass als die Bergföhren. Lärchen sind aber im Gegensatz zu Föhren und Arven in der Lage, auf klimatisch günstige Bedingungen mit starkem Wachstum zu reagieren (GOWER & RICHARDS, 1990), so dass zwanzig Jahre nach der Pflanzung die grössten Bäume Lärchen waren und diese auf den früh ausapernden Standorten standen.

Der festgestellte enge Zusammenhang von Aufforstungserfolg mit der Ausaperung ist von grosser praktischer Bedeutung. Da das Ausaperungsmuster im Frühjahr im Gelände gut erkennbar ist, lassen sich daraus leicht die günstigen und ungünstigen Kleinstandorte für eine Bepflanzung ableiten (SCHÖNENBERGER et al., 1990).

### Die Rolle der Anzahl schneefreier Tage im Winter

Bei allen drei Baumarten wurden positive Korrelationen zwischen der mittleren Anzahl Tage, an denen der Standort im Winter schneefrei ist, und dem Überleben gefunden. Alle drei untersuchten Baumarten überleben also besser an Standorten, welche im Winter längere Zeit ohne Schneebedeckung sind. Bei diesen Standorten handelt es sich vor allem um Rippenstandorte. Hier wird der Schnee durch den Wind häufig mehr oder weniger vollständig abgeräumt. Die Korrelationsanalyse der Windgeschwindigkeit ergab allerdings nur bei der Lärche einen leicht positiven Zusammenhang mit den Überlebensraten. Bei Bergföhre und Arve wurden keine signifikanten Korrelationen gefunden. Zwar ist die Anzahl schneefreier Tage im Winter hoch signifikant mit der Windgeschwindigkeit korreliert (siehe Tabelle 1), doch muss bedacht werden, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit die Mächtigkeit der Schneedecke reduziert wird und der Standort erst im Extremfall völlig schneefrei wird.

Die Analyse der Zusammenhänge zwischen der Anzahl schneefreier Tage im Winter und den mittleren Baumhöhen ergab ähnlich wie bei der Windgeschwindigkeit für alle drei Baumarten hoch signifikante negative Korrelationen. Die Baumhöhen nahmen also mit zunehmender Anzahl schneefreier Tage ab. Ohne den Schutz durch die Schneedecke sind die Bäume in der Nähe der Waldgrenze extremen Temperaturschwankungen (Tag-Nacht-Schwankungen bei offenem Himmel) ausgesetzt (TRANQUILLINI und TURNER, 1961). Auf den Rippenstandorten wurden im Laufe der Jahre auch immer wieder Schäden durch Frostrocknis festgestellt (Schönenberger und Senn, unpubl. Daten). Frostrocknis kann zum Absterben von Gipfeltrieben oder sogar von grösseren Teilen der Baumkronen und im Extremfall sogar von ganzen Bäumen führen und ist nach TRANQUILLINI (1979) ein wichtiger Grund für den Verlauf der alpinen Waldgrenze. Zusätzlich können im Winter schneefreie Bäume bei starken Winden auch unter Eisschliff leiden, der ebenfalls zum Absterben von Zweigen, Nadeln und Triebspitzen führen kann (TURNER, 1968; HOLTMEIER, 1971; KÖRNER, 1999).

### Die Rolle der Lawinhäufigkeit

Bei der Arve konnte überraschend ein leichter und bei der Bergföhre ein stärkerer positiver Zusammenhang zwischen der Lawinhäufigkeit und dem Überleben der Bäume festgestellt werden. Bei der Lärche war dieser Zusammenhang negativ. Die Lawinenrutschen, also die Standorte mit der stärksten Lawinenaktivität, bieten sowohl bezüglich Nährstoffversorgung (BLASER, 1980) als auch bezüglich Mikroklima (TURNER et

al., 1975) für die Bäume günstige Lebensbedingungen. Allerdings führt dies auch zu üppigem Wachstum der Gras- und Krautvegetation (KUOCH, 1970). Vor allem die bei der Auspflanzung sehr kleinen Lärchen litten daher an den Standorten mit hoher Lawinenaktivität unter der starken Vegetationskonkurrenz, wodurch es in den ersten Jahren nach der Pflanzung zu den im Vergleich zu den beiden anderen Baumarten relativ hohen Ausfällen kam (Abbildung 1). Das könnte die negative Korrelation bei der Lärche erklären. Die Arven und die Bergföhren waren beim Auspflanzen bedeutend grösser und konnten sich daher besser gegen die Vegetationskonkurrenz behaupten und von den günstigen Standorten auf Lawinenbahnen profitieren, was zu den positiven Korrelationen zwischen Lawinenaktivität und Überlebensraten führte. Zudem waren die Stammdurchmesser immer noch so gering, dass auch Nassschneelawinen die Bäume auf den Boden legten, ohne grössere Stammverletzungen und damit zusätzliche Mortalität zu verursachen.

Die Baumhöhe war bei allen drei Baumarten positiv mit der Lawinenaktivität korreliert. Hier wird wiederum deutlich, dass, wenn sich die Bäume einmal etablieren konnten, in den Lawinenrutschen für das Wachstum günstige Bedingungen herrschten. Durch die heftigen Schneebewegungen verursachte Stammverletzungen oder sogar Brüche wurden vor 1995 erst wenige gefunden. Die Stammdurchmesser der meisten Bäume waren noch so gering, dass sie flexibel genug waren, um sich allfälligen Schneebewegungen anzupassen. Die Bäume wurden durch die gleitende Schneedecke in den meisten Fällen flach auf die Bodenoberfläche gelegt und richteten sich nach dem Verschwinden der Schneedecke wieder mehr oder weniger vollständig auf. Eine Untersuchung der Arven und der Lärchen im Jahre 1999 zeigte allerdings eine im Vergleich zu 1995 mit zunehmenden Stammdurchmessern starke Zunahme von Stammspaltungen und -brüchen an den Standorten mit Schneebewegungen, von denen die Arven deutlich stärker betroffen waren als die Lärchen (VANOMSEN, 2000). Damit ist absehbar, dass in Zukunft an den Stellen mit hoher Lawinenaktivität die meisten Bäume verschwinden werden.

## Die Rolle der Bodentypen

BLASER (1980) hat die Böden und Humusformen in der Versuchsfläche typisiert und kartiert, SCHÖNENBERGER und FREY (1988) haben sie den Einheitsflächen zugeordnet.

Der mit 38% der Gesamtfläche am weitesten verbreitete stark entwickelte Eisenhumuspodsol war mehr oder weniger gleichmässig über alle Überlebens- und Höhenklassen verteilt (Farbtafel 2). Einzig bei der Klasse mit Totalausfällen war er bei allen Baumarten untervertreten, am meisten bei der Lärche.

Der Anteil des selteneren flachgründigen Eisenhumuspodsols (7% der Gesamtfläche) und des schwach entwickelten Eisenhumuspodsols (7%) nahm bei allen drei Baumarten in den Klassen mit zunehmenden Überlebensraten zu. Während die Anteile des schwach entwickelten Eisenhumuspodsols ebenfalls mit der Baumhöhe zunahm, war die Situation beim flachgründigen Eisenhumuspodsol umgekehrt. Während also für alle drei Baumarten sowohl flachgründiger als auch schwach entwickelter Eisenhumuspodsol überproportional überlebensfreundlich waren, waren die Bäume auf schwach entwickeltem Eisenhumuspodsol eher gross, auf flachgründigem Eisenhumuspodsol aber eher klein.

Der Anteil der Runsenböden (8%) war bei allen Baumarten in den Klassen mit geringen Überlebensraten relativ hoch und nahm gegen die Klassen mit hohen Überlebensraten kontinuierlich ab. Ähnlich wenn auch etwas weniger deutlich verhielt es sich bei den degradierten Runsenböden (2%). Ebenfalls

ähnlich verhielten sich die Bäume auf Ranker (20%). Dieser weit verbreitete Bodentyp kam bei allen Baumarten am häufigsten in der Klasse mit den Totalausfällen (bei Arven und Bergföhren) beziehungsweise mit den grössten Ausfällen (bei der Lärche) vor. In den Klassen mit geringeren Ausfällen war das Bild nicht einheitlich. Tendenziell nahmen die Anteile dieses Bodentyps aber in den Klassen mit zunehmenden Überlebensraten ab, am deutlichsten bei der Lärche. Bei den Baumhöhen zeigte sich nur bei der Lärche ein deutlicher Trend. Hier war der Anteil des Rankers in den Klassen mit geringen Baumhöhen besonders gross. Mit zunehmenden Baumhöhen nahm dieser Anteil ab.

Auffällig ist, dass die Einheitsflächen, in denen der Boden als Mosaik aus verschiedenen Bodentypen (6%) klassifiziert wurde, bei allen Baumarten in den Klassen mit hohen Durchschnittshöhen deutlich häufiger wurden, während solche Mosaikböden in den Klassen mit geringeren Baumhöhen kaum vorkamen.

