



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



WSL-Institut für Schnee-
und Lawinenforschung SLF

Einfluss von Witterungs- und Schneeverhältnissen auf die Entstehung von Waldlawinen im Schweizer Alpenraum

Masterarbeit an der Professur für Waldökologie
im Departement Umweltwissenschaften an der ETH Zürich

Angefertigt von

Clotilde Gollut

Dezember 2008

Betreuer: Dr. P. Bebi

Referent: Prof. Dr. H. Bugmann

An dieser Stelle möchte ich mich bei Dr. Peter Bebi für seine grossartige Betreuung ganz herzlich bedanken.

Mein Dank geht ebenfalls an Prof. Dr. Harald Bugmann, der mir die Möglichkeit gegeben hat meine Masterarbeit an der Professur für Waldökologie der ETHZ anzufertigen.

Roman, Simon und Moritz möchte ich für ihre wertvollen Feedbacks danken.

Ein besonderer Dank geht an meinen Freund Martin für seine grandiose Leistung als Korrektor und für seine moralische Unterstützung.

En dernier lieu, je tiens à remercier tout particulièrement mes parents Christiane et Dominique ainsi que mon frère Benoît pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes études. Merci du fond du cœur.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Zusammenfassung	VI
Abstract	VIII
Résumé	X
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziel der Arbeit, Forschungsfragen und Hypothesen	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Allgemeine Lawinenkunde	4
2.2 Der Wald als Schutz vor Lawinen	8
2.3 Waldlawinen	10
3 Material und Methoden	16
3.1 Datengrundlage	16
3.2 Untersuchte Standorts-, Witterungs- und Schneeparameter	20
3.3 Statistische Datenauswertung	31
4 Resultate	38
4.1 Clusteranalyse	38
4.2 Klassifikationsbäume	48
5 Diskussion	55
5.1 Waldlawinentypen	55
5.2 Lawinensituationen mit zusätzlicher Waldlawinengefahr	58

6 Schlussfolgerungen62
Literaturverzeichnis64

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Schneedeckenaufbau im Übergangsbereich vom Freiland zum Waldbestand (nach Imbeck, 1987).....	10
Abb. 2-2:	Abgrenzung des Begriffes „Waldlawine“ (nach Meyer-Grass & Imbeck, 1985).....	11
Abb. 3-1:	Räumliche Verteilung der 185 untersuchten Waldlawinen im Untersuchungsgebiet.....	17
Abb. 3-2:	Räumliche Verteilung der 185 Freilandlawinen im Schweizer Alpenraum. ..	18
Abb. 3-3:	Räumliche Verteilung der für die Interpolation der Lufttemperatur einbezogenen SDM-Messstationen in den sieben Regionen.	25
Abb. 3-4:	Räumliche Verteilung der Messstationen des Niederschlagsmessnetzes (NIME) im Untersuchungsgebiet.	27
Abb. 4-1:	Dendrogramm.....	39
Abb. 4-2:	Biplot.	40
Abb. 4-3:	Verteilung der Variablen T_{a1} , T_{a3} und T_{a5} innerhalb der Cluster 1 und 2.....	41
Abb. 4-4:	Verteilung der Variablen ΔT_{a3} und ΔT_{a5} innerhalb der Cluster 1 und 2.	41
Abb. 4-5:	Verteilung der Variablen $S1$, $S3$ und $S5$ innerhalb der Cluster 1 und 2.....	42
Abb. 4-6:	Verteilung der Variablen $N1$, $N3$ und $N5$, $HN1$, $HN3$ und $HN5$ innerhalb der Cluster 1 und 2.	43
Abb. 4-7:	Verteilungen der Variablen $W1$, $W3$ und $W5$ innerhalb der Cluster 1 und 2.	44
Abb. 4-8:	Verteilungen der Variablen $W_{\max 1}$, $W_{\max 3}$ und $W_{\max 5}$ innerhalb der Cluster 1 und 2.	45
Abb. 4-9:	Verteilung der Variable HS innerhalb der Cluster 1 und 2.....	45
Abb. 4-10:	Verteilung der Variable H innerhalb der Cluster 1 und 2.....	46
Abb. 4-11:	Verteilung der Variablen $ExpNS$ und $ExpOW$ innerhalb der Cluster 1 und 2.	46

Abb. 4-12: Einteilung der Waldlawinen nach den Waldtypen Laubwald (Typ 1), Mischwald (Typ 2), Immergrüner Nadelwald / Immergrüner Nadelwald & winterkahler Nadelwald (Typ 3) und winterkahler Nadelwald (Typ 4).	47
Abb. 4-13: Einteilung der Waldlawinen nach Monaten.	48
Abb. 4-14: Klassifikationsbaum T_{\max}	49
Abb. 4-15: Kreuzvalidierungsplot.	50
Abb. 4-16: Optimaler Klassifikationsbaum T_{13}	50
Abb. 4-17: Klassifikationsbaum $T_{\text{Cluster 1}}$	53
Abb. 4-18: Klassifikationsbaum $T_{\text{Cluster 2}}$	54

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Untersuchte Standorts-, Witterungs- und Schneevariablen, deren Abkürzung, Name und Einheit.	21
Tab. 3-2:	Vereinfachte Windskala nach Gabl (1988).	28
Tab. 3-3:	Vergleich der zwei Ansätze Potenzfunktion und zweiteilig lineare Funktion zur Berechnung des Grundwertes der Gesamtschneehöhe.	30
Tab. 4-1:	Klassifikationsmatrix des Baumes T_{13}	51
Tab. 4-2:	Alternative Splitvariablen für die vier ersten Knoten des optimalen Klassifikationsbaumes T_{13}	52
Tab. 4-3:	Die drei besten Splitvariablen für die drei Knoten des Baumes $T_{\text{Cluster 1}}$	53

Zusammenfassung

Die aktuellen Kenntnisse über die Lawinenbildung im Wald beruhen hauptsächlich auf den Resultaten des SLF-Waldlawinenprojekts (1985/86 – 1989/90). Im Rahmen dieses Projekts wurden über 120 Waldlawinen aufgenommen. Aufgrund dieser Daten wurde der Einfluss der Bestandesmerkmale sowie des Standorts auf einen möglichen Waldlawinenanriss untersucht. In dieser Arbeit wurde anhand dieser Daten sowie Daten aus der SLF-Schadenlawinendatenbank (1985/86 – 2005/06) der Einfluss der Witterungs- und Schneeeverhältnisse auf den Anriss von Waldlawinen im Schweizer Alpenraum untersucht.

In einem ersten Schritt wurden die Witterungs- und Schneeeverhältnisse am Ort und zur Zeit der untersuchten Lawinenanrisse rekonstruiert. Mit Hilfe einer Clusteranalyse sowie Boxplots und Biplot wurden verschiedene Typen von Witterungs- und Schneeeverhältnissen, welche die Entstehung von Waldlawinen begünstigen, unterschieden und beschrieben. Klassifikationsbäume wurden dazu verwendet, ein Modell zu entwickeln, das eine allgemein kritische Lawinensituation von einer Situation, bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, aufgrund von Witterungs- und Schneeeverhältnissen unterscheiden kann.

Es wurden zwei Typen von für den Anriss von Waldlawinen typischen Witterungs- und Schneeeverhältnissen charakterisiert: (1) Neuschneelawinen brechen nach mässigen Schneefällen (3-Tages-Neuschneesumme meistens grösser als 40 cm), mehreren Tagen ohne Sonneneinstrahlung, bei einer Gesamtschneehöhe von mehr als 80 cm und bei relativ tiefen Temperaturen unter 0° C los, (2) Altschneelawinen ereignen sich nach einer Periode mit viel Einstrahlung und nach einer Erwärmung der Lufttemperatur um einige Grad. Am wichtigsten um eine allgemein kritische Lawinensituation von einer Situation, bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, zu unterscheiden sind die Niederschlags- und die Neuschneesumme sowie die Lufttemperatur. Die Gesamtschneehöhe und vor allem Windparameter spielen hingegen keine grosse Rolle. Das entwickelte Modell hätte 83 % der betrachteten Waldlawinen richtig vorausgesagt. Nach diesem Modell sind Waldlawinenanrisse bei folgenden Bedingungen am wahrscheinlichsten: Einer 1-Tagessumme des Niederschlages kleiner als 55 mm, einer 5-Tagessumme des Niederschlages von mindestens 80 mm, einer 5-Tagessumme der Sonnenscheindauer kleiner als 253 min und einem 1-Tagesmittel der Lufttemperatur kleiner als 1° C.

Im Vergleich zu früheren Untersuchungen wurden in dieser Arbeit mehr Waldlawinenereignisse untersucht, die betrachtete Untersuchungsperiode ist länger und das Untersuchungsgebiet grösser. Somit sind die vorliegenden Resultate für den gesamten Schweizer Alpenraum repräsentativer als die bisherigen Erkenntnisse. Bei extremen Witterungs- und Schneeverhältnissen sollten sie jedoch mit Vorsicht betrachtet werden.

Abstract

The current knowledge on avalanche formation within forested area is mainly based on results of the SLF-forest-avalanche project (1985/86 – 1989/90), in which 120 avalanches with starting points within the forest have been assessed and where the influence of forest structural and terrain variables on avalanche releases have been investigated. In this thesis, I used the same data set and, in addition, the Swiss database for destructive avalanches (1985/86 - 2005/06) to investigate the influence of weather and snow conditions on avalanche releases in forested terrain of the Swiss Alps.

First of all, the weather and snow conditions at the place and time of the investigated avalanche releases have been reconstructed. With the help of cluster analysis, box-plots and a biplot analysis, different types of forest avalanche-prone conditions have been separated and characterised. Classification trees were used to develop a model based on weather and snow parameters to identify snow- and weather conditions which are typical for avalanche releases within the forest compared to snow- and weather conditions typical for other avalanche releases.

Two different types of forest avalanche-prone conditions could be separated and characterised: (1) “Fresh-snow avalanches” are released after periods which are characterized by moderate snow fall (generally more than 40 cm within 3 days) without intermittent solar radiation, by a snow depth exceeding 80 cm and by relatively low temperatures below 0 °C, (2) “Old snow avalanches” are released after periods of high solar radiation and of temperature increases by several degrees. The most important variables to characterise avalanche release within forest cover compared to other avalanches were sum of precipitation, sum of new snow and temperature, less important was snow depth and wind parameters. The classification tree based model would have correctly forecast 83% of the investigated avalanches with starting points within the forest. According to this model, releases in forested terrain are most probable after a 1-day precipitation sum of less than 55 mm, a 5-days precipitation sum of equal or greater than 80 mm, 5-day periods with less than 253 minutes of sunshine and 1-day periods with air temperature below 1° C.

In comparison to earlier studies, I investigated more avalanche events, a longer time period and a larger study area. The results of this study are thus more representative for the Swiss Alps compared to previous knowledge, but should still be used with caution for extreme snow- and weather conditions.

Résumé

Les connaissances actuelles en matière d'avalanches se déclenchant en forêt reposent principalement sur les résultats du projet de recherche "Avalanches en forêt" mené au SLF durant les hivers 1985/86 – 1989/90. Dans le cadre de ce projet, plus de 120 avalanches en forêt ont été documentées. Sur la base de ces données, l'influence des caractéristiques du peuplement ainsi que de la station sur un possible déclenchement d'avalanche en forêt ont été étudiés. Dans le cadre du présent travail, les données du projet "Avalanches en forêt" ainsi que certaines données issues de la banque de donnée du SLF sur les dégâts d'avalanches ont été utilisées afin d'étudier l'influence des conditions météorologiques et d'enneigement sur le déclenchement d'avalanches en forêt dans les Alpes suisses.

Dans un premier temps, les conditions météorologiques et d'enneigement au lieu et au moment du déclenchement des avalanches considérées ont été reconstruites. A l'aide d'une analyse de partitionnement des données, de boxplots et de biplot, différents types de conditions météorologiques et d'enneigement favorisant le déclenchement d'avalanches en forêt ont été différenciés et décrits. La méthode des arbres de classification a ensuite été utilisée, afin de développer un modèle capable de différencier une situation avalancheuse critique d'une situation dans laquelle un danger supplémentaire d'avalanches en forêt existe, ceci sur la base de paramètres météorologiques et d'enneigement.

Deux types de conditions météorologiques et d'enneigement typiques pour le déclenchement d'avalanches en forêt ont été caractérisés : (1) Les "avalanches en forêt de neige fraîche" se produisent après des chutes de neiges modérées (en général plus que 40 cm en trois jours), à la suite de plusieurs jours sans ensoleillement, lorsque la hauteur de neige totale dépasse 80 cm et par des températures relativement basses inférieures à 0° C, (2) les "avalanches en forêt de neige ancienne" se produisent après une période très ensoleillée et après un réchauffement de la température de l'air de quelques degrés. Les facteurs les plus importants pour différencier une situation avalancheuse critique d'une situation dans laquelle un danger supplémentaire d'avalanches en forêt existe, sont la quantité de précipitations et de neige fraîche ainsi que la température de l'air. La hauteur de neige totale ainsi que les paramètres liés au vent ne jouent pas un rôle considérable. Le modèle développé aurait pu prédire de manière correcte 83 % des avalanches en forêt considérées. Selon ce modèle, la probabilité d'une avalanche en forêt est la plus élevée

lorsque les conditions suivantes sont réunies : une somme des précipitations inférieure à 55 mm le jour de l'avalanche, une somme des précipitations d'au moins 80 mm durant le jour de l'avalanche ainsi que les quatre jours précédents, une somme de la durée d'ensoleillement durant le jour de l'avalanche ainsi que les quatre jours précédents inférieure à 253 min ainsi qu'une température de l'air moyenne inférieure à 1° C le jour de l'avalanche.

Par rapport aux études précédentes, un plus grand nombre d'avalanches en forêt a été considéré dans le présent travail. La période ainsi que le périmètre d'étude ont été élargis. Par conséquent, les résultats de ce travail sont plus représentatifs pour l'intégralité des Alpes suisses que les connaissances en vigueur jusqu'à présent. En cas de situations météorologiques et d'enneigements extrêmes, ces résultats seraient toutefois à considérer avec prudence.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Bedeutung des Gebirgswaldes als Schutz vor Lawinenanrissen ist schon lange bekannt. Heute bietet der Wald den flächenmässig wichtigsten Schutz vor Lawinen in der Schweiz (Margreth, 2004). Gemäss dem zweiten Landesforstinventar (LFI) dienen ca. 4 % der gesamten Schweizer Waldfläche ohne Gebüschwald und rund 10 % des Gebirgswaldareals oberhalb 1200 m ü. M. dem Schutz vor Lawinen. Dies entspricht einer Fläche von 46'700 Hektar (Brändli & Herold, 1999). Verliert der Wald seine Schutzfunktion oder wirkt diese ungenügend zum Beispiel aufgrund der Überalterung des Bestandes oder aufgrund von Windschäden, können Lawinen innerhalb des Waldbestandes anreissen. Solche Lawinen werden als Waldlawinen bezeichnet. Waldlawinen sind zwar seltener als Lawinen im Freiland, sie können aber ebenfalls Personen- oder Sachschäden verursachen.

Am Anfang der 1980er Jahre stellte sich die Frage nach den Konsequenzen des Waldsterbens in den Schweizer Schutzwäldern. Wann geht die Schutzfunktion des Waldes verloren? Worauf beruht dieser Schutz genau? Dem WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) wurde 1984 der Auftrag erteilt, solche Fragen im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts, des sogenannten „Waldlawinen“-Forschungsprojekts, zu klären. Aufgrund von mehr als 120 Waldlawinenbeobachtungen untersuchten Meyer-Grass und Schneebeili (1992) im Rahmen dieses Projekts den Einfluss der Bestandesmerkmale sowie der Standortsgegebenheiten auf einen möglichen Lawinenanriss im Wald. Im Rahmen dieses Projekts wurde der bisher grössten Waldlawinen-Datensatz zusammengestellt. Die Anforderungen an einen gut aufgebauten Lawinenschutzwald in der Schweiz, wie z.B. die in der Strategie „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald NaiS“ (Frehner et al., 2005) definierten Anforderungen, stützen sich auf die Resultate dieser Untersuchung (Brändli, 1999).

Die Lawinenaktivität im Wald hängt von komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Waldbestand, dem Standort, der Schneedecke und der Witterung ab. Meyer-Grass und Schneebeli (1992) konzentrierten ihrer Untersuchung auf die zwei ersten Aspekte dieser Problematik. Es wäre sehr wertvoll, ebenfalls den Einfluss der beiden letzteren Aspekte, also der Schneedecke und der Witterung auf den Waldlawinenanrissen zu untersuchen. Damit könnte man besser abschätzen, wann Waldlawinen auftreten können. Diese Forschungslücke soll in dieser Arbeit geschlossen werden. Somit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, die Lawinengefahr aus bewaldeten Gebieten besser vorhersagen zu können.

1.2 Ziel der Arbeit, Forschungsfragen und Hypothesen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, das Verständnis des Einflusses von Witterungs- und Schneeparametern auf den Anriss von Waldlawinen im Schweizer Alpenraum zu verbessern. Dabei sollten folgende Forschungsfragen und Hypothesen untersucht werden:

Frage 1: Welche Witterungs- und Schneeverhältnisse begünstigen den Anriss von Waldlawinen?

Hypothese: Waldlawinenanrisse werden bei Witterungs- und Schneeverhältnissen begünstigt, welche die stabilisierende Wirkung des Waldes auf die Schneedecke verringern, wie z.B. bei Witterungsperioden ohne zwischenzeitliche Einstrahlungsphasen, bei ausgiebigen Schneefällen oder nach starken Erwärmungen.

Frage 2: Lassen sich anhand von Witterungs- und Schneeparametern verschiedene Klassen von Waldlawinen oder Waldlawinenszenarien beschreiben? Wenn ja, besteht ein Zusammenhang zwischen diesen Klassen und bestimmten Standortparametern wie der Höhenlage, der Exposition und des Waldtyps?

Hypothese: Man kann zwischen Waldlawinen, die nach Schneefällen und eher bei kalten Verhältnissen losbrechen, und solchen, die nach einer Einstrahlungsperiode und Erwärmung als Nassschneelawinen losbrechen, unterscheiden. Nassschneelawinen ereignen sich in allen Höhenlagen und

Waldtypen auf eher südexponierten Hängen, während Neuschneelawinen eher in Nadelwäldern der subalpinen Stufe vorkommen.

Frage 3: **Kann man eine allgemeine gefährliche Lawinensituation von einer Situation, bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, anhand von Witterungs- und Schneeparametern unterscheiden? Wenn ja, anhand welcher Parameter lassen sich diese Situationen am besten unterscheiden?**

Hypothese: Situationen, bei denen eine Waldlawinengefahr besteht, lassen sich anhand Witterungs- und Schneeparameter (insbesondere anhand von der Neuschneemenge, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer) erkennen und prognostizieren.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden allgemeine Grundlagen über die Lawinenbildung und die im Wald auf die Schneedecke stabilisierend wirkenden Mechanismen beschrieben. Zudem werden die wichtigsten bisher durchgeführten Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit Waldlawinen vorgestellt. In Kapitel 3 werden die Datengrundlagen, die Methoden die zur Rekonstruktion der Witterungs- und Schneeverhältnisse am Ort und zur Zeit der Lawinenereignissen verwendet wurden und die eingesetzten statistischen Auswertungsmethoden beschrieben. In dieser Arbeit wurden vor allem Methoden der multivariaten Statistik verwendet (Clusteranalyse und Klassifikationsbäume). In Kapitel 4 werden die wichtigsten Resultate dargestellt. Diese Resultate werden in Kapitel 5 interpretiert und mit bisherigen Erkenntnissen verglichen. Die Stärken und Limitierungen der verwendeten Methoden werden ebenfalls diskutiert. Das letzte Kapitel liefert einen Überblick über die wichtigsten Resultate und deren Bedeutung für das Forschungsgebiet sowie für die Praxis (z.B. die Lawinenwarnung).

2 Grundlagen

2.1 Allgemeine Lawinenkunde

2.1.1 Lawinenarten

Aufgrund des Bildungsmechanismus unterscheidet man zwei Arten von Lawinen, Lockerschneelawinen und Schneebrettlawinen (de Quervain, 1979; in der Gand, 1983; McClung & Schaerer, 1993). Lockerschneelawinen entstehen im trockenen oder nassen Lockerschnee ab ungefähr 35° Hangneigung. Sie breiten sich von einem Punkt aus und gewinnen unter seitlicher Ausdehnung an Masse und Geschwindigkeit. Typische Entstehungsbedingungen sind die Erwärmung oder Sonnenbestrahlung von kaltem, lockerem Neuschnee oder die starke Erwärmung von sehr nassem grobkörnigem Altschnee. Lockerschneelawinen können nur dann aufgehalten werden, wenn man sie frühzeitig in ihrer Bewegung abfängt.

Schneebrettlawinen brechen als Tafel in kohärenteren Schneearten ab und setzen sich mit erheblicher Beschleunigung in Bewegung. Sie entstehen ab Hangneigungen von 25° - 30° . Der Anriss ist durch eine scharfe Stufe charakterisiert, welche nur eine obere Schneeschicht (Oberlawine) oder die ganze Schneelage bis zum Boden (Bodenlawine) umfasst. Die Entstehung von Schneebrettlawinen wird oft durch eine schwache hangparallele Zwischen- oder Bodenschicht begünstigt. Beim Verlust dieser hangparallelen Schichtung wird die Lawinenbildung eingeschränkt. Der Anbruch kann nur durch Abstützung der Schneedecke in ihrer ganzen Höhe verhindert werden (in der Gand, 1983).

2.1.2 Lawinenbildung

Die natürliche Lawinenentstehung hängt von der Zusammenwirkung der Wetterbedingungen, der Schneedecke und der Geländeform ab (Hopf, 1988; Schweizer et al., 2003). Auf diese Faktorenkomplexe wird im Folgenden im Detail eingegangen.

Wetter

Neuschnee führt zu einem Anstieg der Lawinengefahr. Die Verfestigung des Neuschnees hält nicht immer Schritt mit der zunehmenden Eigenlast der Schneedecke, wodurch es zu Lawinenanrissen kommt. Je mehr Neuschnee fällt und je mehr Wind den Neuschnee begleitet, umso gefährlicher wird die Situation. Bei günstigen Bedingungen (schwacher bis mässiger Wind, Temperatur leicht unter 0° C, unregelmässige Schneeoberfläche) spricht man ab 30 – 50 cm von einer kritischen Neuschneemenge. Bei ungünstigen Bedingungen (hohe Schneefallintensität, starker Wind, tiefe Temperatur, glatte Schneeoberfläche) können bereits 10 – 20 cm Neuschnee schon kritisch sein (Harvey, 2006). Der Regen begünstigt ebenfalls den Anriss von Lawinen. Er führt zur Erwärmung und Schwächung der Schneedecke und erzeugt mit dem Gewicht des Wassers eine grosse Zusatzlast.

Der Wind ist ein ausschlaggebender Faktor für die Lawinenbildung. Ab Windgeschwindigkeiten von 4 m/s wird Schnee von einer windexponierten Stelle abgetragen und an Orten mit geringeren Strömungsgeschwindigkeit, wie zum Beispiel hangparallelen Mulden und Senken, in Lee (windabgewandte Seite) von Bäumen, in Windschattenhängen, etc. wieder abgelagert. Der Transport von Schnee durch den Wind wird als Schneeverfrachtung bezeichnet, der transportierte Schnee als Triebsschnee. Die vom Schnee transportierten Schneekristalle werden mechanisch zerkleinert. Somit hat Triebsschnee eine höhere Dichte als Neuschnee. In verfrachtetem Schnee haben Schneekristalle viele Berührungspunkte zu ihren Nachbarn. Sie können sich dann zu Schneebrettern zusammenschliessen. Eine Schneebrettlawinengefahr besteht, solange der Triebsschnee frisch ist. Setzt sich der Triebsschnee (je wärmer, desto schneller), wird er fester und die Triebsschneeansammlung wird stabiler (Harvey, 2006).

