

Dynamik und Stabilität von Lawinenschutzwäldern: Eine Luftbild- und GIS- gestützte Analyse



Diplomarbeit

Corina Lardelli, Oktober 2003

**Betreuung:
Dr. Peter Bebi
Eidg. Institut für Schnee-
und Lawinenforschung
Davos (SLF)**

**Fakultätsvertreter:
Prof. Dr. W. Haeberli
Abteilung Physische Geographie
Geographisches Institut
Universität Zürich**

Vorwort

Seit meiner Kindheit spielt die Natur in meinem Leben eine sehr grosse Rolle. Viele Stunden meiner Freizeit verbrachte ich im Wald und in den Bergen und lernte, über die Schönheiten und Geheimnisse dieser Orte zu staunen. Durch das Geographiestudium wurde ich auf die komplexen Zusammenhänge zwischen Mensch und Umwelt sensibilisiert. Die Wechselwirkungen zwischen dem hochempfindlichen Gebirgsökosystem und den immer neuen menschlichen Ansprüche an diese Regionen faszinierten mich besonders und gaben mir den Ansporn für meine Diplomarbeit. Der Aufenthalt am Eidgenössischen Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF) in Davos und die Feldarbeit in den Davoser Schutzwälder war für mich eine ganz besondere Motivation. Mit der vorliegenden, ins NFP48 Projekt ALPSCAPE eingebetteten Arbeit hoffe ich, einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Gebirgswälder und ihrer Schutzfunktion leisten zu können.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Menschen beigetragen, denen ich an dieser Stelle ganz herzlich danken möchte.

Zuerst gilt dieser Dank meinem Betreuer Dr. Peter Bebi, der sich für meine Arbeit stets Zeit genommen hat und mich persönlich und fachlich unterstützt hat. Die grosszügige Vermittlung seiner Kenntnisse und seine reiche Erfahrung in den Davoser Gebirgswälder motivierten mich sehr. In allen Phasen der Arbeit gab er mir viele interessante Anregungen.

Ebenfalls gebührt Prof. Dr. Haeberli grossen Dank, der sich als Fakultätsvertreter der Abteilung Physische Geographie die Zeit nahm, meine Arbeit durchzulesen, um mich danach mit konstruktiver Kritik tatkräftig zu unterstützen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) danke ich für die freundliche Atmosphäre und die Gastfreundschaft. Insbesondere bei Adrienne Grêt-Regamey, Marieka Kukukowa und Anja Rammig möchte ich mich für ihre Hilfsbereitschaft bedanken.

Ganz besonderen Dank gilt Herrn Christian Ginzler an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), der mir bei der Herstellung der Orthofotos geholfen hat.

Auch dem Revierförster Hanspeter Hefti von Davos möchte ich ganz herzlich danken, dass er sich Zeit genommen hat für meine Anliegen. Die grosszügige Vermittlung seiner Kenntnisse liessen mich schnell die Herausforderungen erkennen, die im Gebirgswald zu bewältigen sind.

Am Geographischen Institut in Zürich möchte ich allen danken, die diese Arbeit in irgendeiner Form unterstützt haben. Mirjam Friedli sowie Horst und Inés Machguth gebührt ein besonderer Dank. Sie haben mich im Computerraum des Geographischen Institutes stets seelisch und fachlich unterstützt und für gemütliche Tee- und Plauderstündchen gesorgt.

Meiner Familie und meinen Kollegen bin ich sehr dankbar für den Rückhalt und die moralische Unterstützung während der Zeit dieser Arbeit.

Davos, im Oktober 2003

Corina Lardelli

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	5
Verzeichnis der Tabellen	6
Zusammenfassung.....	7
1 Einleitung.....	9
2 Grundlagen.....	12
2.1 Der Gebirgswald	12
2.2 Lawinenschutzwald und Waldlawinen	13
2.2.1 Definition	13
2.2.2 Entstehung von Waldlawinen	14
2.2.3 Formen von Waldlawinen	15
2.3 Der Wald als Schutz vor Lawinen	16
3 Untersuchungsgebiet.....	18
3.1 Allgemeiner Überblick	18
3.2 Geologie	18
3.3 Geomorphologie	19
3.4 Klima	19
3.5 Vegetation	20
3.6 Böden	22
3.7 Geschichtlicher Hintergrund	22
3.8 Forstwirtschaft	23
4 Methoden.....	25
4.1 Luftbilder	25
4.2 Orthorektifikation der Luftbilder von 1954	26
4.3 Luftbildgestützte Strukturierungsmethoden	28
4.3.1 automatische Klassierung des Waldes	29
4.3.2 Waldstrukturierung mit Hilfe von Luftbildern	33
4.3.3 Verschneidung	36
4.4 Schutzwaldausscheidung	37
4.5 Quantitative Analysen	39

4.6	Statistische Analysen	39
4.6.1	Standorts- und Nutzungsfaktoren	40
4.6.2	Abhängige Variablen	41
4.6.3	Stichprobenwahl und räumliche Autokorrelation	41
4.6.4	Univariate statistische Analysen	45
4.6.5	Multiple logistische Regression	45
4.7	Waldlawinenanrissmodellierung	46
4.7.1	Waldlawinenprojekt 1985 – 1990	46
4.7.2	Modellbildung	47
4.7.3	Räumliche Umsetzung des Modells	49
4.8	Feldarbeit	50
5	Resultate.....	54
5.1	Erfassung der Gebirgswaldstrukturen	54
5.2	Entwicklungsdynamik der Waldstrukturen	58
5.2.1	Gesamtes Untersuchungsgebiet	58
5.2.2	Schutzwaldgebiet	60
5.3	Einfluss von Standorts- und Bestandesparametern auf die Waldentwicklung	61
5.3.1	Waldverdichtung	61
5.3.2	Schlussgradabnahme	64
5.4	Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit in der Landschaft Davos	66
5.5	Feldanalysen	69
6	Diskussion.....	72
6.1	Diskussion der Entwicklungsdynamik im Untersuchungsgebiet	72
6.2	Diskussion der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit in der Landschaft Davos	79
6.3	Diskussion der Methoden	81
7	Schlussfolgerung.....	85
	Literaturverzeichnis.....	87
	Anhang.....	92

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Erklärung des Begriffs „Waldlawine“.	14
Abb. 2: Schnee- und Windverhältnisse im Wald.	17
Abb. 3: Rund 20% der Fläche der Gemeinde Davos ist Waldgebiet.	20
Abb. 4: Arbeitsschritte zur Erfassung der Waldstrukturen.	29
Abb. 5: Einheitliche Lichtverhältnisse (Orthofoto 2000).	30
Abb. 6: Unterschiedliche Lichtverhältnisse (Orthofoto 1954).	30
Abb. 7: Arbeitsschritte der automatischen Waldabgrenzung.	31
Abb. 8: gedrängter Schlussgrad.	34
Abb. 9: lockerer Schlussgrad.	34
Abb. 10: räumiger Schlussgrad.	34
Abb. 11: aufgelöster Schlussgrad.	34
Abb. 12: stufiger Bestand.	35
Abb. 13: nicht stufiger Bestand.	35
Abb. 14: Rottenstrukturen.	36
Abb. 15: Pauschalgefälle: Gefälle zwischen oberstem Anrisspunkt und unterster Ablagerungsstelle.	38
Abb. 16: abhängige und unabhängige Variablen der statistischen Analyse.	40
Abb. 17: Theoretisches Variogramm.	42
Abb. 18: empirisches Variogramm.	43
Abb. 19: Analyse der räumlichen Autokorrelation.	44
Abb. 20: Schlussgradabgrenzung im Jahr 1954 und im Jahr 2000.	54
Abb. 21: stufige Baumstrukturen im Jahr 1954.	55
Abb. 22: Rottenstrukturen im Jahr 2000.	55
Abb. 23: Jungwald im Jahr 1954.	56
Abb. 24: Terrestrische Verifizierung der Schlussgradabgrenzung im Luftbild.	57
Abb. 25: Flächenvergleich der Schlussgradkategorien von 1954 und 2000.	58
Abb. 26: Prozentualer Anteil der gleichgebliebenen-, dichter- und offener gewordenen Bestände.	59
Abb. 27: Vergleich der Veränderung des Schlussgrades zwischen Schutzwald und gesamtem Untersuchungsgebiet.	60
Abb. 28: Abhängigkeit der Waldverdichtung von den Standortparametern Höhe, Exposition und Hangneigung.	62
Abb. 29: Abhängigkeit der Waldverdichtung vom Abstand zum Waldrand.	63
Abb. 30: Waldverdichtung in südexponierten Hängen.	63
Abb. 31: Abhängigkeit der Schlussgradabnahme von den Standortfaktoren (gesamtes Untersuchungsgebiet).	65
Abb. 32: Abhängigkeit der Waldveränderung vom Standortfaktor „südexponiert“ im Schutzwaldgebiet.	65

Abb. 33: Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeiten für 1954 und 2000.	66
Abb. 34: Lawinnenniedergänge zwischen 1950 und 1980 im Vergleich mit der Waldausdehnung bis ins Jahr 2000.	68
Abb. 35: Lawinenanrisszone in steilem Gelände oberhalb des Flüelabachs, wo sich der Wald nicht ausgedehnt hat.	68
Abb. 36: Mit dem Wald konkurrenzierende und nicht konkurrenzierende Bodenvegetation an Standorten mit Lawinenanrisswahrscheinlichkeit.	70
Abb. 37: Seit 1954 genutzte Stichprobenflächen in lawinenanrissgefährdeten Waldgebieten.	71
Abb. 38: Waldzunahme im schweizerischen Alpenraum.	72
Abb. 39: Vergleich der prozentualen Waldflächenzunahme im gesamtschweizerischen Alpenraum in der Landschaft Davos.	73
Abb. 40: Zerfallender, instabiler Waldbestand im Eggenwald.	77
Abb. 41: Windwurffläche im Bodenwald bei Glaris.	78
Abb. 42: Fichtenanwuchs auf morschem Baumstrunk.	79
Abb. 43: Lawinenanrissgefährdete Zone an der rechten Hangseite des Chummertällis bei Glaris.	80
Abb. 44: Falsch klassierte Legföhren (Orthofoto 2000).	82
Abb. 45: Schlagschatten (Orthofoto 1954).	82
Abb. 46: Schlagschatten in Waldlücken (Orthofoto 1954).	82
Abb. 47: Residuenanalyse.	95
Abb. 48: Stichprobenpunkte für offener- und dichter gewordenen Bestände.	100
Abb. 49: Stichprobenpunkte mit einer Anrisswahrscheinlichkeit > 50%.	101

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Verwendete Luftbilder und Orthofotos von 1954 und 2000.	25
Tab. 2: abhängige Variablen und Stichprobenanzahl für die statistische Analyse.	43
Tab. 3: Variablen und Koeffizienten für das Waldlawinenmodell.	48
Tab. 4: Kronenprojektionswerte.	49
Tab. 5: Klassenbildung und Stichprobenanzahl für die Feldaufnahmen.	50
Tab. 6: Klassenbildung und Stichprobenanzahl für Standorte mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit über 50%.	51
Tab. 7: Schlussgradveränderung von 1954 bis 2000.	59
Tab. 8: Univariate Analyse mit dem Chi ² -Test (Waldverdichtung).	61
Tab. 9: Univariate Analyse mit dem Chi ² -Test (Schlussgradabnahme).	64
Tab. 10: Waldzustandsveränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet.	105
Tab. 11: Waldzustandsveränderung im Schutzwaldgebiet.	106

Zusammenfassung

Der Gebirgswald hat in den Alpen eine wichtige Bedeutung als Schutzwald. Es wurden schon verschiedene Methoden zur Erfassung von Gebirgswaldstrukturen im Hinblick auf eine bessere Beurteilung der *aktuellen* Lawinenschutzwirksamkeit entwickelt. Es ist jedoch wenig bekannt über *mittel- bis langfristige* Veränderungen, welche zu einer beziehungsweise Abnahme dieser Schutzwirksamkeit führen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit einer grossflächigen Luftbild- und GIS basierten Zeitreihenanalyse solche Veränderungen zu analysieren und somit zum besseren Verständnis der Dynamik von Gebirgswäldern und insbesondere von Lawinenschutzwäldern beizutragen.

Die gesamte Waldfläche der Landschaft Davos wurde mit Hilfe von Luftbildern aus den Jahren 1954 und 2000 kartiert. Die Waldausscheidung erfolgte zunächst nach einem automatisierten GIS- gestützten Bildverarbeitungsverfahren. Anschliessend wurden Waldstrukturtypen nach einem bestehenden Luftbildschlüssel für die gesamte Fläche abgegrenzt und stichprobenweise terrestrisch überprüft. Die erfassten Waldstrukturen von 1954 und 2000 wurden in einem Geographischen Informationssystem (GIS) übereinandergelagert und miteinander verglichen. Mit Hilfe von univariaten Tests und multivariaten logistischen Regressionen wurde die Abhängigkeit der Walddynamik von Standorts- und Nutzungsfaktoren untersucht. Durch Übereinanderlagerung mit topographischen Daten konnte zudem ein räumliches Modell für die Anrisswahrscheinlichkeit von Waldlawinen in der Landschaft Davos für die beiden Zeitschnitte erstellt und miteinander verglichen werden.

Die Waldfläche hat seit 1954 im Schutzwaldgebiet um 8% - und im gesamten Untersuchungsgebiet um 13% zugenommen. Sowohl in den Schutzwäldern wie auch im gesamten Untersuchungsgebiet bestand eine starke Tendenz zur Waldverdichtung. Besonders ausgeprägt war diese Verdichtung in höheren Lagen, an flacheren und westexponierten Hängen. Nur rund 20% der untersuchten Waldflächen wurden in den letzten Jahrzehnten offener, wobei Waldauflösungen häufiger in tiefer gelegenen und ostexponierten Wäldern auftraten. Trotz der allgemein deutlichen Waldverdichtung hat die Waldlawinen-Anrisswahrscheinlichkeit zwischen 1954 und 2000 kaum abgenommen. Waldtypen, bei denen die Schutzwirksamkeit weiterhin nicht gewährleistet ist, befinden sich vor allem an steilen, nord- und ostexponierten Hanglagen. An solchen Standorten wird die Waldverjüngung häufig durch Schneebewegungen und Vegetationskonkurrenz durch krautige Pflanzen gehemmt. Die in dieser Studie

untersuchten anthropogenen Einflussfaktoren wie Weiderecht oder Nähe zu Waldstrassen hatten weder auf die Walddynamik noch auf die Veränderung der Schutzwirksamkeit einen signifikanten Einfluss.