Die überlebensfeindlichen Standorte sind durch überproportionale Anteile von Rankern und Runsenböden charakterisiert, insbesondere bei Bergföhre und Lärche, die überlebensfreundlichen Standorte durch Übervertretung flachgründiger und schwachentwickelter Eisenhumuspodsolen. Die wachstumsfeindlichen Standorte liegen überdurchschnittlich oft auf Rankern und flachgründigen Eisenhumuspodsolen, während sich die wachstumsgünstigen Kleinstandorte auffallend oft auf dem Mosaik verschiedener Böden und auf Runsenböden befinden.

## Die Rolle der Humusformen

Die Topographie des Versuchsgebietes bestimmt weitgehend die kleinstandörtlichen Temperaturverhältnisse und damit die Verteilung der Humusformen (BEDNORZ *et al.*, 2000). In 48% der Versuchsfläche wurde eine normale Rohhumusaufgabe taxiert, in 25% Moder, in 14% extreme Rohhumusaufgabe, in 5% Geröll und in je 4% Erosionsstellen oder Fels (SCHÖNENBERGER und FREY, 1988).

Die Standorte mit normal entwickelter Rohhumusaufgabe waren bei den Arven und bei den Bergföhren in den Klassen mit geringen Überlebensraten stärker vertreten als in den Klassen mit höheren Überlebensraten. Bei den Lärchen war keine solche Tendenz erkennbar. Erstaunlicherweise zeigten die Standorte mit extremen Rohhumusaufgaben bei allen drei Baumarten eine umgekehrte Tendenz. Dieser Bodentyp war in den Klassen mit den grössten Ausfällen und den Totalausfällen eher selten vertreten, nahm aber gegen die Klassen mit besserem Überleben deutlich zu.

Die Verteilung der übrigen Humusformen in den Überlebensklassen zeigte kein klares Muster. Als Tendenz ist erkennbar, dass die Bäume an Standorten, welche als Erosionsstellen aufgenommen wurden, besser überlebten, da der relative Anteil dieser «Humusform» gegen die Klassen mit höheren Überlebensraten zunahm. Es scheint also, dass alle Baumarten auf Störungen der Bodenoberfläche, das heisst auf das Offenlegen des Mineralhorizontes, positiv reagierten.

Bei der Klassierung der Baumhöhen zeigten sich bei den meisten Humusformen keine deutlichen Tendenzen. Einzig bei den als Moder klassifizierten Einheitsflächen konnte bei allen drei Baumarten mit zunehmender Baumhöhe eine Zunahme der Anteile festgestellt werden. Die Humusform «Moder» war also bei den Einheitsflächen mit hohen Bäumen deutlich übervertreten.

## Die Rolle der Pflanzengesellschaften

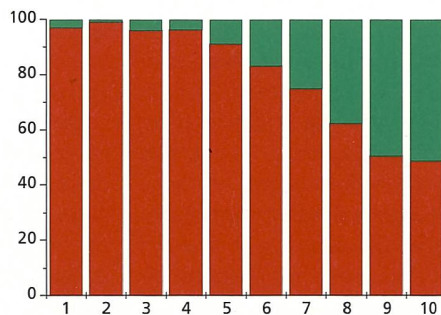
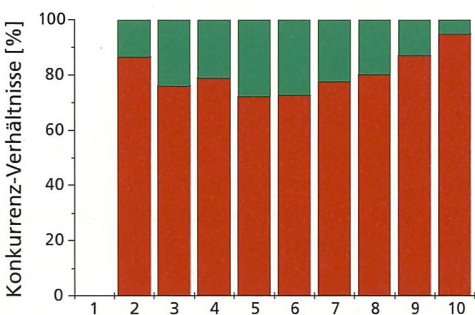
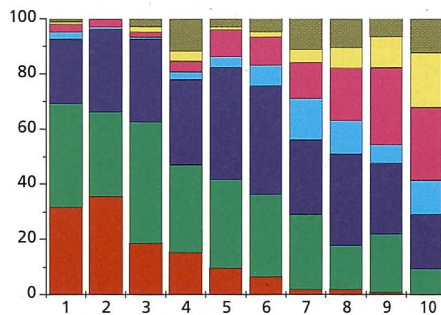
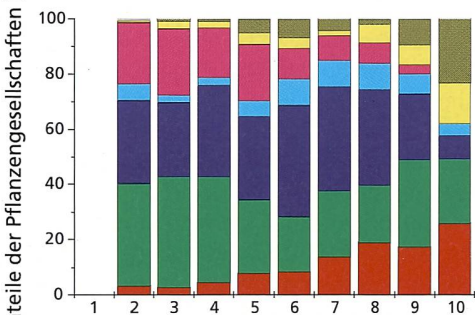
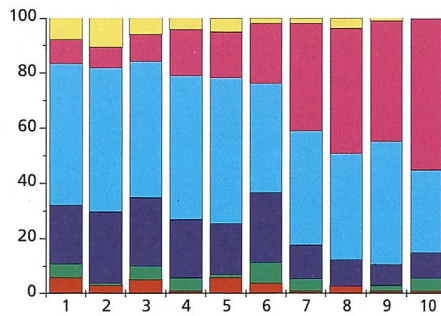
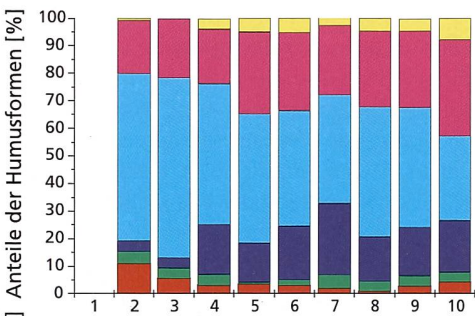
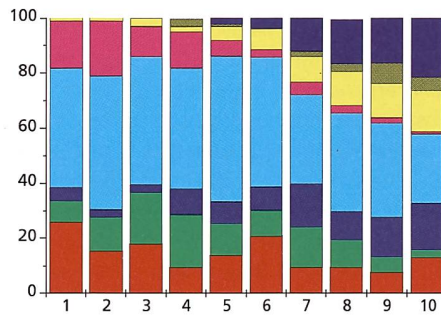
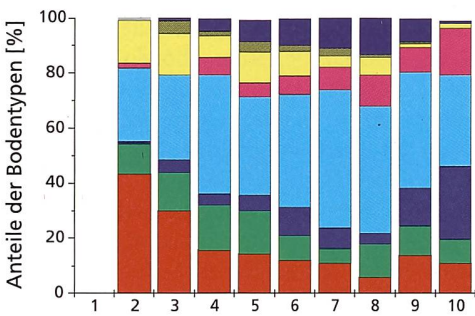
Die Pflanzengesellschaften der Versuchsfläche wurden vor der Pflanzung durch KUOCH (1970) und KUOCH und AMIET (1970)

eingehend untersucht und beschrieben und in einer Vegetationskarte dargestellt. SCHÖNENBERGER und FREY (1988) stellen die Vegetation in der Versuchsfläche auf Einheitsflächen basierend dar. Die Dominanz der Zwergstrauchgesellschaften ist typisch für die Waldgrenzbereiche der kontinentalen Zentralalpen auf Urgestein.

Die räumliche Anordnung der Pflanzengesellschaften widerspiegelt vor allem die horizontale topographische Gliederung der Versuchsfläche in die vier Hauptgeländetypen Rippe mit Windflechten-Azaleenheide mit Rentierflechte, Nordhang mit Krähenbeere-Vaccinienheide, Runse mit Wollreitgrasrasen und Osthang mit Wacholder-Bärentraubenheide. In geringerem Ausmass wird die zunehmende Höhe innerhalb der Versuchsfläche durch zunehmende Anteile an Krähenbeere-Vaccinienheide sichtbar.

Bei den geordneten «Überlebensklassen» zeigte sich bei allen drei Baumarten mit zunehmenden Überlebensraten eine kontinuierliche Zunahme der Anteile von Windflechten-Azaleenheide mit Rentierflechte (*Cetrario-Loiseleirietum cladetosum* auf 10% der Gesamtfläche). Das gleiche gilt für die beiden Gesellschaften Wacholder-Bärentraubenheide mit Wacholder (*Junipero-Arcostaphyletum juniperetosum* 4%) und Wacholder-Bärentraubenheide mit Heidekraut (*J.-A. callunetosum* 5%). Das heisst, diese drei Pflanzengesellschaften waren in den Klassen mit gutem Überleben übervertreten und in denjenigen mit schlechtem Überleben untervertreten.

Umgekehrt nahm der Anteil von Einheitsflächen mit Wollreitgrasrasen mit Drüsengriffel (*Calamagrostietum villosae adenostyletosum* 15%) in den Klassen mit zunehmenden Überlebensraten kontinuierlich ab. Diese Pflanzengesellschaft



2b) Bergföhre

2b) Mountain pine

kam also in den Klassen mit Totalausfall und schlechtem Überleben relativ häufig vor, während sie in den Klassen mit gutem Überleben selten war oder sogar völlig fehlte (z.B. bei der Bergföhre).