Am wichtigsten für die Lawinenbildung ist die Temperatur des Schnees und somit nur indirekt die Lufttemperatur. Gleichbleibende niedrige Lufttemperaturen (-5 bis -10° C) bewahren eine bestehende Lawinensituation. Gleichbleibende warme Temperaturen (um 0°

C und wärmer) führen zur langsamen Durchfeuchtung und Schwächung der Schneedecke und zum Anstieg der Nassschneelawinengefahr. Eine Abkühlung von warmem Schnee führt zur Verfestigung der Schneedecke und somit zur Entspannung der Lawinengefahr. Im Gegensatz dazu erhöht eine markante Erwärmung kurzfristig die Lawinengefahr (Harvey, 2006).

Schneedecke

Die Schneedecke besteht aus mehreren Schichten. Verschiedene Schneefallperioden bewirken mehr oder weniger Schneezuwachs und weisen unterschiedliche Neuschneeigenschaften auf. In den niederschlagsfreien Zwischenperioden verändert sich der liegende Schnee unter dem Einfluss der Witterung (Lackinger, 1988). Der Aufbau der Schneedecke ist somit durch den Witterungsverlauf seit Winterbeginn geprägt. Jede Schicht kann durch die Kornformen, die Korngrößen, die Härte, die Temperatur, den Wassergehalt und die Dichte des Schnees charakterisiert werden.

Bei einem Lawinenniedergang bricht die Schneedecke in der Regel entlang einer Schichtgrenze. Schwache Schichtgrenzen befinden sich meistens zwischen zwei sehr unterschiedlichen Schneeschichten. Eine der beiden an die schwache Schichtgrenze anliegenden Schichten wird als Schwachschicht bezeichnet. Diese Schicht weist eine geringe Festigkeit auf, so können Brüche im Kristallgefüge entstehen und sich durch die Schicht hindurch fortsetzen (Harvey, 2006). Oberflächenreif und Schwimmschnee sind typische Schwachschichten. Als Oberflächenreif werden plättchenförmige Eiskristalle, die sich durch Sublimation aus der Luftfeuchtigkeit an der kalten Schneeoberfläche bilden, bezeichnet. Bei einer aufbauenden Schneenumwandlung wachsen die Schneekristalle zu kantigen Kristallen und becherartigen Hohlformen zusammen. Die grossen Kristalle werden immer grösser und die kleinen werden aufgelöst. Dies führt zu einem Festigkeitsverlust in der umgewandelten Schneeschicht. Bei grossen Temperaturgradienten bildet sich als Resultat einer aufbauenden Schneenumwandlung Schwimmschnee oder Tiefenreif, eine typische Schwachschicht.

Ein günstiger Schneedeckenaufbau besteht aus mächtigen, ähnlichen Schichten. Grosse Schneehöhen führen zu kleineren Temperaturgradienten in der Schneedecke und verhindern somit weitgehend die Entwicklung vom Schwimmschnee. Dünne unterschiedliche Schichten sind hingegen ungünstig. Der Temperaturgradient ist bei

solchen Schneedecken gross und begünstigt die Bildung von Schwimmschnee. Eine raue, variable und warme Schneeoberfläche führt zu einer guten Bindung mit dem Neuschnee. Eine glatte, homogene, weiche, kohäsionslose Oberfläche hingegen erschwert die Bindung zum Neuschnee (Harvey, 2006).

Gelände

Mit der Steilheit des Geländes nimmt in der Regel die Lawinengefahr zu. Lawinenanrisse sind bei Neigungswinkeln zwischen 20° und 60° möglich, wobei die gefährlichen Schneebrettlawinen am häufigsten zwischen 30° und 45° entstehen (Hopf, 1988).

Die Exposition hat einen grossen Einfluss auf die Lawinenbildung. Je nach Exposition herrschen unterschiedliche Strahlungs- und Temperaturverhältnisse. Im Hochwinter stabilisiert sich die Schneedecke durch Sonneneinstrahlung und Setzung an Südhängen schneller als an Nordhängen. An nordexponierten Lagen bleibt, durch fehlende Sonneneinwirkung und tiefere Temperaturen, die Gefahr länger erhalten. Diese Verhältnisse begünstigen ebenfalls die Bildung von Schwimmschnee und das Erhaltenbleiben des Oberflächenreifes über einen längeren Zeitraum. Im Spätwinter verliert die Schneedecke bei Sonneneinstrahlung an Südhängen sehr rasch an Stabilität. Nach Schneefall- und Windperioden ist die Exposition im Zusammenhang mit der Windrichtung der letzten Tage von grosser Bedeutung. Südwinde (Föhn) können zum Beispiel starke Tribschneeansammlungen an Nordhängen verursachen (Hopf, 1988).

Die Geländeform und die Bodenrauigkeit spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Lawinenbildung. Typische Geländeformen welche die Lawinenbildung begünstigen sind: Mulden und Rinnen, Kammlagen, felsdurchsetztes Gelände und Übergangszonen von einem flachen zu einem steilen Gelände (Harvey, 2006). Glatte Hänge fördern das Gleiten der Schneedecke, dies vor allem im Früh- und Spätwinter (Hopf, 1988). Rauhe Hänge können nur so lange Lawinenanrisse verhindern, als sie nicht voll zugeschneit sind. Mit zunehmender Schneehöhe geht die Wirkung der Bodenrauigkeit verloren, da in der Schneedecke selbst und unabhängig von der Bodenbeschaffenheit Gleitflächen entstehen. Eine dichte Vegetation, vor allem ein dichter Wald, kann eine Lawinenbildung weitgehend verhindern.

2.2 Der Wald als Schutz vor Lawinen

Die Hauptwirkung des Waldes gegen die Lawinenbildung ist die Verhinderung des Anrisses in seinem eigenen Bereich. Die Bremswirkung des Waldes bei Lawinen, die oberhalb der Waldgrenze anbrechen, ist hingegen sehr beschränkt. Die stabilisierende Wirkung des Waldes auf die Schneedecke beruht vor allem auf den folgenden Elementen: der Schneeinterzeption, einem veränderten Strahlungshaushalt, weniger Wind und der Stützwirkung der Stämme.

Schneeinterzeption

Bei Schneefall wird ein Teil des Schnees in den Baumkronen abgelagert. Der grösste Teil dieses Schnees fällt nachträglich als Schneeklumpen oder Schmelzwasser zu Boden. Der Rest wird durch Sublimation oder Verdunstung zurück in die Atmosphäre transportiert. Durch Schneeinterzeption wird die Schneedecke im Wald weniger mächtig als im Freiland. Das Herabfallen und das Schmelzen des interzeptierten Schnees verursachen eine Strukturstörung in der Bodenschneedecke und verhindern somit die Bildung einer durchgehenden Schichtung. Diese Störung der Schneedecke beschränkt sich jedoch auf die unmittelbare Umgebung der Bäume und nimmt wenige Meter ausserhalb des Kronenrandes rasch ab (Imbeck, 1987).

Die Menge des interzeptierten Schnees ist sehr variabel und hängt von der Intensität des Schneefalles, der Schneeart, der Witterungsverhältnisse, der Baumart, der Kronenform und der Bestandesform ab (Imbeck, 1984). Bäume fangen kleine Schneefälle bis ca. 10 cm fast ganz ab. Je intensiver der Schneefall, desto kleiner ist der Anteil des Niederschlages der interzeptiert wird. Bei kalten Lufttemperaturen wird weniger Schnee interzeptiert als bei wärmeren Temperaturen (Stadler et al., 1998). Die Interzeption ist bei nassem Schnee wesentlich grösser als bei trockenem Schnee (Imbeck, 1984). Bei kleinen Geschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s begünstigt der Wind die interzeptierte Schneemenge. Kräftiger Wind (über 3 m/s) sowie starke Erwärmung (über 0° C, intensive Einstrahlung) führen zur Entladung der Baumkronen (Imbeck, 1984).

Immergrüne Baumarten interzeptieren mehr Schnee als winterkahlen Baumarten. Allerdings sind die Unterschiede in der Interzeptionsleistung zwischen immergrünen und winterkahlen Baumarten nur bei tiefen Temperaturen ausgeprägt (Pfister & Schneebeili,

1999). Zudem ist die Schneeeinterzeption in dichten Beständen grösser als in aufgelockerten Beständen.

Strahlungshaushalt

Sowohl die Sonneneinstrahlung als auch die nächtliche Ausstrahlung sind im Wald niedriger als im Freiland (Schneebeil & Bebi, 2004). Unter dem Kronenschirm herrscht ein ausgeglicheneres Mikroklima als im Freiland: die Schneedecke erwärmt sich während des Tages weniger und kühlt in der Nacht ebenfalls weniger ab. Im Wald kommt es kaum zu destabilisierenden Schneemetamorphosen in Form von Schwimmschnee oder Oberflächenreif (Ott, 1996). Die Abstrahlung von kurz- und langwelliger Strahlung wird unter einem dichten Bestand mehr reduziert als in einem aufgelockerten Bestand (vgl. Frehner et al., 2005).

Wind

Die Windeinwirkung auf die Schneedecke wird im Wald wesentlich reduziert. Der Schnee ist im Wald dadurch regelmässiger verteilt als im Freiland und Schneeverfrachtungen, die im Freiland sehr problematisch sind, werden weitgehend verhindert (Ott, 1996). In grösseren Waldblößen können sich grössere Triebsschneeansammlungen als im Freiland bilden, da Schnee von den umliegenden Baumkronen vom Wind auf die Blösse verfrachtet werden kann (in der Gand, 1983).

Stützwirkung der Stämme

Im Wald wird die Rauigkeit des Bodens durch aufrechte Stämme und Stöcke sowie liegende Bäume erhöht. Diese Elemente stabilisieren die Schneedecke.

Fazit: Die Waldschneedecke

Wegen des Einflusses der Interzeption durch Bäume sind Schneehöhe und Wasseräquivalent im Wald allgemein um 5 – 20 % kleiner als im Freiland (Imbeck, 1987). Die hangparallele Schichtung der Schneedecke wird im Wald durch den herabfallenden Interzeptionsschnee gestört. Die Schneedecke ist im Wald mit Harsch- und Eisklumpen, Hohlräumen und organischem Material (Nadeln, Zweiglein, usw.) durchgesetzt (Imbeck,

1984). In dichten Fichtenwäldern kann die Schneedecke derart stark gestört sein, dass eine fein gegliederte parallele Schichtung der Schneedecke fehlt. Unter winterkahlen Baumarten sind jedoch meistens noch Schichten mit freilandähnlichen, feinen, parallelen Schichtstrukturen vorhanden (Imbeck, 1987). Die aufbauende Schneemetamorphose, die die Bildung von Schwimmschnee oder Oberflächenreif verursacht, ist im Wald abgeschwächt (in der Gand, 1983). Die Gefahr, dass Reifschichten überschneit werden und dadurch für die Lawinenbildung gefährliche Schwachschichten bilden, wird im Wald ganz verhindert (Imbeck, 1984). Abbildung 2-1 stellt den Schneedeckenaufbau im Übergangsbereich vom Freiland zum Wald dar.

Auf grösseren Waldblößen ist die Schneedecke, wegen der fehlenden Interzeption und der Lee-Wirkung der Blöße im Windfeld, mächtiger als im Waldbestand. Die Schichtung bleibt in der Schneedecke weitgehend erhalten und die aufbauende Schneemetamorphose erfolgt unbehindert (in der Gand, 1983).

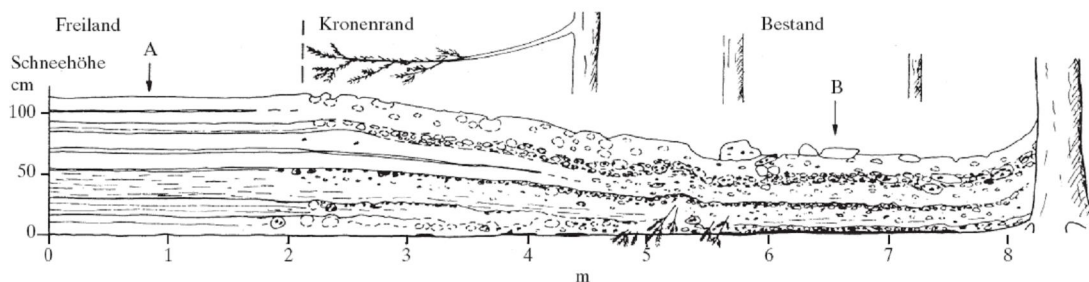


Abb. 2-1: Schneedeckenaufbau im Übergangsbereich vom Freiland zum Waldbestand (nach Imbeck, 1987). Die Schneedecke ist im Wald weniger mächtig als im Freiland. Im Wald ist die Schichtung der Schneedecke weitgehend gestört.

2.3 Waldlawinen

2.3.1 Abgrenzung des Begriffes

Als Waldlawinen werden Lawinen bezeichnet die im Bereich der Waldbestockung anreissen (Meyer-Grass & Imbeck, 1985; Imbeck, 1986; Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Gemäss dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) gilt eine mit Bäumen bewachsene Fläche als Wald, wenn sie breiter als 50 m ist und wenn der Deckungsgrad

mindestens 20 % beträgt (Keller, 2005). Ist der Bestand dichter, gelten auch schmalere Flächen als Wald, diese müssen jedoch mindestens 25 m breit sein. Zudem muss der Bestand, mit Ausnahme von Aufforstungen, Verjüngungen, Schlag-, Sturm- und Schadenflächen sowie Gebüschwald, eine Oberhöhe von mindestens 3 m aufweisen. Der Begriff Waldlawine bezieht sich ausschliesslich auf den Ort der Anrisszone. Lawinen die oberhalb des Waldes anbrechen und dann in den Wald eindringen gelten nicht als Waldlawinen (s. Abb. 2-2). Ebenfalls sind Lawinen, die in einer unbestockbaren Erosions- oder Lawinenrinne, auf einer grossen Blockschuttfläche, in einer steilen Felspartie (steiler als 60 %) oder auf einer bestockbaren Waldwiese anbrechen, keine Waldlawinen (Meyer-Grass & Schneebeili, 1992).

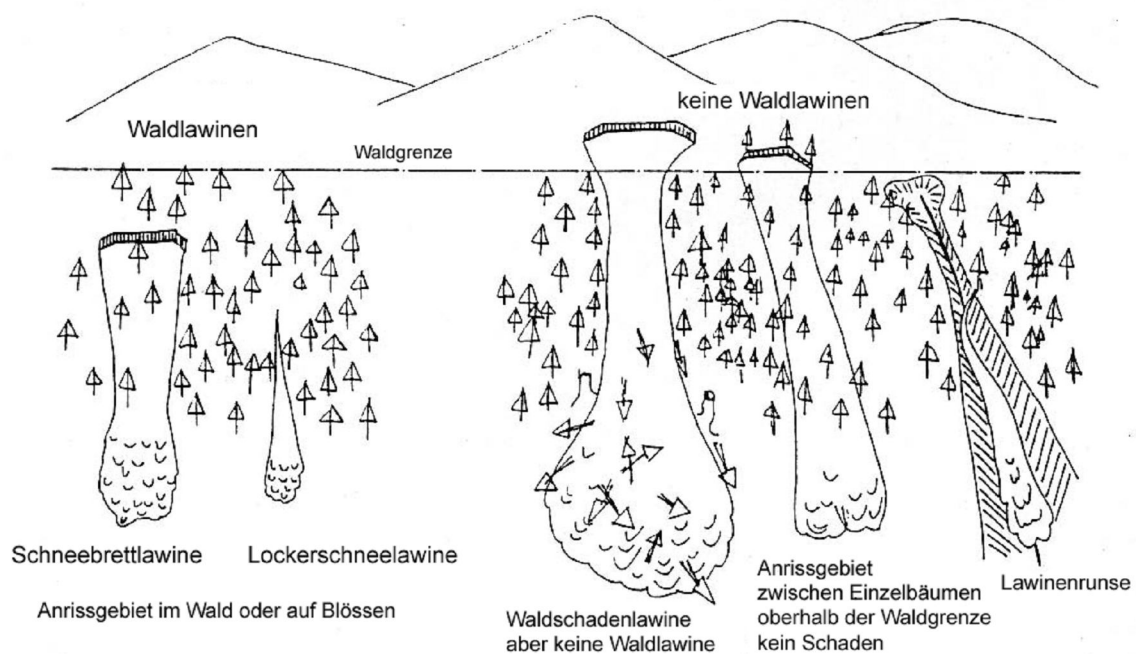


Abb. 2-2: Abgrenzung des Begriffes „Waldlawine“ (nach Meyer-Grass & Imbeck, 1985). Als Waldlawinen werden Lawinen bezeichnet die im Bereich der Waldbestockung anreissen (links). Lawinen die oberhalb der Waldgrenze, in einer unbestockbaren Erosions- oder Lawinenrinne oder auf einer bestockbaren Waldwiese anbrechen (rechts), gelten nicht als Waldlawinen.

2.3.2 Bisherige Erkenntnisse

Im Jahr 1974 begannen am Institut für Wildbach- und Lawinenverbauung der Universität für Bodenkultur in Wien Forschungsarbeiten zur Klärung des Einflusses der Bestockung auf das Entstehen von Waldlawinen (Fiebiger, 1975; Fiebiger 1978). Dabei wurden drei

ausgewählte Waldlawinengebiete der nördlichen Kalkalpen untersucht. Diese setzten sich aus buchenreichen (unterhalb 1000 m ü. M.), tannenreichen (um 1000 m ü. M.) sowie fichtenreichen (in der subalpinen Stufe) Gesellschaften zusammen.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte keine einheitliche Neigung bestimmter Waldgesellschaften zur Begünstigung von Waldlawinenanrissen festgestellt werden. Folgende Ursachen für Waldlawinenanrisse wurden festgestellt: „(1) Steilheit des Geländes (immer fast 100 %), (2) ungünstige Bestandesentwicklung mit Überhang an späten Entwicklungsphasen, schlechte Regenerationsfähigkeit der Bestände, (3) ungünstige Bodenbedeckung durch Gras und/oder Laubstreupolster, (4) ungünstige Bestandesstrukturen, besonders im Verhältnis zwischen immer- und sommergrünen Baumarten, (5) mangelhafter oder fehlender horizontaler und vertikaler Bestandesschluss und (6) zu hoher Anteil an Blössen“ (Fiebiger, 1978).

Neben diesen bestandesstrukturellen und topographischen Ursachen, wurde ein bedeutender Einfluss der Schneedeckenentwicklung auf die Waldlawinenbildung festgestellt. In Fichten-Tannen-Buchen-Waldgesellschaften zeigte die labile Entwicklung der Schneedecke eine Tendenz zu einem zweischichtigen Aufbau und einen stärkeren Einfluss der expositions- und strahlungbedingten Metamorphose im Bestand als im Freiland. Nach Fiebiger (1978) neigen solche Bestände zur Bildung von Oberlawinen nach ausgiebigen Schneefällen. In Buchendominierten Beständen entwickelte sich die Schneedecke quasi ähnlich wie im Freiland. In den lärchenreichen Fichtenwäldern der subalpinen Stufe wurden stabile Schneedeckenentwicklungen festgestellt.

Im Jahr 1984 wurde die Vorstudie zum Waldlawinenprojekt am SLF abgeschlossen. Ziel dieses Projekts war zu klären, unter welchen Bedingungen, in welchen Waldbeständen und in welchem Ausmass sich Waldlawinen in der Landschaft Davos bilden (Imbeck, 1984). Im Rahmen dieses Projekts wurden in den fünf Wintern von 1979/80 bis 1983/84 sämtliche Wälder der Landschaft Davos, die stark verlichtet waren, grosse Blössen enthielten oder einen hohen Anteil an Lärchen aufwiesen, nach grossen Neuschneefällen und/oder bei massiven Wärmeeinbrüchen nach Lawinen abgesucht.

Aus dieser Untersuchung ergaben sich folgende Erkenntnisse (Imbeck, 1984): (1) In geschlossenen Fichtenwäldern wurde kein Lawinenanriss beobachtet, (2) Lawinen die oberhalb der Waldgrenze oder auf Waldwiesen anbrachen durchfliessen oder durchschlagen den Wald und können durch Bäume nur im wenig geneigten Gelände um

20° gestoppt werden, (3) Die stabilisierende Wirkung des Waldes auf die Schneedecke geht mit zunehmender Auflockerung sehr schnell verloren, so dass Lockerschneelawinen entstehen können. Exakte Grenzen, wann die Schutzfunktion nicht mehr erfüllt ist, lassen sich jedoch nicht festlegen, (4) An der Waldgrenze bieten Einzelbäume mit einem Abstand von mehr als 15 m praktisch keinen Lawinenschutz, (5) Verlichteten Lärchenwälder, Lawinenzüge innerhalb des Waldes sowie steile Wälder mit Felspartien bieten keinen genügenden Lawinenschutz. In jedem Winter wurden in solchen Zonen mehrere Lockerschneelawinen beobachtet und (6) Im Wald sind vor allem Lockerschneelawinen zu erwarten, die vor allem nach grossen Neuschneefällen mit lockerem Schnee oder nach starker Erwärmung auftreten.

Im Rahmen des im Jahr 1991 abgeschlossenen Waldlawinenprojekts des SLF wurden 132 Waldlawinen, die sich in den Wintern von 1985/86 bis 1989/90 im Schweizer Alpenraum ereigneten, untersucht. Der grösste Teil dieser Waldlawinen fand jedoch vor allem im Engadin und in der Region Davos statt. Meyer-Grass & Schneebeili (1992) bestimmten mit Methoden der deskriptiven Statistik und univariater Teste die zur Lawinenbildung im Wald wichtigsten Gelände- und Bestandesparameter. Für die fünf wichtigsten Parameter Kronendeckung, Anzahl Stämme pro Hektar, mittlere Lückenbreite, Vegetationsdeckungsgrad und mittlere Neigung der Anrisszone gaben sie „kritische Werte“, bei deren Unterschreitung es zum Waldlawinenanriss kommen kann sowie „Sollwerte“, bei deren Einhaltung es nicht zum Anriss kommen sollte, an. Dabei wurden die fünf folgenden Waldtypen: „Laubwald“ (weniger als 10 % Nadelholz), „Mischwald“ (11 bis 90 % Nadelholz), „wintergrüner Wald“ (Fichten-, Tannenwald, mehr als 90 % wintergrüne Arten), „wintergrüner/Lärchen-Wald“ (weniger als 90 % wintergrüne Arten, bis 90 % Lärchen) und „Lärchenwald“ (mehr als 90 % Lärche) betrachtet. Es ist zu beachten, dass die angegebenen Werte nur für die Winterbedingungen der Untersuchungsjahre gelten. Diese Winter waren relativ warm und schneearm (Jaccard et al., 1991) und es kam während diesen Wintern nicht zu Extremereignissen bezüglich Schneemenge und Lawinengefahr.

Meyer-Grass & Schneebeili (1992) stellten fest, dass Waldlawinen sich an Tagen ereigneten, an denen auch Freilandlawinen losbrachen. Anrisse im Laub- und im Mischwald fanden bei einer Höhe von 1000 m ü. M. (± 300 m) statt. Zwischen 1200 und 1600 m ü. M. wurden kaum Waldlawinenanrisse beobachtet, jedoch wieder von 1600 bis

2200 m ü. M. Im Bezug auf Witterungs- und Schneeparameter konnten Meyer-Grass & Schneebeli (1992) anhand ihrer Beobachtungen zwei Ereignistypen unterscheiden, dies jedoch ohne statistische Abstützung: „Einerseits Neuschneelawinen, die nach einem Schneefall von mindestens 40 cm und nachfolgender Erwärmung von wenigen Grad als trockene bis feuchte Lawinen losbrachen, andererseits Nassschneerutsche, die nach mehrtägiger starker Einstrahlung oder Temperaturen über 0° C und allgemeiner Schneedeckenabnahme losbrachen“ (Meyer-Grass & Schneebeli, 1992). Neuschneelawinen traten an allen Expositionen auf, während Nassschneerutsche ausschliesslich auf südlich exponierte Hänge beschränkt waren.