Die Arbeit zeigt, wie durch Luftbild- und GIS- gestützte Zeitreihenanalysen wichtige Aussagen zur langfristigen Veränderung und zur Lawinenschutzfunktion von Gebirgswäldern gemacht werden können und wo sich diesbezüglich kritische Waldstrukturen befinden. Sie deutet aber auch darauf hin, dass die zurzeit stattfindende Waldausdehnung und Waldverdichtung im Alpenraum nicht zwingend eine Verbesserung der Lawinenschutzwirksamkeit zur Folge haben muss und dass die Möglichkeiten zur aktiven Steuerung dieser Schutzwirksamkeit limitiert sind.

1 Einleitung

Der Gebirgswald hat in grossen Teilen der Alpen eine herausragende Bedeutung als Schutzwald. Seit der Besiedlung des Alpenraumes war er neben der lokalen Holzversorgung und verschiedenen Nebennutzungen wichtig zur Verhütung von Lawinen, Erosion und Steinschlag. Ohne diese Schutzwirkung wäre das Berggebiet vielerorts unbewohnbar (Gremminger und Bürki 2002). Während die Holznutzung in den letzten Jahrzehnten an wirtschaftlicher Bedeutung verloren hat, sind Schutzbedürfnisse und damit entsprechende Ansprüche an den Gebirgswald ständig gestiegen (Teufen 1984). Wo es der Standort erlaubt, bietet der Wald für Gebäude und Verkehrsverbindungen flächenmässig die wichtigste und günstigste Schutzmassnahme (Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung 2000). Dennoch verursacht die Schutzwaldpflege immer grössere Kosten und der Erlös der Holznutzung trägt immer weniger bei, um diese Kosten zu decken.

Über die Lawinenschutzwirksamkeit der Gebirgswälder ist bereits viel bekannt (Schneebeili und Bebi, in press.; Bebi et al. 2001; Meyer-Grass und Schneebeili 1990, Bischoff 1987). Es wurden schon verschiedene Methoden zur Erfassung von Gebirgswaldstrukturen im Hinblick auf eine bessere Beurteilung der *aktuellen* Lawinenschutzwirksamkeit entwickelt (Mauser 1997, Chauvin et al. 1994, Leibundgut 1959). Es ist jedoch wenig bekannt über *mittel- bis langfristige* Veränderungen, welche zu einer Zu- beziehungsweise Abnahme dieser Schutzwirksamkeit führen. Die Untersuchungen erfolgten zudem immer sehr kleinflächig. Erst Bebi (2000) hat in seiner Arbeit Methoden entwickelt, die sich zur Erfassung von grossflächigen Kartierungen der subalpinen Fichtenbestände eignen. Mit Luftbildzeitreihen und Geographischen Informationssystemen (GIS) stehen heute Mittel zur Verfügung, um retrospektiv mehr über die Dynamik der Schutzwirksamkeit zu erfahren.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt darin, mit einer grossflächigen, luftbildbasierten Zeitreihenanalyse zum besseren Verständnis der Dynamik von Gebirgswäldern und insbesondere von Lawinenschutzwäldern beizutragen. Mit Hilfe von statistischen Analysen und GIS soll erklärt werden, welche Standorts- und Nutzungsfaktoren die Waldveränderung und die Schutzwirksamkeit beeinflusst haben.

Mit dieser Zielsetzung verbunden sind folgende spezifische Forschungsfragen:

1. Wie stark hat die Waldfläche seit den letzten 50 Jahren in der Gemeinde Davos zugenommen?
2. Bei welcher Kombination von Standortfaktoren hat tendenziell eher eine Zu- bzw. Abnahme der Schutzwirksamkeit stattgefunden.
3. Haben unterschiedliche Bewirtschaftungsmethoden eine Zu- bzw. Abnahme der Schutzwirksamkeit beeinflusst?

Basierend auf diesen Forschungsfragen und den folgenden Überlegungen können verschiedene Hypothesen gebildet werden:

Der Wald hat sich im gesamten schweizerischen Alpenraum, insbesondere in Folge der landwirtschaftlichen Nutzungsänderungen, während den letzten Jahrzehnten relativ stark ausgedehnt (Bebi und Baur 2002; Brändli 2000). Viele Heimweiden wurden brach gelegt. Die für den Graswuchs günstigen Lichtungen wuchsen endgültig ein und wurden zu geschlossenem Wald. Ein dichter Wald schützt infolge der höheren Interzeptionswirkung besser vor dem Anreissen von Lawinen als ein offener Wald (Schneebeli und Bebi, in press; siehe auch Kap. 2.3).

→ Hypothese 1:

Aufgrund der allgemeinen Waldausdehnung hat die Schutzwirksamkeit gegenüber Lawinen zugenommen.

Die Waldausdehnung in den Schweizer Alpen erfolgte gemäss Gellrich (2003, mündliche Überlieferung) im allgemeinen ausgeprägter an südexponierten Hängen, da die Strahlung dort höher ist und die Standorte dadurch wärmer sind.

→ Hypothese 2:

An südexponierten Hanglagen hat sich die Schutzwirksamkeit verbessert.

In steilem Gelände, wo sich die Schutzwälder befinden, sind die standörtlichen Bedingungen für die Waldregeneration sehr schwierig. Im Gegensatz zu den flachen Hanglagen wurden die steilen Hänge weniger häufig landwirtschaftlich genutzt. Mechanische Einwirkungen der Schneedecke beeinträchtigen die Waldverjüngung an steilen Hängen relativ stark und haben zur Folge, dass die Wälder offene Strukturen behalten (Ott et al. 1997; siehe auch Kap. 2.1).

→ Hypothese 3:

An steilen Hängen hat sich die Schutzwirksamkeit nicht verbessert.

→ Hypothese 4:

Schutzwälder haben sich weniger stark ausgedehnt als andere Waldflächen.

Mit gezielten Aufforstungen und waldbaulichen Massnahmen sollte die Schutzwirksamkeit an solchen Standorten jedoch verbessert werden können (Ott et al. 1997; Imbeck und Ott 1987; Hefti und Bühler 1986).

→ Hypothese 5:

In genutzten Wäldern hat sich die Schutzwirksamkeit häufiger verbessert.

Für die Erfassung der Waldstruktur in der Landschaft Davos soll der bestehende Luftbildschlüssel von Bebi (2000) verwendet werden, der für das grossflächige Untersuchungsgebiet etwas vereinfacht wird. Der Vorteil der Typologie von Bebi (2000) liegt darin, dass auf schon bestehenden Strukturabgrenzungen aufgebaut wird (vergl. Chauvin et al. 1994), und dass die Abgrenzung mit dem Landesforstinventar (LFI 1994) kompatibel ist. Die erfassten Waldstrukturen von 1954 und 2000 werden anschliessend übereinandergelagert und miteinander verglichen. Die Abhängigkeit der Walddynamik von Standorts- und Nutzungsfaktoren kann anhand von univariaten und multivariaten statistischen Methoden analysiert werden. Im Untersuchungsgebiet soll aufgezeigt werden, wie die Erfassung von Gebirgswaldstrukturen mit Hilfe von GIS-Analysen und in Kombination mit zusätzlichen Datenquellen zur Beurteilung der Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit eingesetzt werden kann. Ob eine Lawine innerhalb des Waldes anbricht oder nicht, wird bestimmt durch die Schneedecke, die Witterung, die Gelände- und die Bestandeseigenschaften. Während die ersten drei Faktoren von Natur aus gegeben und kaum veränderbar sind, können die Bestandeseigenschaften durch waldbauliche Massnahmen beeinflusst werden (Mayer und Ott 1991). Die Berechnungen der Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit für die gesamte Landschaft Davos soll dabei auf den Modellierungen von Bebi (2000) aufgebaut werden.

2 Grundlagen

2.1 Der Gebirgswald

Die Lebensbedingungen im Gebirgswald sind sehr hart. Der Wärmemangel setzt dem Wald in der subalpinen Stufe Grenzen. Die Sommer sind kurz, die warmen Tage selten. Darum muss alles, was zum Leben und Überleben notwendig ist, innerhalb von kurzer Zeit vollbracht sein. Nicht genügend verholzte Jahrestriebe, die sich über der Schneedecke befinden, trocknen infolge des gefrorenen Bodens und dem dadurch entstehenden Wassermangel aus, und die Bäume verbuschen (Ott et al. 1997). Im Unterschied zu tieferen Lagen brauchen die jungen Fichten- und Lärchenpflanzen direktes Sonnenlicht um heranzuwachsen.

Das Standortmosaik im Gebirgswald schafft günstige und ungünstige Kleinstandorte. Günstig wirken sich Geländeüberhöhungen wie Kuppen und Rippen, die Anwesenheit von Baumstrünken und Moderholz aus (Ott et al. 1997). Nadelwaldfeindliche Kleinstandorte sind vernässte Stellen und schneereiche Geländevertiefung mit später Ausaperung. Die hohen langandauernden Schneedecken belasten die Bäume durch ihr Gewicht und durch ihre Bewegungen und bieten Schneepilzen ideale Vermehrungsbedingungen. Vor allem junge Fichten, Arven und Bergföhren sind bedroht von ihnen, wenn die Kronen bis in den Frühling hinein unter der Schneedecke liegen.

Die Bodenvegetation im Gebirgswald setzt sich meist aus wenigen Pflanzenarten zusammen, die sich in aufgelichteten Beständen breit machen. Es bilden sich Farnflure, Reitgrasrasen, hüfthohe Hochstaudenfluren mit Alpendost, oder Zwergstrauchheiden mit Heidelbeeren und Alpenrosen. Diese Kräuter werden durch eine stets ausreichende Wasserversorgung begünstigt und profitieren zudem vom zuverlässigen Schutz der Schneedecke gegen Winterfrost. Allzu üppige Vegetationsteppiche wirken sich auf die Verjüngung der Bäume negativ aus. Es verstreichen oft viele Jahre, bis die leichtsamigen Nadelbäume im Vegetationsteppich Fuss fassen können (Bischoff 1987).

In der subalpinen Höhenstufe wachsen die Bäume in den ersten Jahrzehnten sehr langsam. Die Fichte benötigt oft mehr als 50 Jahre, bis sie etwa Brusthöhe erreicht, weil das Wurzelwachstum durch die ungenügende Bodenwärme verzögert wird. Danach beginnt ein riskanter Lebensabschnitt, weil die Bäume ihr Höhenwachstum beschleunigen und die Stämme starr und brüchig werden. Es entsteht die Gefahr, dass

die Wipfel unter der Schneeauflast brechen, oder dass sie durch Schneebewegungen verformt, gebrochen oder entwurzelt werden. Wenn die Bäume diesen kritischen Lebensabschnitt überwunden haben und Stangenholz gebildet haben, erreichen sie erstaunlich hohe Alter. Innerhalb derselben Baumgruppe gibt es oft Altersunterschiede von über 200 Jahren. Die Ungleichaltrigkeit macht den subalpinen Nadelwald widerstandsfähig und dauerhaft.

Infolge der schwierigen Lebensbedingungen bildet der Wald manchmal unregelmässig „klumpig“ angeordnete Waldstrukturen und passt sich so den kleinstandörtlichen Gegebenheiten an. Dort wo die Standortbedingungen besonders hart sind, bilden sich nur selten dichte Waldstrukturen.

2.2 Lawinenschutzwald und Waldlawinen

2.2.1 Definition

Als *Wald* werden gemäss dem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI 1999) Flächen bezeichnet, bei denen der Abstand zwischen den Stämmen weniger als 25 m beträgt, der Deckungsgrad der Kronen mindestens 20% erreicht, und die Bäume eine minimale Oberhöhe von 3 m aufweisen. Die Oberhöhe ist definiert als Mittel der 100 höchsten Bäume pro ha.

Ein Wald gilt dann als *Lawinenschutzwald* wenn er auf Hängen mit mehr als 28° Hangneigung stockt und gefährdete Objekte wie Menschenleben oder erhebliche Sachwerte schützt (siehe Kap. 4.4).

Der Begriff *Waldlawine* wird für Lawinen verwendet, die innerhalb des Waldes anreissen (siehe Abb. 1). Entscheidend ist einzig der Ort des Anrisses und nicht der verursachte Schaden. Lawinen, die Wälder beschädigen, aber oberhalb des Waldes anbrechen, sind nach dieser Definition keine Waldlawinen (Konetschny 1990). Eine Ausnahme wird dann gemacht, wenn der Anriss in einer morphologisch vorgegebenen und teilweise unbestockten Erosions- oder Lawinenrinne, auf einer grossen Blockschuttfäche oder einer steilen Felspartie (>60 Grad) liegt (siehe Abb. 1). In diesen Fällen ist der Begriff Waldlawine nicht angebracht (Meyer-Grass und Schneebeli 1992).

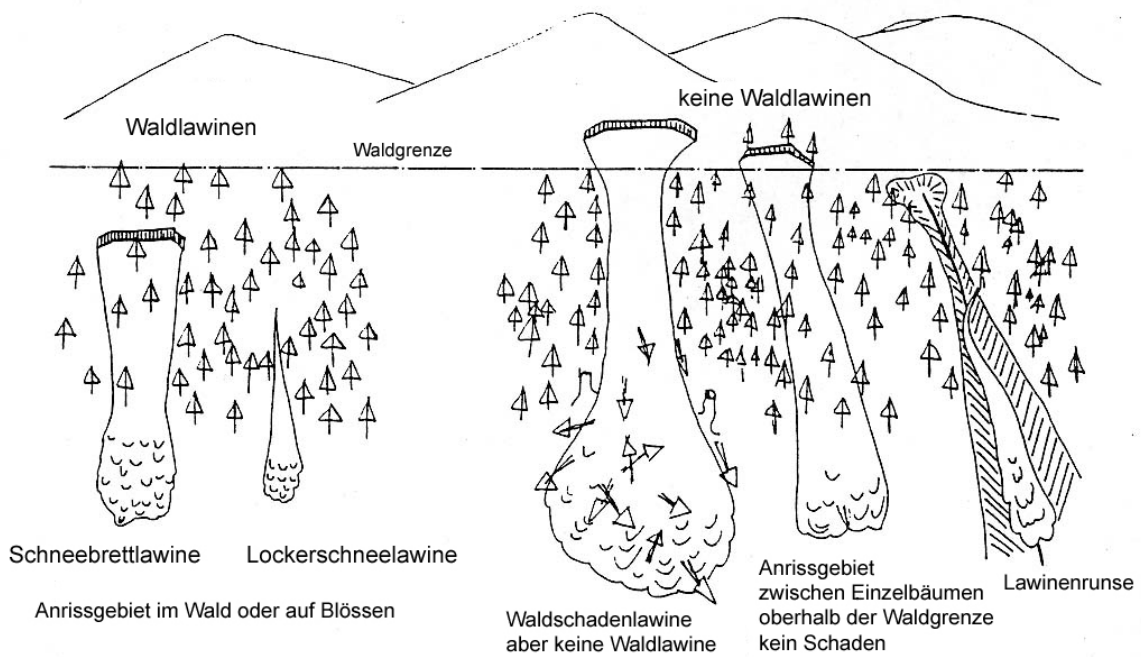


Abb. 1: Erklärung des Begriffs „Waldlawine“. Aus: Meyer-Grass 1987

2.2.2 Entstehung von Waldlawinen

Die Lawinenaktivität im Wald ist abhängig von einer komplexen Kombination verschiedener Parametern (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 2000):

- *Bestandesparameter:* Lückengröße, Bedeckungsgrad, Durchlässigkeit für einfallende und ausgehende Strahlung.
- *Topographische Parameter:* Hangneigung, Exposition (meist sehr steile Schattenhänge), Bodenrauigkeit.
- *Nivologische Parameter:* geringe basale Scherfestigkeit in einer potentiellen Gleitschicht, Überlast, Neuschnee und Temperaturanstieg.