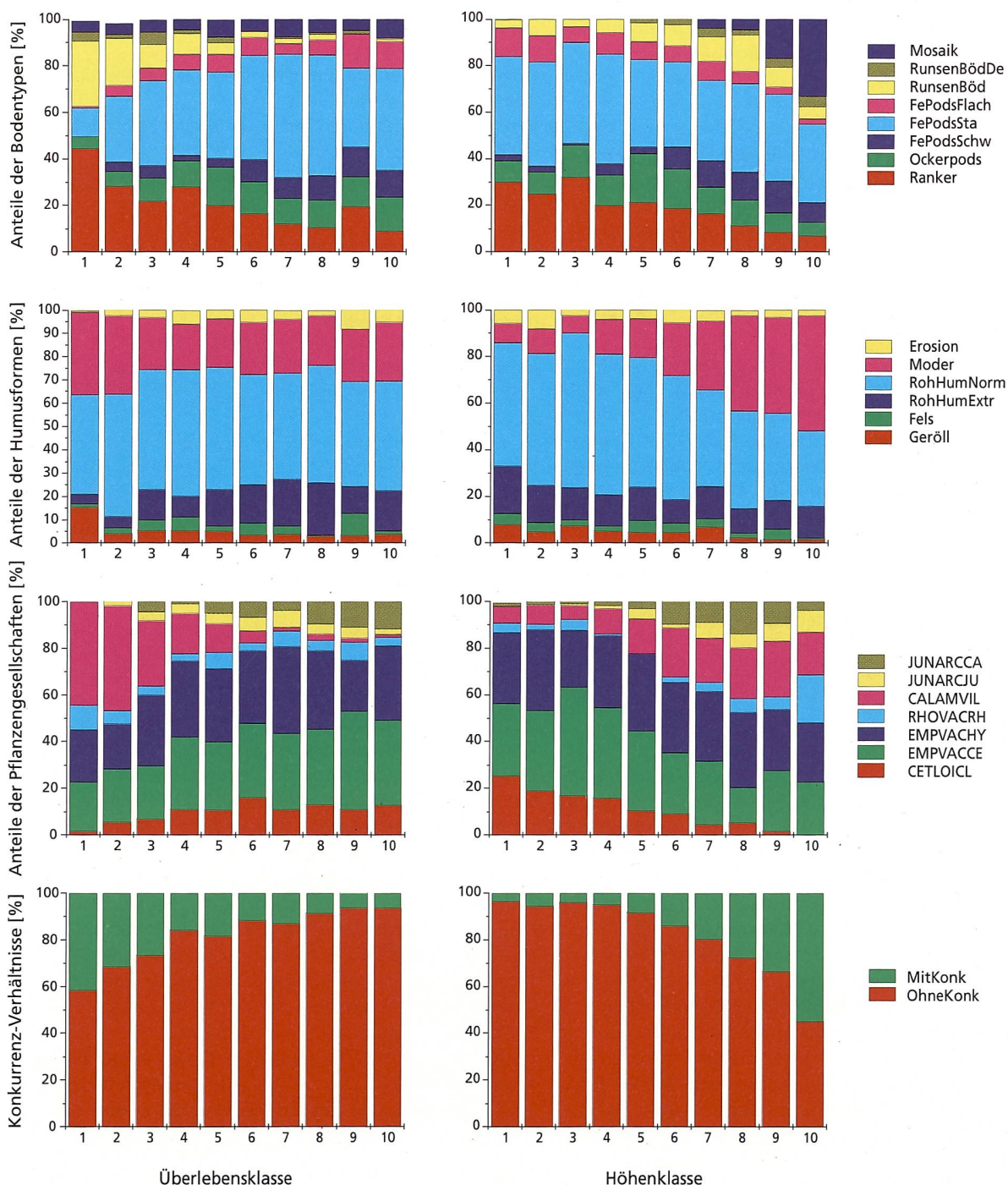
Die Anteile der Alpenrosen-Vaccinienheide (*Rhododendro-Vaccinietum rhododendretosum* 6%) oder der Krähenbeeren-Vaccinienheiden mit Etagenmoos (*Empetrum-Vaccinietum hylacomietosum* 30%) und Krähenbeeren-Vaccinienheide mit Flechten (*Empetrum-Vaccinietum cetrarietosum* 29%) variierten zwischen den Klassen entweder nur wenig oder zeigten keine gerichteten Zu- oder Abnahmen.

Bei den geordneten «Höhenklassen» zeigte sich wiederum bei allen drei Baumarten ein ziemlich einheitliches Bild. Die Anteile von Windflechten-Azaleenheide mit Rentierflechte nahmen in den einzelnen Klassen mit zunehmender Durch-

schnittshöhe kontinuierlich ab. Daraus ist zu schliessen, dass alle drei Baumarten in dieser Pflanzengesellschaft, welche vor allem auf exponierten Rippenstandorten vorkommt, zwar gut überlebten, aber klein blieben.

Die beiden Wacholder-Bärentrauben-Gesellschaften wurden in den Klassen mit zunehmender Durchschnittshöhe stets häufiger. In diesen Pflanzengesellschaften, welche vor allem an den relativ sonnigen Osthängen vorkommen, wuchsen die Bäume gut, so dass auf diesen Standorten heute die grössten Bäume stehen.

Interessant ist das Bild der Wollreitgrasrasen-Gesellschaft (*Calamagrostietum villosae adenostyletosum*). In dieser Pflanzengesellschaft überlebten die Bäume zwar schlecht. Wenn sie es aber schafften, sich zu etablieren, dann konnten sie teilweise gute Höhen erreichen. In den Runsen-Standorten,



2c) Lärche

2c) European larch

an denen diese Pflanzengesellschaft vorkommt, sind Bäume zwar zuerst durch Vegetationskonkurrenz (siehe weiter unten) und später durch Lawinen gefährdet. Während der Vegetationszeit herrscht an diesem Standorttyp aber ein günstiges Mikroklima. Die Versorgung mit Nährstoffen ist ebenfalls sehr günstig.

Bezüglich der Alpenrosen-Vaccinienheide-Gesellschaft zeigte sich eine deutliche Zunahme der Häufigkeiten in den Klassen mit grösseren Durchschnittshöhen. Diese Pflanzengesellschaft zeigte aber keinen Trend in den Überlebensklassen. Junge Bäume leiden in dieser Pflanzengesellschaft unter Konkurrenz durch die Alpenrosenbüsche. Wenn es aber ein Baum geschafft hat, sich in dieser Pflanzengesellschaft zu etablieren, dann profitieren die Bäume von den günstigen kleinklimatischen Bedingungen, unter denen diese Pflanzengesellschaft vorkommt.

Die Krähenbeeren-Vaccinienheiden-Gesellschaften zeigten in den Baumhöhenklassen ähnlich wie in den Überlebensklassen keinen deutlichen Trend. Diese Pflanzengesellschaften kamen in allen Baumhöhenklassen ähnlich häufig vor.

### Die Rolle der Vegetationskonkurrenz

Nach der Pflanzung im Jahr 1975 wurden im ganzen Versuchsgebiet die Konkurrenzverhältnisse zwischen der Kraut- und Strauchschicht und den gepflanzten Bäumchen aufgenommen. In 739 oder 18% der insgesamt 4086 Einheitsflächen wurde starke Konkurrenz durch Strauch- und Krautschicht festgestellt. Viele dieser Flächen waren dicht mit Alpenrosen bewachsen, welche die gepflanzten Bäumchen konkurrenzten.

Die Verteilung der relativen Anteile der Einheitsflächen mit und ohne Konkurrenz zeigte in der Verteilung der Überlebensraten bei den Arven und den Bergföhren ein ähnliches Muster: Der grösste Anteil von Einheitsflächen mit Konkurrenz lag nicht in der Klasse mit Totalausfall, sondern in den Klassen mit niedrigen Überlebensraten. Die Klasse mit Totalausfall enthielt viele Einheitsflächen, in denen allgemein ungünstige Bedingungen für Pflanzenwachstum herrschen. An solchen Standorten wurde natürlich auch keine Konkurrenz durch die Kraut- und Strauchschicht gefunden. Die Klassen mit niedrigen Überlebensraten hatten aber grössere Anteile an Einheitsflächen mit Konkurrenz. Die Häufigkeit von Einheitsflächen mit Konkurrenz nahm gegen die Klassen mit höheren Überlebensraten ab und war am kleinsten in der Klasse mit dem höchsten Überleben.

Bei der Lärche, wo nur wenige Einheitsflächen mit Totalausfall zu verzeichnen waren, kam es von der Klasse mit geringsten Überlebensraten bis zur Klasse mit den höchsten Überlebensraten zu einer stetigen Abnahme des Anteils der Einheitsflächen mit Konkurrenz. Die Lärche als Pionierbaumart zeigt somit, obwohl die Mortalität allgemein gering war, den deutlichsten Zusammenhang zwischen Überleben und Konkurrenz durch die Kraut- und Strauchschicht.