Pfister (1997) entwickelte aufgrund der Daten des Waldlawinenprojekts ein Modell, dass die Wahrscheinlichkeit eines Waldlawinenanrisses in Abhängigkeit von Standorts- und Bestandesparameter berechnet. Das Modell erstellte er mit Hilfe einer linearen Regression. Pfister stellte fest, dass die mittlere Hangneigung, die Anzahl Stämme mit Brusthöhendurchmesser grösser als 16 cm pro Hektar und die Lückenlänge die wichtigsten Variablen zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses im Laub- sowie im Mischwald sind. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines Anrisses im Nadelwald sind es hingegen die mittlere Hangneigung, die Kronenprojektion aller Baumarten, die Lückenbreite und das Vorhandensein einer abrupten Neigungsänderung. Für diese Variablen berechnete er, unter der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses von mehr als 50 % im Schutzwald problematisch ist, kritische Werte.

Das Anforderungsprofil des Waldes bezüglich Lawinen der „Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion NaiS“ (Frehner et al., 2005) beruht auf den Resultaten von Meyer-Grass & Schneebeli (1992). In dieser Wegleitung werden drei Wetter- und Schneesituationen, die das Entstehen von Waldlawinen begünstigen, erwähnt. Diese drei Situationen wurden vom SLF aufgrund von wenigen Waldlawinenereignissen und ohne statistische Analyse entworfen.

Als Mass für die Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses im Wald wurde am SLF ein empirischer Waldlawinenindex entwickelt (SLF, 2000). Grundlage für die Entwicklung dieses Index bilden 16 Waldlawinentage und 16 Lawinentage ohne Waldlawinen. Je grösser der Index, desto wahrscheinlicher sind Waldlawinen, ist der Index kleiner als fünf, sind Waldlawinen unwahrscheinlich. Der Waldlawinenindex wird aufgrund der Lufttemperatur- und der Schneetemperaturdifferenz in einer festgelegten Anzahl Tage, der

3- und 10-Tages-Neuschneesumme sowie eines Index für die basale Scherfestigkeit berechnet. Der Waldlawinenindex ist ein einfaches Werkzeug um den Einfluss von Witterung und Schneedecke auf Waldlawinen zu beschreiben, er erhebt jedoch keinen Anspruch auf statistische Korrektheit und sachliche Vollständigkeit (SLF, 2000).

3 Material und Methoden

3.1 Datengrundlage

3.1.1 Lawinendaten

Waldlawinen

Die Datengrundlage besteht aus insgesamt 185 Waldlawinenereignissen in den Wintern 1985/86 bis 2005/06. 126 Ereignisse kommen aus der Datenbank des SLF-Waldlawinenprojekts und werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit als WLP-Waldlawinen bezeichnet. Teilweise fanden viele WLP-Waldlawinen am selben Tag also bei ähnlichen Witterungs- und Schneeverhältnissen statt. Um das Spektrum an unterschiedlichen Witterungs- und Schneeverhältnissen zu erweitern, wurden Waldlawinen aus einer zweiten Quelle, der SLF-Schadenlawinendatenbank (SLDB), miteinbezogen. 59 Ereignisse stammen aus der SLDB und werden in dieser Arbeit als SLDB-Waldlawinen bezeichnet. Die räumliche Verteilung der 185 untersuchten Waldlawinen ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Im Rahmen des Waldlawinenprojekts wurden die Anrissörtlichkeiten der Waldlawinen meistens einmal im Winter und ein zweites Mal im Sommer begangen (Meyer-Grass und Schneebeili, 1992). Im Winter wurden die Merkmale der Lawine (Morphologie, Geometrie, mögliche Ursachen der Lawinenauslösung und der -bremsung, verursachte Schäden) und der Schneedecke (Gesamtschneehöhe, geschätzte Neuschneemenge, Lage des Anrisses in der Schneedecke, Schwachschichten, usw.) aufgenommen. Im Sommer wurden Bestandes- (Waldtyp, Baumartenzusammensetzung, Deckungsgrad, Struktur, Entwicklungsstufe, usw.) und Standortparameter (Topographie, Bodeneigenschaften, bodennahe Vegetation) dokumentiert. Die Daten sind als S-Plus *dataframe* sowie als ASCII-Datei vorhanden.

Die SLF-Schadenlawinendatenbank enthält ausschliesslich Lawinen die irgendwelche Personen- oder Sachschäden verursacht haben oder Folgekosten nach sich gezogen haben (Latenser et al., 1998). Mittlerweile sind es mehr als 12'000 Datensätze. Zu jeder Lawine sind Angaben über die Zeit, den Ort, die Lawinenbahn (Anriss- und Ablagerungsgebiet), die Lawinencharakteristik sowie über verursachte Schäden in der Datenbank enthalten. Auf die SLF-Schadenlawinendatenbank wurde mit dem Programm FileMaker Pro zugegriffen. Mithilfe dieses Programmes lassen sich kriterienspezifische Abfragen leicht durchführen. Aus der SLF-Schadenlawinendatenbank wurden diejenigen Waldlawinenereignisse ausgewählt, die frühestens im Winter 1985/86 stattgefunden haben, und deren Auslösung natürlich war. Die Koordinaten der jeweiligen Anrisszonen wurden mit Orthophotos vom Jahr 2000 verglichen, um sicherzustellen dass die Lawinen im Wald angerissen sind.

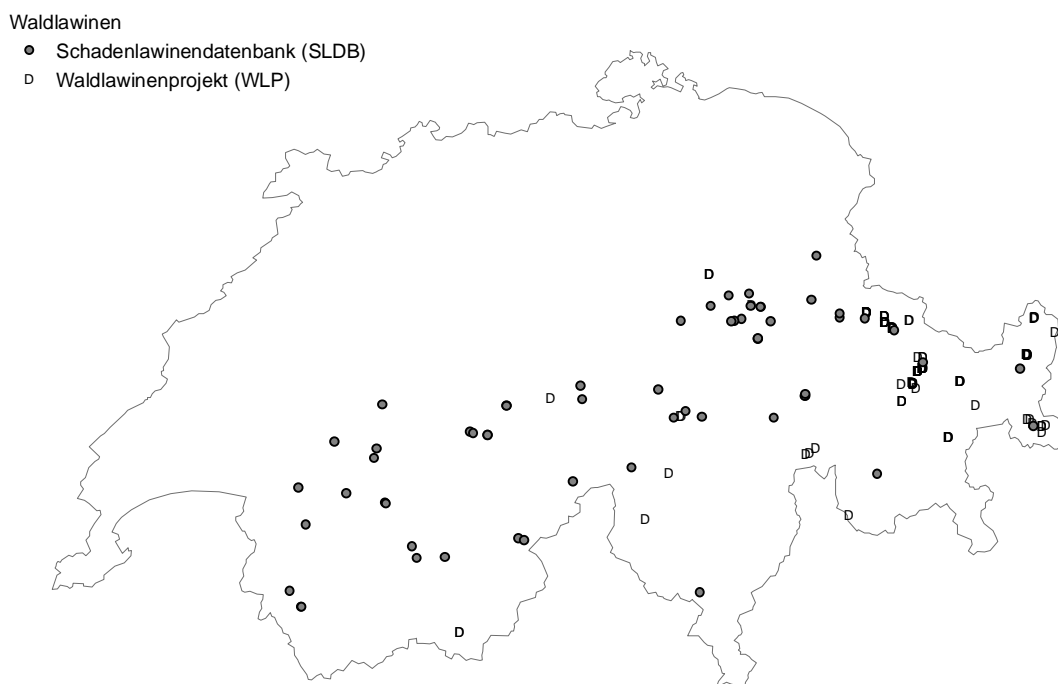


Abb. 3-1: Räumliche Verteilung der 185 untersuchten Waldlawinen im Untersuchungsgebiet. Die SLDB-Waldlawinen sind im ganzen Schweizer Alpenraum verteilt während die WLP-Waldlawinen vor allem im Engadin und in der Region Davos konzentriert sind.

Lawinen im Freiland

Um den Vergleich zwischen einer allgemein gefährlichen Lawinensituation und einer Situation, bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, ziehen zu können, wurde ein zweiter Datensatz mit 185 Lawinen, deren Anrisszone sich im Freiland befindet, erstellt. Diese Lawinen werden als Freilandlawinen bezeichnet. Die räumliche Verteilung der Freilandlawinen ist in Abbildung 3-2 dargestellt.



Abb. 3-2: Räumliche Verteilung der 185 Freilandlawinen im Schweizer Alpenraum.

Als Datengrundlage wurde die SLF-Schadenlawinendatenbank verwendet. Die Freilandlawinen wurden nach den vier folgenden Kriterien ausgewählt:

- 1) Die Freilandlawinen ereigneten sich im gleichen Zeitraum wie die Waldlawinen (1985/86 – 2005/06).
- 2) Die Freilandlawinen ereigneten sich weder am selben Tag wie eine Waldlawine, noch innerhalb der letzten oder darauffolgenden drei Tagen. Dieses Kriterium wurde festgelegt, um Witterungs- und Schneesituationen mit und ohne Waldlawinen möglichst gut zu unterscheiden.
- 3) Die Freilandlawinen lösten sich natürlich aus.

- 4) Die Freilandlawinen fanden in ähnlichen Höhenlagen wie die Waldlawinen statt. Für jede Waldlawine wurde eine Freilandlawine ausgesucht, die sich in der gleichen Höhenlage ereignete.

Wenn mehrere Freilandlawinen die vier Kriterien erfüllten, wurde eine Lawine zufällig ausgewählt.

3.1.2 Klima- und Schneedaten

Die miteinbezogenen Klima- und Schneedaten stammen aus dem automatischen Messnetz (SDM) sowie dem Niederschlagsmessnetz (NIME) von MeteoSchweiz, aus den SLF-Vergleichsstationen und –Messstellen sowie aus dem Interkantonalen Mess- und Informationssystem (IMIS).

Der Nationale Wetterdienst MeteoSchweiz betreibt vier Bodenmessnetze: das konventionelle Messnetz (KLIMA), das automatische Messnetz (ANETZ), das Ergänzungsnetz (ENET) und das Niederschlagsmessnetz (NIME). Das konventionelle Messnetz besteht seit Dezember 1863. Die Messinstrumente werden dreimal pro Tag (jeweils um 6:00 UTC, 12:00 UTC und 18:00 UTC) durch Beobachterinnen und Beobachter gelesen. Die ersten Stationen des automatischen Messnetzes wurden in den späten 1970er Jahren in Betrieb genommen. Dabei lösten viele ANETZ-Stationen konventionelle Stationen ab. Das ANETZ deckt alle Regionen und Höhenlagen der Schweiz ab. Die Messungen erfolgen automatisch alle zehn Minuten. Das ENET dient als Erweiterung des ANETZ und nimmt hauptsächlich Windmessungen vor. Von 1991 bis 1993 wurden in Zusammenarbeit mit dem SLF elf ENET-Gebirgsstationen errichtet. Diese liegen zwischen 2000 und 3000 m ü. M. und erfassen verschiedene Schneeparameter. Die Daten werden wie im ANETZ alle zehn Minuten gemessen. Im Rahmen des im Jahr 2005 gestarteten SwissMetNet-Projekts werden die bestehenden Bodenmessnetze ANETZ, ENET und KLIMA technisch auf den neusten Stand gebracht und in ein einziges automatisches Messnetz (SDM) überführt (MeteoSchweiz, 2008).

Zur Erfassung des Niederschlags wurde ein zusätzliches Messnetz aufgebaut. Das NIME besteht seit Dezember 1863 und ist das dichteste Messnetz von MeteoSchweiz. Niederschlag (bzw. der Wasserwert des Neuschnees), Witterung und vielerorts Neu- und Gesamtschneehöhe werden jeden Morgen um 7:30 UTC ermittelt (MeteoSchweiz, 2008).

Die SLF-Vergleichsstationen und –Messstellen bilden die wesentliche Grundlage für die Einschätzung der Lawinengefahr. An den rund 80 SLF-Vergleichsstationen werden täglich vor 8:00 UTC die Neuschnee-, die Gesamtschneehöhe sowie andere Schneeparameter und Wetterdaten von Beobachtern gemessen. Die Messungen erfolgen auf einem möglichst freistehenden, minimal windbeeinflussten Versuchsfeld. An den 35 Messstellen werden täglich 8:00 UTC die Neu- und Gesamtschneehöhen gemessen (Pielmeier, 2007).

Das Interkantonale Mess- und Informationssystem (IMIS) wurde in Zusammenarbeit mit Bund, Kantonen, Gemeinden und weiteren Interessenverbänden entwickelt (SLF, 2008). Eine IMIS-Station besteht in der Regel aus einer Windstation und einer oder mehreren Schneestationen. Das IMIS besteht aus 76 Einheiten, die im gesamten Schweizer Alpenraum verteilt sind und Höhenlagen oberhalb von 2000 m ü. M abdecken. Die Messungen erfolgen im Halbstundentakt.

3.2 Untersuchte Standorts-, Witterungs- und Schneeparameter

Als Grundlage für die statistischen Auswertungen wurde ein Variablensatz bestehend aus 25 Variablen gebildet. Diese Variablen sind in Tabelle 3-1 aufgelistet. Die vier ersten Variablen beschreiben die Topographie und den Waldtyp (nur bei Waldlawinen) an der Anrissstelle. Die 21 weiteren Variablen beschreiben die Witterungs- und Schneebeziehungen am Tag des Lawinenereignisses sowie innerhalb der letzten vier Tage vor dem Ereignis. Um auszuwählen welche Witterungs- und Schneevariablen untersucht werden müssen, wurde anhand der Fachliteratur eine Vorselektion an Variablen, die regelmässig zur Prognose von Freilandlawinen benutzt werden, vorgenommen. Dann wurden diejenigen Variablen ausgewählt, für die Messwerte aus dem gesamten Schweizer Alpenraum ab 1985 zur Verfügung stehen.

Tab. 3-1: Untersuchte Standorts-, Witterungs- und Schneevariablen, deren Abkürzung, Name und Einheit.

Abkürzung	Name	Einheit
H	Höhe über Meer	m
ExpNS	Nord-Süd-Gradient (engl. <i>northness</i>)	-
ExpOW	Ost-West-Gradient (engl. <i>eastness</i>)	-
Waldtyp	Waldtyp	-
T _{a1}	1-Tagesmittel der Lufttemperatur	° C
T _{a3}	3-Tagesmittel der Lufttemperatur	° C
T _{a5}	5-Tagesmittel der Lufttemperatur	° C
ΔT _{a3}	3-Tages-Lufttemperaturdifferenz	°
ΔT _{a5}	5-Tages-Lufttemperaturdifferenz	°
S1	1-Tagessumme der Sonnenscheindauer	min
S3	3-Tagessumme der Sonnenscheindauer	min
S5	5-Tagessumme der Sonnenscheindauer	min
N1	1-Tagessumme des Niederschlages	mm
N3	3-Tagessumme des Niederschlages	mm
N5	5-Tagessumme des Niederschlages	mm
W1	1-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit	-
W3	3-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit	-
W5	5-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit	-
W _{max1}	1-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit	-
W _{max3}	3-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit	-
W _{max5}	5-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit	-
HN1	1-Tagessumme des Neuschnees	cm
HN3	3-Tagessumme des Neuschnees	cm
HN5	5-Tagessumme des Neuschnees	cm
HS	Gesamtschneehöhe	cm

Zur Beschreibung der Witterungs- und Schneeverhältnisse wurden folgende Parameter ausgewählt: Die Lufttemperatur, die Lufttemperaturdifferenz, die Sonnenscheindauer, die Niederschläge (Regen oder Wasserwert des Neuschnees), der Wind (mittlere und maximale Windgeschwindigkeit), die Neuschneehöhe sowie die Gesamtschneehöhe. Die meisten dieser Parameter werden jeweils durch drei Variablen beschrieben. Eine jeweils durch die Ziffer 1 gekennzeichnete Variable (z.B. T_{a1}) bezieht sich auf den Tag des Ereignisses, eine jeweils durch die Ziffer 3 gekennzeichnete Variable (z.B. T_{a3}) bezieht sich auf den Tag des Ereignisses sowie die zwei letzten Tagen vor dem Ereignis und eine

jeweils durch die Ziffer 5 gekennzeichnete Variable (z.B. T_{a5}) bezieht sich auf den Tag des Ereignisses sowie die vier letzten Tagen vor dem Ereignis. Zwei Parameter sind nicht nach diesem Prinzip beschrieben, die Lufttemperaturdifferenz und die Gesamtschneehöhe. Die Lufttemperaturdifferenz wird nur von zwei Variablen charakterisiert. Die erste ist die 3-Tages-Lufttemperaturdifferenz (ΔT_{a3}) und entspricht der Differenz zwischen dem Tagesmittel der Lufttemperatur am Tag des Ereignisses und dem Tagesmittel der Lufttemperatur am zweitletzten Tag vor dem Ereignis. Die zweite ist die 5-Tages-Lufttemperaturdifferenz (ΔT_{a5}) und entspricht der Differenz zwischen dem Tagesmittel der Lufttemperatur am Tag des Ereignisses und dem Tagesmittel der Lufttemperatur am viertletzten Tag vor dem Ereignis. Der Parameter Gesamtschneehöhe wird von nur einer einzelnen Variable beschrieben und zwar der Variable Gesamtschneehöhe (HS), die der Gesamtschneehöhe am Tag des Ereignisses entspricht. Die Methoden zur Rekonstruktion der Witterungs- und Schneeverhältnisse am Ort und zur Zeit der Lawinenanrisse anhand der erwähnten Parameter werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2.1 Standort

Topographie

Die Topographie der Anrisszone wurde anhand der Höhe über Meer und der Exposition beschrieben. Diese Angaben sind sowohl in der Datenbank des Waldlawinenprojekts als auch in der SLF-Schadenlawinendatenbank vorhanden.

Die Werte der Variable Höhe über Meer wurden aus den beiden Datenbanken direkt übernommen. Die Exposition wurde anhand zweier Variablen charakterisiert: dem Nord-Süd-Gradienten und dem Ost-West-Gradienten. Der Nord-Süd-Gradient ist als $\cos(x)$ und der Ost-West-Gradient als $\sin(x)$ definiert, wobei x die Exposition in Grad ist. Die beiden Gradienten können Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Beim Nord-Süd-Gradient entspricht der Wert +1 dem Norden, der Wert -1 dem Süden und der Wert 0 dem Osten oder dem Westen. Je mehr nordexponiert ein Gebiet ist, desto näher liegt der Wert des Nord-Süd-Gradienten an +1. Der Ost-West-Gradient verhält sich ähnlich wie der Nord-Süd-Gradient, wobei der Wert +1 dem Osten und der Wert -1 dem Westen entspricht. Diese in der Ökologie oft verwendete Transformation erlaubt es, die Exposition als kontinuierliche Größe anzusehen und erleichtert somit die Interpretation.

Waldtyp

Im Rahmen des Waldlawinenprojekts wurden die Anrisszonen der Waldlawinen den fünf folgenden Waldtyp-Kategorien zugeordnet: (1) Laubwald, (2) Laubwald & immergrüner Nadelwald, (3) Immergrüner Nadelwald, (4) Immergrüner Nadelwald & winterkahler Nadelwald und (5) Winterkahler Nadelwald (s. dazu Kapitel 2.3.2, S. 13). Die SLF-Schadenlawinendatenbank enthält hingegen keine Angaben bezüglich des Waldbestandes im Anrissgebiet. Die Koordinaten der Anrisszonen der Waldlawinen aus der SLF-Schadenlawinendatenbank wurden mit dem ArcGIS-Layer WMG25 des Bundesamtes für Statistik (BFS) verglichen. Dieser Layer liefert eine flächendeckende Aufteilung der Schweizer Wälder nach den folgenden vier Kategorien: (1) Nadelwald, (2) Nadelmischwald (Mischwald mit dominantem Nadelwaldanteil), (3) Laubmischwald (Mischwald mit dominantem Laubwaldanteil) und (4) Laubwald. Als Datengrundlage für diese Aufteilung dienten 11 Landsat-5 TM-Szenen aus den Jahren 1990 bis 1992 (BFS, 2004).

Die Waldtyp-Kategorien des Waldlawinenprojekts sind also nicht mit denjenigen der BFS-Aufteilung identisch. Aus diesem Grund mussten neue Waldtyp-Kategorien, welche die beiden verschiedenen Aufteilungen vereinen, definiert werden. Diese neuen Kategorien wurden folgendermassen definiert:

Waldtyp 1 Laubwald

Diese Kategorie umfasst die Kategorie 1 (Laubwald) des Waldlawinenprojekts sowie die Kategorie 4 (Laubwald) der BFS-Aufteilung.

Waldtyp 2 Mischwald

Diese Kategorie umfasst die Kategorie 2 (Laubwald und immergrüner Nadelwald) des Waldlawinenprojekts sowie die Kategorien 2 (Nadelmischwald) und 3 (Laubmischwald) der BFS-Aufteilung.

Waldtyp 3 Immergrüner Nadelwald / Immergrüner Nadelwald & winterkahler Nadelwald

Diese Kategorie umfasst die Kategorien 3 (Immergrüner Nadelwald) und 4 (Immergrüner Nadelwald & winterkahler Nadelwald) des

Waldlawinenprojekts sowie die Kategorie 1 (Nadelwald) der BFS-Aufteilung.

Waldtyp 4 Winterkahler Nadelwald

Diese Kategorie entspricht der Kategorie 5 (Winterkahler Nadelwald) des Waldlawinenprojekts.

3.2.2 Witterungs- und Schneeverhältnisse

Lufttemperatur

Die Lufttemperatur weist eine starke Höhenabhängigkeit auf. Überwiegend nimmt die Lufttemperatur bei zunehmender Höhe annähernd linear ab, wobei der Höhengradient von Ort zu Ort unterschiedlich ist und kurzfristig, je nach meteorologischen Verhältnissen, sehr stark variieren kann. Aufgrund der ausgeprägten Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur wurde die höhenabhängige Regression als Interpolationsmethode gewählt. Die räumliche Variabilität der Temperatur wurde berücksichtigt indem ein spezifischer Höhengradient für die folgenden Regionen der Schweizer Alpen berechnet wurde: (1) westlicher Alpennordhang, (2) zentraler Alpennordhang, (3) östlicher Alpennordhang, (4) Wallis, (5) Nord- und Mittelbünden, (6) zentraler Alpensüdhang und (7) Engadin und östlicher Alpensüdhang (s. Abb. 3-3). Diese Regionen wurden aufgrund von klimatischen, topographischen und politischen Faktoren vom SLF definiert (Brabec et al., 2001). In jeder Region wurden fünf Messstationen des automatischen Messnetzes (SDM) von MeteoSchweiz gesucht, welche über genug lange Messreihen verfügen. In einigen Regionen gibt es jedoch nur drei oder vier Stationen. In den Regionen mit mehr als fünf Messstationen mit ausreichend langen Messreihen wurde darauf geachtet, dass sich die ausgewählten Stationen möglichst gleichmässig auf die verschiedenen Höhenstufen verteilen. Die ausgewählten Stationen und deren räumliche Verteilung sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

Anhand der an den Stationen gemessenen Tagesmittel der Temperatur und der Höhe dieser Stationen wurden für jeden Tag und jede Region die Koeffizienten a_i und b_i der folgenden linearen Regression bestimmt:

$$T_a(h) = a_i h + b_i$$

Wobei	$T_a(h)$	Tagesmittel der Lufttemperatur [$^{\circ}$ C] in der Region i ($i = 1, \dots, 7$) und zur Höhe über Meer h
	h	Höhe über Meer [m] der Anrisszone
	a_i, b_i	Koeffizienten der Regression [-] in der Region i ($i = 1, \dots, 7$)

Durch Einfügen der Höhe über Meer h der jeweiligen Anrisszone in die entsprechende Gleichung, wurde das Tagesmittel der Lufttemperatur am Tag und Ort des Anrisses berechnet. Weiter wurden die Tagesmittel der Lufttemperatur für die vier letzten Tage vor dem Ereignis berechnet.