Nicht alle diese Parameter beeinflussen die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit gleich stark (siehe Kap. 4.7). Eine geringe basale Scherfestigkeit in einer potentiellen Gleitschicht muss jedoch genau wie bei Freilandlawinen immer vorhanden sein.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Distanz von der Lawinenanrissstelle in einer Lücke bis zum nächsten, in der Falllinie gelegenen Waldsaum. Sie beeinflusst die Geschwindigkeit und die Gewalt der Lawine. Generell können Lawinen, die sich über

eine Distanz von mehr als 150 m beschleunigen, vom Wald nicht mehr gebremst werden und die Bäume werden zerstört (Schneebeli und Bebi *in press*). Wenn die Distanz kleiner ist als 150 m, ist die Schutzwirkung des Waldes abhängig von der Hangneigung, der Lawinengrösse und der Verteilung und Grösse der Baumstämme (Schneebeli und Bebi *in press*).

2.2.3 Formen von Waldlawinen

Auf Grund ihrer Bildungsmechanismen werden zwei Arten von Lawinenformen unterschieden:

Lockerschneelawinen im Wald

Charakteristisch für Lockerschneelawinen sind der punktförmige Anriss, der entweder spontan oder durch einen äusseren Anstoss (z.B. durch herabfallenden Schnee oder einen Stein) verursacht wird sowie die kegelförmige Lawinenform. Lockerschneelawinen entstehen nach intensiven, kalten Schneefällen bei einem Temperaturanstieg, der sowohl am Boden wie auch auf den Bäumen einen Festigkeitsverlust des Schnees verursacht. In der Anfangsphase der Erwärmung ist die Aktivität von Lockerschneelawinen stark erhöht und geht dann rasch wieder zurück. Normalerweise richten die Lockerschneelawinen am Wald keinen Schaden an. Die lockeren Schneemassen bewegen sich langsam den Hang hinunter. Erst wenn sie den Wald verlassen, können sie durch erhöhte Fliessgeschwindigkeit Schaden an Objekten anrichten (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 2000).

Schneebrettlawinen im Wald

Bei Schneebrettlawinen ist der Anriss linienförmig, scharfkantig und senkrecht zur Gleitfläche, was zur Folge hat, dass eine ganze Schneetafel gleichzeitig abbricht. Der Bruchvorgang hat seinen Ursprung meist in einer kleinen Fläche (einige 10 m²), in der die wirkende Spannung so gross wie die betreffende Festigkeit geworden ist (Salm 1987). Die Schneebrettlawinen brechen meist in grösseren Lücken an, weil dort die notwendige Schwachschicht oft flächenhaft vorhanden ist (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 2000).

2.3 Der Wald als Schutz vor Lawinen

Der Wald schützt nicht vor Lawinen, die oberhalb der Waldgrenze losgehen. Er kann nur das Anreissen von Lawinen innerhalb des Bestandes verhindern. Die Schutzwirksamkeit des Waldes basiert vor allem auf den folgenden vier Eigenschaften (vergl. Schneebeli und Bebi, in press):

Schneeinterzeption

Im Wald wird ein Teil des fallenden Schnees durch die Baumkronen aufgefangen, was als Interzeption bezeichnet wird (siehe Abb. 2). Die Menge des interzeptierenden Schnees ist sehr unterschiedlich und stark von der Intensität des Schneefalls, der Schneeart, den jeweiligen Witterungsverhältnissen (Wind, Temperatur, Strahlung) und vom Bestandesaufbau abhängig (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 2000). Bei wärmeren Temperaturen ($T > -3^{\circ}\text{C}$) nimmt der Anteil des interzeptierenden Schnees stark zu. Ungefähr 10-30% des Schnees auf den Ästen verdunstet. Der grösste Teil fällt nachträglich als Tropfwasser auf den Boden. Das Herabfallen des Schnees wird durch kurzweilige Sonneneinstrahlung, welche die Nadeln, Zweige und Äste erwärmt, stark gefördert. Die Schneeinterzeption reduziert die Schneehöhe innerhalb des Waldes und verhindert die Bildung von homogenen Schichten, die wir im Freiland beobachten können. Dies hat zur Folge, dass auf grösseren Flächen keine Scherbrüche entstehen können und somit die Lawinenbildung verhindert wird (Meyer-Grass und Schneebeli 1992).

Strahlungshaushalt

Im Vergleich zum Freiland sind Einstrahlung und nächtliche Ausstrahlung im Wald reduziert. Es herrscht ein gemässigt Waldinnenklima (Frey 1977). Die geringen Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht verhindern die Bildung von Rauhereif und Schwimmschnee, die im Freiland zur Entwicklung von gefährlichen Schwachschichten führen können. Die höheren Schneetemperaturen bewirken im Wald eine festere Schneedecke.

Wind

Da im Wald reduzierte Windeinwirkungen herrschen, wird die Bildung von gefährlichem Triebsschnee stark vermindert. In grösseren Waldlücken jedoch kann es zu erhöhten Schneeansammlung kommen, da sich dort durch den Wind oft starke Wirbel bilden, die den Schnee von den umliegenden Baumkronen in die Waldlücke verfrachten (siehe Abb. 2).

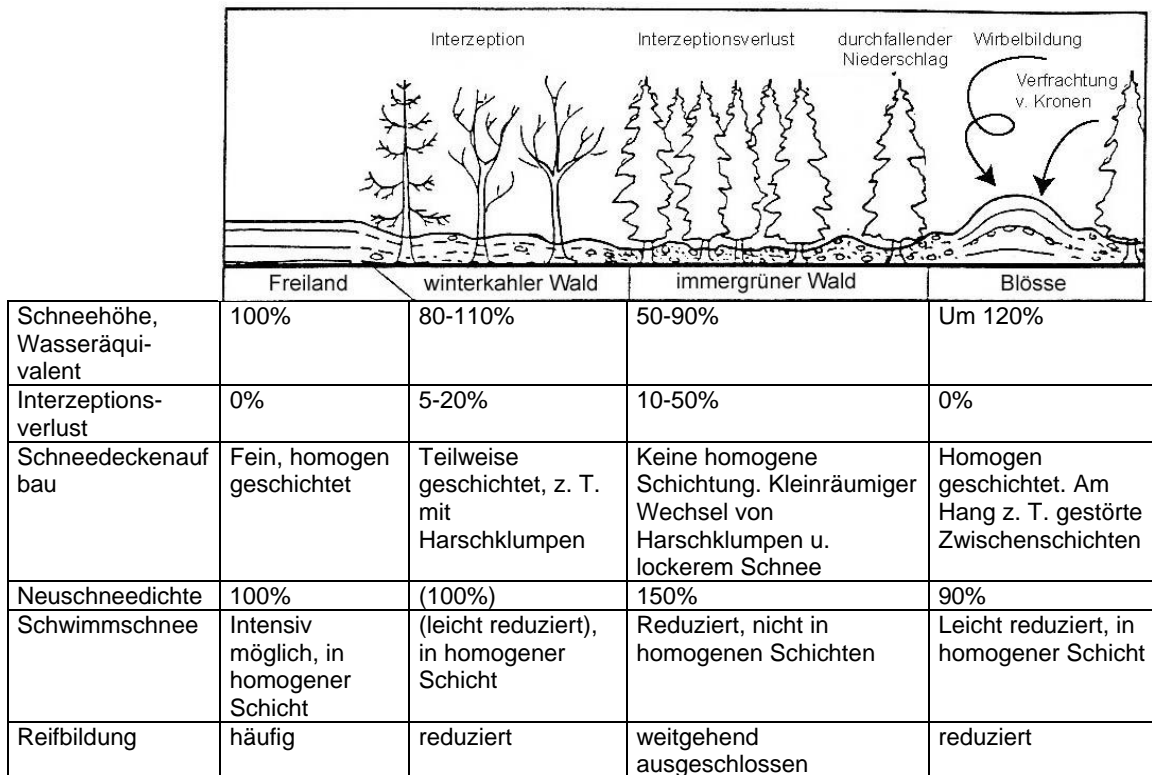


Abb. 2: Schnee- und Windverhältnisse im Wald. Aus: Imbeck 1984

Stützwirkung der Stämme

Abstützende Stämme und Stöcke, aber auch liegende Bäume erhöhen die Rauigkeit des Bodens und wirken so als stabilisierende Elemente in der Schneedecke. Die Stützwirkung der Bäume alleine genügt aber normalerweise nicht für die Schutzwirksamkeit vor Lawinen. Damit die Wirkung einem Lawinenverbau entsprechen würde, sind je nach Hangneigung und Schneehöhe unterschiedliche Stammzahlen/ha nötig: 500 Stämme/ha für einen 30° steilen Hang, 1000 Stämme/ha für einen 40° steilen Hang (Meyer-Grass und Schneebeli 1992).

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Allgemeiner Überblick

Die „Landschaft Davos“ (so lautet die offizielle Bezeichnung für die politische Gemeinde) ist ein Tourismusort im Nordosten des Kantons Graubünden. Sie liegt im Übergangsbereich von den feuchten nördlichen zu den trockenen Zentralalpen in den Bündner Alpen. Mit einer Fläche von 253 km² ist sie die zweitgrösste Gemeinde der Schweiz. Das Haupttal der Landschaft Davos, das Landwassertal, verläuft von NNE nach SSW und wird von der Landwasser zum Hinterrhein entwässert. In die Südostflanke des Haupttales münden die drei Seitentäler Flüela-, Dischma- und Sertigtal. Die Nordwestflanke des Haupttales ist nicht von Tälern durchschnitten, sondern schliesst das Landwassertal gegen NNW durch eine Gipfelflur mit dem Parsenn- und Strelagebiet und den Gipfeln Weissfluh, Schiahorn und Chüpfenflue ab.

Davos-Dorf und Davos-Platz sind mit 11000 Einwohnern die grössten städtischen Siedlungen der Landschaft Davos und im oberen Bereich des Haupttales gelegen. Nebst einigen Einzelhöfen kommen in den Seitentälern und in den übrigen Bereichen des Haupttales kleinere, hauptsächlich landwirtschaftliche Siedlungen hinzu (Laret, Wolfgang, Frauenkirch, Glaris, Spina, Monstein und Clavadel).

3.2 Geologie

Das Landwassertal trennt als markante geologische Grenze das Silvrettakristallin (einen herzynischen Grundgebirgsblock, der bei der Alpenfaltung von seiner Unterlage abgeschert ist und jetzt den Kern der ostalpinen Decke bildet) von tieferen tektonischen Einheiten (Cadisch 1929). Das Silvrettakristallin liegt im Südosten des Landwassertales und reicht zwischen Davos Platz und Frauenkirch über das Tal hinweg auf den Gegenhang. Es besteht einerseits aus Paragneisen und Amphiboliten, andererseits aus Orthogneisen hauptsächlich granitischer Herkunft. In der kristallinen Unterlage sind zwei SW-NE streichende von Triassedimenten erfüllte Grossmulden eingesenkt (Ducanmulde und Landwassermulde) (Streckeisen 1966). Im Nordwesten des Haupttales liegen die tektonisch tieferen Einheiten der Aroser Dolomitdecke (Triasdolomit), der Silvrettakristallinschuppe, der Davoser Dorfbergdecke (Kristallin aus feinkörniger Gneise und Glimmerschiefer) und der Aroser Schuppenzone. Sie fallen im

Süden unter das Silvrettakristallin ein und treten im Unterengadiner Fenster (Ardez, Scuol, Tarasp) wieder hervor (Streckeisen 1966).

3.3 Geomorphologie

Im Hochglazial waren die Talabschnitte der Landschaft Davos das Nährgebiet eines eigenen Gletschers, der bis auf 2600 m ü. M. reichte und nur gerade die höchsten Berggipfel freiliess. Die Eismassen strömten einerseits nach Südwesten zum Albulagletscher, anderseits nach Norden zum Silvretta-Landquart-Gletscher. Im Spätglazial trennten sich die Eismassen allmählich, und der Davoser-Gletscher löste sich nach und nach in einzelne Zungen auf, die dann selbständige Moränen und Gletscherstände ausbildeten (Maisch 1981). Am Verlauf der Seitentäler ist zu erkennen, dass das Landwassertal im Bereich Davos ursprünglich in nordöstlicher Richtung entwässert wurde. Die Wasserscheide befand sich damals zwischen Albula und Landwasser in der Gegend von Glaris. Im Spätglazial ereignete sich der Totalbergsturz und schuf beim heutigen Wolfgang eine neue Wasserscheide. Es kam zum Aufstau eines 13-14 km langen Sees – dem Gross-Davosersee, der im Laufe der Zeit durch die Schwemmkegel der Zuflüsse in mehrere Becken zerlegt wurde. Der südliche Talabschluss war mit Moränenmaterial aufgefüllt, das relativ schnell ausgeräumt wurde und zum Auslaufen des Sees beitrug. Durch diese Prozesse wurde der grosse See auf die heutige Fläche des Davoser Sees verkleinert. Durch den Gross-Davosersee entstanden verschiedene Deltaschüttungen (Wildboden, Chumma, Monstein), die zur Gestaltung des Hochtales beitrugen (Cadisch 1929).