Die Verteilung von Einheitsflächen mit und ohne Konkurrenz über die Höhenklassen war bei allen drei Baumarten sehr ähnlich. Die Klassen mit den kleinsten Durchschnittshöhen enthielten überall die kleinsten Anteile von Einheitsflächen mit Konkurrenz. Dieser Anteil nahm gegen die Klassen mit grösseren Höhen stetig zu, so dass bei Bergföhren und Lärchen in der Klasse mit den grössten Durchschnittshöhen bei mehr als 50% der Einheitsflächen am Anfang Konkurrenz aufgenommen wurde, während es in der Klasse mit den kleinsten Durchschnittshöhen jeweils deutlich weniger als 5% waren.

Diese Resultate zeigen, dass die Bäume durch anfängliche Konkurrenz durch die Kraut- und Strauchschicht nicht nachhaltig in ihrem Wachstum gestört werden. Konkurrenz wirkt

sich zwar in der «Etablierungsphase» auf das Überleben der gepflanzten Bäume aus, am deutlichsten bei der Lärche. Haben sich die Bäume aber einmal etabliert, dann entwickeln sie sich an diesen Standorten deutlich besser als an den Standorten mit weniger Konkurrenz. An diesen Standorten kommt es wahrscheinlich generell weniger zu kompetitiven Interaktionen zwischen Pflanzen, weil hier alle Pflanzen weniger üppig wachsen.

### Die Ausfallursachen und die Zusammenhänge mit dem Kleinstandort

Als die mit Abstand wichtigste Ursache für das Absterben bei Arve und Bergföhre stellte sich das Triebsterben *Gremmeniella abietina* (Lagerb.) Morelet (= *Asxocalyx abietina* [Lagerb.] Schläpfer-Bernhard) heraus (Tabelle 3). Diesem pathogenen Pilz fielen mehr als 50% der Arven und fast 50% der Bergföhren zum Opfer. Für das Überleben der Lärche spielte der Pilz nur eine unbedeutende Rolle.

**Tabelle 3: Überlebensprozente 1995 und Prozentanteile für die Ursachen des Absterbens.<sup>11</sup>**

Table 3: Tree survival in 1995 and percentage for each mortality cause.

	Arve	Bergföhre	Lärche
1995 lebende Bäume (Überlebensprozent)	16,7%	37,8%	72,2%
zwischen 1975 und 1995 abgestorbene Bäume	83,3%	62,2%	27,8%
Ursachen für das Absterben:			
Triebsterben ( <i>Gremmeniella abietina</i> )	59,8%	47,2%	1,5%
Schneeschlütze ( <i>Phacidium infestans</i> )	14,6%		
Ursache unbekannt	6,2%	9,3%	17,2%
Pflanze verschwunden			3,7%
Vegetationskonkurrenz	0,6%	1,0%	2,3%
Rest (verschiedene Ursachen)	2,1%	4,7%	3,1%

Von allen gemessenen Standortfaktoren erklärte das mittlere Ausaperungsdatum im Frühling bei allen drei Baumarten den grössten Anteil der Variation in den Überlebensraten in den Einheitsflächen (Abbildung 5). Die Häufigkeit des Vorkommens des pathogenen Pilzes *Gremmeniella abietina* als Ursache für das Absterben hing ebenfalls eng mit dem Ausaperungsdatum zusammen (SENN, 1999). Je länger ein Standort im Frühling schneebedeckt war, desto mehr junge Bäume wurden durch den Pilz befallen und zum Absterben gebracht. Auf den früh ausapernden Standorten überlebten relativ viele Bäume (Farbtafel 1b und Abbildung 5). Hier wurden nur wenige Bäume durch *Gremmeniella abietina* befallen und zum Absterben gebracht. Aber schon eine im Durchschnitt zehn Tage länger liegen gebliebene Schneedecke ging einher mit einer drastischen Zunahme der Mortalität (SENN, 1999). Der Pilz konnte sich unter der Schneedecke in den jungen Bäumen rasch entwickeln und die Bäume innerhalb weniger Jahre zum Absterben bringen. Die meisten Infektionen erfolgten über die Knospen, von wo sich der Pilz über die Zweige und Äste

<sup>11</sup> Ursachen für das Absterben, welche während des Zeitraumes zwischen 1975 und 1995 in der Stichprobe bei mindestens einer Baumart für mindestens 1% der Ausfälle verantwortlich waren; 228 Einheitsflächen (EF) mit Arven, 226 EF mit Bergföhren und 226 EF mit Lärchen.

bis zum Stamm ausbreitete (PATTON *et al.*, 1984). Der deutlich geringere Befall der Lärchen (1,5% im Vergleich zu rund 60 bzw. 50% bei den anderen beiden Baumarten) dürfte damit zusammenhängen, dass die Lärche als «laubwerfende» Baumart dem Pilz weniger Angriffsmöglichkeiten bietet als die beiden immergrünen Föhrenarten. Gemäss PETRINI *et al.* (1989) wird *Gremmeniella abietina* nur selten auf Lärche gefunden. Dafür kommt auf dieser Baumart die nahe verwandte und lärchenspezifische *Ascocalyx (=Gremmeniella) laricina* vor, welche auf dem Stillberg nicht gefunden wurde, die aber an anderen Orten in Aufforstungen schon grossflächige Ausfälle verursacht hat (SCHÖNENBERGER *et al.*, 1990; BUTIN, 1996).

*Gremmeniella abietina* scheint bevorzugt Bäume zu befallen und sich auf diesen erfolgreich zu entwickeln, welche durch ungünstige Umweltbedingungen gestresst sind. Lange Schneebedeckung im Frühling reduziert die Vegetationsdauer, was sich auf Bäume nahe der subalpinen Waldgrenze, also an Standorten, an denen die Bäume ohnehin schon nahe an ihren physiologischen Grenzen leben (HÄSLER, 1982; KÖRNER, 1995), besonders ungünstig auswirken muss. Ein weiterer Hinweis für die erhöhte Anfälligkeit von «gestressten» Bäumen ist die Tatsache, dass besonders nach kühlen Sommern vermehrt Ausfälle durch *Gremmeniella* auftraten (Fig. 4 in SENN, 1999).

*Phacidium infestans* Karsten, die Schneeschütte, wurde bei der Arve mit rund 15% als zweithäufigste Ursache für das Absterben gefunden. Obwohl diese Pilzart über ihr ganzes Verbreitungsgebiet auf einer Vielzahl von Wirtsarten vorkommt (ROLL-HANSEN, 1989), befiel sie im Untersuchungsgebiet nur die Arve. Die Häufigkeit des Vorkommens dieser Pilzart war signifikant negativ mit der Dauer der Schneebedeckung im Frühling korreliert (SENN, 1999). Das heisst, Arven wurden durch diesen Pilz besonders häufig an Standorten zum Absterben gebracht, welche im Frühling früh ausaperten und weniger häufig an spät ausapernden Standorten. *Phacidium infestans* scheint, im Gegensatz zu *Gremmeniella abietina*, bevorzugt junge Bäume guter Kondition zu befallen (ROLL-HANSEN, 1975 und 1989). Auf den früh ausapernden Standorten der Untersuchungsfläche wuchsen schon vor der Pflanzung vereinzelt Arven, welche der Grösse nach zu schliessen von mehreren Jahrzehnten bis über hundert Jahre alt sind. Auf den unteren Zweigen dieser Arven kann *Phacidium* ständig in geringem Umfang gefunden werden (Senn, pers. Beob.), ohne dass durch diesen Befall das Überleben der grossen Bäume gefährdet wird. BURDON *et al.* (1992) fanden, dass die durch *Phacidium* verursachte Mortalität sowohl von der Dichte befallener als auch von der Dichte potenzieller Wirtspflanzen abhing. Nach diesen Befunden sollten gepflanzte Jung-Arven in der Nähe grösserer Arven, welche als Reservoir für Infektionen wirken, öfter befallen werden als weiter entfernte. Damit müsste die bisherige Auffassung revidiert werden, wonach die Jung-Arven in schneereichen Geländevertiefungen am meisten durch Schneeschütte gefährdet sind. Vielmehr ist das Befallsrisiko in der Umgebung von Alt-Arven am grössten; und diese stocken bekanntlich vorwiegend auf Gelände-rippen.

Neben *Gremmeniella abietina* und *Phacidium infestans* verursachten in der Aufforstung keine weiteren pathogenen Pilzarten Mortalität von Bedeutung. *Herpotrichia juniperi* (Duby) Petrak, der schwarze Schneeschimmel, kommt im Versuchsgebiet zwar vor, verursachte aber unter den gepflanzten Bäumen überhaupt keine Verluste (siehe auch BAZZIGHIER, 1976).