- Stationen des automatischen Messnetzes (SDM)

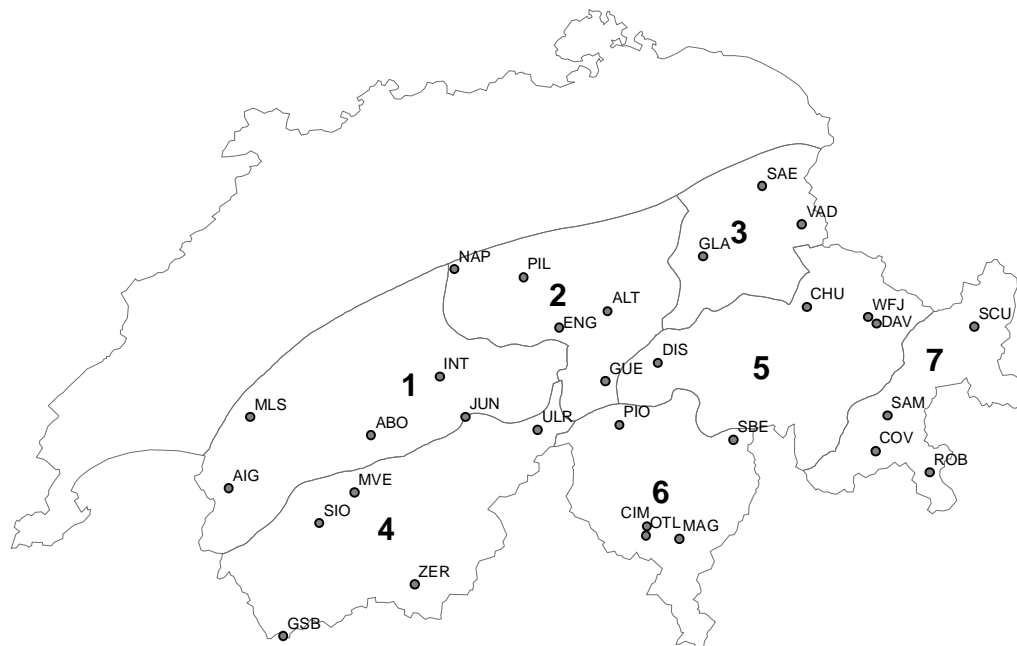


Abb. 3-3: Räumliche Verteilung der für die Interpolation der Lufttemperatur einbezogenen SDM-Messstationen in den sieben Regionen. Jede Station wird mit ihrer Abkürzung charakterisiert.

Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer hängt vor allem von der Jahreszeit, der Bewölkung und der Topographie ab. Zur Interpolation der Sonnenscheindauer wurde angenommen, dass die Sonnenscheindauer am Ort des Ereignisses gleich der Sonnenscheindauer an der nächstgelegener SDM-Messstation ist. Jedem Lawinenereignis wurden die an der nächstgelegenen SDM-Station gemessenen Werte der Sonnenscheindauer, am Tag des Ereignisses sowie der letzten vier Tagen vor dem Ereignis, zugeteilt.

Niederschlag

Grundsätzlich ist die Niederschlagsverteilung von der grossräumigen Situation (Hoch- und Tiefdruckgebiete, grossräumige Strömungen) abhängig (Weilguni, 2006). Die Topographie kann jedoch einen grossen Einfluss auf das Niederschlagsgeschehen haben. Im Allgemeinen nehmen die Niederschläge mit der Höhe zu, dabei besteht aber weder ein linearer noch ein regelmässiger Zusammenhang.

Da die räumliche Variabilität des Niederschlags deutlich grösser als diejenige der Temperatur ist, wurden bei der Interpolation des Niederschlages kleinere räumliche Einheiten betrachtet als bei der Interpolation der Lufttemperatur. Es wurde eine Einteilung des schweizerischen Alpenraums in 27 Gebiete verwendet. Diese Gebiete wurden ebenfalls aufgrund von klimatischen, topographischen und politischen Faktoren vom SLF definiert. Einige SLF-Gebiete mussten hier jedoch zu grösseren Gebieten zusammengeschlossen werden, so dass genug Messstationen in jedem Gebiet vorhanden waren. Die 27 betrachteten Gebiete sind in Abbildung 3-4 dargestellt. In jedem Gebiet wurden drei bis fünf Stationen des Niederschlagsmessnetzes (NIME) von MeteoSchweiz ausgewählt. Da das NIME viel dichter ist, wurde es dem SDM-Messnetz vorgezogen. Wenn mehr als fünf Stationen mit einer genug langen Messreihe in einem Gebiet vorhanden waren, wurde darauf geachtet, Stationen möglichst unterschiedlicher Höhen auszuwählen.

Zur Interpolation des Niederschlages in den einzelnen Gebieten wurde die Methode der arithmetischen Mittelbildung angewendet. Dabei entspricht die interpolierte Tagessumme des Niederschlages im jeweiligen Gebiet dem arithmetischen Mittel aller Messungen. Die Tagessumme des Niederschlages im jeweiligen Gebiet am Tag des Ereignisses sowie an den letzten vier Tagen vor dem Ereignis wurde mit Hilfe der folgenden Gleichung ermittelt:

$$N_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^n x_j$$

Wobei	N_i	Tagessumme des Niederschlages [mm] im Gebiet i ($i = 1, \dots, 27$)
	n_i	Anzahl Messstationen [-] im Gebiet i ($3 \leq n_i \leq 5$)
	x_j	Tagessumme des Niederschlages [mm] an der Messstation j ($j = 1, \dots, 5$) im Gebiet i ($i = 1, \dots, 27$)

- Stationen des Niederschlagsmessnetzes (NIME)

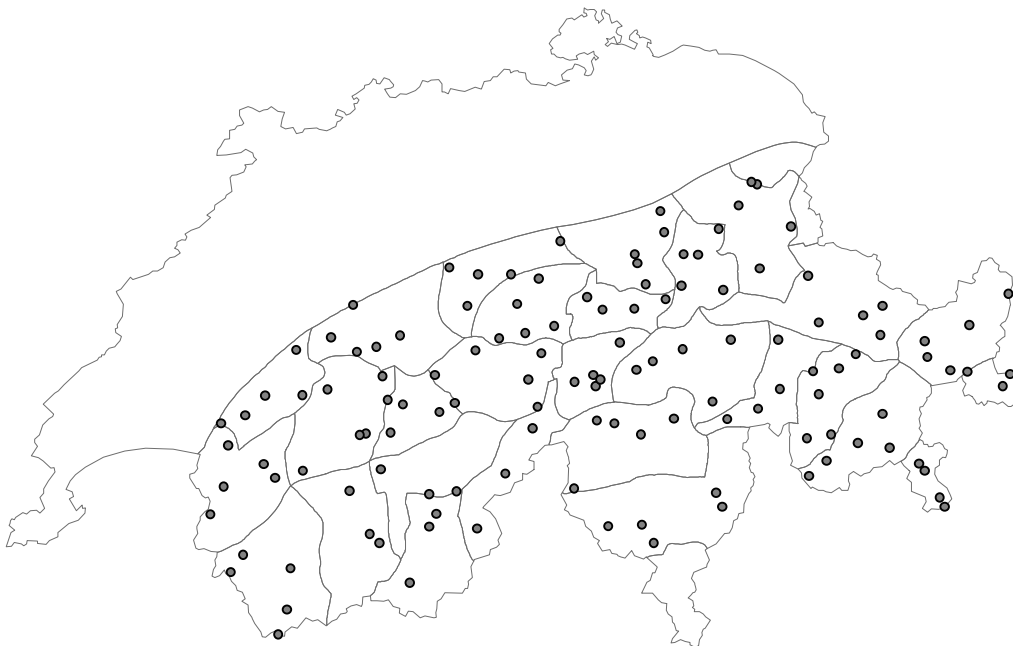


Abb. 3-4: Räumliche Verteilung der Messstationen des Niederschlagsmessnetzes (NIME) im Untersuchungsgebiet.

Wind

Die mittlere Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu. Am höchsten ist die Windgeschwindigkeit auf isolierten Gipfeln und Gräten, in Tälern und Mulden dazwischen ist der Wind oft nicht stärker als im Tiefland (Landolt, 2003). Sowohl die Windstärke als auch die Windrichtung hängen jedoch sehr von der Topographie einer Gegend ab. Aus diesem Grund ist die Interpolation der Windgeschwindigkeit sehr schwierig.

Grundlage für die Interpolation der mittleren und maximalen Windgeschwindigkeit an der Anrissstelle am Tag des Ereignisses sowie an den letzten vier Tagen vor dem Ereignis, bilden die jeweiligen drei nächstgelegenen SDM-Messstationen. Nach Gabl (1988) genügt es, die in Tabelle 3-2 dargestellte vereinfachte Windgeschwindigkeitsskala für praktische Abschätzungen zu verwenden. Die an den drei SDM-Stationen gemessenen täglichen mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten wurden nach der Skala von Gabl der entsprechenden Windkategorie zugeordnet. Als interpolierte mittlere bzw. maximale Windgeschwindigkeit wurde diejenige Windkategorie ausgewählt welche die an den drei Messstationen gemessenen Windstärken am besten wiedergibt. Wenn zum Beispiel die am Tag des Ereignisses an den drei Stationen gemessene mittleren Windgeschwindigkeiten den Kategorien 3, 2 und 2 entsprachen, wurde die Windkategorie 2 als Tagesmittel der Windgeschwindigkeit an der Anrissstelle betrachtet. Wurde an den drei Messstationen die Windkategorien 1, 2 und 3 gemessen, wurde ebenfalls die Kategorie 2 als Tagesmittel der Windgeschwindigkeit an der Anrissstelle betrachtet. Zur Bestimmung der 3- bzw. 5-Tagesmittel und dem 3- bzw. 5-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit wurde das gleiche Prinzip angewendet.

Tab. 3-2: Vereinfachte Windskala nach Gabl (1988).

Windkategorie	Windgeschwindigkeit [m/s]	Beschreibung
0	0	Windstille, Kalme, Rauch steigt senkrecht empor
1	1 – 3	Schwache Winde, im Gesicht spürbar
2	4 – 8	Mässige Winde, bewegt Flaggen, beginnende Schneeverfrachtung
3	9 – 17	Starke Winde, Pfeifen in Gipfelkreuzverankerungen
4	über 17	Stürmische Winde, hindern beim Gehen, erhebliche Schneeverfrachtung

Gesamtschneehöhe

Die Regionalisierung der Gesamtschneehöhe wurde mit Hilfe des sogenannten „Schneehöhenverteilungsmodells“ (Auer, 2003) durchgeführt. Dieses Modell wurde am SLF entwickelt, um mittlere monatliche Schneehöhen im Relief graphisch darzustellen.

Insgesamt wurden 173 Messstationen in die Berechnungen miteinbezogen: 63 SLF-Vergleichsstationen, 29 SLF-Messstellen, 25 IMIS-Stationen und 56 SDM-Stationen (25

KLIMA-, 22 ANETZ- und 9 ENET-Stationen). Es ist dabei zu beachten, dass die IMIS- und ENET-Messnetze erst in den 1990er Jahren aufgebaut wurden. Die Messwerte dieser Stationen konnten dementsprechend erst ab dem Jahr der Inbetriebnahme der jeweiligen Station in die Berechnung miteinbezogen werden.

Das Berechnungsmodell besteht aus zwei Teilen, dem Grundwert und dem Ausgleichswert (Auer, 2003):

$$HS = G + A$$

Wobei	HS	Gesamtschneehöhe HS [cm]
	G	Grundwert [cm]
	A	Ausgleichswert [cm]

Der Grundwert beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Schneeparameter und der Höhe über Meer. Das Modell bietet zwei verschiedene Ansätze an um diesen Zusammenhang zu beschreiben: eine Potenzfunktion und eine zweiteilige lineare Funktion (Auer, 2003). Die Potenzfunktion der Form:

$$G = f(x) = ax^n$$

Wobei x Höhe über Meer [m] der Anrisszone

erklärt den Bereich unterhalb 3000 m ü. M. sehr gut, oberhalb dieser Höhenlage steigt die Funktion jedoch zu stark an, d.h. der Höhengradient ist dann zu hoch. Für Höhenlagen oberhalb 3000 m ü. M. übernimmt deshalb das Modell einfach den Wert von 3000 m ü. M. Der zweite Ansatz berechnet den Grundwert mit einer zweiteilig linearen Funktion, wobei die Grenze zwischen 1300 und 1500 m ü. M. verläuft:

$$G_1 = f_1(x) = a_1 + b_1x \quad \text{für } x < 1300 \text{ bzw. } 1500 \text{ m ü. M.}$$

$$G_2 = f_2(x) = a_2 + b_2x \quad \text{für } x > 1300 \text{ bzw. } 1500 \text{ m ü. M.}$$

Dabei werden alle Messstationen die unterhalb bzw. oberhalb der Grenze liegen zusammengefasst und mit je einer linearen Regression beschrieben.

Da keine Anrisszone oberhalb von 3000 m ü. M. liegt, ist die Anwendung beider Ansätze möglich. Um zu bestimmen, welcher Ansatz für die Berechnung des Grundwertes der Gesamtschneehöhe besser geeignet ist, wurden deren Bestimmtheitsmasse verglichen. Dafür wurde der Zusammenhang zwischen der Gesamtschneehöhe und der Höhe über

Meer an sechs verschiedenen Tagen mit den beiden Ansätzen ermittelt. Bei der Wahl dieser Tage wurde darauf geachtet, dass jeder Wintermonat vertreten ist, innerhalb des Monats wurde der Tag zufällig ausgewählt. Es wurde dabei ersichtlich, dass die Potenzfunktion den Zusammenhang zwischen der Gesamtschneehöhe und der Höhe über Meer besser erklärt (s. Tab. 3-3). Dementsprechend wurde der Potenzansatz für die Berechnung des Grundwertes der Gesamtschneehöhe gegenüber dem linearen Ansatz bevorzugt.

Tab. 3-3: Vergleich der zwei Ansätze Potenzfunktion und zweiteilig lineare Funktion zur Berechnung des Grundwertes der Gesamtschneehöhe. Für sechs Tage wurde der Grundwert mit der Potenzfunktion (G) und mit der zweiteilig linearen Funktion (G_1, G_2) sowie den entsprechenden Bestimmtheitsmassen (R^2) ermittelt. Der Bestimmtheitsgrad der Potenzfunktion ist dabei immer höher, als derjenige der linearen Funktion.

Tag	R^2		
	$G(HS) = ax^n$	$G_1(HS) = a_1 + b_1x$	$G_2(HS) = a_2 + b_2x$
29.11.1987	0.63	0.44	0.27
18.12.2005	0.67	0.52	0.05
13.01.1986	0.55	0.20	0.17
08.02.1999	0.67	0.53	0.07
01.03.2004	0.82	0.46	0.27
01.04.1995	0.44	0.26	0.05

Die Höhe über Meer ist zwar ausschlaggebend für die Schneeverteilung, regionale Faktoren spielen dabei jedoch ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Interpolation der Schneeparameter sollte unter Einbezug der umliegenden Stationswerte erfolgen, damit diese regionalen Verhältnisse zum Ausdruck kommen. Dementsprechend wird das Modell durch einen regionalen, distanzgewichteten Korrekturwert ergänzt, den Ausgleichswert (Auer, 2003):

$$A = \frac{x}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{a_i}} * \sum_{i=1}^3 \left[\frac{1}{a_i} \frac{(s_i - G(h_i))}{h_i} \right]$$

Wobei	A	Ausgleichswert [cm]
	x	Höhe über Meer [m] der Anrisszone
	a_i	Distanz [km] zwischen der Messstation i ($i = 1, \dots, 3$) und der Anrisszone
	s_i	An der Station i gemessene Gesamtschneehöhe [cm]

h_i	Höhe über Meer [m] der Messstation i
$G(h_i)$	Berechneter Grundwert zur Höhe über Meer der Station i [cm]

Dabei werden die Abweichungen zwischen den an den drei nächst gelegenen Stationen gemessenen Werten und den an der jeweiligen Stationshöhe berechneten Grundwerten bestimmt. Diese werden umgekehrt proportional zu den Distanzen zwischen der Anrisszone und den Stationen und in Abhängigkeit der Höhendifferenz gewichtet (Auer, 2003).

Neuschneehöhe

Zur Interpolation der Neuschneehöhe wurden die gleichen sieben SLF-Regionen wie bei der Interpolation der Lufttemperatur betrachtet (s. Abb. 3-3). Für jede Lawine wurde diejenige SLF-Vergleichsstation oder –Messstelle ausgewählt, die in der gleichen Region liegt und den kleinsten Höhenunterschied zur Anrissstelle aufweist. Es wurde dann angenommen, dass die an dieser Station gemessene Neuschneehöhe, der Neuschneehöhe an der Lawinenanrissstelle entspricht. Für zwei Lawinen der Region 7, deren Anrissstelle tief gelegen war, wurden die Neuschneewerte der SDM-Station von Sion (SIO) herangezogen. Dies, weil der Höhenunterschied zur tiefstgelegenen SLF-Messstation sehr gross war.

3.3 Statistische Datenauswertung

3.3.1 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse umfasst Methoden zur Klassenbildung. Das Ziel ist die Aufteilung eines mehrdimensionalen Datensatzes in zwei oder mehrere Klassen oder Cluster. Die Objekte die demselben Cluster zugeordnet werden, sollten sich möglichst ähnlich sein. Die Objekte, die verschiedenen Clusters zugewiesen werden, sollten sich möglichst deutlich unterscheiden (Kaufmann & Pape, 1996). Clusteranalysen können sowohl zur Datenbeschreibung als auch zur Hypothesenüberprüfung verwendet werden (Gore, 1999). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Clusteranalyse eingesetzt um zu überprüfen ob sich anhand von Witterungs- und Schneeparametern Typen von Waldlawinen unterscheiden lassen.

Die Datenbank des Waldlawinenprojekts enthält auch Waldlawinen deren Grösse nicht bekannt ist. Es könnte sich dabei um kleine Rutsche (Laufänge kleiner als 50 m) handeln die nach der Arbeitsgruppe der Europäischen Lawinenwarndienste relativ harmlos für Personen sind. Um zu vermeiden, dass solche Rutsche die Resultate in hohem Mass beeinflussen, wurden diese aus dem Datensatz entfernt. Nur diejenigen Lawinen, die eine Laufänge von mindestens 50 m hatten, wurden in der Clusteranalyse miteinbezogen. Insgesamt sind dies 103 Waldlawinen, davon sind 45 WLP-Waldlawinen und 58 SLDB-Waldlawinen. Diese Lawinen wurden anhand von den 21 Witterungs- und Schneevariablen (s. Tab. 3-1) charakterisiert und klassifiziert. Da diese Variablen auf unterschiedlichen Skalen gemessen wurden, sind sie nach der Empfehlung von Leyer & Wesche (2007) vor der Clusteranalyse mithilfe einer z-Transformation standardisiert worden.

Als Klassifikationsstrategie wurden in dieser Arbeit hierarchisch-agglomerative Verfahren gewählt. Hierarchische Klassifikationsverfahren bauen eine Folge von Partitionen der Objektmenge $I = I_1, \dots, I_N$. Partitionierende Verfahren hingegen teilen die Objektmenge in eine bestimmte Menge k von Clustern auf (Kaufmann & Pape, 1996). Es wird zwischen agglomerativen und divisiven hierarchischen Verfahren unterschieden. Bei agglomerativen Verfahren werden am Anfang alle Objekte als ein Cluster betrachtet. Bei jedem Schritt werden dann zwei Cluster zu einem grösseren Cluster vereinigt, bis es nur noch ein Cluster gibt der alle Objekte umfasst. Divisive Verfahren gehen von einem Cluster aus der alle Objekte enthält. Dieser Cluster wird schrittweise in neue Cluster aufgeteilt, bis jeder Cluster nur noch ein Objekt enthält.

Das Klassifikationsergebnis hierarchischer Verfahren lässt sich graphisch als Dendrogramm darstellen. Diese Darstellung hat die Form eines Stammbaums. Die Wurzel entspricht dem Cluster, welcher die gesamte Datenmenge enthält. Die Blätter oder Endknoten repräsentieren Cluster, in denen sich jeweils nur ein Objekt befindet. Agglomerative Verfahren bauen das Dendrogramm von unten nach oben. Jeder Knoten entspricht einem Cluster in welchem sich alle Objekte, die zu den sich vom Knoten verzweigenden Ästen gehören, befinden. Die Länge der Vereinigungskante zwischen einem Knoten der i -ten Stufe und seinem Subknoten der $(i-1)$ -ten Stufe entspricht dem Abstand zwischen den beiden Objektmengen. Je kürzer die Vereinigungskante, desto kompakter ist das Vereinigungscluster, je länger die Kante, desto ausgedehnter der Cluster.

Meistens werden die Knoten nicht als Punkte sondern als zu den Vereinigungskanten senkrechte Linien dargestellt.

Die Euklidische Distanz wurde als Distanzmass gewählt um die Ähnlichkeit oder Distanz zwischen den Objekten zu quantifizieren. Dieses Mass ist nach Leyer & Wesche (2007) für die Klassifikation von Objekten auf der Basis abiotischer Variablen günstig. Um den Abstand zwischen zwei Clustern zu definieren, bieten sich verschiedene Methoden an. Der Abstand zwischen zwei Clustern kann zum Beispiel als minimaler bzw. maximaler Abstand zweier Objekte aus je einem der Cluster (*Single-* bzw. *Complete-Linkage-Methode*) definiert werden oder als Mittelwert der Abstände zwischen allen Objektpaaren (*Average-Linkage-Methode*). Hier wurde die Methode von Ward den anderen Methoden vorgezogen. Wie bei der *Average-Linkage-Methode* werden auch bei der Methode von Ward alle Elemente in die Distanzberechnung miteinbezogen. Bei der Methode von Ward wird allerdings nicht der Mittelwert der Distanzen innerhalb des Clusters, sondern die Summe der Abweichungsquadrate innerhalb des Clusters betrachtet. Die Cluster werden dann so vereinigt, dass die Summe der Abweichungsquadrate innerhalb der neuen Cluster möglichst gering bleibt. Die Methode von Ward liefert meist klarere Dendrogramme als die *Average-Linkage-Methode*, bei der im Dendrogramm manchmal treppenartige Strukturen entstehen und die Interpretation erschweren (Leyer & Wesche, 2007).

Nach der Durchführung des Klassifikationsverfahrens stellt sich die Frage wie viele Cluster interpretiert werden sollen, d.h. wo das Dendrogramm durchschnitten werden soll. Diese Entscheidung wurde mithilfe der Regel von Mojena (1977) getroffen. Mojena empfiehlt das Dendrogramm bei der ersten Stufe j mit $j = 1, \dots, n$ Cluster durchzuschneiden, die die folgende Bedingung erfüllt:

$$\alpha_j > \bar{\alpha} + ks_\alpha$$

Wobei	α_j	Abstandswert bei der Stufe j
	$\bar{\alpha}$	Mittelwert der α -Verteilung
	s_α	Standardabweichung der α -Verteilung
	k	Konstante

Nach Mojena sollte der Konstanten k ein Wert zwischen 2.75 und 3.50 zugewiesen werden.

Der agglomerative Koeffizient eines Klassifikationsverfahrens beschreibt die Stärke der Clusterung und kann einen Wert zwischen null und eins annehmen. Ein kleiner agglomerativer Koeffizient bedeutet, dass keine natürliche Struktur innerhalb der Objektmenge gefunden wurde. Es wurden also keine klaren Cluster gefunden. Je näher an eins der Wert des Koeffizientes liegt, desto klarer ist die Struktur innerhalb der Objektmenge. Dies bedeutet aber nicht, dass die „richtigen“ Cluster gefunden wurden (Kaufman & Rousseeuw, 1990). Nach Leyer & Wesche (2007) kann es als Hinweis auf eine stabile Klassifikation gedeutet werden, wenn verschiedene Methoden zu ähnlichen Ergebnissen führen. Um die Stabilität der Klassifikation anhand der Methode von Ward zu überprüfen, wurde diese mit einer Klassifikation anhand der *Average-Linkage*-Methode verglichen.