3.4 Klima

Die klimatischen Bedingungen in der Landschaft Davos können als gemässigt zentralalpin oder kontinental beschrieben werden. Das Tal weist eine relativ kleine Niederschlagssumme, geringe Bewölkung und eine lange Sonnenscheindauer mit wenig Wind auf. Innerhalb der Landschaft Davos gibt es jedoch klimatische Unterschiede. Das obere Landwassertal gehört zusammen mit dem Prättigau zur niederschlagsreichen Klimazone der Nordalpen. Das untere Landwassertal zählt bereits zum gemässigten kontinentalen eher trockenen inneralpinen Gebirgsklima. Im Durchschnitt liegt der Niederschlag in der Landschaft Davos bei 1007 mm pro Jahr und damit unter dem Landesmittel der Schweiz von 1250 mm (Zingg 1961). Bei Südlagen

kommt der Föhneffekt hinzu, der den niederschlagsarmen Charakter unterstützt. Bei Nordlagen ist Davos durch seine Lage hinter dem Wolfgangpass bereits etwas besser geschützt als das trichterförmige Prättigau, in das die Nordwinde ungehindert eindringen können (Schüepp 1961). Obwohl die Landschaft Davos rund 350m höher gelegen ist als Klosters, fallen deutlich weniger Niederschläge. Rund 40% der Niederschläge fallen als Schnee. In der Regel dauert die durchgehende Schneebedeckung von Anfang November bis Ende Mai. Die Vegetationszeit beträgt 3-4 Monate (Mai/Juni bis September). Das Januarmittel der Temperatur liegt bei -7°C , das Julimittel bei $+12^{\circ}\text{C}$. Das mittlere Januarminimum beträgt -21°C , das mittlere Julimaximum $+24^{\circ}\text{C}$. Die Anzahl Frosttage wird mit 192 pro Jahr angegeben, diejenige der Eistage mit 60 (Schüepp 1961).

3.5 Vegetation

Der Wald macht flächenmässig rund 20% des Gemeindegebietes Davos aus (siehe Abb. 3). Die Fichte ist mit 83% die meist vertretene Baumart, gefolgt von der Lärche mit 13% und der Arve und der Föhre mit je 2% (Teufen 1984).

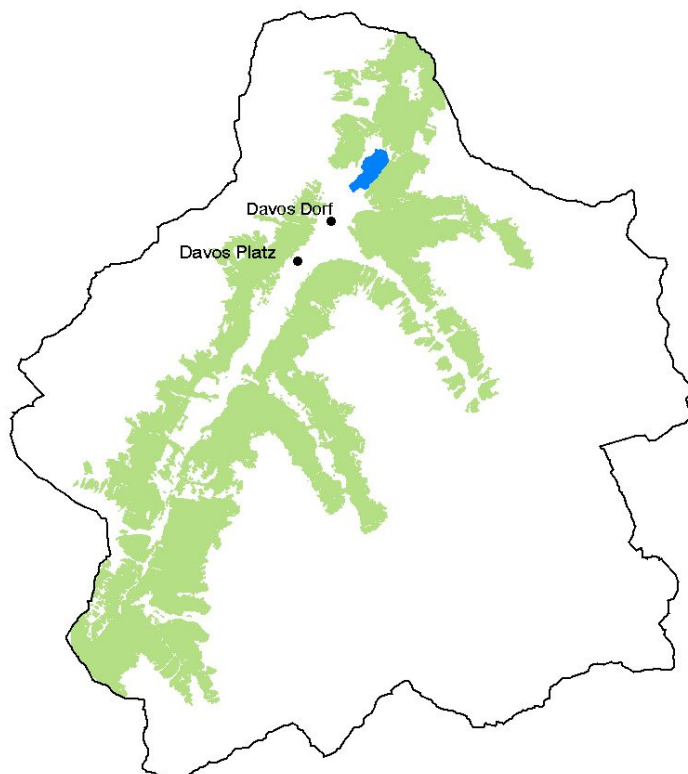


Abb. 3: Rund 20% der Fläche der Gemeinde Davos ist Waldgebiet.

In der Landschaft Davos sind hauptsächlich drei Höhenstufen vertreten: die subalpine, die alpine und die nivale Stufe. Es kommen je nach Höhenstufe verschiedene Vegetationseinheiten vor (Trepp 1959). Die heutige Flora muss zum grössten Teil nach dem Rückzug der Gletscher eingewandert sein, da während der letzten Eiszeit das Gebiet von Davos sehr stark vergletschert war und nur wenige Gipfel über 2500m aus dem Eismeer herausragten (Maisch 1981).

Nach Trepp (1959) werden die Höhenstufen folgendermassen charakterisiert: Zur subalpinen Stufe (1400 – 2200m ü. M.) gehören die Fettwiesen der Talsohlen auf rund 1500m ü. M., die Waldgesellschaften sowie die Legföhrengbüsche und Zwergstrauchheiden. Fichtenwälder sind der verbreitetste Waldtyp. Sie erstrecken sich im Haupttal vom Talboden bis zur Waldgrenze. An den feuchten, schattigen Nordhängen ist der Hochstauden-Alpenfichtenwald und der Heidelbeer-Alpenfichtenwald sehr weit verbreitet. In diesen beiden Waldtypen wird die Bodenvegetation vom Alpendost und von Heidelbeeren dominiert (Teufen 1984). An den sonnigen, trockenen Rippen und Kuppen beidseits des Tales ist häufig aber eher kleinflächig der Preiselbeer-Alpenfichtenwald anzutreffen. Er bevorzugt den kristallinen Boden. Entlang der oberen Waldgrenze an west-, nord-, und ostexponierten Hängen kommt der Reitgras-alpenfichtenwald vor. Das Reitgras ist vor allem in Bestandeslücken oft üppig vorhanden. In den Seitentälern nehmen die Fichten nur den unteren Teil der Waldstufe ein. Sie bilden oft reine Bestände die gegen die Waldgrenze hin mit Lärchen vermischt sind. Südlich des Landwassers löst der Lärchen -Arvenwald nach oben den Alpenfichtenwald ab. In den Seitentälern und an den Nordhängen des Haupttales hat der Arvenwald früher einen zusammenhängenden Gürtel gebildet; heute ist er weitgehend aufgelöst. Am Eingang des Schiatobels sowie auf dem nährstoffarmen Serpentinegestein des Wolfgangs ist der Erika – Bergföhrenwald bestandesbildend. Legföhrengbüsche befinden sich vor allem auf rutsch- und lawinengefährdeten Hängen. Die Zwergstrauchgesellschaften sind hauptsächlich im Dischmatal anzutreffen. Sie bilden zwischen der Waldvegetation und dem alpinen Urrasen einen breiten Gürtel; intensive Beweidungen in früheren Jahrhunderten haben den Waldbestand dort verdrängt.

Die alpine Stufe schliesst an die Zwergstrauchheiden an und umfasst den Bereich der alpinen Rasen bis zur Schneegrenze. Sie ist oft durch Schutt, Felsfluren und permafrosthaltigen Blockgletscher unterbrochen und weist keine homogene Zusammensetzung auf (vergl. auch Phillips 2000; Haeberli 1975). Die Schneedecke ist ein wichtiger Faktor für die Vegetation in dieser Stufe. Der Zeitpunkt der Ausaperung

und die Schneedeckenmächtigkeit haben massgeblichen Einfluss auf die Artenzusammensetzung. Durch eine langanhaltende Schneedecke wird die Vegetationsperiode verkürzt und die andauernden schneedynamischen Vorgänge beeinflussen die Vegetationsdecke beträchtlich. Oberhalb der Schneegrenze wächst die spärliche Pioniervegetation der nivalen Stufe.

3.6 Böden

Die Landschaft Davos weist je nach Lage, Höhe und Vegetation verschieden Bodentypen auf. Die bodenbildenden Faktoren sind die Ein- und Auswaschung und die Prozesse der Verwitterung. In der subalpinen Zone sind Podsole (stofflich stark differenzierte Auswaschungsböden silikatischer Lockergesteine) häufig. Die Nadelbäume liefern eine schwer abbaubare Streu, aus der sich immer stärker versauernder Rohhumus bildet. Sie gliedern sich im Mineralboden in einen Eluvialhorizont, der an Mineralstoffen und Ton sehr verarmt ist, und in einen Illuvialhorizont, in dem die mit dem Sickerwasser verlagerten Humusstoffe angereichert werden. Die Podsole sind nährstoffarme Böden hoher Durchlässigkeit und geringer Wasserkapazität.

Primäre Humuspodsole, Braunerden oder Braunpodsole entstehen an nicht mit Hochvegetation bedeckten Lagen. Ranker und Rendzinen sowie die Alpine Braunerde charakterisieren die alpine Stufe. Ranker sind flachgründig, sauer, oft relativ nährstoffarm und nur mässig wasserhaltefähig (Krause 1986).

3.7 Geschichtlicher Hintergrund

Die ganzjährige Besiedlung von Davos begann im 13. Jahrhundert mit dem Einzug der Walser. Sie zogen aus dem heutigen Wallis nach Davos, weil sie von den damaligen Freiherren von Vaz als Lohn für ihre Kriegsdienste Land in der Region des Landwassertales zugesprochen bekamen (Laely 1984). Der Einzug der Walser veränderte die Landschaft Davos. Sie rodeten mit Feuer und Axt grosse Flächen und teilten das Gebiet in 12 Einzelhöfe auf (nachträglich kamen zwei weitere Höfe dazu: Ober- und Unter-Laret). Die 14 Höfe bildeten die Grundlage für die spätere Aufteilung in Nachbarschaften. Die politische Aufteilung blieb bis Mitte des 19. Jahrhunderts bestehen. Als Siedlungsform wählten die Walser Streuhöfe, was sich für Viehzucht und Milchwirtschaft gut eignete, jedoch die gesellschaftlichen Verbindungen erschwerte

und den bereits vorhandenen Individualismus, der sich auch in der Waldgeschichte deutlich macht, noch zusätzlich verstärkte (Senn 1952). Als Donat von Vaz, der letzte Freiherr von Vaz 1338 starb, wurde das Gebiet eine Zeitlang eigenständig. 1479 nahmen die Österreicher die gesamte Region in Besitz und beherrschten sie ungefähr 150 Jahre lang. Die Österreicher zeigten grosses Interesse am Bergbau. Dieser war in Davos bis ins 19. Jahrhundert ein wichtiger Industriesektor. 1848 wurden die letzten Gruben aus wirtschaftlichen Gründen stillgelegt (Ferdmann 1938). Ende des 18. Jahrhunderts gewann Davos als Sommerkurort an Bedeutung zu gewinnen. Mit dem Bau des ersten Kurhauses 1866 wurde die Region weltweit bekannt. Es folgte eine rasche Verbesserung der Infrastruktur: die Strassenbeleuchtung (1880), öffentliche Verkehrsmittel (1883), die meteorologische Anstalt (1887) und die Eisenbahn (1889) verwandelten Davos in einen modernen Kurort. In den dreissiger Jahren des 20. Jahrhunderts machten sich durch den Rückgang der Tuberkulose starke finanzielle Einbussen bemerkbar. Es wurden deshalb viele Sanatorien zu Hotels umgebaut und die Berge wurden weiter erschlossen. Der Erfolg der Parsennbahn, die 1932 in Betrieb genommen wurde, und der Zwang der Umstrukturierung führten ab 1955 zum weiteren Ausbau der Wintersportanlagen. Mit dem Bau des Kongresszentrums 1969 gewann Davos zusehends an internationaler Bedeutung (Günter 1985).

3.8 Forstwirtschaft

Die Landschaft Davos war früher bis zur klimatischen Waldgrenze hin bewaldet. Einzig die durch den Fluss versumpften Gebiete im Haupttal blieben waldfrei. Mit dem Einzug der Walser im 13. Jahrhundert begann sich dies zu verändern. Der Wald wurde mit Axt und Feuer gerodet und zugunsten von neuem Kulturland zurückgedrängt. Er war wichtiger Lieferant von Brenn- und Bauholz und diente als Weide und Mahd und zur Gewinnung von Streue und Zaunholz (Senn 1952). Eine geregelte Bewirtschaftung war schwierig, da sich der Wald mehrheitlich in Privatbesitz befand und komplizierte sich überlagernde Nutzungsrechte vorherrschten. Im 16. Jahrhundert wurden erstmals Gesetze erlassen, welche die Rodung mit Feuer bewilligungspflichtig machten. Besonders stark geprägt wurde der Wald durch die Waldweide. Er war ein beliebter Weidegrund von Schafen und Ziegen. Bis zum Verbot der Waldweide durch die Davoser Forstordnung 1873 und durch das Eidgenössische Forstpolizeigesetz 1876 schädigten die Ziegen die Bergwälder in hohem Ausmass. Auch der Bergbau bis ins 19. Jahrhundert reduzierte den Wald durch mehrere grosse Kahlschläge (Laely 1984). Starke Riefenniedergänge im Jahr 1870 und das Gesetz der Forstpolizei führten

schliesslich zu einer Wende und allmählich zum Wiederaufbau der Davoser Wälder. Nebst den Pflanzungen hatte der Verzicht auf Wald- und Weidenutzung einen grossen Einfluss auf die Wälder. In einem Schutzwaldprojekt zur Regulation des Albertibaches wurden zwischen 1907 und 1932 rund 300000 Bäume gepflanzt. Andere grössere Aufforstungen erfolgten unter anderem im Bereich Schatzalp-Guggerbach, am Dorfberg, in Monstein sowie im Gebiet Seehorn-Steinschlagwald. Die Zahl der Ziegen in der Landschaft Davos sank zwischen 1866 und 1911 von 1790 auf 391 Stück, und die Holznutzung in den Wäldern war in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nur noch etwa halb so gross wie der Holzzuwachs. Der abrupte Nutzungsverzicht schuf ausgezeichnete Bedingungen für das Aufkommen und das schnelle Wachstum von Jungbäumen, weil die von der Beweidung freigelegten Mineralböden sehr nährstoffreich waren und das noch offene Kronendach im Sommer genügend Licht und Wärme spendete. Ein weiterer Grund für das schnelle Wachstum war zudem das noch weitgehende Fehlen von überwinternden Hirschen in dieser Zeit. All diese Gegebenheiten führten dazu, dass viele junge Bäume gleichzeitig aufwachsen konnten und gegenseitig in einen Konkurrenzkampf gerieten. Um genügend Licht zu erhalten, wuchsen die Bäume schnell in die Höhe und wurden schlank und kurzkrönig. Deshalb trifft man in Davos heute häufig dichtgedrängte, gleichförmige Wälder an. Nahe der Waldgrenze nehmen die dichten Waldbestände ab, da die Bäume in höheren Lagen härteren klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind und nur langsam wachsen (Bebi 2000).