Die einzige weitere Ursache für das Absterben, welcher mehr als 1% der Verluste unter den gepflanzten Bäumchen zugeschrieben wurden, stellte Konkurrenz durch die Kraut- und Strauchschicht dar. Der Konkurrenz durch Gras und Hochstauden fielen vor allem Lärchen zum Opfer. Diese waren bei

der Pflanzung durchschnittlich nur 1,9 cm hoch im Gegensatz zu den Arven und den Bergföhren, welche durchschnittlich 13,8 und 10,4 cm hoch waren und sich daher besser gegen Vegetationskonkurrenz behaupten konnten (Abbildung 3). Unter Vegetationskonkurrenz litten in den ersten Jahren nach der Pflanzung besonders die Lärchen in den Lawinenzügen, in denen sich im Sommer vor allem Wollgras (*Calamagrostis villosa* [Chaix] Gmelin) und Hochstauden üppig entwickelten (KUOCH, 1970).

Für einen beträchtlichen Teil der Abgänge war die Ursache nicht bekannt, weil die Pflanzen entweder spurlos verschwanden oder die Ursache für das Absterben nicht eruiert werden konnte. Bei der Lärche betrug dieser Anteil mehr als 20%.

Verbiss durch Huftiere sowie durch Birkwild wurde im Versuchsgebiet zwar gefunden (STREULE, 1973), doch schien dieser Verbiss im Laufe der Untersuchungsperiode zu keiner wesentlichen Mortalität geführt zu haben. Wilde Huftiere hatten vom späten Herbst bis in den späten Frühling Zugang zur Versuchsfläche. Über den Sommer war die Versuchsfläche aber durch einen Zaun vor wilden und domestizierten Huftieren geschützt.

### Meteorologische Einflüsse auf das Überleben der Bäume

Da ein wichtiger Grund für Waldgrenzen das Erreichen von für Baumwachstum minimal notwendigen Temperaturen sein soll (KÖRNER, 1998), wurde nach Zusammenhängen zwischen den jährlichen Mortalitätsraten und den Temperaturverhältnissen während der Vegetationszeit gesucht. Als Mass für die den Bäumen zur Verfügung stehende Energiemenge wurde die aus den in der Klimastation gemessenen Temperaturwerten errechnete Temperatursumme dd5 (5°C degree days) gebraucht. Diese Temperatursumme ist die Summe der Grade über 5°C Tagesdurchschnittstemperatur (GRACE, 1988; ROMO & EDDLEMAN, 1995).

Gemäss früheren Analysen von SENN (1999) zeigten die in der Versuchsfläche gemessenen Temperatursummen über die ganze Untersuchungsperiode eine klare Tendenz für eine Erwärmung der Sommer, doch kam es innerhalb dieser Reihe zu grossen Variationen. So folgte zum Beispiel auf den wärmsten Sommer 1983 mit 739 dd5 einer der kältesten Sommer mit 426 dd5.

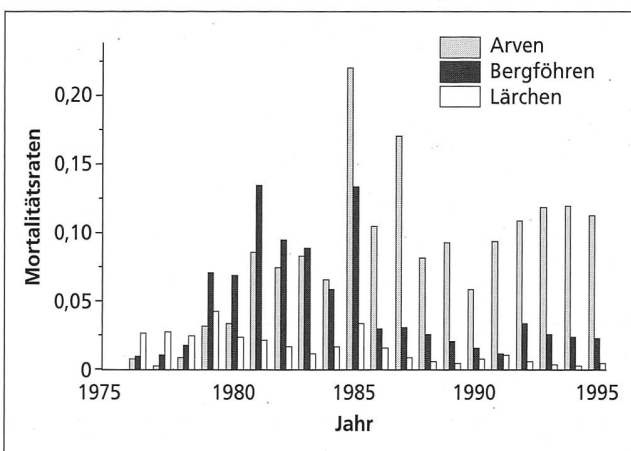


Abbildung 7: Jährliche Mortalität bei Arven, Bergföhren und Lärchen.<sup>12</sup>

Figure 7: Annual mortality rates in Swiss stone pine, mountain pine and European larch.

<sup>12</sup> Zur Berechnung der Mortalitätsraten der einzelnen Jahre wurden jeweils die im Vorjahr lebenden Bäume als 100% genommen.

Die Mortalitätsraten änderten zwischen den Jahren stark (Abbildung 7). Kalte Sommer scheinen bis ins folgende Jahr hinein eine erhöhte Mortalität zu bewirken. So kam es nach dem kalten Sommer 1984 bis zum Sommer 1995 bei allen drei Baumarten zu den höchsten in der Untersuchungsperiode beobachteten Ausfällen. Ein ähnlicher Anstieg der Mortalität zeigte sich bei der Bergföhre und in geringerem Mass bei der Arve im Jahr 1981 nach dem kalten Sommer 1980. Der überwiegende Teil dieser Ausfälle wurde durch *Gremmeniella abietina* verursacht (SENN, 1999). Die Gründe für die in den letzten fünf Jahren bei der Arve beobachteten anhaltend hohen Ausfälle sind allerdings unklar. Diese Ausfälle lassen sich nicht mit den Temperatursummen erklären.

## Die Standortsgunst in der Übersicht

Die drei Baumarten reagierten auf Variation der einzelnen Standortsfaktoren erstaunlich gleichförmig. Nur in ihrer Toleranz gegenüber Variation einzelner Faktoren unterschieden sie sich. Unterschiedliches Verhalten zeigten die drei Arten einzig in ihren Reaktionen auf die Lawinhäufigkeit, indem bei Arve und Bergföhre das Überleben positiv und bei Lärche negativ mit der Lawinhäufigkeit korreliert war und beim Ausaperungsdatum, wo die Arve keinen, die Bergföhre einen positiven und die Lärche einen negativen Zusammenhang mit der Baumhöhe zeigte. Bezüglich ihrer Reaktionen auf die quantitativen Faktoren verhielten sich die drei Baumarten ebenfalls sehr ähnlich. Einzig auf die Humusform «Moder» zeigte die Lärche bezüglich Überleben eine andere Reaktion als Arve und Bergföhre: Während bei den beiden

letzteren Baumarten Moder auf den Standorten mit hohen Überlebensraten übervertreten war, war Moder bei der Lärche auf Standorten mit schlechten Überlebensraten übervertreten.

Die auffälligsten Tendenzen, die sich aus den Abbildung 5 und Farbtabelle 2 ableiten lassen, sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Bezüglich Überleben und Baumhöhen sind bei den quantitativen Faktoren die Korrelation und die Steigung der linearen Regressionsgeraden kommentiert. Für jeden qualitativen Faktor sind die Ausprägungen genannt, die bezüglich Überleben und Baumhöhen auf den günstigen und ungünstigen Kleinstandorten flächenmässig übervertreten sind. Vergleicht man die überlebensfreundlichen mit den überlebensfeindlichen Standorten, so sind generelle Trends für alle Baumarten festzustellen.

Die überlebensfeindlichen Standorte lassen sich für alle Baumarten am deutlichsten durch hohe Lagen und späte Ausaperung charakterisieren, ausserdem durch wenige schneefreie Tage im Winter. Überlebensfeindliche Stellen liegen überdurchschnittlich oft auf Ranker- und Runsenböden, auf normaler Rohhumusaufgabe und Geröll sowie im Reitgrasrasen.

Die überlebensfreundlichen Standorte sind demnach in tieferen Lagen, an früh schneefreien Stellen zu finden. Podsole ohne oder mit Moderaufgabe, Wacholder-Bärentraubenheide und Windflechten-Azaleenheide sowie Flächen mit geringer Vegetationskonkurrenz sind übervertreten.

Die wachstumsfeindlichen Standorte zeichnen sich aus durch hohe Lage, niedrige Strahlung, starken Wind, geringe Lawinenaktivität und häufiges Fehlen von Schnee im Winter.

**Tabelle 4: Übersicht über den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Standortsgunst bezüglich Überleben und Baumhöhen, verallgemeinert für alle Baumarten.<sup>13</sup>**

Table 4: Summary of the influences of various factors on microsite suitability to tree survival and height, generalised for all tree species.

Einfluss	Korr <sup>14</sup>	Überleben		Korr	Baumhöhe	
		negativ	positiv		negativ	positiv
<b>Quantitative Parameter</b>						
Höhenlage	- Ar, Bf, LÄ	hohe Lage	tiefe Lage	- Ar, Bf, LÄ	hohe Lage	tiefe Lage
Strahlung	+ Bf, LÄ 0 Ar	niedrige Strahlung	hohe Strahlung	+ Ar, Bf, LÄ	niedrige Strahlung	hohe Strahlung
Windgeschwindigkeit	+ nur LÄ	geringer Wind	starker Wind	- Ar, Bf, LÄ	starker Wind	geringer Wind
Ausaperungsdatum	- Ar, Bf, LÄ	spät schneefrei	früh schneefrei	0 Ar + Bf - LÄ	kein Zusammenhang früh schneefrei spät schneefrei	spät schneefrei früh schneefrei
Anzahl schneefreie Tage im Winter	+ Ar, Bf, LÄ	wenige Tage schneefrei	viele Tage schneefrei	- Ar, Bf, LÄ	viele Tage schneefrei	wenige Tage schneefrei
Lawinhäufigkeit	+ Ar, Bf - LÄ	wenige Lawinen viele Lawinen	viele Lawinen wenige Lawinen	+ Ar, Bf, LÄ	wenige Lawinen	viele Lawinen
<b>Qualitative Parameter</b>						
Bodentyp	Ar, Bf, LÄ	Ranker, Runsenböden	Podsole	Ar, Bf, LÄ	Podsole	Mosaik versch. Runsenböden
Humusformen	Ar, Bf, LÄ	Rohhumus normal Geröll	Mineralerde Rohhumus extrem Moder <sup>15</sup>	Ar, Bf, LÄ	Rohhumus Mineralerde	Moder
Pflanzengesellschaft	Ar, Bf, LÄ	Calamagrostietum	Junipero-Arctost. Cetrario-Lois.	Ar, Bf, LÄ	Cetrario-Loisel.	Junipero-Arctost. Calamagrostietum Rhododendretum
Vegetationskonkurrenz	Ar, Bf LÄ	neutral mit Konkurrenz	ohne Konkurrenz	Ar, Bf, LÄ	ohne Konkurrenz	mit Konkurrenz

<sup>13</sup> Ar = Arve; Bf = Bergföhre; LÄ = Lärche.