3.3.2 Biplot und Hauptkomponentenanalyse

Der Biplot ist das Streudiagramm der multivariaten Datenanalyse. In einem Biplot werden die Objekte und die Variablen eines mehrdimensionalen Datensatzes in einem meistens auf zwei Dimensionen reduzierten Raum dargestellt (Gower & Hand, 1996). Biplots sind sehr hilfreich um sowohl Daten, als auch Resultate einer Analyse graphisch darzustellen. Die Hauptkomponentenanalyse ist eine Methode zur Reduktion einer grösseren Menge untereinander korrelierter Variablen auf einige wenige. Dabei werden die Variablen linear zu untereinander unkorrelierten neuen Variablen, den sogenannten Hauptkomponenten, transformiert (Brachinger & Ost, 1996). Die Hauptkomponenten sind abstrakte Achsen, die durch die Variable in jeweils unterschiedlich starkem Mass bestimmt werden.

Als Achse eines Biplots werden Hauptkomponenten gewählt, die nicht miteinander korreliert sind und möglichst viel der Gesamtvarianz abbilden (Leyer & Wesche, 2007). Der prozentuale Anteil an erklärter Varianz gibt an, wie viel von der Gesamtvarianz eine Hauptkomponente abbildet. Die Variablen werden als Vektoren im neuen Koordinatensystem dargestellt. Die Korrelation einer Variablen mit einer Hauptkomponente wird Ladung genannt. Je höher die Ladung einer Variable auf einer Hauptkomponente, desto stärker nimmt sie in Richtung der Komponente zu. Die Länge der Vektoren ist wegen der Standardisierung der Variablen vergleichbar. Der Winkel zwischen zwei Vektoren hängt von der Korrelation zwischen den beiden durch den Vektoren repräsentierten Variablen ab. Sind die Variablen positiv korreliert, ist der Winkel kleiner

als 90° . Je kleiner der Winkel, desto höher die Korrelation. Sind die Variablen negativ korreliert, ist der Winkel grösser als 90° . Ein Winkel von 90° bedeutet, dass die Variablen überhaupt nicht miteinander korreliert sind. Die Objekte werden als Punkte im Biplot eingetragen.

3.3.3 Klassifikationsbäume

Klassifikations- und Regressionsbäume (engl. *Classification And Regression Trees, CART*) sind nicht-parametrische Verfahren zur rekursiven Partitionierung von Daten. In den letzten Jahren wurde diese Methode sowohl zur Beschreibung von Daten als auch zur Entwicklung von Prognosemodellen, mehrmals in der Lawinenforschung eingesetzt (vgl. Davis et al., 1999; Jones & Jamieson, 2001; Hendrikx et al., 2005; Kronholm et al., 2006). Unter der Annahme, dass sich Waldlawinen nur dann ereignen wenn die allgemeine Lawinensituation kritisch ist, wurden Klassifikationsbäume in dieser Arbeit dazu verwendet, die Kriterien nach denen sich eine allgemeine gefährliche Lawinensituation von einer Situation bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, zu identifizieren. In einem ersten Schritt wurde ein allgemeiner Klassifikationsbaum anhand aller 185 Waldlawinen (126 WLP-Waldlawinen und 59 SLDB-Waldlawinen) und aller 185 Freilandlawinen erstellt. In einem zweiten Schritt wurden spezifische Klassifikationsbäume für die in der Clusteranalyse identifizierten Waldlawinenklassen entwickelt.

Klassifikations- und Regressionsbäume erklären die Streuung einer Zielvariablen (engl. *response variable*) anhand einer oder mehrerer erklärender Variablen (engl. *explanatory variables*). Dabei ist die Zielvariable entweder kategorial (Klassifikationsbäume) oder metrisch (Regressionsbäume) und die erklärende Variablen kategorial und/oder metrisch (De Ath & Fabricius, 2000). In dieser Arbeit wurden ausschliesslich binäre Klassifikationsbäume entwickelt. Die kategoriale Zielvariable beschreibt das Vorkommen von Waldlawinen bei einer allgemein gefährlichen Lawinensituation, also einer Situation bei der Freilandlawinen losbrechen. Die Zielvariable kann die Werte 1 (Ereignis mit Waldlawine) oder 0 (Ereignis ohne Waldlawine) annehmen. Als erklärende Variablen gelten die 21 Wetter- und Schneevariablen (s. Tab. 3-1). Ein Klassifikationsbaum entsteht schrittweise bei sukzessiver Verzweigung (engl. *split*) des Datensatzes (Breiman et al., 1998; Fahrmeir et al., 1996). In einem ersten Schritt wird der Datensatz aufgrund einer

erklärenden Variablen in zwei, in sich möglichst homogene und zueinander möglichst heterogene Teildatensätze gesplittet. Dabei werden diejenige Splitvariable und derjenige Splitpoint (bei metrischen Variablen: „größer als“ oder „kleiner als“ ein bestimmter Wert) gesucht, welche diese Kriterien am besten erfüllen. Die Verzweigungsstelle wird als Knoten (engl. *node*) bezeichnet. Der Gini-Index wird als Splitkriterium oder Mass für die Unreinheit (Heterogenität) eines Knotens benutzt. Die Daten werden weiter nach diesem Splitverfahren aufgeteilt, bis der Baum seine maximale Grösse erreicht hat. Die Grösse eines Baumes ist als die Anzahl Endknoten die er enthält definiert. Jede Endgruppe wird durch die Streuung der Zielvariablen innerhalb dieser Gruppe, die Grösse der Gruppe und den Wert der Zielvariablen, welcher die Gruppe definiert, charakterisiert. Die Fehlklassifikationsrate (engl. *misclassification error rate*) eines Baumes gibt den Anteil an falsch klassifizierten Daten an.

Klassifikationsbäume mit vielen Verzweigungen sind oft zu stark an den Datensatz, mit dem sie kalibriert wurden, angepasst (engl. *overfitted*). Dies ist vor allem bei der Verwendung von Klassifikationsbäumen als Prognosemodelle für neue Daten problematisch. Um das Problem der Überanpassung zu umgehen, wurde der maximale „over-fitted“ Klassifikationsbaum T_{\max} durch Kosten-Komplexitäts-Beschneidung (engl. *cost-complexity pruning*) nach Breimann et al. (1998), auf die wesentliche Information reduziert. Die Kosten-Komplexität-Beschneidung liefert eine absteigende Reihenfolge beschnittener Subbäume aller möglichen Grössen von T_{\max} . Jeder Subbaum T_i dieser Folge ist der beste Subbaum der entsprechenden Grösse. Aus dieser vorselektierten Hierarchie wurde der „beste“ Baum durch Schätzung der Prognosegüte ausgewählt. Als Schätzmethode wurde die X-fache Kreuzvalidierung (engl. *X-fold cross-validation*) von Breiman et al. (1998) verwendet. Dabei wird der Datensatz in X ungefähr gleich grosse Untermengen zerlegt. X-1 Untermengen, die Lernstichprobe, werden dazu verwendet den Baum zu erstellen und eine Untermenge, die Validierungsstichprobe, wird zum Testen der Prognosegüte des Baumes eingesetzt. Das gleiche Verfahren wird neunmal wiederholt, wobei jede Untermenge einmal als Validierungsstichprobe verwendet wird. Am Ende wird der relative Fehler der Kreuzvalidierung (engl. *x-val Relative Error*) berechnet. Der Prozess wird für jede mögliche Baumgrösse wiederholt. Der Baum mit dem kleinsten relativen Fehler der Kreuzvalidierung wird als „bester“ Baum gewählt. Alternativ kann die *ISE-rule* von Breiman et al. (1998) angewendet werden. Danach ist der „beste“ Baum jeweils der kleinste Baum dessen relativer Fehler der Kreuzvalidierung, den minimalen

relativen Fehler der Kreuzvalidierung plus einmal deren Standardabweichung nicht übertrifft. Die Klassifikationsbäume wurden nach Empfehlung von Venables & Ripley (2002) mit der *rpart library* in S-Plus erstellt.

4 Resultate

4.1 Clusteranalyse

4.1.1 Klassifikationsverfahren

Das Dendrogramm zum hierarchisch-agglomerativen Klassifikationsverfahren ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Auf der linken Achse ist der Abstand zwischen den Objekten bzw. den Clustern aufgetragen. Der agglomerative Koeffizient dieses Klassifikationsverfahrens ist mit 0.94 sehr hoch. Die gestrichelten Linien entsprechen dem kritischen Wert α_j nach der Regel von Mojena mit $k = 2.75$ (untere Linie) und $k = 3.00$ (obere Linie). Nach dieser Regel kann dieses Dendrogramm entweder bei Stufe 2 oder bei Stufe 3 durchgeschnitten werden.

Der Vergleich der Methode von Ward mit der *Average-Linkage*-Methode deutet darauf hin, dass die Aufteilung der Objektmenge in zwei Cluster eine stabilere Klassifikation liefert als die Aufteilung in drei Cluster. Bei einer Aufteilung der Objekte in zwei Cluster liefern beide Methoden sehr ähnliche Resultate. Nur acht Objekte werden anders klassifiziert. Bei der Aufteilung in drei Cluster sind die Resultate hingegen sehr unterschiedlich. Während die Methode von Ward Cluster mit jeweils 17, 38 und 48 Objekten bildet, bildet die *Average-Linkage*-Methode Cluster mit jeweils 43, 4 und 56 Objekten. Aus diesem Grund wird die Aufteilung der Objektmenge in zwei Cluster als die bessere Klassifikation betrachtet. Im Weiteren werden die zwei Cluster, welche sich nach der Methode von Ward herausgebildet haben, beschrieben. Cluster 1 (links im Dendrogramm) enthält 55 Walddlawinen, Cluster 2 (rechts im Dendrogramm) 48.

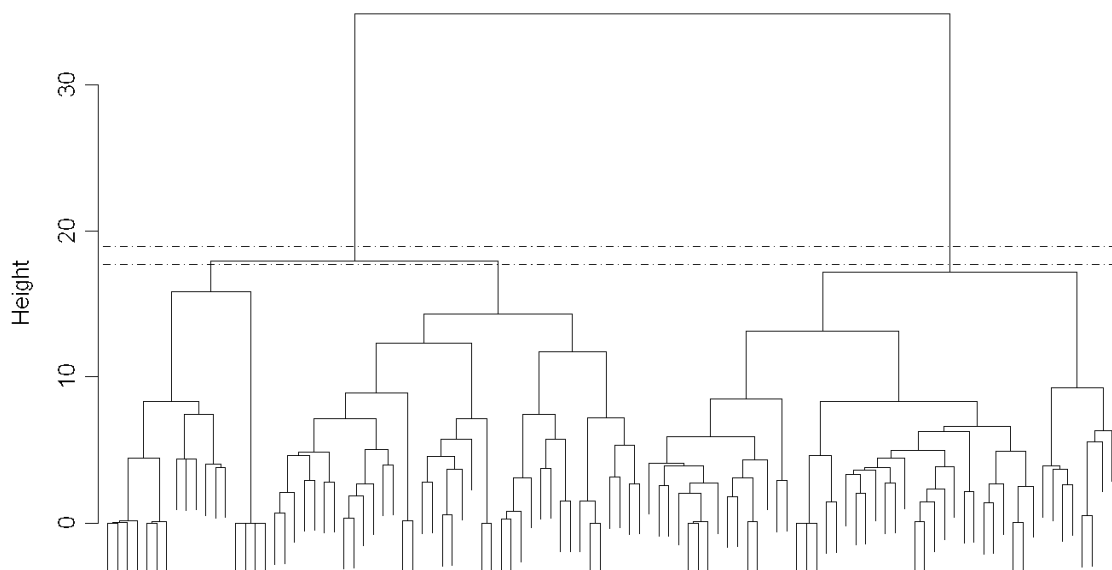


Abb. 4-1: Dendrogramm. Resultat des hierarchisch-agglomerativen Klassifikationsverfahrens zur Klassifikation der 103 Waldlawinen (45 WLP-Waldlawinen und 58 SLDB-Waldlawinen) basierend auf der Methode von Ward. Dieses Klassifikationsverfahren weist einen agglomerativen Koeffizienten von 0.94 auf. Die gestrichelten Linien entsprechen dem kritischen Wert α_j nach der Regel von Mojena mit $k = 2.75$ (untere Linie, $\alpha_j = 17.70$) und $k = 3.00$ (obere Linie, $\alpha_j = 18.92$).

4.1.2 Beschreibung der Cluster

Der Biplot in Abbildung 4-2 verschafft einen allgemeinen Überblick über die Ergebnisse des Klassifikationsverfahrens. Zusammen erklären die ersten beiden Hauptkomponenten 54.3 % der Gesamtvarianz. Die erste Hauptkomponente wird vor allem von den Variablen HN5 (5-Tagessumme des Neuschnees), HN3 (3-Tagessumme des Neuschnees), S5 (5-Tagessumme der Sonnenscheindauer) und S3 (3-Tagessumme der Sonnenscheindauer) bestimmt, die zweite Hauptkomponente von den Variablen ΔT_{a5} (5-Tages-Lufttemperaturdifferenz), T_{a1} (1-Tagesmittel der Lufttemperatur), N1 (1-Tagessumme des Niederschlages) und W3 (3-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit).

Cluster 1 und 2 unterscheiden sich graphisch ziemlich gut voneinander. Die Objekte die zu Cluster 1 gehören sind eher auf der rechten Seite des Biplots gruppiert, die Objekte die zu Cluster 2 gehören eher zur linken Seite. Anhand des Biplots lassen sich vor allem folgende Tendenzen erkennen. Die Objekte von Cluster 1 werden durch mehr Niederschläge und stärkere Winde charakterisiert. Die Objekte von Cluster 2 zeichnen sich durch mehr

Sonneneinstrahlung und höhere Lufttemperaturen aus. Die Zusammenhänge zwischen den beiden Clustern und den einzelnen Wetter- und Schneevariablen werden in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. Die Cluster werden ebenfalls anhand der Variablen, die im Klassifikationsverfahren nicht involviert wurden, charakterisiert. Es handelt sich um die Höhe über Meer, die Exposition der Anrisszone, den Zeitpunkt der Lawine und den Waldtyp in der Anrisszone.

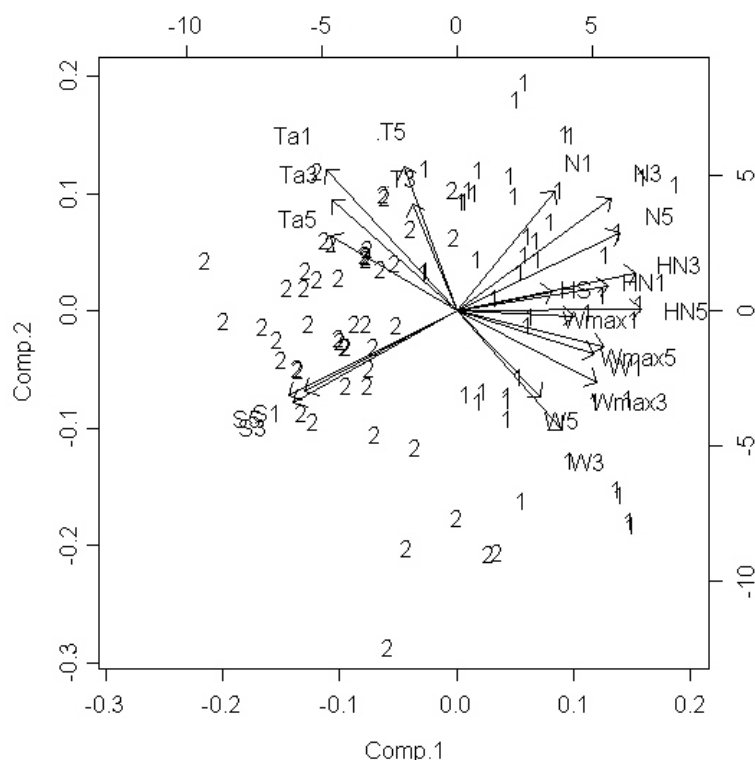


Abb. 4-2: Biplot. Jede Waldlawine wird durch die Ziffer 1 oder 2 gekennzeichnet je nachdem zu welchem Cluster sie gehört. Die Variablen werden anhand von Vektoren dargestellt. Die erste Hauptkomponente erklärt 38.5 % der Gesamtvarianz, die zweite Hauptkomponente 15.8 %.

Lufttemperatur

Cluster 1 zeichnet sich durch andauernde kalte Verhältnisse aus. Mehr als drei Viertel der Lawinen ereigneten sich bei einem Tagesmittel der Temperatur am Tag des Ereignisses von kleiner 0°C , im Durchschnitt -3.3°C (s. Abb. 4-3). Das obere Quartil der Variablen T_{a3} und T_{a5} liegt ebenfalls im Bereich der Minustemperaturen.

Cluster 2 lässt sich nicht anhand durchschnittlicher Temperaturen charakterisieren. Lawinen fanden sowohl bei positivem als auch bei negativem 1-Tagesmittel der

Temperatur statt. Der Mittelwert liegt bei ca. 0° C. Die Variablen T_{a3} und T_{a5} weisen ebenfalls ein breites Temperaturspektrum auf mit jeweils mehr als 15° C Unterschied zwischen dem kleinsten und dem grössten Wert.

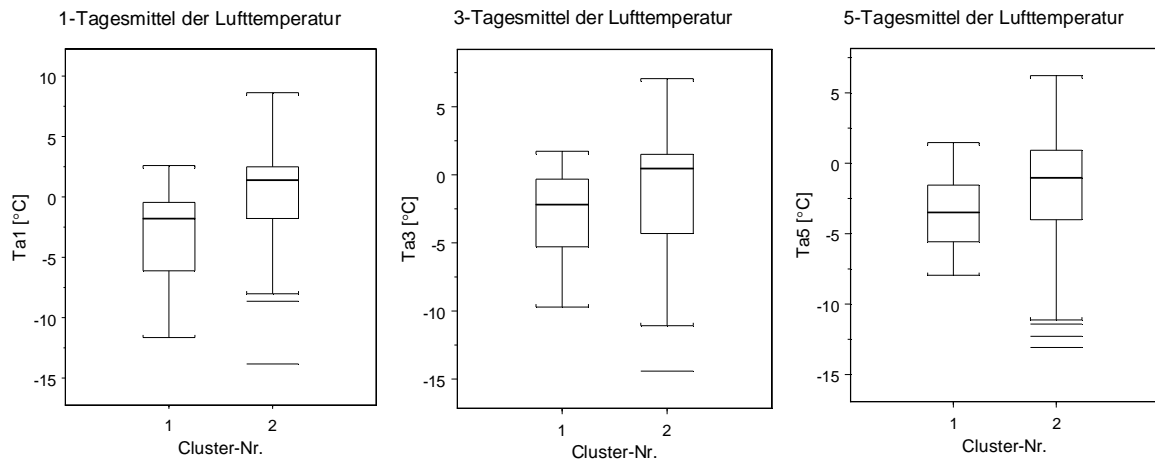


Abb. 4-3: Verteilung der Variablen T_{a1} (1-Tagesmittel der Temperatur), T_{a3} (3-Tagesmittel der Temperatur) und T_{a5} (5-Tagesmittel der Temperatur) in ° C innerhalb der Cluster 1 und 2.

In Cluster 2 fanden mehr als 75 % der Lawinen nach einer Erwärmung statt (s. Abb. 4-4). Die unteren Quartile der Variablen ΔT_{a3} und ΔT_{a5} liegen beide oberhalb von 0°, also bei einer positiven Temperaturdifferenz. Eine Erwärmung um 1 bis ca. 4° zwischen dem zweitletzten Tag vor dem Ereignis und dem Tag des Ereignisses wurde bei der Hälfte der Lawinen festgestellt. In Cluster 1 hingegen liegt der Median der Variable ΔT_{a3} bei ca. 0°. Es fanden gleich viele Lawinen nach einer Erwärmung wie nach einer Abkühlung zwischen dem zweitletzten Tag vor dem Ereignis und dem Tag des Ereignisses statt.

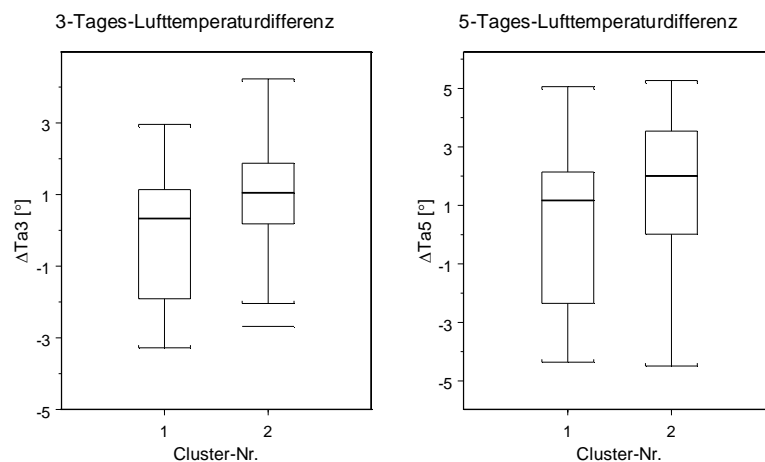


Abb. 4-4: Verteilung der Variablen ΔT_{a3} (3-Tages-Lufttemperaturdifferenz) und ΔT_{a5} (5-Tages-Lufttemperaturdifferenz) in ° innerhalb der Cluster 1 und 2.

Sonnenscheindauer

Cluster 1 und 2 unterscheiden sich deutlich anhand der Sonnenscheindauer. In Cluster 1 ereigneten sich fast alle Lawinen an Tagen mit weniger als eine halbe Stunde Sonne (s. Abb. 4-5). Die Summe der Sonnenscheindauer über den Tag des Ereignisses sowie die zwei bzw. vier letzten Tage vor dem Ereignis (S3 bzw. S5) ist ebenfalls sehr gering. Die Mittelwerte der Variablen S3 und S5 betragen 65 bzw. 208 min. Nur wenige Ausreisser nehmen bei S3 Werte grösser als ca. 250 min und bei S5 grösser als 500 min an.

In Clusters 2 fanden die Lawinen bei stärkerer Einstrahlung statt. Bei 75 % der Lawinen wurde am Tag des Ereignisses eine Sonnenscheindauer von mehr als zwei Stunden festgestellt, bei 50 % der Lawinen sogar von mehr als vier Stunden. S3 und S5 zeigen ebenfalls deutlich höhere Werte im Cluster 2 als im Cluster 1. Die Mittelwerte der Variablen S3 und S5 betragen 715 bzw. 1165 min.

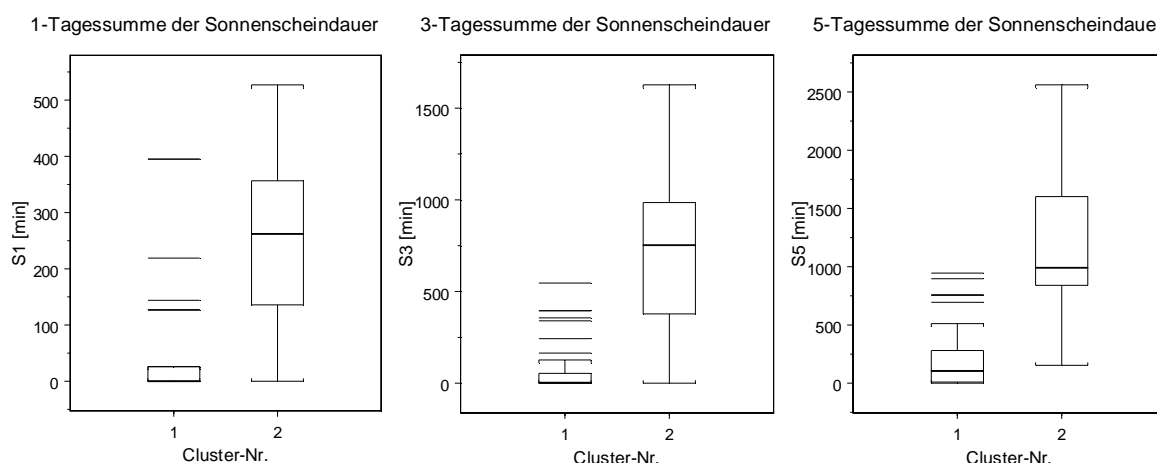


Abb. 4-5: Verteilung der Variablen S1 (1-Tagessumme der Sonnenscheindauer), S3 (3-Tagessumme der Sonnenscheindauer) und S5 (5-Tagessumme der Sonnenscheindauer) in min innerhalb der Cluster 1 und 2.