4 Methoden

4.1 Das Luftbild

Das Luftbild stellt ein aktuelles Umweltdokument dar, in dem der Zustand der Landoberfläche zum Zeitpunkt der Aufnahme für lange Zeit festgehalten wird (Mauser 1997). Mit Hilfe von Luftbildzeitreihen lassen sich Landschaftszustände analysieren und Entwicklungstendenzen feststellen. Für die Analyse der Lawinenschutzwälder von Davos wurden Luftbilder von 1954 und 2000 verwendet. Bei den Luftbildern von 1954 handelt es sich um 24 panchromatische Senkrechtaufnahmen mit einer Überdeckung von 50-70% und einem durchschnittlichen Massstab von 1:30000. Die 19 farbigen Luftbilder vom Jahr 2000 waren bereits als digitale Orthofotos mit einer Auflösung von 0.5 m vorhanden. Beide Bildserien wurden im Spätsommer aufgenommen (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Verwendete Luftbilder und Orthofotos von 1954 und 2000

Luftbilder 1954	Orthofotos 2000
Kamera: Wild RC5; f = 115 mm	Format: Tiff, RGB (24bit)
Flughöhe: 5180 m. ü. M	Pixelgrösse: 0.5m
Massstab: 1:30000 (Durchschnittswert)	Aufnahmedatum: 23-25. 08.2000
Aufnahmedatum: 01. 09. 1954	Digitalies Geländemodell : dhm25

Luftbildaufnahmen werden mit passiven Fernerkundungsverfahren erstellt. Dabei wird die von Objekten reflektierte Sonnenstrahlung mit einer Filmemulsion erfasst und in Wellenlängenbereichen von 100nm (ultraviolett) bis 1300nm (Nahes Infrarot) dargestellt (Mauser 1997).

Die Verwendung des Luftbildes für forstliche Informationsgewinnung ist bereits mehr als 100 Jahre alt (Mauser 1997). Insbesondere die Farbinfrarotluftbilder bieten bei forstlichen Planungsaufgaben eine Reihe von Vorteile: Die Vogelperspektive erlaubt das Erkennen von Merkmalen, die vom Boden aus schlecht oder gar nicht sichtbar sind. Dadurch lassen sich Verteilungen von Objekten und fließende Übergänge gut erkennen. Vor allem in Schutzwäldern mit schwer begehbarem und unübersichtlichem Gelände kann das von grossem Vorteil sein. Grosse Untersuchungsgebiete können

flächendeckend und in kurzem Zeitraum erfasst werden. Dabei ist eine hohe Detailerkennbarkeit gewährleistet, die je nach Bildmassstab in den Dezimeter- oder Zentimeterbereich geht (Mauser 1997). Ein weiterer Vorteil des Luftbildes ist der Stereoeffekt, der durch die räumliche Betrachtung von sich überlagernden Luftbildern unter dem Stereoskop entsteht. Der Stereoeffekt wurde für die Luftbildanalyse in dieser Arbeit nicht verwendet, weil die Analysen für die weitere Verwendung im GIS (Geographisches Informationssystem) in das Schweizerische Koordinatensystem eingepasst werden mussten. Dies wäre nur mit komplizierten photogrammetrischen Auswerteverfahren möglich gewesen. Statt dessen wurden die Luftbilder von 1954 orthorektifiziert (siehe Kapitel 4.2), damit die Waldstrukturerfassung direkt mit Hilfe der Software ArcGIS von ESRI erfolgen konnte.

Das Luftbild besitzt auch Nachteile, die man bei einer Analyse beachten sollte. Es bietet keine Möglichkeit, ins Innere von Objekten zu blicken. Zum Beispiel sind Informationen von Gegenständen, die sich unterhalb einer Vegetationsdecke befinden, schwierig zu erkennen. Vor allem im Gebirge schaffen die starke Gliederung des Geländes und die Steilheit unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse (Haefner 1963). Die Auswirkung der verschiedenen Beleuchtungsintensität wird vor allem im Grauton sichtbar. Das gleiche Objekt wird je nach Lage eine andere Tönung aufweisen (Haefner 1963). Je nach Einfallswinkel des Sonnenlichtes und der Lage des Objektes können Schlagschatten entstehen (Mauser 1997). Diese können erheblich verkürzt oder verlängert werden, je nachdem ob sie Hang aufwärts oder Hang abwärts fallen. Infolge der Steilheit des Geländes werden in alpinen Regionen einzelne Partien oft vom Schatten eines Berges bedeckt, wodurch diese Stellen für eine gute Interpretation nicht mehr verwendet werden können. Zur Zeit der Aufnahme sollte der Einfallswinkel der Sonne deshalb nicht flacher sein als die steilsten Abschnitte des Gebietes.

4.2 Orthorektifikation der Luftbilder von 1954

Da Luftbilder in Zentralprojektion abgebildet sind, weisen sie Reliefverzerrungen und variierende Abbildungsmaßstäbe auf. Sie müssen für den Gebrauch im GIS zuerst geometrisch entzerrt - und ins Schweizerische Landeskoordinatensystem transformiert werden.

Die Korrekturen erfolgten mit der Software ERDAS Imagine Version 8.3. Alle Bildpaare wurden mit einer Auflösung von 800dpi im TIFF-Format in 256 Graustufen eingescannt. Um den Bezug zwischen dem Gelände/Objekt und seiner Abbildung zu beschreiben, waren folgende Parameter nötig:

- Parameter der inneren Orientierung: Die innere Orientierung wird beschrieben durch die Brennweite (Lage des Bildhauptpunktes bezüglich des Projektionszentrums) und durch die Rahmenmarken, welche das Bildkoordinatensystem festlegen. Die Lage der Rahmenmarken ist kalibriert und im Kalibrierungsprotokoll erläutert (Kääb 2002). Für die verwendeten Luftbilder wurde das Kalibrierungsprotokoll vom 03.07.1956 verwendet, das demjenigen von 1954 entspricht.
- Parameter der äusseren Orientierung: Es wird unterschieden zwischen der relativen Orientierung (Orientierung der Bilder zueinander, aber ohne Geländebezug) und der absoluten Orientierung (Geländebezug des Bildverbandes) (Kääb 2002). Die Anpassung an das Schweizerische Koordinatensystem erfolgte mit Hilfe von Passpunkten (Ground Control Points), Dazu wurden korrespondierende Punkte aus der georeferenzierten Datengrundlagen (digitale Pixelkarten Jahr 1991) in die nicht referenzierten digitalen Bildpaare übertragen, wodurch eine geometrische Verbindung zwischen den beiden Daten erstellt wurde. Die notwendige Höheninformation wurde der Landeskarte 1:25000 (Kartenblattnr. 1217 und 1197) entnommen. Die Passpunkte mussten regelmässig über das Bild verteilt sein und besonders auch am Rand des Luftbildes und auf Positionen unterschiedlicher Höhe liegen, damit bei der Entzerrung ein gutes Resultat erzielt werden konnte. Für die Berechnung wurden pro Bildpaar durchschnittlich 10 Passpunkte gesetzt. Luftbilder, auf denen wenig Siedlungsgebiet abgebildet ist, weisen bei der Referenzierung oft Schwierigkeiten auf, da nicht genug eindeutig identifizierbare Passpunkte vorhanden sind. Sowohl zu wenig Passpunkte wie auch falsche Passpunkte verschlechtern die geometrische Genauigkeit.

Aus der inneren und der äusseren Orientierung konnte das Modell berechnet werden. Von Bedeutung waren die Restfehlerbeträge (Residuen) der Passpunkte. Die Ungenauigkeiten schwankten zwischen 1-10 m. Vor allem im Randbereich der Bilder waren die Residuen schlechter. Die Werte sind im grossen und ganzen als gut einzustufen, da die Luftbilder mit einer verhältnismässig geringen Auflösung gescannt wurden. Um optimale Werte für jedes Bildpaar zu erreichen, wurde das Modell verschiedene Male berechnet, wobei die Passpunkte jedes Mal korrigiert wurden und somit die Genauigkeit verbessert werden konnte. Dadurch wurden Ausreisser unter

den Passpunkten eindeutig identifiziert und beseitigt. Nach der Modellberechnung wurden die Luftbildpaare orthorektifiziert. Dabei wurden sowohl Verzerrungen korrigiert, die durch die Abweichung der Aufnahmeachse von der Senkrechten entstanden waren, wie auch die topografisch bedingten Verzerrungen. Für die Orthorektifizierung wurde das dhm25 der Landestopographie verwendet. Zum Erstellen der Orthofotos wurde das Verfahren der nächsten Nachbarschaft angewandt. Der Vorteil dieser Methode lag darin, dass die Grauwerte der einzelnen Pixel erhalten blieben und nicht aus Mittelwerten benachbarter Pixel neu berechnet wurden. Der Inhalt der Bilder wurde dadurch nicht verändert und besonders Kontrast und Schärfe blieben erhalten.

Als Resultat entstand ein Orthofoto mit einer Pixelgrösse von 2x2 m. Im GIS wurden die Orthofotos nochmals überprüft. Dabei wurden sie mit den Pixelkarten überlagert. Das Resultat war für die weiteren Analysen gut brauchbar. An einigen Stellen im Randbereich sind jedoch Ungenauigkeiten von bis zu 15 m festzustellen, denen bei den weiteren Berechnungen grosse Beachtung geschenkt werden musste.

4.3 Luftbildgestützte Strukturerfassungsmethoden

Die Erfassung der Waldstrukturen von 1954 und 2000 erfolgte in zwei Schritten (siehe Abb. 4). Zuerst wurde mit einer automatischen Klassierung versucht, den Wald vom übrigen Gebiet abzugrenzen. Dies erfolgte mit einem aml-Programm (arc macro language). Dabei sollten nebst dem Wald auch die Waldlücken möglichst genau klassiert werden, denn sie sind für die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald bedeutsam. In einem zweiten Schritt wurden die Waldstrukturen anhand der Luftbilder von 1954 und 2000 digitalisiert. Die gesamte Digitalisierarbeit erfolgte mit der Software ArcGIS 8.2. Nachdem die beiden Schritte ausgeführt und überprüft worden waren, konnte der automatisch klassierte Wald mit den Waldstrukturen verschnitten werden.

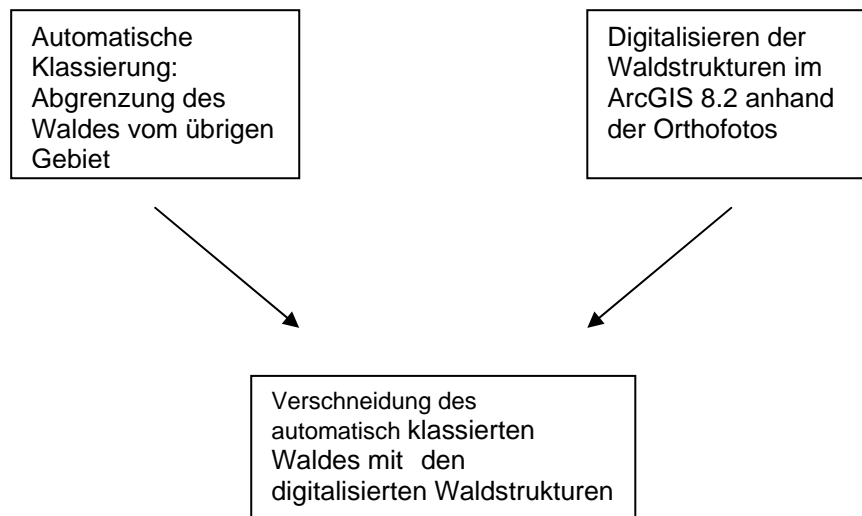


Abb. 4: Arbeitsschritte zur Erfassung der Waldstrukturen

Als Resultat entstand eine exakte Abbildung der Waldstrukturen und Waldlücken sowohl für 1954 wie auch für 2000. In den folgenden Kapitel wird näher auf die oben erwähnten Schritte der Waldstrukturerefassung eingegangen.

4.3.1 Automatische Klassierung des Waldes

Die Waldabgrenzung erfolgte mit Hilfe eines aml-Programmes (arc macro language), welches im Anhang 1 ausführlich beschrieben ist. Für die Klassierung wurden die Orthofotos in das Rasterformat (Grid¹) des Programms ArcGIS umgewandelt. Für die farbigen Orthofotos von 2000 wurde der zweite Kanal für die Klassierung (grün) verwendet, da der Wald in diesem Kanal am deutlichsten erkennbar ist. Die Umwandlung der drei Farbkanäle in Graustufen mit dem Photoshop erbrachte im Rasterformat ein weniger gutes Resultat. Die entstandenen Grids mit Grauwerten von 1-256 stellten die Ausgangslage für alle weiteren Bildverarbeitungsanalysen dar. Die Rastergrösse der Grids wurde auf 2x2 m gesetzt. In dieser Auflösung konnten die Datenfiles noch effizient bearbeitet werden, ohne dass Detailinformationen verloren gingen.

¹ Ein Grid bildet einen räumlichen Datensatz in einem Rasterformat mit einer bestimmten Zellgrösse ab.

Die Abgrenzung der zwei Klassen (Wald, nicht Wald) erfolgte mit Fokalen Funktionen. Bei diesen Funktionen ist der Wert des Resultatgrids von den Werten des Inputgrids an derselben Stelle inklusive derer Umgebung abhängig. Die Umgebung wird vom Benutzer mit Hilfe von *Moving Windows* definiert (Weibel 2000). Für diejenige Zelle, die in der Mitte des Fensters liegt, wird aus den Werten aller Zellen im Fenster eine statistische Grösse berechnet und als Resultat im Outputgrid der Mittelzelle zugewiesen. Mit Hilfe des Mittelwertes (Funktion *Focalmean*) können so Grauwertunterschiede zwischen benachbarten Pixel geglättet werden. Für die Verdeutlichung von Objekteigenschaften werden Summe (*Focalsum*), Maximum (*Focalmax*), Minimum (*Focalmin*) und Standardabweichung (*Focalstd*) einer Pixelumgebung eingesetzt. Um den unterschiedlichen Lichtbedingungen auf den Luftbildern von 1954 gerecht zu werden, musste das aml-Programm jeweils angepasst werden. Ausschnitte innerhalb eines Bildes mussten teilweise einzeln berechnet werden, wenn der Wald im oberen Teil des Grids sehr hell und im unteren Teil sehr dunkel war (siehe Abb.5 und 6).