<sup>14</sup> Korrelation: Bei quantitativen Variablen: 0 = keine, - negative, + positive

<sup>15</sup> Ausser bei der Lärche.

Podsolböden, normale Rohhumus-Auflage oder Mineralerde sowie die Pflanzengesellschaft Windflechten-Azaleenheide sind hier übervertreten.

Wachstumsfreundliche Standorte zeichnen sich demgegenüber durch tiefere Lage, hohe Strahlung, wenig Wind, häufige Schneebedeckung im Winter und häufige Lawinen aus. Moderauflage, Wacholder-Bärentraubenheide, Reitgrasrasen und Alpenrosenheide sind überdurchschnittlich vertreten.

Die meisten Standortsfaktoren sind bezüglich Überleben und Baumhöhe gleichläufig, d.h. Überlebens- und Wachstumsgunst stimmen bezüglich der meisten Standortsfaktoren überein. Eine auffallende Ausnahme bilden die Flächen mit Reitgras, wo hohe Ausfälle mit gutem Wachstum kombiniert sind. Ähnlich stellt sich die Situation auf den Standorten mit Vegetationskonkurrenz dar: Hohe Ausfälle sind hier ebenfalls mit gutem Wachstum kombiniert. Auffällig ist auch, dass das Ausaperungsdatum zwar stark negativ mit dem Überleben korreliert ist, aber keine Korrelation mit der Baumhöhe zeigt.

## Schlussfolgerungen

Der Langzeitversuch mit der Aufforstung Stillberg wies einen kontinuierlichen Selektionsprozess durch die Standortbedingungen nach: Unter den kleinstandörtlich variablen Bedingungen entstand im Laufe der zwanzig Jahre aus der absolut gleichförmigen Pflanzung ein äusserst differenziertes Bild. Die Entwicklung der ersten zehn Jahre hat sich in den zweiten zehn Jahren nicht einfach linear fortgesetzt: Während bei der Lärche in den letzten Jahren nur noch geringe Ausfälle zu verzeichnen waren, setzten sich die Verluste bei der Bergföhre fort und nahmen bei der Arve eher noch zu. Zudem wechselte im Laufe der zwanzig Jahre die Rangfolge sowohl der Überlebensraten als auch der mittleren Baumhöhen mehrmals zwischen den drei Baumarten. Diese äusserst dynamische Entwicklung zeigt, dass kurzfristige Untersuchungen nur beschränkt für Prognosen zu langfristigen Entwicklungen genutzt werden können. Zu verschiedenen Zeitpunkten wären sehr unterschiedliche Prognosen zur weiteren Entwicklung der Aufforstung gemacht worden. Wie lange diese Selektion noch weitergeht und wie viele Bäume nach einigen weiteren Jahrzehnten noch überleben werden, lässt sich heute noch nicht schlüssig sagen. So traten seit 1995 vor allem bei grösseren Arven an Standorten mit Schneebewegungen häufig Stammspaltungen und -brüche auf (VANOMSEN, 2000).

Die grosse Überlegenheit der Lärche gegenüber Arve und Bergföhre äusserte sich vor allem in einem guten Überdauerungsvermögen auch auf den für die beiden anderen Baumarten sehr ungünstigen Kleinstandorten und vor allem auf der Hangschulter in den höchsten Lagen. Die meisten Ausfälle erlitt die Lärche in den ersten Jahren, also in der Anwuchsphase. Der Erfolg der Lärche steht im Kontrast zum natürlichen Baumarten-Vorkommen am Stillberg, wo die Arve in den höchsten Lagen den Aspekt bestimmt und die Lärche kaum in Erscheinung tritt. Bei diesem Vergleich muss berücksichtigt werden, dass mit der regelmässigen Pflanzung eine künstliche Ausgangssituation geschaffen wurde, in der die drei Baumarten über die ganze Versuchsfläche mit der gleichen Wahrscheinlichkeit vorkamen. Für ihre natürliche Verjüngung besitzen die drei Baumarten jedoch sehr unterschiedliche Möglichkeiten. Während sich die Arve mit Hilfe der Tannenhäher über weite Distanzen aus dem Wald hinaus in die durch die Alpwirtschaft offen gehaltenen Flächen ausbreiten kann (LINHART & TOMBACK, 1985; MATTES, 1990), kann sich die Lärche mit ihren durch Wind verbreiteten Samen weniger weit ausbreiten. Zudem verstecken die Häher die Arvensamen an den für die Verjüngung günstigsten Stellen,

während durch Wind verbreitete Samen eher an ungünstigen Stellen wie Geländevertiefungen landen, wo sie durch die lang andauernde Schneebedeckung benachteiligt sind. Die schon zehn Jahre nach der Pflanzung postulierte grosse praktische Bedeutung des Kleinstandortes (SCHÖNENBERGER *et al.*, 1988) wurde auch langfristig bestätigt. Das damals abgeleitete Konzept der Rottenaufforstung (SCHÖNENBERGER *et al.*, 1990; SCHÖNENBERGER, 2001) wird somit durch die langfristige Entwicklung der Aufforstung ebenfalls gestützt. Bezüglich Standort hat man damit bei der Anlage der Pflanzung gute Einflussmöglichkeiten auf die zukünftigen Entwicklungen, gegen Witterungseinflüsse hingegen ist man machtlos. Ungünstige Witterung verstärkte die Verluste unter den überlebenden Bäumen und verengte damit den ohnehin schon engen Bereich der für Aufforstungen nutzbaren Standortbedingungen noch stärker. Deshalb ist in der Praxis die Handlungsweise auf die optimale Nutzung der Standortunterschiede auszurichten. Nach dem Konzept der Rottentpflanzung sollen bei der Anlage einer Aufforstung zunächst die ungünstigen Kleinstandorte erkannt und deren Bepflanzung vermieden werden. In zweiter Linie werden die günstigsten Kleinstandorte im Gelände gesucht und vorzugsweise bepflanzt. Die Erkenntnisse sind im weiteren Sinne auch auf die natürliche Verjüngung im Waldgrenzbereich und im Gebirgswald anwendbar, zum Beispiel auf Massnahmen zur Förderung der Verjüngung.

Wie weit können die Ergebnisse auf andere Verhältnisse übertragen oder verallgemeinert werden? Der Einfluss der Topographie, d.h. die relative Standortgunst auf erhöhten und früh schneefreien Kleinstandorten, hat sich weiterhin bestätigt. Er scheint ein allgemeines Prinzip unter den klimatischen Verhältnissen der mitteleuropäischen Gebirge zu sein. Verantwortlich dafür sind in erster Linie die Pilzkrankheiten, die vom Zeitpunkt der Ausaperung abhängen. Letztlich ist es eine Frage der Niederschlagsmengen. In den schneereichen Voralpen wird also die Kleintopographie eine grössere differenzierende Rolle spielen als in den trockeneren Zentralalpen.

Diese Erkenntnisse sind auch in möglichen Szenarien zur Waldentwicklung unter Erwärmung des Klimas zu berücksichtigen. Eine Zunahme der mittleren Sommertemperaturen muss nicht zwangsläufig zu einer Verschiebung der Waldgrenze in Richtung grösserer Höhen führen. Wenn nämlich die Temperaturerhöhung zu einer Zunahme der Niederschläge, möglicherweise sogar in Form von Schnee führt, dann kann das den Verjüngungserfolg der Gebirgsbaumarten weiter reduzieren und auf Pilzbefall empfindliche Arten wie die Arve von gewissen Standorten sogar völlig ausschliessen.