Niederschlag und Neuschneemenge

Im Gegensatz zu Cluster 2 fanden in Cluster 1 die Lawinen meistens nach Schneefällen statt. Bei 75 % der Lawinen wurde eine Neuschneesumme von mindestens 8 cm am Tag des Ereignisses, von mindestens 30 cm über den Tag des Ereignisses sowie die zwei letzten Tage vor dem Ereignis und von 47 cm über den Tag des Ereignisses sowie die vier letzten Tage vor dem Ereignis gemessen (s. Abb. 4-6). Im Durchschnitt ereigneten sich die Lawinen bei einer HN1 von 20 cm, einer HN3 von 60 cm und einer HN5 von 86 cm.

In Cluster 2 sind die Niederschlagsverhältnisse ganz anders. Am Tag des Ereignisses wurden nur ausnahmsweise Schneefälle beobachtet. Bei 50 % der Lawinen wurden hingegen einige Millimeter Niederschlag gemessen. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass es in manchen Fällen geregnet hat. Bei der Hälfte der Lawinen hat es am Tag des Ereignisses sowie innerhalb der zwei letzten Tage vor dem Ereignis ebenfalls nicht geschneit, bei der andere Hälfte weniger als 7 cm. Bei 50 % der Lawinen fielen am Tag des Ereignisses sowie innerhalb der vier letzten Tage vor dem Ereignis zwischen 9 und 55 cm Neuschnee.

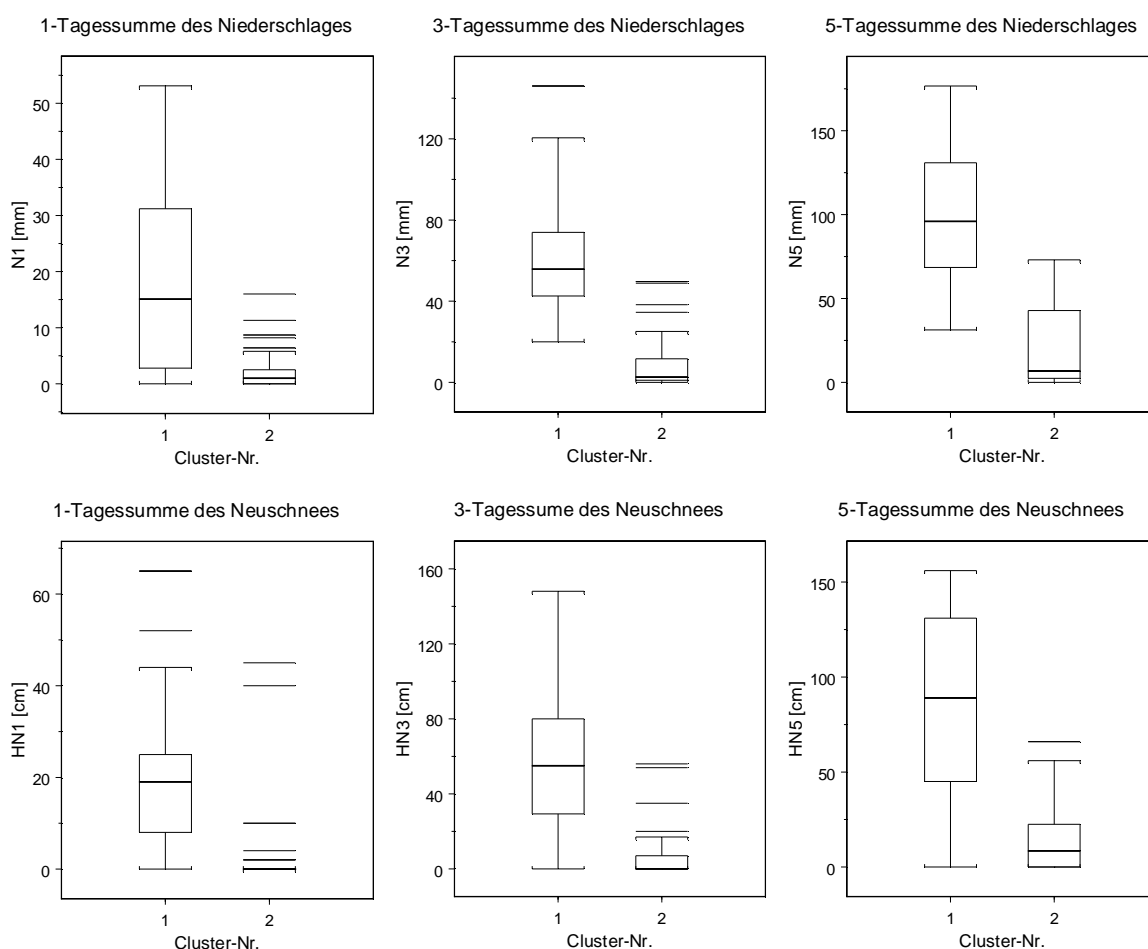


Abb. 4-6: Verteilung der Variablen N1 (1-Tagessumme des Niederschlages), N3 (3-Tagessumme des Niederschlages) und N5 (5-Tagessumme des Niederschlages) in mm (obere Zeile), HN1 (1-Tagessumme des Neuschnees), HN3 (3-Tagessumme des Neuschnees) und HN5 (5-Tagessumme des Neuschnees) in cm (untere Zeile) innerhalb der Cluster 1 und 2.

Wind

In Clusters 1 ereigneten sich die Lawinen bei stärkeren Winden als in Clusters 2. In Cluster 1 wurden am Tag des Ereignisses bei ca. 50 % der Lawinen mittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 3 m/s gemessen, bei den anderen 50 % Geschwindigkeiten zwischen 4 und 8 m/s (s. Abb. 4-7). Mässige mittlere Windgeschwindigkeiten (4 - 8 m/s) am Tag des Ereignisses sowie über die zwei bzw. vier letzten Tage vor dem Ereignis wurden bei 40 bzw. 33 % der Lawinen in Cluster 1 festgestellt. Bei allen anderen Lawinen dieses Clusters liegen W3 und W5 im Bereich der schwachen Windgeschwindigkeiten (0 – 3 m/s). In Cluster 2 liegen bei 90 % der Lawinen die mittleren Windgeschwindigkeiten, sowohl am Tag des Ereignisses als auch über die letzten zwei und vier Tage vor dem Ereignis, unter 3 m/s.

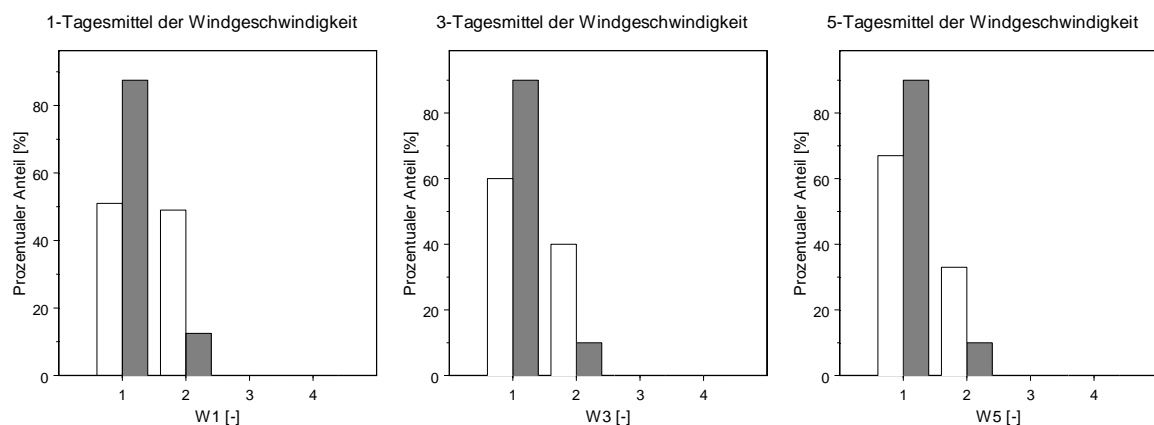


Abb. 4-7: Verteilungen der Variablen W1 (1-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit), W3 (3-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit) und W5 (5-Tagesmittel der Windgeschwindigkeit) innerhalb der Cluster 1 und 2. Die weissen Säulen entsprechen Cluster 1, die grauen Säulen Cluster 2. Kategorie 1 entspricht schwachen Windgeschwindigkeiten (0 - 3 m/s), Kategorie 2 mässigen Windgeschwindigkeiten (4 - 8 m/s), Kategorie 3 starken Windgeschwindigkeiten (9 - 17 m/s) und Kategorie 4 stürmischen Windgeschwindigkeiten (> 17 m/s).

In Cluster 1 wurden am Tag des Ereignisses oder innerhalb der letzten vier Tage vor dem Ereignis bei 75 % der Lawinen stürmische Windböen von mehr als 17 m/s gemessen (s. Abb. 4-8). Bei 27 % der Lawinen in Cluster 1 wurden sogar am Tag des Ereignisses stürmische Windböen festgestellt, bei 60 % der Lawinen am Tag des Ereignisses oder in den letzten zwei Tagen vor dem Ereignis. In Cluster 2 wurden nur bei 19 % der Lawinen stürmische Windböen am Tag des Ereignisses oder innerhalb der letzten vier Tage vor dem Ereignis gemessen, starke Windböen zwischen 9 und 17 m/s wurden jedoch bei mehr als

70 % der Lawinen am Tag des Ereignisses oder innerhalb der letzten zwei Tage vor dem Ereignis festgestellt.

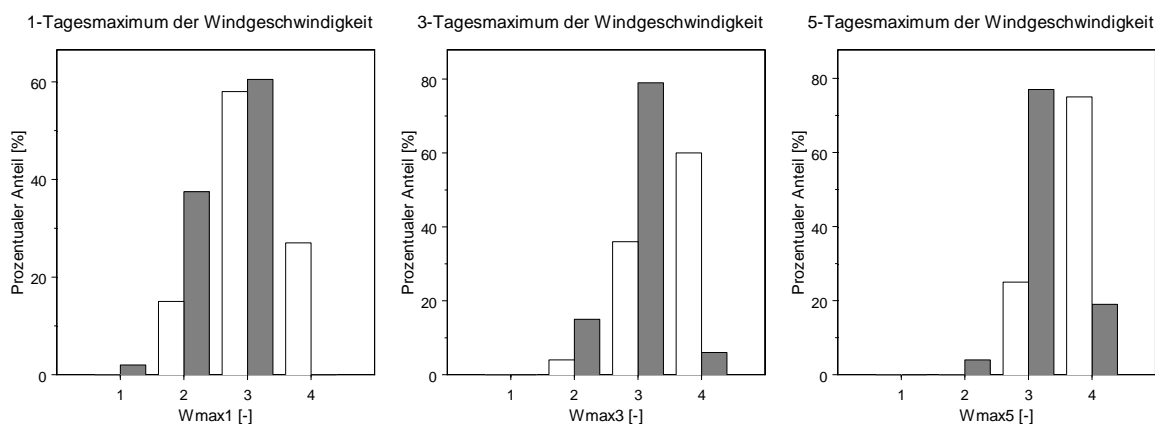


Abb. 4-8: Verteilungen der Variablen $W_{\max 1}$ (1-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit), $W_{\max 3}$ (3-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit) und $W_{\max 5}$ (5-Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit) innerhalb der Cluster 1 und 2. Die weissen Säulen entsprechen Cluster 1, die grauen Säulen Cluster 2. Kategorie 1 entspricht schwachen Windgeschwindigkeiten (0 - 3 m/s), Kategorie 2 mässigen Windgeschwindigkeiten (4 - 8 m/s), Kategorie 3 starken Windgeschwindigkeiten (9 - 17 m/s) und Kategorie 4 stürmischen Windgeschwindigkeiten (> 17 m/s).

Gesamtschneehöhe

In Cluster 1 fanden nur drei Lawinen bei einer Gesamtschneehöhe von weniger als 80 cm statt (s. Abb. 4-9). Im Durchschnitt war die Schneedecke am Tag der Lawine 154 cm mächtig. In Cluster 2 war die Schneedecke bei 50 % der Lawinen weniger als 81 cm mächtig. In beiden Clustern sind Schneehöhen von mehr als 2 m selten.

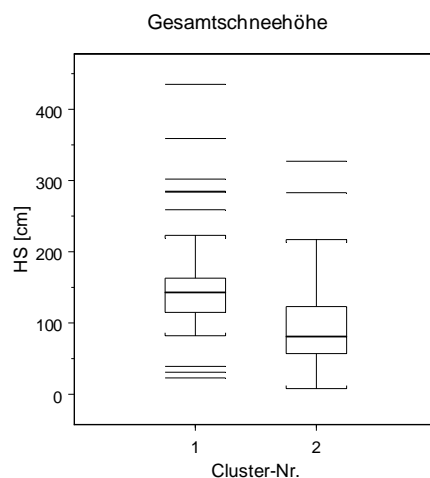


Abb. 4-9: Verteilung der Variable HS (Gesamtschneehöhe) in cm innerhalb der Cluster 1 und 2.

Höhe über Meer

In Cluster 1 fanden die Lawinen in höheren Lagen als in Cluster 2 statt. In Cluster 1 lagen 75 % der Anrisszonen oberhalb von 1500 m ü. M (s. Abb. 4-10). In Cluster 2 lagen 75 % der Anrisszonen zwischen 770 und 1440 m ü. M.

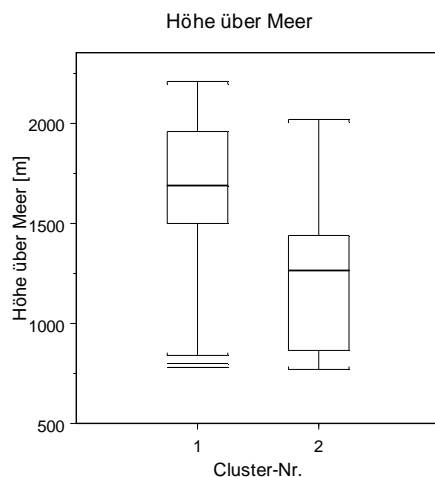


Abb. 4-10: Verteilung der Variable H (Höhe über Meer) in m innerhalb der Cluster 1 und 2.

Exposition

In Cluster 1 fanden 75 % der Lawinen in nordexponierten Lagen statt (s. Abb. 4-11). Die Hälfte der Anrisszonen waren NW- bis NO-exponiert. In Cluster 2 ereigneten sich genau soviel Lawinen an Nord- wie an Süd-exponierten Hängen. Anhand des Ost-West-Gradienten unterscheiden sich die beiden Cluster nicht deutlich.

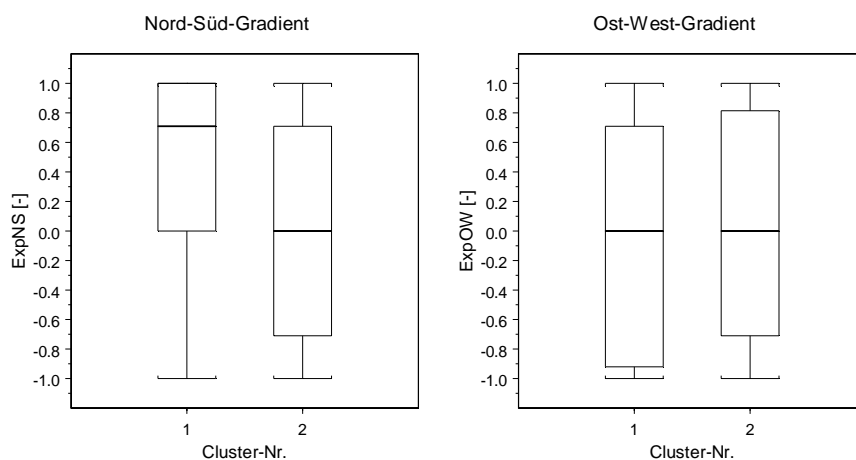


Abb. 4-11: Verteilung der Variablen ExpNS (Nord-Süd-Gradient) und ExpOW (Ost-West-Gradient) innerhalb der Cluster 1 und 2.

Waldtyp

In Cluster 1 ereigneten sich 73 % der Lawinen in immergrünen Nadelwäldern oder immergrünen & winterkahlen Nadelwäldern, 18 % ereigneten sich in Mischwäldern (s. Abb. 4-12). Es fanden selten Lawinen in Laubwäldern und winterkahlen Nadelwäldern statt. In Cluster 2 fanden 29 % der Lawinen in Laubwäldern, 17 % in Mischwäldern, 44 % in immergrünen oder immergrünen & winterkahlen und 10 % in winterkahlen Nadelwäldern statt.

Es ist hier zu beachten, dass bei den SLDB-Waldlawinen nicht zwischen wintergrünen und winterkahlen Nadelwäldern unterschieden wurde (s. Kapitel 3.2.1, S. 23). Diejenigen SLDB-Waldlawinen die in winterkahlen Nadelwäldern angerissen sind, sofern es solche gibt, wurden dem Waldtyp 3 zugeordnet. Dies könnte dazu beigetragen haben, dass nach Abbildung 4-12 so wenig Waldlawinen in winterkahlen Nadelwäldern angerissen sind.

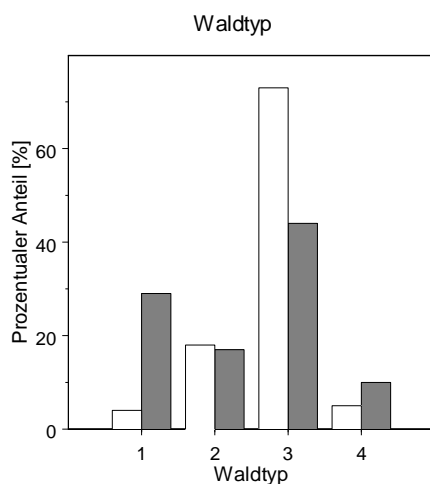


Abb. 4-12: Einteilung der Waldlawinen nach den Waldtypen Laubwald (Typ 1), Mischwald (Typ 2), Immergrüner Nadelwald / Immergrüner Nadelwald & winterkahler Nadelwald (Typ 3) und winterkahler Nadelwald (Typ 4). Die weissen Säulen entsprechen Cluster 1, die grauen Säulen Cluster 2.

Monat

Fast alle Waldlawinen fanden in den Monaten Januar, Februar und März statt (s. Abb. 4-13). In Cluster 1 fanden 64 % der Lawinen im Februar statt. In Cluster 2 ereigneten sich 31 % der Lawinen im Februar und 50 % im März.

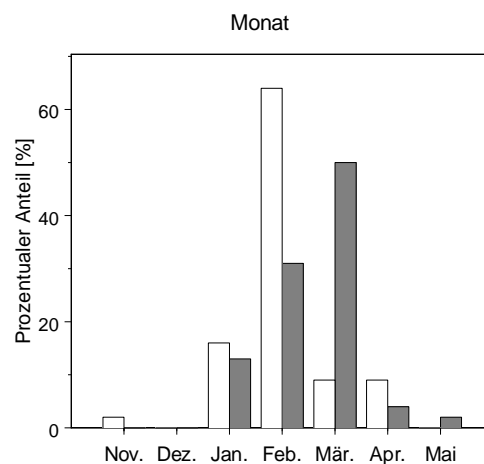


Abb. 4-13: Einteilung der Waldlawinen nach Monaten. Die weissen Säulen entsprechen Cluster 1, die grauen Säulen Cluster 2.

4.2 Klassifikationsbäume

4.2.1 Allgemeines Modell

Der *overfitted* Klassifikationsbaum T_{\max} , der 185 Ereignisse mit Waldlawine und 185 Ereignisse ohne Waldlawine klassifiziert, ist in Abbildung 4-14 dargestellt. Bei jedem Knoten werden diejenigen Ereignisse welche die Splitbedingung erfüllen links und diejenige die die Bedingung nicht erfüllen rechts eingeteilt. Insgesamt wurden sieben der 21 möglichen Kovariablen als Splitvariablen verwendet: N1, N5 (1- bzw. 5-Tagessumme des Niederschlages), T_a1 , T_a5 (1- bzw. 5-Tagesmittel der Lufttemperatur), HN3, HN5 (3- bzw. 5-Tagessumme des Neuschnees) und S5 (5-Tagessumme der Sonnenscheindauer). Im Baum T_{\max} sind die 370 Ereignisse in 15 Endgruppen aufgeteilt. Insgesamt weist der Baum T_{\max} eine Fehlklassifikationsrate von 11 %, d.h. 43 von 370 Ereignissen wurden einer falschen Klasse zugeteilt.

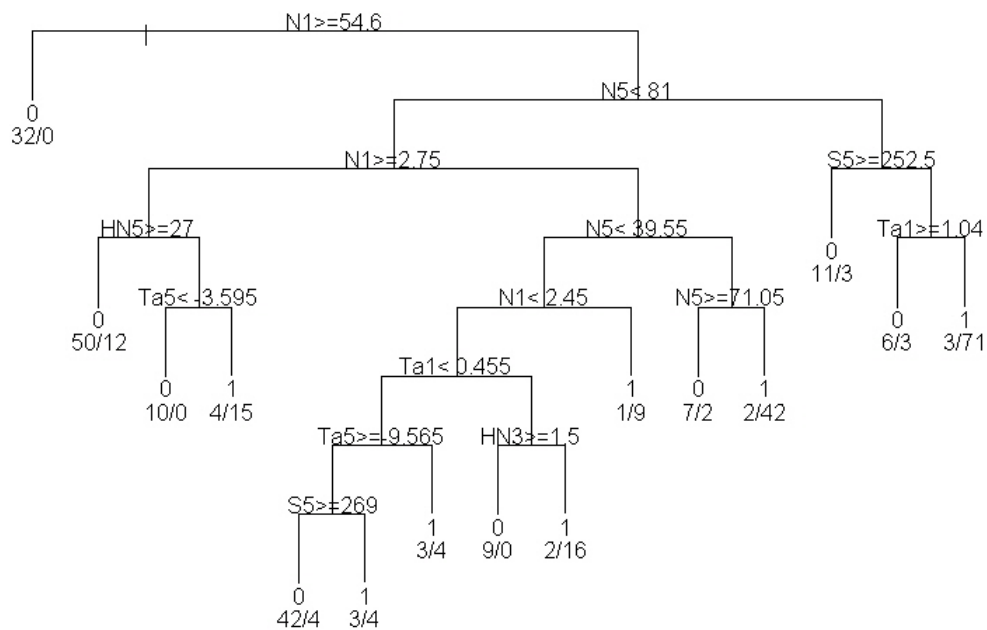


Abb. 4-14: Klassifikationsbaum T_{max} . Der Baum T_{max} klassifiziert 185 Ereignisse mit Waldlawinen (Klasse 1) und 185 Ereignisse ohne Waldlawinen (Klasse 0) mit einer Fehlklassifikationsrate von 11 %. Bei jedem Endknoten bezeichnet die obere Ziffer die Klasse der jeweiligen Endgruppe. Die Verteilung der Ereignisse zwischen den zwei Klassen innerhalb der Endgruppe wird in der Form n_0/n_1 angegeben.

Die Resultate der 10-fachen Kreuzvalidierung des Baumes T_{max} sind in Abbildung 4-15 dargestellt. Die obere Achse gibt die Baumgröße an, die untere Achse die entsprechenden Komplexitätsparameter (cp). Auf der linken Achse ist der relative Fehler der Kreuzvalidierung ($X-val$ Relative Error) aufgetragen. Der Baum der Größe 13 (T_{13}) hat den kleinsten relativen Fehler der Kreuzvalidierung und könnte dementsprechend als „bester“ Baum gewählt werden. Nach der *ISE-rule* wäre T_{11} der „beste“ Baum, weil T_{11} der erste Baum mit einem relativen Fehler der Kreuzvalidierung kleiner als 0.53 (relative Fehler der Kreuzvalidierung von T_{13} plus einmal deren Standardabweichung) ist.