Abb. 5: einheitliche Lichtverhältnisse
(Orthofoto 2000)

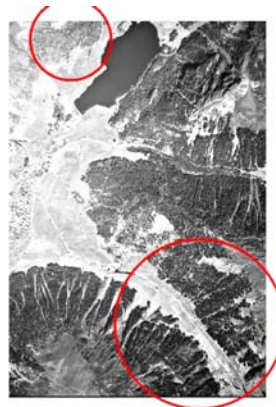


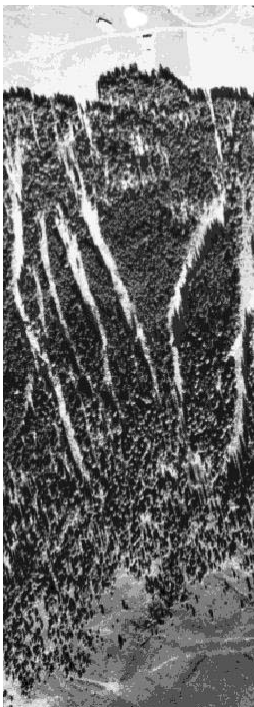
Abb. 6: unterschiedliche Lichtverhältnisse
(Orthofoto 1954)

Die Grids der Bilder von 2000 wurden vor der Klassifikation zusammengefügt. Die Klassierung konnte in einem Mal durchgeführt werden. Die Berechnung für die Bilder von 1954 war komplizierter. Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse konnten weder beim Scannen noch beim Bearbeiten der Orthobilder ausgeglichen werden. Das Zusammenfügen der Grids hatte also keinen Sinn; statt dessen wurden die unterschiedlichen Teilbereiche für jedes Bild einzeln gerechnet. Erst am Schluss der Klassierung konnten die Teilbereiche zusammengeführt werden. Als Vorteil erwies sich dabei der teilweise grosse Überlappungsbereich der Bilder, denn dort konnte jeweils die bessere der beiden Klassierungen für das Outputgrid ausgesucht werden. Oft wiesen die Randzonen in den orthorektifizierten Bildern unterschiedlich hohe Residuen

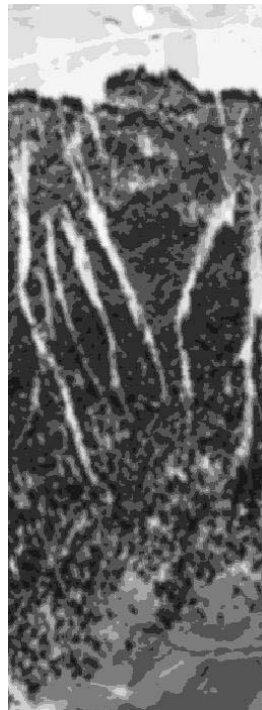
auf (vergl. Kap. 4.2); es wurde deshalb bei der Auswahl auf die Geometrie des Bildes geachtet.

Das aml-Programm für die Waldabgrenzung ist im Anhang 1 aufgeführt. Auf die wichtigsten Arbeitsschritte wird im Folgenden eingegangen. Die Werte für die Berechnungen sind iterativ ermittelt worden:

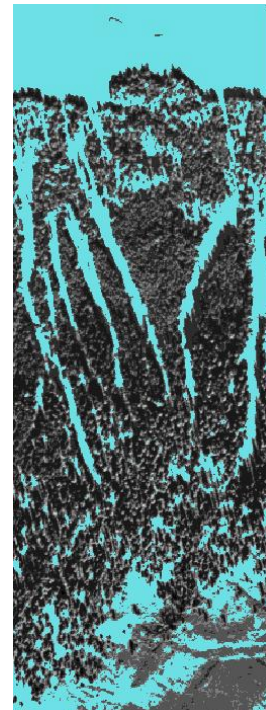
Das Ausgangsgrid (siehe Abb. 7 a) wurde mit Hilfe der Funktion *Focalmean* mit einem 5x5 Moving Window geglättet (siehe Abb. 7 b). Der Wald ist im Vergleich zum übrigen Gebiet dunkel und besitzt tiefe Grauwerte. Es wurde mit iterativen Methoden einen Grauwert bestimmt, der den Wald von hellen Lücken und nicht-Waldgebiet abgrenzt (siehe Abb. 7 c). Das Resultat nach dieser ersten Klassierung wies noch viele Fehler auf. Vor allem an der oberen Waldgrenze wurden Alpweiden fälschlicherweise als Wald klassiert (siehe Abb. 7 c). Mit Hilfe des dhm25 wurden deshalb alle Pixel, die höher als 2200 m. ü. M. gelegen sind, als nicht-Waldgebiet klassiert. Da der Wald im Vergleich zum übrigen Gebiet eine heterogene Grauwertverteilung aufweist, konnte mit Hilfe der Standardabweichung eine weitere Bedingung für die Klasse Wald erfolgen (siehe Abb. 7 d und e). Es wurde ein Wert definiert, der die heterogene Grauwertverteilung von der homogenen Grauwertverteilung trennt. Danach konnten alle Bedingungen miteinander verknüpft werden (siehe Abb. 7 f).



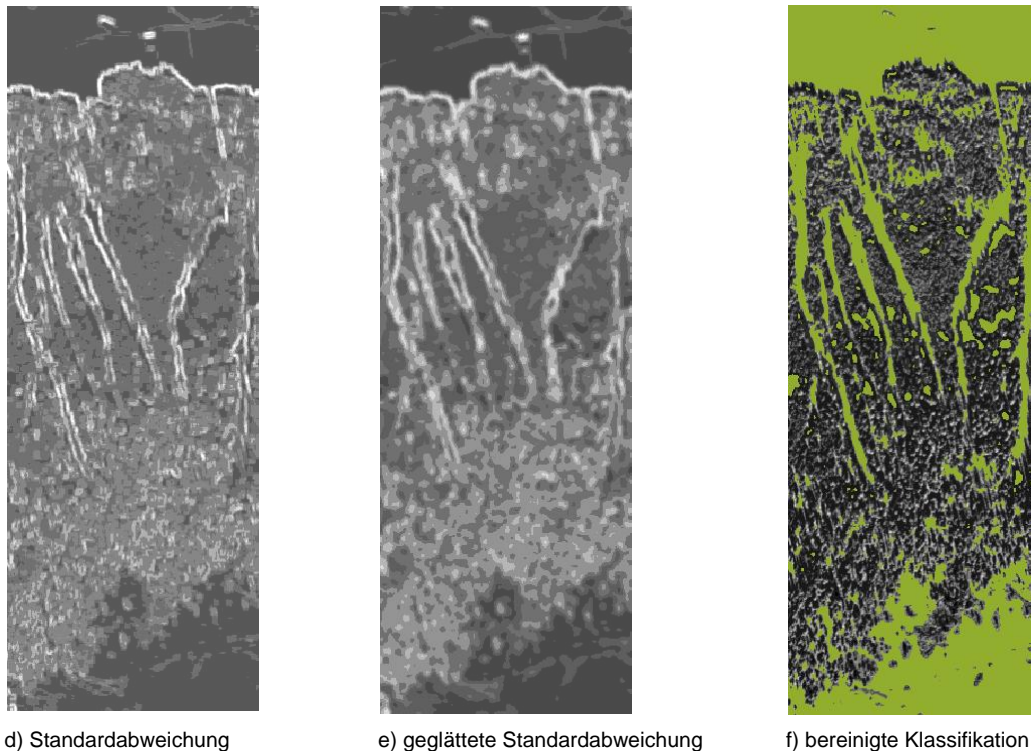
a) Ausgangsgrid 1954 (2x2 m)



b) geglättetes Ausgangsgrid



c) Waldklassifikation



d) Standardabweichung

e) geglättete Standardabweichung

f) bereinigte Klassifikation

Abb. 7 a-f: Methoden der Waldklassifikation

Für das Endresultat war eine möglichst genaue Abgrenzung des Waldes von den Waldlücken wichtig, denn die Waldlücken sind für die Lawinenschutzwirksamkeit von grosser Bedeutung. Es wurde eine minimale Lückengrösse definiert, bei der ein Lawinenanriss im Wald möglich ist. Nach Meyer-Grass und Schneebeili (1992) stellen Lückenbreiten, die grösser sind als 10m in subalpinen Fichtenwälder potentielles Waldlawinenanrissgebiet dar. Pfister (1997) untersuchte mit der multiplen logistischen Regression, welche Parameter die Lawinenanrisse innerhalb des Waldes massgeblich beeinflussen. Die kritischen Lückenbreiten wurden im Modell eher höher berechnet als sie bei Meyer-Grass und Schneebeili (1992) zu finden sind. Als Faustregel werden maximale Lückenbreiten von 10 bis 15m oder eine halbe Baumlänge unabhängig der Neigung und der Kronendeckung genannt (Meyer-Grass und Schneebeili, 1992; Mayer und Ott, 1991). Die Lückenlänge ist für Meyer-Grass u. Schneebeili (1992) kein relevanter Parameter für die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit. Nach Pfister (1997) ist sie nur bedeutend für die Laubwälder in tieferen Lagen, bei welchen im Frühling lockere Nassschneelawinen mit punktförmigem Anriss niedergehen können. In den subalpinen Fichtenwäldern von Davos spielen Schneebrettlawinen mit linienförmigem Anriss eine bedeutendere Rolle. Die Mindestlückengrösse wurde deshalb mit einem 15 m grossen Kreisdurchmesser definiert, der in die Mitte der Lücke gelegt werden kann

(Bebi 2000). Alle Lücken mit einer Fläche kleiner als 170 m² wurden für die Bereinigung der Klassierung gelöscht. Als minimale Waldfläche wurde gemäss Landesforstinventar eine Fläche von 500 m² angenommen (LFI 1999). Flächen, bei denen der Abstand zwischen den Stämmen mehr als 25 m beträgt werden nicht mehr als Wald bezeichnet (LFI 1999). Alle Flächen die kleiner als 500 m² waren wurden ebenfalls aus der Waldklasse gelöscht.

4.3.2 Waldstrukturerfassung mit Hilfe von Luftbildern

Die Waldstrukturen von 1954 und 2000 wurden für das ganze Untersuchungsgebiet erhoben. Die Grundlage für die Luftbildansprache in subalpinen fichtendominierten Wäldern bildete der Luftbildschlüssel von Bebi (2000). Dieser ist jedoch sehr detailliert und auf stereoskopische Untersuchungen mit Luftbildern im Massstab 1:9000 ausgerichtet. Er musste für die grossflächigen Untersuchungen in der Landschaft Davos stark vereinfacht und auf die Abgrenzungseinheiten, welche für die Beurteilung der Lawinenschutzfunktion relevant sind, reduziert werden. In den folgenden Abschnitten wird das Kartierungskonzept erläutert.

Die flächenhafte Strukturkartierung erfolgte in den zwei Arbeitsschritten Flächenabgrenzung und Flächenbeschreibung (Bebi 2000; Mauser 1997). In einem ersten Arbeitsschritt wurden die Strukturtypen anhand der Orthofotos im ArcGIS digitalisiert. Es ist wichtig, dass sich die Luftbildinterpretin ausführlich mit den Luftbildern beschäftigt um das Auge auf die Abgrenzungseinheiten zu schulen. Der Massstab für die Digitalisierarbeit wurde für die Orthofotos von 1954 auf 1:2500 gesetzt. Bei einer noch kleineren Massstabszahl wären die Details nicht mehr erkennbar gewesen, da die Luftbilder durch das Scannen an Auflösung verloren hatten. Für die Orthofotos von 2000 wurde der Massstab auf 1:1500 gesetzt. Es liessen sich dank der guten Auflösung dieser Fotos sehr viele Details erkennen. Zuerst wurden klar abgrenzbare Linien kartiert. Danach wurden schrittweise schwierigere Grenzen mit fliessenderen Übergängen eingezeichnet. Die Mindestflächengrösse wurde wie in der automatischen Klassifikation mit 500m² definiert (siehe Kap. 4.3.1).

Im zweiten Arbeitsschritt wurde jeder digitalisierten Einheit ein Strukturtyp zugeordnet. Dazu wurde jede einzelne Fläche auf dem Bildschirm nochmals beurteilt und entsprechend der Kriterien des Luftbildschlüssels klassiert. Der Luftbildschlüssel setzte sich aus folgenden Parametern zusammen:

Schlussgrad

Der Schlussgrad ist ein Mass für die gegenseitige Bedrängung der Baumkronen eines Bestandes (LFI 1994). Er gibt Auskunft über den Standraum der Bäume und die Konkurrenzverhältnisse im Bestand. Der Schlussgrad korreliert stark mit der Kronenprojektion. Diese beschreibt das Verhältnis der durch die Kronenprojektion überschirmten Fläche zur Gesamtfläche (LFI 1994). Beide Parameter sind für die Lawenschutzfunktion von grosser Bedeutung. Eine grössere Kronenprojektion führt zu unregelmässigen Schneeablagerungen und weniger differenzierten Schichtungen in der Schneedecke. Die Bildung von Lawenanrissen wird somit vermindert (siehe Kap. 2.3). Für diese Abgrenzungseinheit wurden 4 Typen unterschieden (siehe Abb. 8 - 11). Sie stimmen mit den Abgrenzungen von Bebi (2000) und mit den Einheiten vom Landesforstinventar (LFI 1994) überein.



Abb. 8: gedrängt (1): Starke Berührung der Kronen. Der Boden und die Schlagschatten sind selten sichtbar (die sichtbare Bodenfläche ist selten grösser als 10 m²). Meistens ist nur die Spitze der Bäume oder die obere Kronenhälfte erkennbar. Der Deckungsgrad ist > 90%.



Abb. 9: locker (2): Es sind nur kleine Lücken vorhanden. Das Einschieben von Kronen ist nicht möglich. Der Boden und die Schlagschatten sind selten sichtbar. Der Deckungsgrad beträgt 70-90%.

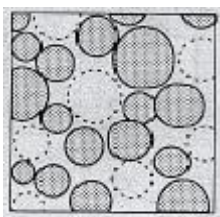


Abb. 10: räumig (3): Die Kronen sind nicht mehr regelmässig verteilt. Es gibt teilweise grössere Unterbrechungen des Kronenschlusses. Das Einschieben von einzelnen Kronen ist möglich. Die Schlagschatten und der Boden sind häufig sichtbar. Der Deckungsgrad beträgt 40-70%.