## Zusammenfassung

In der Versuchsaufforstung Stillberg bei Davos wurden in einem topographisch stark strukturierten nordostexponierten Lawinanrissgebiet je rund 30 000 Arven (*Pinus cembra* L.), Bergföhren (*Pinus uncinata* Ramond) und Lärchen (*Larix decidua* Mill.) in einem regelmässigen Muster gepflanzt und deren Überleben und Höhenentwicklung während zwanzig Jahren beobachtet. Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss der Kleinstandortsbedingungen auf die Entwicklung der Aufforstung unter den teilweise schwierigen Bedingungen nahe der subalpinen Waldgrenze zu bestimmen sowie herauszufinden, welches die Ursachen für die Ausfälle sind und wo die Grenzen der Aufforstbarkeit liegen. Dazu wurden vor der Pflanzung kleinstandörtliche Parameter ermittelt und deren räumliche Variation im Untersuchungsgebiet bestimmt. Das regelmässige Pflanzmuster erlaubte es, die Entwicklung der drei Baumarten unter gleichen Bedingungen miteinander zu vergleichen.

Zwanzig Jahre nach der Pflanzung lebten noch 71,5% der Lärchen, 32,5% der Bergföhren und 15,6% der Arven. Während die Lärche noch fast über das ganze Untersuchungsgebiet unter einer Vielzahl von Standortbedingungen vorkam, überlebten die Bergföhre und besonders die Arve nur noch auf den günstigsten Kleinstandorten, das heisst auf südostexponierten Hängen, welche im Untersuchungsgebiet die stärkste Sonneneinstrahlung erhielten und wo der Schnee im Frühling am frühesten taut. Wichtigste Ursache für die hohen Ausfälle bei Bergföhre und Arve waren pathogene Pilze, vor allem das Triebsterben *Gremmeniella abietina*, welches besonders häufig an Standorten auftrat, die im Frühling lang von Schnee bedeckt blieben. Die Entwicklung der Lärche wurde sehr viel weniger durch Pilze beeinflusst. Von den gemessenen Standortparametern erklärte der Zeitpunkt der Ausaperung im Frühling bei allen drei Baumarten den grössten Anteil der Variation der Überlebensraten (auch deutlich mehr als die Meereshöhe). Neben dem Kleinstandort beeinflusste aber auch das Wetter die Entwicklung der Aufforstung. So stieg nach kalten Sommern die Mortalität stark an. Diese Mortalität wurde wiederum vor allem durch *G. abietina* verursacht.

Die mittlere Baumhöhe betrug zwanzig Jahre nach der Pflanzung bei der Arve 74 cm, bei der Bergföhre 85 und bei der Lärche 88 cm. Bei der Lärche, welche bezüglich Standortbedingungen den grössten Toleranzbereich zeigte, wurden sowohl die kleinsten Bäume mit weniger als 20 cm als auch die grössten Bäume mit mehr als 3 m gefunden. Die Höhen der Arven und Bergföhren variierten weniger, da diese beiden Arten nur auf den klimatisch günstigen Osthängen in grösseren Zahlen überlebten.

Überlebensgünstige Standorte zeichneten sich dadurch aus, dass sie im Frühling früh ausaperten, dass im Winter starke Winde den Schnee wegbliesen und dass die Bäume während der Vegetationszeit nur wenig durch die übrige Vegetation konkurrenziert wurden. Standorte mit höheren Bäumen waren vor Wind geschützt, waren im Winter nicht oder nur wenige Tage schneefrei, erhielten aber grosse Strahlungsmengen und zeichneten sich durch üppige Kraut- und Strauchvegetation aus, aus der den Bäumen viel Konkurrenz erwuchs. Alle drei Baumarten zeigten bei zunehmender Meereshöhe deutliche Abnahmen sowohl der Überlebensprozente als auch der Baumhöhen. Bei der Lärche äusserte sich die grosse Überlegenheit vor allem in einem guten Überdauerungsvermögen auch auf den für die beiden anderen Baumarten sehr ungünstigen Kleinstandorten.

Diese Untersuchung weist im Laufe der zwanzig Jahre sowohl bei den Überlebensprozenten als auch bei den mittleren Baumhöhen dreimalige Rangänderungen zwischen den Baumarten nach und demonstriert damit die Notwendigkeit von Langzeituntersuchungen.

## Résumé

### Vingt ans de suivi dans l'afforestation expérimentale de Stillberg: survie et accroissement d'une afforestation subalpine en fonction des conditions stationnelles

Dans l'afforestation expérimentale de Stillberg, près de Davos, 30 000 arolles (*Pinus cembra* L.), pins de montagne (*Pinus uncinata* Ramond) et mélèzes (*Larix decidua* Mill.) ont été plantés à espace régulier dans une zone de départ d'avalanches exposée au nord-est et au relief très accidenté. La survie et l'accroissement en hauteur des arbres y ont été observés pendant vingt ans. Ce projet avait pour but d'étudier l'influence des conditions microstationnelles sur le développement de l'afforestation à proximité de la limite forestière subalpine où les conditions sont souvent défavorables. Cette étude devait ainsi permettre de découvrir les causes de mortalité et donc la limite au-delà de laquelle l'afforestation n'est

plus réalisable. A cet effet, plusieurs paramètres microstationnels ont été définis et leur variation spatiale a été mesurée avant la plantation. Le schéma de plantation régulière a permis de comparer le développement des trois essences dans des conditions semblables.

Vingt ans après la plantation vivaient encore 71,5% des mélèzes, 32,5% des pins de montagne et 15,6% des arolles. Alors que les mélèzes ont survécu dans toute l'aire expérimentale ou presque, les pins de montagne mais surtout les arolles, n'ont résisté que dans les milieux favorables, c'est-à-dire sur les pentes exposées au sud-est où le rayonnement solaire est maximal et où la neige disparaît en premier au printemps. La forte mortalité des pins de montagne et des arolles est due en premier lieu à l'action de champignons pathogènes, notamment *Gremmeniella abietina* qui provoque le dépérissement des pousses du pin. Ce champignon est particulièrement répandu dans les milieux où la neige tarde à disparaître au printemps. Les mélèzes ont été beaucoup moins sensibles aux champignons. Parmi les paramètres étudiés, la date de la disparition du manteau neigeux au printemps explique (bien davantage que l'altitude) la majeure partie de la grande variation des taux de survie constatée chez les trois essences. Outre les conditions du milieu, le temps a influencé le développement de l'afforestation: après des étés froids, la mortalité a augmenté. Ici encore, *G. abietina* en fut la principale cause.

En vingt ans, les arolles ont atteint en moyenne une hauteur de 74 cm, les pins de montagne 85 cm et les mélèzes 88 cm. Le mélèze, qui s'est montré le plus résistant aux différentes conditions stationnelles, a atteint des hauteurs allant de 20 cm à 3 m. Celles des arolles et des pins de montagne varient moins car une grande partie de ces deux essences n'a survécu que sur les pentes au climat favorable.

Les stations les plus propices à la survie des arbres sont celles où le manteau neigeux disparaît tôt au printemps, où le vent souffle la neige en hiver et où les arbres sont peu concurrencés par le reste de la végétation. Les arbres les plus hauts se trouvent dans les milieux protégés du vent et dans ceux où le manteau neigeux subsiste tout l'hiver. Ces milieux sont également soumis à un fort rayonnement solaire et recouverts d'une luxuriante végétation arbustive et herbacée. Chez les trois essences, la hauteur et la survie diminuent fortement avec l'élévation altitudinale. Le mélèze a démontré son indéniable supériorité notamment par son aptitude à survivre même dans les microstations très défavorables aux deux autres essences.

Durant les vingt ans qu'a duré cette étude, l'ordre de classement de la hauteur et de la survie a changé trois fois pour chacune de ces essences. Ceci démontre la nécessité de réaliser des recherches long terme.

## Summary

### Twenty years experimental afforestation Stillberg: Survival and growth in a subalpine afforestation in relation to site conditions

In the experimental afforestation Stillberg near Davos about 30 000 trees of each of Swiss stone pine (*Pinus cembra* L.), mountain pine (*Pinus uncinata* Ramond) and European larch (*Larix decidua* Mill.) were regularly planted in a topographically highly structured, north-easterly exposed avalanche catchment. Survival and height development of these trees were recorded during twenty years. The aim of the project was to study the impact of microsite conditions on the development of the afforestation under locally adverse conditions close to the subalpine tree line, to find the causes for mortality and thus the limits for afforestations. Therefore, various microsite parameters, and their spatial variation, were measured before planting. The regular planting pattern enabled the comparison of the development between the three species under similar conditions.

Twenty years after planting survival was 71.5% for larch, 32.5% for mountain pine, and 15.6% for stone pine. While larch survived under various site conditions throughout the study area, mountain pine and, particularly, stone pine survived only at the most favourable sites, i.e. on south-easterly exposed slopes. These slopes receive the highest amounts of solar radiation and thus snow disappears earliest in spring. The most important cause for mortality in mountain pine and in stone pine was pathogenic fungi, particularly *Gremmeniella abietina*, which occurred most frequently on sites with prolonged snow cover in spring. Larch was less susceptible to fungi than the pines. Of all the site parameters recorded, date of disappearance of snow cover explained the highest amount of variation in survival rates (clearly more than altitude). Besides the microsite conditions, the weather affected the development of the afforestation: after cold summers mortality increased, and it was mainly due to *G. abietina*.