Bei den Bäumen T_{11} und T_{13} werden die gleichen sieben Splitvariablen eingesetzt wie beim *over-fitted* Baum T_{max} . Baum T_{11} hat eine Fehlklassifikationsrate von 14 % gegenüber 12 % bei Baum T_{13} . Da Baum T_{13} eine tiefere Fehlklassifikationsrate als Baum T_{11} hat und genau so viele Splitvariablen wie Baum T_{11} benötigt, wird er hier als optimaler Klassifikationsbaum gewählt. Dieser wird in Abbildung 4-16 dargestellt.

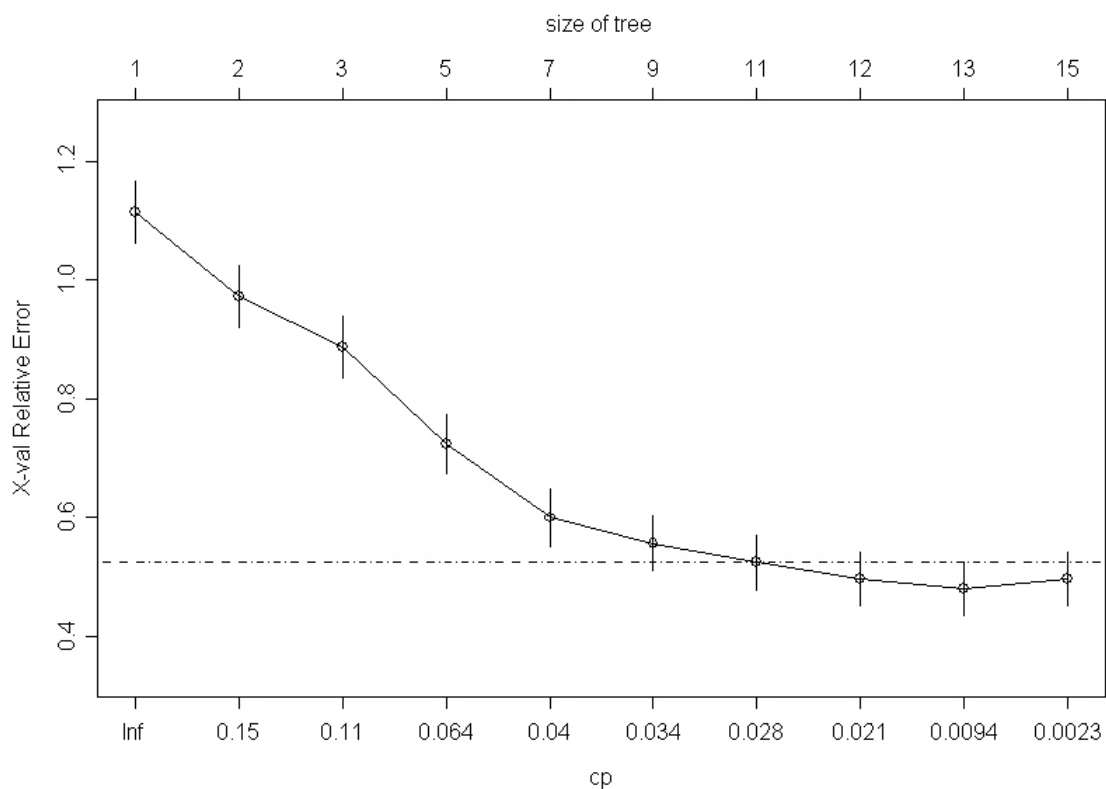


Abb. 4-15: Kreuzvalidierungsplot. Die gestrichelte Linie entspricht dem Wert des relativen Fehlers der Kreuzvalidierung des Baumes mit dem kleinsten Fehler (T_{13}) plus einmal deren Standardabweichung (vertikaler Strich).

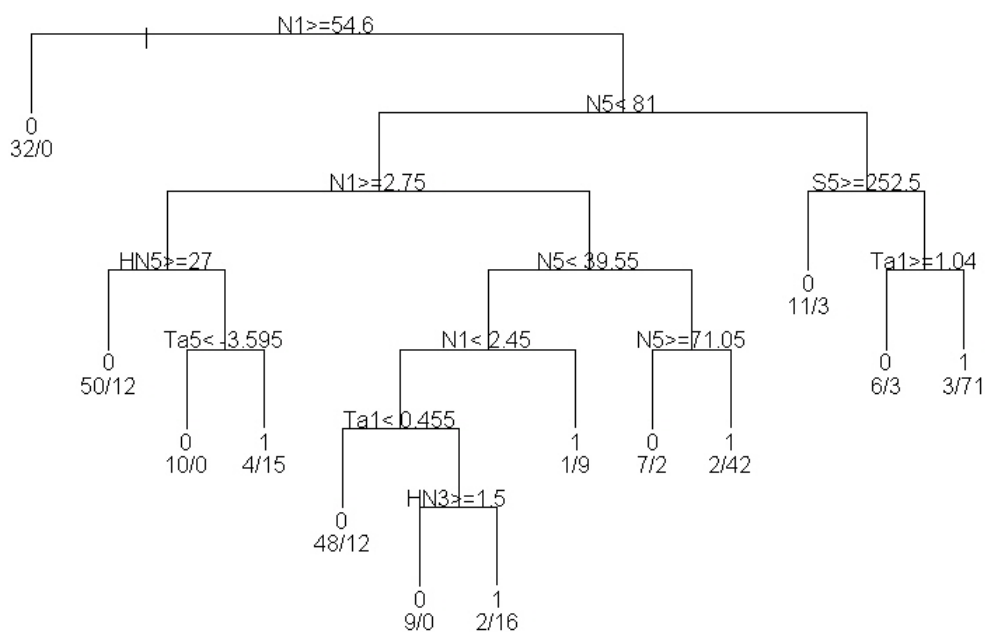


Abb. 4-16: Optimaler Klassifikationsbaum T_{13} . Dieser Baum hat eine Fehlklassifikationsrate von 12 %.

In Baum T₁₃ werden die Ereignisse ohne Waldlawine (Klasse 0) in acht Endgruppen klassifiziert, die Ereignisse mit Waldlawine (Klasse 1) in fünf Endgruppen. Zwei dieser Endgruppen, die erste und die vierte Endgruppe von rechts, enthalten einen grossen Anteil der Ereignisse mit Waldlawine und weisen zudem eine tiefe Fehlklassifikationsrate auf. Dementsprechend ist die Wahrscheinlichkeit eines Waldlawinenanrisses bei den jeweiligen Wetter- und Schneebedingungen sehr hoch. Die erste Endgruppe enthält 71 von 185 Ereignissen mit Waldlawine und nur 3 Ereignisse ohne Waldlawine, dies entspricht einer Fehlklassifikationsrate von nur 4 %. Diese Gruppe wird durch die folgenden Bedingungen charakterisiert: Eine 1-Tagessumme des Niederschlages kleiner als 54.6 mm, eine 5-Tagessumme des Niederschlages von mindestens 81 mm, eine 5-Tagessumme der Sonnenscheindauer kleiner als 252.5 min und ein 1-Tagesmittel der Lufttemperatur kleiner als 1.04° C. Die zweite Gruppe enthält 42 Ereignisse mit Waldlawine und 2 Ereignisse ohne Waldlawine. Die Fehlklassifikationsrate beträgt damit 4.5 %. Die Ereignisse dieser Endgruppe erfüllen die zwei folgende Bedingungen: eine 1-Tagessumme des Niederschlages kleiner als 2.75 mm und eine 5-Tagessumme des Niederschlages von mindestens 39.55 mm aber kleiner als 71.05 mm. Die drei restlichen Endgruppen der Klasse 1 enthalten bedeutend weniger Ereignisse und weisen höhere Fehlklassifikationsraten auf. Insgesamt klassifiziert dieser Baum 153 der 185 Ereignisse mit Waldlawinen richtig. Das heisst dass dieses Modell 83 % der Waldlawinenanrisse richtig vorausgesagt hätte (s. Tab. 4-1).

Tab. 4-1: Klassifikationsmatrix des Baumes T₁₃. 153 der 185 Ereignisse mit Waldlawine (83 %) und 173 der 185 Ereignisse ohne Waldlawine (94 %) werden vom Baum T₁₃ richtig klassifiziert.

		Waldlawine beobachtet	
		Ja	Nein
Waldlawine prognostiziert	Ja	153	12
	Nein	32	173
		185	185

Besonders auffallend in diesem Klassifikationsbaum ist die Wichtigkeit der niederschlagsbezogenen Variablen (Tagessumme des Niederschlages N und Tagessumme des Neuschnees HN). Acht von insgesamt zwölf Knoten werden aufgrund solchen Variablen definiert. 157 von insgesamt 370 Ereignissen werden nur anhand dieser Variablen klassifiziert. In Tabelle 4-2 sind die drei besten Splitvariablen für die vier ersten

Knoten aufgelistet. Rang 1 bezeichnet die beste Variable und somit diejenige die im Baum als Splitvariable gebraucht wird. Rang 2 bezeichnet die zweitbeste Splitvariable, also diejenige die eingesetzt worden wäre, wenn die beste Variable nicht vorhanden gewesen wäre. Die Wichtigkeit niederschlagsbezogener Variablen wird hier ebenfalls ersichtlich. Für Knoten 1 sind die drei besten Splitvariablen N1, N3 und N5, für Knoten 2 sind es N5, HN5 und S5. Die Tabelle enthält keine windbezogene Variablen.

Tab. 4-2: Alternative Splitvariablen für die vier ersten Knoten des optimalen Klassifikationsbaumes T_{13} . Rang 1 bezeichnet die beste Splitvariable, also diejenige die für den Aufbau des Baumes gebraucht wurde. Rang 2 bzw. 3 bezeichnet die zweit- bzw. drittbeste Variable.

Rang der Splitvariable	Knoten-Nr.			
	1	2	3, links	4, rechts
1	N1	N5	N1	S5
2	N3	HN5	T _a 5	HS
3	N5	S5	S1	T _a 1

4.2.2 Spezifische Modelle

Die Klassifikationsbäume $T_{\text{Cluster 1}}$ und $T_{\text{Cluster 2}}$ klassifizieren die 55 zu Cluster 1 bzw. 48 zu Cluster 2 gehörenden Ereignisse mit Waldlawine (s. Kapitel 4.1) und deren entsprechenden Ereignisse ohne Waldlawine. Die optimale Grösse dieser Bäume wurde anhand von 5-fachen Kreuzvalidierungen bestimmt.

Baum $T_{\text{Cluster 1}}$ (Abb. 4-17) weist eine Fehlklassifikationsrate von 16 % auf. Nach diesem Baum werden Ereignisse ohne Waldlawine in drei Endgruppen klassifiziert, während Ereignisse mit Waldlawine in einer einzelnen Endgruppe enthalten sind. In dieser Endgruppe werden 47 von 55 Ereignissen mit Waldlawine richtig klassifiziert, 10 von 55 Ereignissen ohne Waldlawine werden falsch klassifiziert. Diese Endgruppe erfüllt die folgenden Bedingungen: eine 3-Tagessumme des Niederschlages von mindestens 36.65 mm, eine 3-Tagessumme des Niederschlages kleiner als 55.45 mm und ein 1-Tagesmittel der Lufttemperatur kleiner als 1.225° C. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine in Cluster 1 enthaltene Waldlawine bei solchen Bedingungen ereignet, ist höher als 80 %.

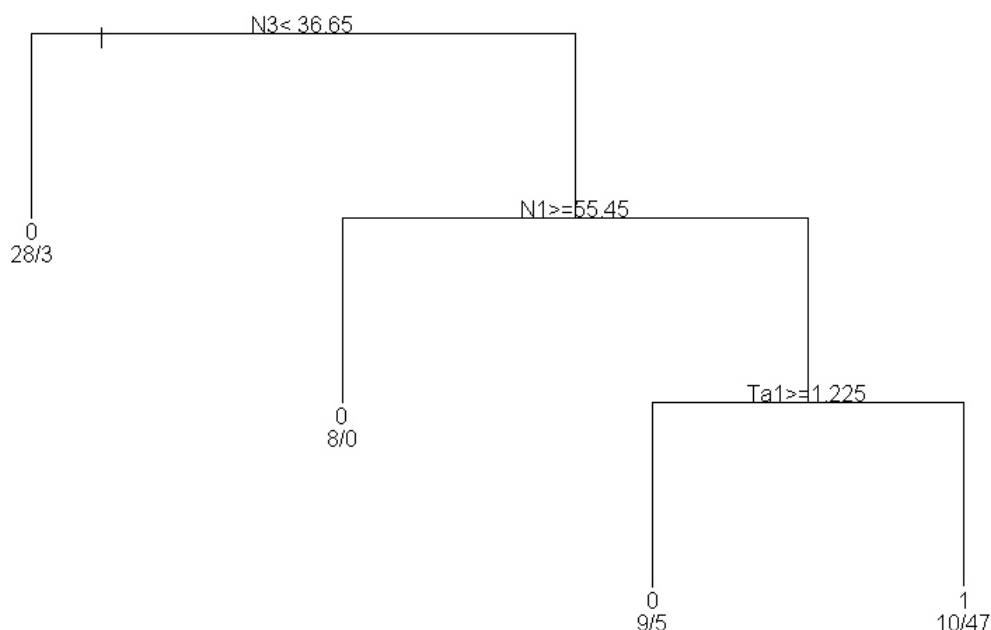


Abb. 4-17: Klassifikationsbaum $T_{\text{Cluster } 1}$. Dieser Baum klassifiziert die 55 zu Cluster 1 gehörenden Ereignisse mit Waldlawine und die 55 entsprechenden Ereignisse ohne Waldlawine mit einer Fehlklassifikationsrate von 16 %.

Die drei besten Splitvariablen für die drei Knoten des Baumes $T_{\text{Cluster } 1}$ sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Die zwei ersten Knoten werden anhand der Splitvariablen N3 und N1 definiert. Als zweitbesten Variablen für diese zwei Knoten gelten N5 bzw. N3. Der dritte Knoten wird anhand der Variable T_{a1} definiert, als zweitbeste Variable gilt S5. Die Tagessummen des Niederschlages N1, N3 und N5 sind in diesem Klassifikationsbaum unter den besten Splitvariablen am häufigsten vertreten.

Tab. 4-3: Die drei besten Splitvariablen für die drei Knoten des Baumes $T_{\text{Cluster } 1}$.

Rang der Splitvariable	Knoten-Nr.		
	1	2	3
1	N3	N1	T_{a1}
2	N5	N3	S5
3	S5	HS	ΔT_{a3}

Der Klassifikationsbaum $T_{\text{Cluster } 2}$ klassifiziert die 48 in Cluster 2 enthaltenen Waldlawineneignisse und die 48 entsprechenden Ereignissen ohne Waldlawine in drei Endgruppen (Abb. 4-18). Die Ereignisse mit Waldlawine werden in einer einzelnen Gruppe klassifiziert. Diese Gruppe enthält 42 der 48 Ereignisse mit Waldlawine und zwei

Ereignisse ohne Waldlawine. Diese Ereignisse erfüllen die zwei folgenden Bedingungen: eine 5-Tagessumme der Sonnenscheindauer von mindestens 376 min und eine 3-Tagessumme des Neuschnees kleiner als 12.5 cm. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine in Cluster 2 enthaltene Waldlawine bei solchen Bedingungen ereignet, beträgt fast 90 %. Die drei besten Splitvariablen für den ersten Knoten sind S5, HN3 und N1, für den zweiten Knoten sind es HN3, N1 und ΔT_{a3} . Windbezogene Variablen sind hier ebenfalls nicht vertreten.

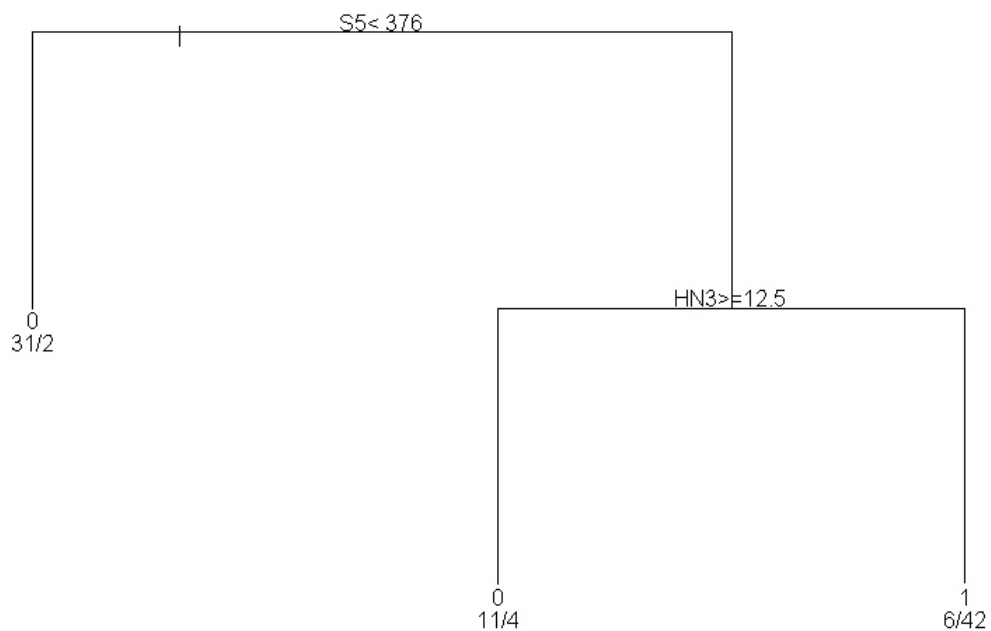


Abb. 4-18: Klassifikationsbaum $T_{\text{Cluster } 2}$. Dieser Baum klassifiziert die 48 zu Cluster 2 gehörenden Ereignisse mit Waldlawine und die 48 entsprechenden Ereignisse ohne Waldlawine mit einer Fehlklassifikationsrate von 12.5 %.

5 Diskussion

5.1 Waldlawinentypen

Aufgrund der Clusteranalyse von 103 Waldlawinen mit einer Lauflänge gleich oder grösser 50 m, wurden zwei Typen von Witterungs- und Schneeverhältnissen, welche die Entstehung von Waldlawinen fördern, identifiziert. Diese können folgendermassen charakterisiert werden.

Typ 1: Neuschneelawinen

Neuschneelawinen finden nach mehreren Tagen mit Schneefällen und bei einer Gesamtschneehöhe von mindestens 80 cm statt. Die Menge an gefallenem Neuschnee ist dabei sehr variabel. Neuschneelawinen sind bei weniger als 30 cm Schnee in drei Tagen oder weniger als 50 cm Schnee in 5 Tagen jedoch eher selten. Negative durchschnittliche Temperaturen am Ereignistag sowie über die letzten Tage vor dem Ereignis sind bei Neuschneelawinen die Regel. Ebenso typisch ist, dass es am Tag des Ereignisses sowie in den letzten zwei Tagen vor dem Ereignis beinahe keine Sonneneinstrahlung gab. Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten am Tag des Ereignisses, sowie in den letzten Tagen vor dem Ereignis sind schwach bis mässig, starke bis stürmische Windböen sind jedoch häufig. Neuschneelawinen ereignen sich meistens an nordexponierten Hängen oberhalb 1500 m ü. M. Am häufigsten brechen Neuschneelawinen in wintergrünen Nadelwäldern oder wintergrünen und winterkahlen Nadelwäldern los. In Laubwäldern sind sie hingegen sehr selten. Neuschneelawinen finden meistens im Hochwinter (Januar-Februar) statt.

Typ 2: Altschneelawinen

Altschneelawinen finden nach einem Anstieg der Lufttemperatur von einigen Grad zwischen dem zweitletzten Tag vor dem Ereignis und dem Tag des Ereignisses statt. Typisch für Altschneelawinen sind mehrere Tage mit Sonneneinstrahlung. Meistens fällt

am Tag des Ereignisses sowie innerhalb der zwei letzten Tage vor dem Ereignis kein oder sehr wenig (weniger als 10 cm) Neuschnee. Regen kann jedoch vorkommen. In den letzten Tagen vor dem Lawinenereignis herrschen schwache durchschnittliche Windgeschwindigkeiten, jedoch kommt es häufig zu starken Windböen. Altschneelawinen brechen unabhängig von der Exposition meistens unterhalb 1500 m ü. M. bei allen Expositionen los. Sie ereignen sich in wintergrünen oder wintergrünen und -kahlen Nadelwäldern, sowie in Laub- und Mischwäldern. Altschneelawinen finden vor allem im Spätwinter (Februar-März) statt.

Beide Waldlawinentypen entsprechen Witterungen, bei denen die stabilisierende Wirkung des Waldes auf die Schneedecke vermindert wird. Die Resultate bestätigen somit die geäußerten Hypothesen. Bei Typ 1 kann man davon ausgehen, dass der interzeptierte Neuschnee wegen kalten Temperaturen und fehlenden Einstrahlungsperioden zwischen den Schneefällen nicht verdunsten oder sublimieren kann. Dieser Schnee bleibt dann entweder in den Baumkronen, was dazu führt, dass beim nächsten Schneefall weniger Schnee interzeptiert wird, oder fällt auf den Boden. In beiden Fällen ist der Interzeptionseffekt reduziert und deswegen kommt relativ viel Schnee auf den Waldboden. Zudem kommt, dass die Setzung der Waldschneedecke wegen kalten Temperaturen verzögert wird. Bei Typ 2 bringen die starke Einstrahlung und die Erwärmung der Lufttemperatur den in den Baumkronen interzeptierten Schnee zum Schmelzen. Das Schmelzwasser und eventuell vorkommender Regen führen zur Durchfeuchtung, Erwärmung und schlussendlich Schwächung eines Teiles oder der ganze Waldschneedecke.

Imbeck (1984) sowie Meyer-Grass & Schneebeili (1992) beschrieben in ihren Untersuchungen ebenfalls zwei Typen von Waldlawinen, welche den in dieser Arbeit beschriebenen Neuschneelawinen (Typ 1) und Altschneelawinen (Typ 2) grundsätzlich ähnlich sind. Im Rahmen der Vorstudie zum Waldlawinenprojekt folgerte Imbeck (1984), dass im Wald vor allem Lockerschneelawinen zu erwarten sind, die vor allem nach grossen Neuschneefällen mit lockerem Schnee (Typ 1) oder nach einer starke Erwärmung (Typ 2) auftreten. Meyer-Grass & Schneebeili (1992) stellten im Rahmen des Waldlawinenprojekts zwei Typen von Waldlawinenereignissen fest: Neuschneelawinen, die nach einem Schneefall losbrachen (Typ 1), und Nassschneerutsche, die sich nach mehrtägiger starker Einstrahlung ereigneten (Typ 2).

Im Rahmen des Waldlawinenprojekts wurden zwischen 1200 und 1600 m ü. M. kaum Waldlawinenanrisse beobachtet. Im Gegensatz dazu, brach ungefähr ein Viertel der in dieser Arbeit untersuchten Waldlawinen in dieser Höhenlage los. Dabei handelt es sich sowohl um Neu- als auch um Altschneelawinen. Die WLP-Waldlawinen ereigneten sich hauptsächlich in der Region Davos und im Engadin. In diesen Regionen (Nördliche Zwischenalpen ohne Buche und kontinentale Hochalpen) wachsen zwischen 1200 und 1600 m ü. M. vor allem dichte Fichtenwälder. Die Waldgrenze und der Gürtel der subalpinen, offenen Waldgrenzenwälder liegen in den anderen Alpenregionen 200 – 600 m tiefer als in den kontinentalen Alpen wo sich die meisten WLP-Waldlawinen ereigneten. Nur 45 der 126 WLP-Waldlawinen, zusammen mit 58 SLDB-Waldlawinen, wurden in die Clusteranalyse miteinbezogen. Somit sind die kontinentalen Hochalpen im Verhältnis zu den anderen Alpenregionen in der Clusteranalyse weniger stark vertreten als in der Untersuchung von Meyer-Grass & Schneebeli (1992). Demnach sind die Resultate für den gesamten Schweizer Alpenraum repräsentativer als diejenigen des Waldlawinenprojekts. Meyer-Grass & Schneebeli (1992) stellten fest, dass Neuschneelawinen an allen Expositionen und Nassschneerutsche ausschliesslich an südlich exponierten Hängen auftraten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass sich Neuschneelawinen fast ausschliesslich an nordexponierten Lagen und Altschneelawinen an allen Expositionen ereignen.