Abb. 11: aufgelöst (4) : Mit Einzelbäumen wenig zusammenhängend bestockte Fläche. Das Einschieben mehrerer Kronen ist möglich. Die Schlagschatten und der Boden sind sehr häufig sichtbar. Der Deckungsgrad beträgt 20-40%.

Bestandesstruktur

Das zweite wichtige Abgrenzungskriterium ist die Bestandesstruktur. Sie beschreibt den vertikalen Aufbau des Bestandes und wird durch die Anteile der verschiedenen Schichten definiert. Normalerweise werden drei verschiedene Strukturen unterschieden: einschichtiger Bestand, mehrschichtiger Bestand und stufiger Bestand. Im Luftbild ist die untere Schicht von mehrschichtigen Beständen je nach Schlussgrad oft nicht eindeutig erkennbar. Für die vorliegende Arbeit wurde deshalb nur zwischen den Strukturen stufig und nicht stufig unterschieden (siehe Abb. 12-13).

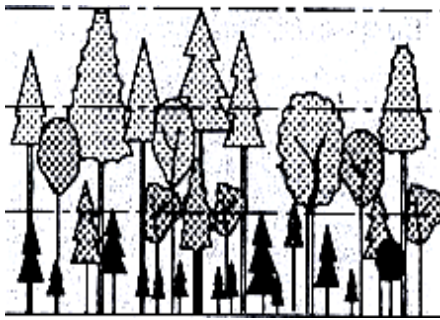


Abb. 12: stufig: Ein Bestand gilt als stufig, wenn die Bäume in mehreren, nicht von einander trennbaren Schichten vorhanden sind. Der Deckungsgrad der Unterschicht ist grösser oder gleich 20% und eine Mittelschicht ist vorhanden. Bei aufgelösten Strukturen ist der Deckungsgrad von Unterschicht und Mittelschicht zusammen mindestens so gross wie der Deckungsgrad der Oberschicht.

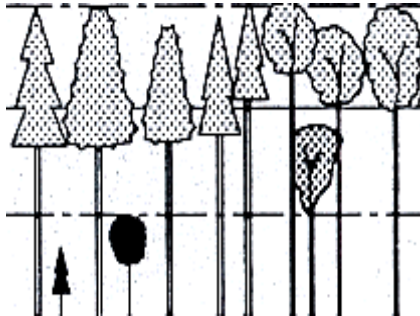


Abb. 13: nicht stufig: In einem nicht stufigen Bestand ist nur eine Schicht eindeutig vertreten.

Jungwald

Ein Bestand gilt dann als Jungwald, wenn die Oberhöhe der Bäume kleiner als 10 m beträgt. Die Bäume an der oberen Waldgrenze werden nicht als Jungwald gezählt, obwohl sie meist eine Oberhöhe kleiner als 10 m aufweisen. Infolge der harten klimatischen und standortlichen Bedingungen in dieser Zone verbuschen die Bäume.

Waldfläche, die zu mehr als zwei Dritteln mit Sträuchern und Gebüsch bedeckt ist, wird als Gebüschwald bezeichnet. Für die Luftbilderhebung wurde der Gebüschwald nicht zum Wald gezählt, da er für die Lawinenschutzfunktion von untergeordneter

Bedeutung ist. Als Gebüschwald gelten insbesondere die Grün- oder Alpenerlen und die Legföhrenwälder.

Rotten

Im subalpinen Wald sind die Bäume oft klumpenförmig angeordnet. Eine Rotte ist ein in sich abgeschlossenes Baumkollektiv von gedrängt bis locker aneinanderstehenden Bäumen (siehe Abb. 14). Am Rande der Lücken behalten die Bäume ihre vollen Kronen. Eine Rotte wird nie so gross, dass sich im Innern der Rotte mehrere Reihen von kurzkrönigen Bäumen drängen. In der Regel nimmt eine Rotte einen Durchmesser von 7-15 m ein (Bebi 2000). Wenn die Baumkollektive über Einzelbäume oder kleine Baumgruppen miteinander verbunden sind, spricht man von Rottenansätzen. Es ergeben sich dadurch längliche, miteinander vernetzte Baumgruppen, die nie so breit werden, dass sich im Inneren der Rotte kurzkrönige, instabile Abschnitte bilden können.

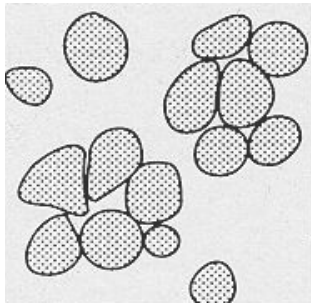


Abb 14: Rotten (Grundriss)

4.3.3 Verschneidung

Die Waldstrukturen wurden mit dem automatisch klassierten Wald und den Waldlücken verschnitten und anschliessend bereinigt und nochmals überprüft. In der automatischen Klassierung wurden Legföhren und Alpenerlen teilweise als Wald klassiert. Deshalb musste diese Grenze manuell im ArcGIS nochmals überarbeitet werden. Auch die Waldlücken mussten teilweise verbessert werden. Vor allem dort, wo die Schlagschatten der Bäume die Lücken verdunkelten, mussten sie von Hand überarbeitet werden. Die Methode hatte den Vorteil, dass nochmals alle Strukturen und Grenzen überprüft werden mussten.

4.4 Schutzwaldausscheidung

Die Waldstrukturen von 1954 und 2000 wurden für die ganze Landschaft Davos erhoben. Die Analysen der Waldstrukturen erfolgten jeweils für die gesamte Waldfläche und spezifisch für den Lawinenschutzwald in der Landschaft Davos. Eine gesamtschweizerische Erhebung der Schutzwaldflächen fehlt bis heute. Deshalb wurden die Wälder mit besonderer Schutzfunktion (sogenannte BSF-Wälder), die das Forstinspektorat von Graubünden für den ganzen Kanton erhoben hat, für die Analysen übernommen. Nach Art. 42 der schweizerischen Waldverordnung muss ein Wald mit besonderer Schutzfunktion folgende Kriterien erfüllen (Bühler et al. 1995):

- Er muss auf Hängen stocken, von denen eine Lawinen-, Rutsch-, Erosions-, Übermürungs- oder Steinschlaggefahr ausgehen könnte.
- Es muss ein direkter Bezug vom Hang zum gefährdeten Objekt bestehen.
- Die gefährdeten Objekte müssen Menschenleben oder erhebliche Sachwerte sein.
Dazu zählen:
 - ständig bewohnte Häuser
 - Bahnlinien mit Fahrplanpflicht (RhB, FO, SBB)
 - Nationalstrassen
 - Kantonsstrassen mit Winterdienst
 - Gewerbe- und Industriebetriebe
 - Schulhäuser, Spitäler, Kirchen und Kraftwerkzentralen

Ausdrücklich davon ausgenommen sind touristische Anlagen wie Bahnen, Skilifte, Skipisten und Loipen. Ebenfalls ausgeschlossen sind Gemeindestrassen, grössere landwirtschaftliche Einrichtungen, Ferienhäuser und Sportanlagen.

Wälder, die durch eine oberliegende Gefahrenquelle beeinträchtigt werden, ohne dass von ihrem Standort selbst eine Gefährdung ausgehen könnte (zum Beispiel Wald in Lawinenauslaufstrecken), zählen gemäss dieser Definition nicht zum Wald mit besonderer Schutzfunktion.

Zur Überprüfung des direkten Bezuges zwischen Hang und gefährdetem Objekt wurde vom Kanton Graubünden die Methode des Pauschalgefälles – definiert als Gefälle zwischen oberstem Anrisspunkt und unterster Ablagerungsstelle – verwendet (siehe Abb. 15). Definitionsgemäss muss dabei der oberste Anrisspunkt im bewaldeten Hang

liegen. Bedeutsame Hindernisse in der Auslaufstrecke, die höher als 1.5 m hoch sind, wurden bei der Berechnung berücksichtigt.

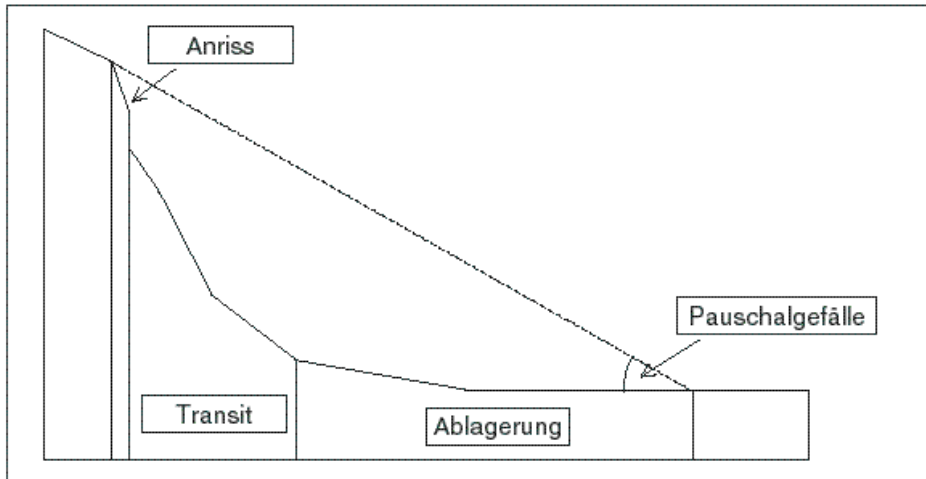


Abb 15: Pauschalgefälle: Gefälle zwischen oberstem Anrisspunkt und unterster Ablagerungsstelle (Aus: Weibel 2002)

Für die vorliegende Arbeit wurde nur der Wald mit besonderer Schutzfunktion in Bezug auf Lawinen verwendet. Bewaldete Hänge, von denen eine Lawinengefahr ausgeht, wurden wie folgt definiert (Bühler et al. 1997):

1. Höhenlage > 900 m ü. M.
2. Mittlere Hangneigung > 27°.
3. Hanglänge > 60m.
4. Die gefährdeten Objekte müssen sich innerhalb eines Pauschalgefälles von 22° befinden.

Bei nicht plausiblen Resultaten wurde der Auslauf mit der Voellmy-Salm-Methode überprüft.

4.5 Quantitative Analysen

Die Waldstrukturen von 1954 und 2000 wurden mit der Software ArcView 3.2 quantitativ analysiert und miteinander verglichen. Dabei wurden die Strukturen in das Rasterformat von ArcView (Grid) umgewandelt. Zuerst wurde der Zustand von 1954 und 2000 quantitativ ausgewertet, danach wurden die Veränderungen zwischen 1954 und 2000 untersucht, indem die Strukturen übereinandergelagert wurden und die Zellen mit gleichem Ursprung verglichen wurden.

4.6 Statistische Analysen

Die Waldstrukturveränderung von 1954 bis 2000 (abhängige Variablen) wurde in einer GIS gestützten statistischen Analyse mit verschiedenen Standorts- und Nutzungsfaktoren (erklärende Variablen) in Beziehung gesetzt (siehe Abb. 16). In einem ersten Schritt wurde der Effekt der einzelnen erklärenden Faktoren in univariaten Tests geprüft. In einer zweiten Phase wurden die Faktoren in ein multivariates logistisches Modell einbezogen und schrittweise reduziert, so dass nur noch die Variablen im Modell vorhanden waren, die einen wesentlichen Beitrag zum Modell leisteten (Chambers und Hastie 1993). Für alle statistischen Analysen wurde als Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ gewählt. Die Berechnungen erfolgten mit der Software S-Plus (Version 2000).

In Abbildung 16 sind die in der statistischen Analyse verwendeten abhängigen und unabhängigen Variablen aufgeführt.

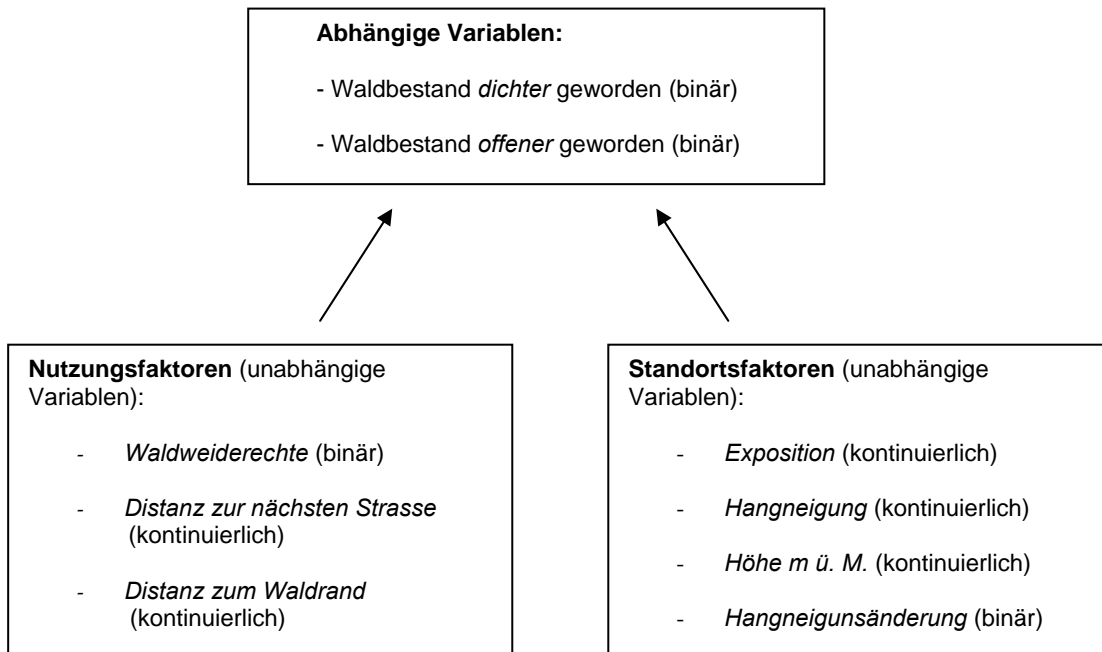


Abb. 16: abhängige und unabhängige Variablen der statistischen Analysen

4.6.1 Standort- und Nutzungsfaktoren

Standortsfaktoren

Die Standortsfaktoren konnten alle aus dem dhM25 abgeleitet werden. Die Exposition konnte mit Hilfe der sinus-Funktion in einen ost-west-Gradienten und mit der cosinus-Funktion in einen nord-süd-Gradienten geteilt werden.