In twenty years stone pines reached on average 74 cm, mountain pine 85 cm, and larch 88 cm. Larch, which was the most tolerant in various site conditions, had the smallest trees of less than 20 cm, as well as the largest trees of more than 3 m. Tree height varied less in stone and in mountain pine, since these two species survived in reasonable numbers only on the climatically favourable slopes.

At sites where tree survival was high, trees experienced only low competition from herbs and shrubs. At these sites snow was frequently blown away by strong winds in winter and melted early in spring. Trees grew high at sites which were protected from strong winds and remained snow covered through the winter. These sites received high amounts of solar radiation and growth of herbs and shrubs was vigorous. For all species tree height and survival decreased significantly with increasing altitude within the study area. The superiority of larch became evident through its ability to survive adverse conditions which were hazardous for stone and mountain pine.

During the twenty years of the study the ranking order of the tree species changed three times for survival and tree height. This demonstrates the necessity of long-term studies.

## Literaturverzeichnis

- BAZZIGHER, G. (1976): Der schwarze Schneeschimmel der Koniferen (*Herpitrachia juniperi* [Duby] Petrak und *Herpitrachia Coulteri* [Peck] Bose). Eur. J. For. Pathol. 6: 109–122.
- BEDNORZ, F., REICHSTEIN, M., BROLL, G., HOLTMEIER, F.-K., URFER, W. (2000): Humus forms in the forest-alpine tundra ecotone at Stillberg (Dischmatal, Switzerland): spatial heterogeneity and classification. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 32: 21–29.
- BLASER, P. (1980): Der Boden als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe (Stillberg, Davos). Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 56: 527–611.
- BURDON, J., WENNSTRÖM, A., ERICSON, L., MÜLLER, W., MORTON, R. (1992): Density-dependent mortality in *Pinus sylvestris* caused by the snow blight pathogen *Phacidium infestans*. Oecologia 90: 74–79.
- BUTIN, H. (1996): Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- GOWER, S., RICHARDS, J. (1990): Larches: deciduous conifers in an evergreen world. BioScience 40: 818–826.
- GRACE, J. (1988): Temperature as a determinant of plant productivity. In: LONG, S., WOODWARD, F. (eds.): Plants and temperatures. Symposium of Experimental Biology Vol. 42, Cambridge, Massachusetts, 91–107.
- HÄSLER, R. (1982): Net photosynthesis and transpiration of *Pinus mugo* on east and north facing slopes at the alpine timberline. Oecologia 54: 14–22.
- HOLTMEIER, F. (1971): Der Einfluss der orographischen Situation auf die Windverhältnisse im Spiegel der Vegetation. Erdkunde 25: 178–195.
- KÖRNER, C. (1995): Impact of atmospheric changes on high mountain vegetation. In: BENISTON, M. (ed.): Mountain environments in changing climates. London, New York, Routledge Publ. Company, 155–166.
- KÖRNER, C. (1998): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. Oecologia 115: 445–459.
- KÖRNER, C. (1999): Alpine plant life. Springer Verlag, Berlin.
- KUOCH, R. (1970): Die Vegetation auf Stillberg (Dischmatal, Kt. Graubünden). Mitt. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 46: 329–342.
- KUOCH, R., AMIET, R. (1970): Die Verjüngung im Bereich der oberen Waldgrenze der Alpen. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 46: 160–328.
- LINHART, Y., TOMBACK, D. (1985): Seed dispersal by nutcrackers causes multi-trunk growth form in pines. Oecologia 67: 107–110.
- MATTES, H. (1990): Die Lebensgemeinschaft von Tannenhäher, *Nucifraga caryocatactes* (L.), und Arve, *Pinus cembra* (L.), und ihre forstliche Bedeutung in der oberen Gebirgswaldstufe. 2. Auflage, Birmensdorf, Eidg. Anst. forstl. Versuchswes.
- NÄGELI, W. (1971): Der Wind als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe (Stillbergalp im Dischmatal, Kt. Graubünden). Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 47: 33–147.
- PATTON, R., SPEAR, R., BLENIS, P. (1984): The infection process in pines by *Gremmeniella abietina*. In: MANION, P. (ed.): *Scleroderris* canker of conifers. Forestry Sciences ed., Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, The Hague, 96–103.
- PETRINI, O., PETRINI, L., LAFLAMME, G., QUELLETTE, G. (1989): Taxonomic position of *Gremmeniella abietina* and related species: a reappraisal. Can. J. Bot. 67: 2805–2814.
- ROLL-HANSEN, F. (1975): *Phacidium infestans* on dwarf plants of *Pinus sylvestris*. Eur. J. For. Pathol. 5: 1–7.
- ROLL-HANSEN, F. (1989): *Phacidium infestans*. A literature review. Eur. J. For. Pathol. 19: 237–250.
- ROMO, J., EDDLEMAN, L. (1995): Use of degree-days in multiple-temperature experiments. J. Range Manage 48: 410–416.
- SCHÖNENBERGER, W. (1975): Standortseinflüsse auf Versuchsaufforstungen an der alpinen Waldgrenze (Stillberg, Davos). Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 51: 357–428.
- SCHÖNENBERGER, W. (2001): Cluster afforestation for creating diverse mountain forest structures – a review. Forest Ecology and Management 145: 121–128.
- SCHÖNENBERGER, W., FREY, W. (Koordinatoren) (1988): Untersuchungen zur Ökologie und Technik der Hochlagenaufforstung. Schweiz. Z. Forstwes. 139: 735–820.
- SCHÖNENBERGER, W., FREY, W., LEUENBERGER, F. (1990): Ökologie und Technik der Aufforstung im Gebirge – Anregungen für die Praxis. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Berichte Nr. 325, 58 S.
- SENN, J. (1999): Tree mortality caused by *Gremmeniella abietina* in a subalpine afforestation in the central Alps and its relationship with duration of snow cover. Eur. J. For. Pathol. 29: 65–74.
- SENN, J., SCHÖNENBERGER, W., WASEM, U., SCHNYDER, D., FREY, W. (1996): Lawinhänge aufforsten – gewusst wie. Argumente aus der Forschung 12: 2–12.
- STREULE, A. (1973): Schäden in Gebirgsaufforstungen durch das Birkhuhn (*Lyrurus tetrix*). Bündnerwald 26: 249–254.
- TRANQUILLINI, W. (1979): Physiological ecology of the alpine timberline. Springer Verlag Berlin.
- TRANQUILLINI, W., TURNER, H. (1961): Untersuchungen über die Pflanzentemperaturen in der subalpinen Stufe mit besonderer Berücksichtigung der Nadeltemperaturen der Zirbe. Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt Mariabrunn 59: 127–151.
- TURNER, H. (1966): Die globale Hangbestrahlung als Standortsfaktor bei Aufforstungen in der subalpinen Stufe (Stillberg im Dischmatal, Kt. Graubünden). Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 42: 109–168.
- TURNER, H. (1968): Über «Schneeschliff» in den Alpen. Wetter und Leben 20: 192–200.
- TURNER, H. (1985): Das Gebirgsprogramm «Wiederbewaldung der oberen Waldgrenze»: Anmerkungen zu einem langfristigen interdisziplinären Forschungsvorhaben. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 61: 757–765.
- TURNER, H., ROCHAT, P., STREULE, A. (1975): Thermische Charakteristik der Hauptstandortstypen im Bereich der oberen Waldgrenze (Stillberg, Dischmatal bei Davos). Eidg. Anst. forstl. Versuchswes., Mitt. 51: 95–119.
- VANOMSEN, P. (2000): Vergleichende Untersuchung der Stabilität junger Arven (*Pinus cembra* L.) und Lärchen (*Larix decidua* L.). Stammbrüche und -spaltungen in Lawinenanrissgebieten in der Versuchsaufforstung Stillberg GR nach einem schneereichen Winter. Diplomarbeit ETHZ, Professur Waldbau.

*Dank*

Diese Synthese wäre nicht möglich gewesen ohne die langjährigen und umfangreichen ökologischen und klimatologischen Vor- und Begleituntersuchungen auf dem Stillberg, an denen seit bald fünfzig Jahren insgesamt sehr viele Leute beteiligt waren. Die Feldarbeiten wurden unterstützt durch eine grosse Zahl von Mitarbeitern und Helfern. Ohne hier alle Namen nennen zu können, möchten wir allen Beteiligten ganz herzlich danken. Besonderer Dank gehört Werner Frey, Ruedi Häsler, Arnold Streule, Hans Turner und Ueli Wasem, auf deren Hilfe und Unterstützung wir immer zählen konnten. Danken möchten wir auch zwei anonymen Reviewern, deren Hinweise und Vorschläge wesentlich zur Verbesserung einer früheren Version der Arbeit beigetragen haben und Monique Dousse für die französische Übersetzung der Zusammenfassung.

Die Farbabbildungen wurden mit finanzieller Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt WSL gedruckt.

*Autoren:*

Dr. JOSEF SENN und Dr. WALTER SCHÖNENBERGER, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 8903 Birmensdorf.