Einige Aspekte der in der „Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion NaiS“ (Frehner et al., 2005) erwähnten Witterungs- und Schneesituationen, lassen sich anhand der vorliegenden Resultate nicht bestätigen. Im NaiS geht man von einer 3-Tages-Neuschneesumme von mindestens 50 cm aus. Diese Bedingung wird von knapp der Hälfte der 55 untersuchten Neuschneelawinen erfüllt. Bei den 48 Altschneelawinen wurde fast nie eine 3-Tages-Neuschneesumme von mehr als 50 cm festgestellt. Zwei NaiS-Witterungstypen gehen von einer Gesamtschneehöhe von über 120 cm aus. Etwa die Hälfte der Neuschneelawinen und mehr als 75 % der Altschneelawinen brachen bei einer kleineren Gesamtschneehöhe los. Zudem wird bei zwei NaiS-Witterungstypen eine Temperatur unter -4°C erwähnt. Die grosse Mehrheit der in dieser Arbeit untersuchten Waldlawinen ereignete sich bei wärmeren Lufttemperaturen. Es ist nochmals zu erwähnen, dass die im NaiS erwähnten Witterungs- und Schneeverhältnisse anhand nur weniger Waldlawinen entworfen werden konnten. Erst nach der im Rahmen dieser Studie durchgeführten aufwändigen Rekonstruktionsarbeit stehen Daten zur

Verfügung, welche die Witterungs- und Schneeverhältnissen am Ort und zur Zeit des Anrisses von mehr als 180 Waldlawinen detailliert beschreiben.

Clusteranalysen sind sehr hilfreich um Strukturen in grossen, komplexen Datensätzen zu erkennen. Sie sind in der Lage, eine heterogene Objektmenge in homogene Cluster aufzuteilen. Der grosse Vorteil von hierarchischen Klassifikationsverfahren, ist dass die Anzahl an Clustern vor der Analyse nicht festgelegt werden muss. Es braucht also keine Vorkenntnisse über die Struktur innerhalb des Datensatzes. Die Resultate einer Clusteranalyse sind relativ schwierig zu interpretieren. Eine Clusteranalyse liefert keine „richtigen“ oder „falschen“ Resultate. Es wird in jedem Fall eine Struktur im Datensatz gefunden und die Objekte werden in Gruppen eingeteilt, man weiss aber nicht, aufgrund welcher Kriterien diese Gruppen entstanden sind und ob die Klassifikation im Zusammenhang mit der Fragestellung sinnvoll ist oder nicht. Die Güte der Klassifikation muss anhand anderer Methoden überprüft werden.

Aufgrund des untersuchten Datensatzes scheint eine Unterteilung in zwei Waldlawinenszenarien am sinnvollsten zu sein (s. dazu Kapitel 4.1.1, S. 38). Die Resultate der durchgeführten Clusteranalyse lassen sich sowohl durch weitere statistische Auswertungen als auch durch theoretische Überlegungen nachvollziehen. Dies heisst aber nicht, dass es tatsächlich nur zwei Waldlawinenszenarien gibt. Im Dendrogramm (Abb. 4-1, S. 39) kann man mindestens vier Cluster klar unterscheiden, zwei davon enthalten jedoch nur wenige Ereignisse. Im Biplot (Abb. 4-2, S. 40) lassen sich ebenfalls Ansätze von weiteren Gruppenbildungen erkennen. Hätte man anstatt der Methode von Ward einen anderen Algorithmus gewählt oder eine andere Regel als diejenige von Mojena (1977) verwendet, um das Dendrogramm zu durchschneiden, hätte man vielleicht mehr als zwei Cluster oder Waldlawinenszenarien beschreiben können. In diesem Fall wären die Cluster aber kleiner gewesen.

5.2 Lawinensituationen mit zusätzlicher Waldlawinengefahr

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell entwickelt, aufgrund dessen eine allgemein kritische Lawinensituation von einer Situation, bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, unterschieden werden kann. Dieses Modell beruht, wie auch der empirische Waldlawinenindex (vgl. SLF, 2000), auf der Annahme, dass sich Waldlawinen an Tagen

ereignen, an denen auch Freiladlawinen losbrechen. Das Modell erlaubt es, anhand von sieben Witterungs- und Schneeparametern die Wahrscheinlichkeit eines Waldlawinenanrisses zu berechnen. Diese Parameter sind: Die 1- und 5- Tagessummen des Niederschlages, die 1- und 5-Tagesmittel der Lufttemperatur, die 3- und 5-Tagessummen des Neuschnees sowie die 5-Tagessumme der Sonnenscheindauer. Das Modell basiert auf 185 Waldlawinen und 185 Freilandlawinen und weist eine Fehlklassifikationsrate von 12 % auf. 83 % der miteinbezogenen Waldlawinen hätte das Modell voraussagen können.

Nach dem Modell ist die Wahrscheinlichkeit eines Waldlawinenanrisses bei folgenden Witterungs- und Schneebedingungen besonders gross:

Situation 1 (Wahrscheinlichkeit eines Waldlawinenanrisses: 96 %)

- 1-Tagessumme des Niederschlages < 55 mm,
- 5-Tagessumme des Niederschlages ≥ 81 mm,
- 5-Tagessumme der Sonnenscheindauer < 253 min und
- 1-Tagesmittel der Lufttemperatur $< 1^{\circ}$ C.

Situation 2 (Wahrscheinlichkeit eines Waldlawinenanrisses: 95 %)

- 1-Tagessumme des Niederschlages < 3 mm,
- 5-Tagessumme des Niederschlages < 71 mm und ≥ 40 mm.

Klassifikationsbäume sind eine sehr robuste Methode, die einfache, leicht interpretierbare Resultate liefert. Ausreisser werden in einem Ast „isoliert“ und haben somit keinen Einfluss auf die anderen Äste. Hendrikx et al. (2005) verwendeten Klassifikationsbäume um in Neuseeland Tage mit hoher Lawinengefahr aufgrund meteorologischer Parameter zu prognostizieren. Ihre zwei besten Klassifikationsbäume weisen Fehlklassifikationsraten von 15 bzw. 22 % auf. Der erste Baum klassifiziert 79 % der Tage mit Lawinen richtig, der zweite Baum 86 %. Kronholm et al. (2006) entwickelten basierend auf meteorologischen Parametern in Norwegen ebenfalls Klassifikationsbäume zur Prognose von Tagen mit und ohne Lawinen. Diese Bäume weisen Fehlklassifikationsraten von 13 bis 18 %. Verglichen mit diesen Resultaten ist das in dieser Arbeit entwickelte Modell, mit einer Fehlklassifikationsrate von 12 % und 83 % richtig prognostizierter Waldlawinen gut.

Nach Föhn (1998, zit. nach: Hendrikx et al., 2005; Kronholm et al., 2006) können Modelle mit einer Fehlklassifikationsrate von weniger als 20 % zur Lawinenprognose angewendet

werden. Das entwickelte Modell erfüllt dieses Kriterium und könnte dementsprechend in der Praxis angewendet werden. Vor einer praktischen Anwendung müsste das Modell jedoch auf seine „Anwendbarkeit“ geprüft werden. Zum Beispiel werden im Modell Zehn Ereignisse anhand der beiden Splitkriterien 1-Tagessumme des Niederschlages grösser als 2.45 mm und kleiner als 2.75 mm klassifiziert. Aufgrund der Messfehler der Niederschlagsmessgeräte aber vor allem aufgrund der Ungenauigkeit des Interpolationsverfahrens, ist es nicht sinnvoll diese Splitkriterien im Prognosemodell zu lassen. Weiter müsste man überprüfen, ob man einen von diesen Splits durch einen Alternativsplit ersetzen könnte und ob die Zuverlässigkeit des Modells dadurch nicht beeinträchtigt würde. Bei einer praktischen Anwendung wäre auch zu beachten, dass dieses Modell für die Winterbedingungen der Untersuchungsperiode (1985/86 – 2005/06) kalibriert wurde und unter anderen Winterbedingungen, vor allem bei 30- und 300-jährigen Extremereignissen, entsprechend vorsichtig anzuwenden ist.

Aufgrund der Resultate der Clusteranalyse wurden zwei weitere spezifische Klassifikationsbäume entwickelt. Der erste Baum klassifiziert die 55 Neuschneewaldlawinen und die 55 entsprechenden Freilandlawinen aufgrund der drei Parameter 1- und 3- Tagessummen des Niederschlages sowie 1-Tagesmittel der Lufttemperatur mit einer Fehlklassifikationsrate von 16 %. Der zweite Baum klassifiziert die 48 Altschneewaldlawinen und die 48 entsprechenden Freilandlawinen aufgrund der 5-Tagessumme der Sonnenscheindauer und der 3-Tagessumme des Neuschnees mit einer Fehlklassifikationsrate von 12.5 %. Diese Bäume weisen ebenfalls relativ tiefe Fehlklassifikationsraten auf, sie stützen sich aber auf wenige Daten. Aus diesem Grund empfiehlt es sich nicht, diese Bäume als Prognosemodelle zu verwenden.

Niederschlagsbezogene Parameter (Niederschlags- und Neuschneesumme) wurden in den erstellten Klassifikationsbäumen am häufigsten als Splitvariablen verwendet. Die Parameter Lufttemperatur und Sonnenscheindauer wurden mehrmals verwendet. Dies bedeutet, dass sich eine allgemein kritische Lawinensituation von einer Situation, bei der zusätzlich eine Waldlawinengefahr besteht, vor allem anhand der Niederschlags- und Neuschneesumme, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer, unterscheiden lässt. In ihren Studien erwähnen Davis et al. (1999), Jones & Jamieson (2001), Hendrikx et al. (2005) und Kronholm et al. (2006) die Wichtigkeit niederschlagsbezogener Parameter für die Prognose von Freilandlawinen. Windbezogene Parameter werden ebenfalls oft als sehr

wichtig angesehen. In den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modellen wurden Windparameter hingegen weder als Splitvariable noch als alternative Splitvariable für die wichtigsten Knoten eingesetzt. Variablen die sich auf den Tag des Ereignisses sowie die vier letzten Tagen vor dem Ereignis beziehen, wurden sehr oft in die verschiedenen Klassifikationsbäume miteinbezogen. Um Waldlawinen zu prognostizieren scheint es also wesentlich zu sein, sich nicht nur auf die zwei letzten sondern auf die vier letzten Tage vor dem Ereignis zu beziehen.

6 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit konnten zwei Witterungsszenarien beschrieben werden die den Anriss von Lawinen innerhalb des Waldes fördern. Diese zwei Szenarien wurden aufgrund von 103 Waldlawinen, die sich in den Wintern 1985/86 – 2005/06 im Schweizer Alpenraum ereigneten, festgestellt. Neuschneewaldlawinen brechen nach Schneefällen und einer Witterungsperiode ohne zwischenzeitliche Einstrahlungsphasen los. Altschneewaldlawinen ereignen sich nach mehreren Tagen mit Sonneneinstrahlung und einer Erwärmung der Lufttemperatur.

Weiter wurde ein Modell entwickelt, mithilfe dessen anhand von sieben Witterungsparametern eine Situation mit erhöhter Waldlawinenwahrscheinlichkeit von einer Situation, bei der sich ausschliesslich Freilandlawinen ereignen, unterschieden werden kann. Dieses Modell hätte 83 % der 185 miteinbezogenen Waldlawinen richtig prognostiziert. Ebenfalls aufgrund meteorologischer Parameter früher entwickelte Modelle zur Prognose von Freilandlawinen weisen ähnliche Zuverlässigkeiten auf. Es wäre denkbar, dieses Modell in der Praxis als Waldlawinenprognosemodell anzuwenden. Es ist zuverlässig und einfach anzuwenden, da die Prognose anhand von nur sieben meteorologischen Werten gemacht wird.

Im Vergleich zu früheren Studien wurden in dieser Arbeit mehr Waldlawinen untersucht. Sowohl die im Rahmen des Waldlawinenprojekts betrachteten Untersuchungsperiode als auch das Untersuchungsgebiet wurden erweitert. Zum ersten Mal konnte der Einfluss von Witterungs- und Schneebedingungen auf die Entstehung von Waldlawinen aufgrund einer so grossen Datengrundlage analysiert werden. Somit liefert diese Arbeit wichtige, neue, statistisch abgestützte Erkenntnisse, die sowohl für die Praxis (z.B. Lawinenwarnung) als auch für weitere Forschungsarbeiten von Bedeutung sein könnten.

Da die SLF-Schadenlawinendatenbank keine Angaben über den Waldbestand und den Schneedeckenaufbau in der Anrisszone enthält, konnten diese Aspekte in dieser Arbeit nur wenig betrachtet werden. Der Wald konnte nur anhand des Waldtyps und die Schneedecke

nur anhand der Gesamtschneehöhe und der Neuschneesumme charakterisiert werden. Eine Studie die sich mit allen Aspekten der Waldlawinenentstehung, also dem Wald, dem Standort, der Schneedecke und der Witterung sowie deren Beziehungen zueinander befasst, wäre von grossem Interesse. Dazu würde jedoch eine neue Datengrundlage benötigt. Die Datenerhebung könnte nach dem gleichen Konzept wie beim Waldlawinenprojekt erfolgen (eine Erhebung im Winter und eine im Sommer). Aufgrund der Untersuchungen von Meyer-Grass & Schneebeli (1992) und Pfister (1997) könnte die Anzahl an Parametern, die erhoben werden müssten, eventuell reduziert werden. Um möglichst viele Waldlawinenmeldungen zu bekommen, wäre es wichtig, möglichst viele Fachleute und Interessierte im ganzen Alpenraum über die laufende Datenerhebung zu informieren. Wichtig wäre auch, die Datenerhebung über einen möglichst langen Zeitraum zu erstrecken, so dass möglichst viele Winterbedingungen im Datensatz repräsentiert wären. Dadurch könnten zuverlässigere kritische Werte hergeleitet und bessere Prognosemodelle erstellt werden als die aktuellen.

Literaturverzeichnis

- Auer, M., 2003. *Regionalisierung von Schneeparametern: Eine Methode zur Darstellung von Schneeparametern im Relief*. Diplomarbeit, Universität Bern, Bern, 97 S.
- Brabec, B., Meister, R., Stöckli, U., Stoffel, A., Stucki, T., 2001. RAIFoS: Regional Avalanche Information and Forecasting System. *Cold Regions Science and Technology* 33: 303-311.
- Brachinger, H. W., Ost, F., 1996. Modelle mit latenten Variablen: Faktorenanalyse, Latent-Structure-Analyse und LISREL-Analyse. In: Fahrmeir, L., Hamerle, A., Tutz, G., (Hrsg.), *Multivariate statistische Verfahren*, 2. erweiterte Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 639–766.
- Brändli, U.-B., 1999. Zustand der Schutzwälder. *Wald und Holz* 5: 11-14.
- Brändli, U.-B., Herold, A., 1999. LFI2-Schutzwald. In: Brassel, P., Brändli, U.-B., *Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995*. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 331-354.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., Stone, C. J., 1998. *Classification and regression trees*. Chapman & Hall, Boca Raton, London, New York, Washington, DC, 358 S.
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2008. *Bodenmessnetze der MeteoSchweiz*. 2 S.
<http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/messsysteme/boden.Par.0051.DownloadFile.tmp/messnetzderautomatischenstationen.pdf> (Stand 21.12.2008)
- Bundesamt für Statistik BFS, 2004. *Waldmischungsgrad der Schweiz*. 12 S.
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/waldmischungsgrad.parsys.0003.downloadList.00031.DownloadFile.tmp/dh404.pdf> (Stand 21.12.2008)
- Davis, R. E., Elder, K., Howlett, D., Bouzaglou, E., 1999. Relating storm and weather factors to dry slab avalanche activity at Alta, Utah, and Mammoth Mountain, California, using classification and regression trees. *Cold Regions Science and Technology* 30: 79-89.

- De Quervain, M., 1979. Wald und Lawinen. *Proceedings IUFRO Seminar Mountain Forests and Avalanches*, Davos, 1978, EDMZ, Bern, 219-239.
- De' Ath, G., Fabricius, K. E., 2000. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 81(11): 3172-3192.
- Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Hrsg.), 2000. *Der Lawinenwinter 1999: Ereignisanalyse*. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 588 S.
- Fahrmeir, L., Häussler, W., Tutz, G., 1996. Diskriminanzanalyse. In: Fahrmeir, L., Hamerle, A., Tutz, G., (Hrsg.), *Multivariate statistische Verfahren*, 2. erweiterte Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 357-435.
- Fiebiger, G., 1975. Lawinen aus dem Walde. *Allgemeine Forstzeitschrift* 86(11): 330-331.
- Fiebiger, G., 1978. *Ursachen von Waldlawinen im Bereich der nordöstlichen Randalpen und ihre Behandlung durch forsttechnische Massnahmen*. Mitteilungen aus dem Institut für Wildbach- und Lawinenverbauung an der Universität für Bodenkultur in Wien, Heft 11, Universität für Bodenkultur, Wien, 406 S.
- Föhn, P. M. B., 1998. An overview of avalanche forecasting models and methods. In: Hestnes, E., (Hrsg.). *25 Years Of Snow Avalanche Research, Voss, Norway, 12-16 May 1998*. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 19-27.
- Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R., 2005. *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald*. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- Gabl, K., 1988. Meteorologie der Lawinen. In: Land Tyrol (Hrsg.), *Lawinenhandbuch*. 2. Aufl. Tyrolia-Verlag, Innsbruck, 13-38.
- Gore, P. A. JR., 2000. Cluster Analysis. In: Tinsley, H. E. A., Brown, S. D. (Hrsg.). *Handbook of applied multivariate statistics and mathematical modelling*. Academic Press, San Diego, 297-321.
- Gower, J. C., Hand, D. J., 1996. *Biplots*. Chapman & Hall, London, Glasgow, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, 277 S.

- Harvey, S., 2006. *White Risk*. Interaktive Lern-CD zur Lawinenunfall-Prävention. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt SUVA, Luzern. [CD-ROM]
- Hendriks, J., Owens, I., Carran, W., Carran, A., 2005. Avalanche activity in an extreme maritime climate: The application of classification trees for forecasting. *Cold Regions Science and Technology* 43: 104-116.
- Hopf, J., 1988. Beurteilung der Lawinengefahr. In: Land Tyrol (Hrsg.), *Lawinenhandbuch*, 2. Aufl. Tyrolia-Verlag, Innsbruck, 86-94.
- Imbeck, H., 1984. *Lawinenbildung im Wald und deren Wirkung in der Region Davos*. Schlussbericht des Forschungsprojektes 307.80, Interner Bericht Nr. 626, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, 21 S.
- Imbeck, H. 1986. Waldlawinen. *Bündner Wald* 39(5):22-26.
- Imbeck, H., 1987. *Schneeprofile im Wald*. Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen Winter 1985/86. Winterbericht SLF, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, 177-183.
- In der Gand, H., 1983. Schnee- und Lawinenkundliche Grundlagen für Lawenschutzwälder. *Bündner Wald* 36(3/4): 1–15.
- Jaccard, C., Meyer-Grass, M., Rychetnik, J., Gubler, H., Good, W., Leuenberger, F., Frey, W., 1991. *Forschungsprojekt "Waldlawinen" Schlussbericht*. Interner Bericht Nr 665. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, 21 S.
- Jones, A. S. T., Jamieson, B., 2001. Meteorological forecasting variables associated with dry slab avalanches. *Cold Regions Science and Technology* 33: 223-236.
- Kaufman, L., Rousseeuw, P. J., 1990. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 342 S.
- Kaufmann, H., Pape, H., 1996. Clusteranalyse. In: Fahrmeir, L., Hamerle, A., Tutz, G., (Hrsg.), *Multivariate statistische Verfahren*, 2. erweiterte Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 437–536.
- Keller, M., 2005. *Schweizerisches Landesforstinventar: Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004-2007*. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 393 S.

- Kronholm, K., Vikhamar-Schuler, D., Jaedicke, C., Isaksen, K., Sorteberg, A., Kristensen, K., 2006. Forecasting snow avalanche days from meteorological data using classification trees; Grasdalen, Western Norway. *Proceedings International Snow Science Workshop*, Telluride, Colorado, 1-6 October 2006, 786-795.
- Lackinger, B., 1988. Die natürliche Schneedecke. In: Land Tyrol (Hrsg.), *Lawinenhandbuch*, 2. Aufl. Tyrolia-Verlag, Innsbruck, 51-67.
- Landolt, E., 2003. *Unsere Alpenflora*, 7. neu bearbeitete Aufl. SAC-Verlag, Bern, 341 S.
- Latenser, M., Schneebeili, M., Wüthrich, R., 1998. Die neue SLF-Schadenlawinendatenbank. *Bündnerwald* 51(1): 35-39.
- Leyer, I., Wesche, K., 2007. *Multivariate Statistik in der Ökologie: Eine Einführung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 221 S.
- Margreth, S., 2004. *Die Wirkung des Waldes bei Lawinen*. Forum für Wissen 2004, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 21-26.
- McClung, D., Schaerer, P., 1993. *The Avalanche Handbook*, 2. Aufl. The Mountaineers, Seattle, 271 S.
- Meyer-Grass, M., Imbeck, H., 1985. *Walddlawinen: Anleitung für die Meldung von Walddlawinen*. Info Nr. 1 Dezember 1985, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 12 S.
- Meyer-Grass, M., Schneebeili, M., 1992. *Die Abhängigkeit der Walddlawinen von Standorts-, Bestandes-, und Schneeverhältnissen*. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 1992 Bern, Tagungspublikation, Band 2, 443-455.
- Mojena, R., 1977. Hierarchical grouping methods and stopping rules: An evaluation. *The Computer Journal* 20(4): 359-363.
- Ott, E., 1996. Leitbilder zur Schutzwirkung des Waldes vor Lawinenbildung. *European Journal of Forest Research* 115(1): 223-230.
- Pfister, R., 1997. *Modellierung von Lawinenanrissen im Wald*. Projektarbeit, ETHZ, Zürich, 19 S.
- Pfister, R., Schneebeili, M., 1999. Snow accumulation on boards of different sizes and shapes. *Hydrological Processes* 13: 2345-2355.

- Pielmeier, C., Aebi, M., Schweizer, J., 2007. *Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Winter 2004/05. Wetter Schneedecke und Lawinengefahr*. Winterbericht SLF, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, 104 S.
- Schneebeli, M., Bebi, P., 2004. Snow and Avalanche Control. In: Burley, J., Evans, J., Youngquist, J. A. (Hrsg.), *Encyclopedia of Forest Sciences*, Band 1. Elsevier, Amsterdam, 397-402.
- Schweizer, J., Jamieson, J. B., Schneebeli, M., 2003. Snow Avalanche Formation. *Reviews of Geophysics* 41(4): 2-1-2-25.
- Stadler, D., Bründl, M., Schneebeli, M., Meyer-Grass, M., Flühler, H., 1998. *Hydrologische Prozesse im subalpinen Wald im Winter*. Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderung und Naturkatastrophen“, NFP 31, vdf Hochschulverlag AG an der ETHZ, Zürich, 145 S.
- Venables, W. N., Ripley, B. D., 2002. *Modern Applied Statistics with S-PLUS*, 4. Aufl. Springer, New York, 495 S.
- Weilguni, V., 2006. Regionalisierung des Niederschlags. *Wiener Mitteilungen* 197: 71-92.
- WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF, 2008. *IMIS*.
http://cmsslw.wsl.ch/lawineninfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/grundlagen/detail_imis_DE (Stand 21.12.2008)