Nutzungsfaktoren

Die Nutzungsfaktoren wurden vom aktuellen Waldentwicklungsplan Davos (WEP) übernommen. Die Variable "Waldweiderecht" umfasst alle Flächen, wo theoretisch Waldweide erlaubt ist. In über 70% des Davoser Waldes ist Waldweide theoretisch erlaubt.

Die Distanz zur nächsten Strasse wurde ebenfalls vom Datensatz des WEP abgeleitet, in welchem alle existierenden Strassen von Davos aufgeführt sind. Die Distanz zum nächsten Weg wurde im ArcView 3.2 mit der Funktion *find distance* berechnet. Der Wert einer Zelle im Resultatgrid ist dabei potentiell abhängig von allen Zellen des Inputgrids (Weibel 2000).

Über Holznutzungsmengen der letzten 50 Jahre war im Waldentwicklungsplan nichts zu entnehmen. Die Holznutzung erfolgte hauptsächlich entlang des Waldrandes an zugänglichen Standorten. Steile Hangpartien die wenig erschlossen sind, wurden nach Angaben vom Revierförster H.P. Hefti in den letzten 50 Jahren fast nicht genutzt (Hefti 2003, mündlich). Deshalb wurde zusätzlich die Distanz zum Waldrand berechnet (50 m Intervalle).

4.6.2 Abhängige Variablen

Für die Berechnung der abhängigen Variable wurde sowohl die Veränderung von einem Strukturtyp in einen anderen berücksichtigt, wie auch der Zustandswechsel von einer offenen Fläche oder Waldlücke in Wald und umgekehrt. Um die geometrischen Ungenauigkeiten und die Fehlereinflüsse der falsch klassierten Schlagschatten am Wald- und Lückenrand zu minimieren, wurde innerhalb und ausserhalb der abhängigen Variablen ein Buffer (= systematischer Abstand) gelegt, der bei den statistischen Berechnungen nicht mehr berücksichtigt wurde.

4.6.3 Stichprobenwahl und räumlich Autokorrelation

Bei der Stichprobenwahl gilt zu beachten, dass die räumliche Autokorrelation möglichst minimiert wird. Die Werte, die ein Merkmal in den Raumeinheiten eines Gebietes annimmt, sollten zufällig verteilt sein. Wenn man vom Wert einer Variablen in einer Raumeinheit auf den Wert in den benachbarten Raumeinheiten schliessen kann, sind die Variablen systematisch im Raum verteilt und man spricht von räumlicher Autokorrelation.

Für alle statistischen Tests ist die Repräsentativität der Stichprobe wichtig. Sie hängt vom Stichprobenumfang und dem Stichprobenauswahlverfahren ab (Bahrenberg et al. 1999). Bei einer multiplen logistischen Regression sind hinreichend aussagekräftige Ergebnisse mit einer Stichprobenanzahl > 100 zu erwarten (Backhaus et al. 2000; Bahrenberg et al. 1999).

Für die Bestimmung der Stichproben wurde über die ganze Waldfläche von Davos ein Punktraster gelegt. Das Punktraster sollte genügend Stichproben aufweisen, damit der Stichprobenumfang repräsentativ blieb (Lindemann und Baker 2002; Brito 1999). Für das gesamte Untersuchungsgebiet wurden die Punkte in einem Abstand von 200 m platziert. Mit Hilfe eines empirischen Variogramms konnte überprüft werden, wie stark

die räumliche Autokorrelation ist (Stahel 1995). Das Variogramm gibt die mittlere Streuung der Differenzen zwischen zwei Zufallsvariablen mit Abstandsvektor h an und ist ein Mass für den räumlichen Zusammenhang dieser beiden Variablen (Brito et al. 1999: Stahel 1995):

$$\text{Var}(Z(u) - Z(v)) = \text{Var}(Z(u) - Z(u+h))$$

Streuen die Werte der Differenz der beiden Zufallsvariablen $Z(u)$ und $Z(v)$ stark, so bedeutet dies, dass die beiden Zufallsvariablen im Mittel sehr verschiedene Werte annehmen; ihr räumlicher Zusammenhang ist also klein. Streuen die Werte der Differenz $Z(u) - Z(v)$ wenig, so heisst das, dass im Mittel $Z(u)$ ähnliche Werte wie $Z(v)$ annimmt, ihr räumlicher Zusammenhang ist also gross. Abbildung 17 zeigt das prinzipielle Verhalten des Variogramms:

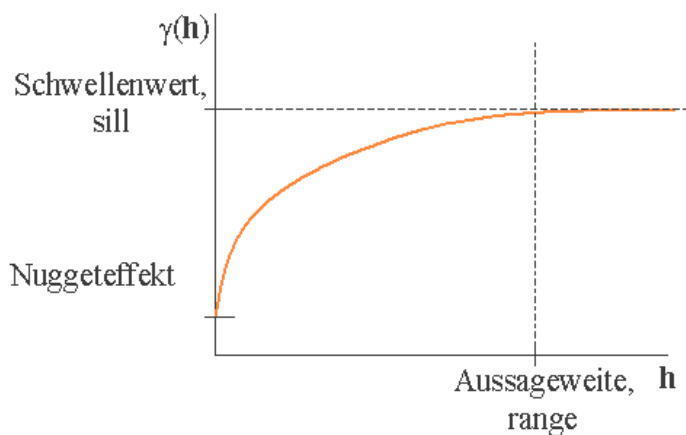


Abb. 17: theoretisches Variogramm: Der Schwellenwert zeigt an, wie gross die Distanz (Aussageweite) zwischen den Variablen mindestens sein muss, damit sie voneinander als unabhängig betrachtet werden können.

Der Abstand, bei dem das Variogramm einen Schwellenwert (sill) erreicht, wird Aussageweite (range) genannt. Zufallsvariablen, die weiter voneinander entfernt liegen als die Aussageweite, werden als unabhängig voneinander betrachtet.

Das empirische Variogramm charakterisiert den räumlichen Zusammenhang der Stichprobe. Es wird geschätzt, indem man für jeden Abstand h einen Wert des Variogramms $\gamma(h)$ bestimmt (siehe Abb. 18):

Empirisches Variogramm

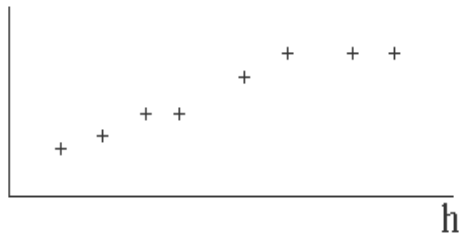


Abb. 18: empirisches Variogramm

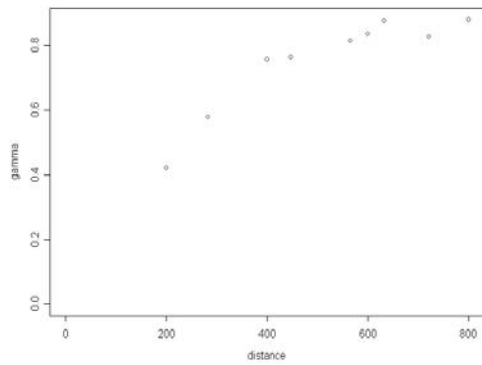
Mit dem aml-Programmes *gridspot* von ESRI konnten die Informationen der abhängigen und unabhängigen Variablen in die Attributtabelle des Punktrasters übertragen werden. Für die abhängige Variable „Waldbestand *dichter geworden*“ ergaben sich 264 Punkte, bei welchen das Argument zutraf. Es sollten für die Analyse jeweils gleich viele Argumente wie Gegenargumente vorhanden sein, weil sonst bei der logistischen Regression das Argument mit mehr Stichproben begünstigt werden würde (Brito et al. 1999). Deshalb wurden vom Gegenargument auch 264 Stichprobenpunkte zufällig ausgewählt. Somit ergaben sich insgesamt 528 Stichproben für die Variable „Waldbestand *dichter geworden*“. Beim Waldbestand der offener geworden ist, waren es insgesamt 180 Punkte: 90 bei denen das Argument zutraf und 90 bei denen das Argument nicht zutraf.

Im Schutzwaldgebiet wurde zusätzlich noch eine zweite statistische Analyse durchgeführt, wobei für die Stichprobenauswahl ein 100 m Raster gewählt wurde. Mit dieser Rastergrösse konnte auch für die Variable „Waldbestand *offener geworden*“ eine genügend grosse Stichprobenanzahl selektioniert werden. Für die Variable „Bestand *dichter geworden*“ ergaben sich total 892 Stichprobenpunkte und für die Variable „Bestand *offener geworden*“ insgesamt 426 (siehe Tabelle 2):

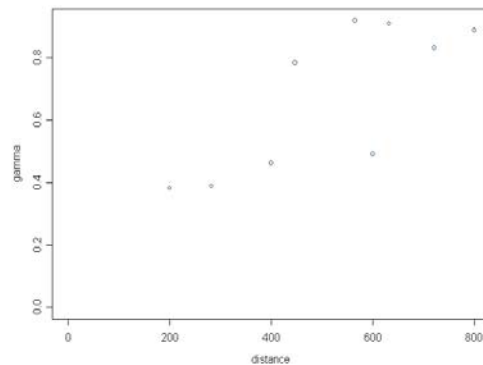
Tab. 2: abhängige Variablen und Stichprobenanzahl für die statistische Analyse

Abhängige Variablen	200 m Punktraster für die ganze Landschaft Davos	100 m Punktraster für die Schutzwälder von Davos
„Bestand <i>dichter geworden</i> “	528 Stichprobenpunkte	892 Stichprobenpunkte
„Bestand <i>offener geworden</i> “	180 Stichprobenpunkte	426 Stichprobenpunkte

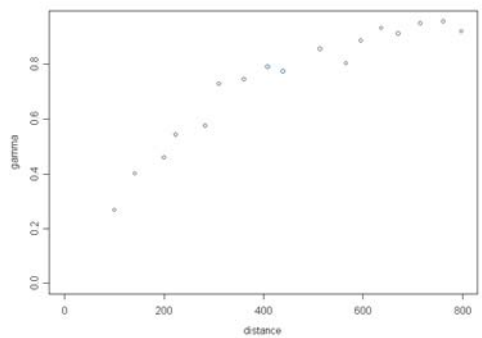
In Abbildung 19a-d sind die Werte der räumlichen Autokorrelationsanalyse festgehalten. In allen vier Modellen herrscht eine leichte räumliche Autokorrelation vor. Das Stichprobenraster im gesamten Untersuchungsgebiet hätte für eine Analyse ohne räumliche Autokorrelation mindestens 600 m Abstand zwischen den Punkten betragen sollen (siehe Abb. 19 a und b). Im Schutzwaldgebiet liegt der Schwellenwert bei 500 m Abstand zwischen den Punkten: Ab dieser Distanz gibt es keinen räumlichen Zusammenhang mehr (siehe Abb. 19 c und d). Weil die Stichprobenanzahl vor allem bei den offener gewordenen Beständen zu klein geworden wäre mit einem grösseren Rasternetz, wurden die Modelle beibehalten und die leichte räumliche Autokorrelation akzeptiert.



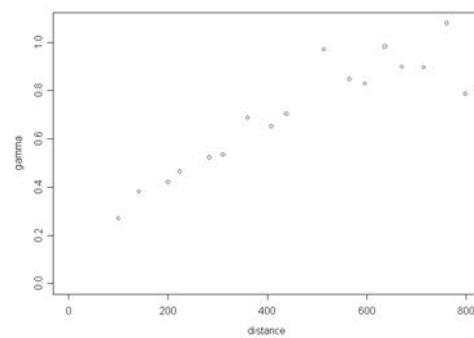
a) dichter geworden (ges. Untersuchungsgebiet)



b) offener geworden (ges. Untersuchungsgebiet)



c) dichter geworden (Schutzwaldgebiet)



d) offener geworden (Schutzwald)

Abb. 19 a-d: Analyse der räumlichen Autokorrelation (der gamma-Wert zeigt an, wie gross die Distanz (Ausageweite) zwischen den Variablen mindestens sein muss, damit sie voneinander als unabhängig betrachtet werden können).

4.6.4 Univariate statistische Analysen

Als erstes wurden die Variablen univariat analysiert. Alle binären Daten wurden in einer Kontingenztafel den Variablen „Bestand *dichter geworden*“ (=0,1) und „Bestand *offener geworden*“ (=0,1) gegenübergestellt und mit Pearson's Chi-Quadrat-Test auf ihre Unabhängigkeit getestet (Dorigo 1999; Fowler et al. 1998; Pfister 1997).

Um den Einfluss der kontinuierlichen Daten auf die abhängigen Variablen zu testen, wurde die logistische Regression angewendet. Bei der logistischen Regression wird der Zusammenhang ermittelt zwischen der Veränderung der kontinuierlichen unabhängigen Variablen auf der einen Seite und der Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer betrachteten Kategorie (hier: binär) der abhängigen Variablen auf der anderen Seite (siehe nächstes Kapitel).

4.6.5 Multiple logistische Regression

Mit Hilfe der multiplen logistischen Regression konnte die Wahrscheinlichkeit einer Waldveränderung in Abhängigkeit der Standorts- und Nutzungsfaktoren modelliert werden.

Mathematisch sieht das Modell der multiplen logistischen Regression wie folgt aus:

$$\log\left\{\frac{P\{Y_i = 1\}}{1 - P\{Y_i = 1\}}\right\} = \alpha + \beta_1 x^{(1)} + \beta_2 x^{(2)} + \dots + \beta_m x^{(m)} \quad (1)$$

$P\{Y_i = 1\}$ stellt die Wahrscheinlichkeit einer Waldveränderung dar, $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}$ sind die Standorts- und Nutzungsparameter und $\alpha, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ die zu schätzenden Koeffizienten. Das Modell sieht dem der linearen Regression ähnlich. Der Unterschied liegt darin, dass die abhängige Variable (in diesem Beispiel die Waldveränderung) keine kontinuierliche Variable, sondern eine binäre Variable ist, die nur zwei Zustände annehmen kann:

$Y = 1$ Bestand *dichter* (bzw. *offener*) geworden

$Y = 0$ sonst

Mit der „logit“-Transformation $p \rightarrow \log(p/(1-p))$ wird erreicht, dass für $P(Y_i = 1)$ nur Wahrscheinlichkeitswerte zwischen 0 und 1 in Frage kommen. Auf den detaillierten Rechenansatz der logistischen Regression wird hier nicht eingegangen, sondern auf die umfassende Literatur verwiesen (Baltes-Götz 2002; Backhaus et al. 2000; Stahel 1995; Venables and Ripley 1994; McCullagh and Nelder 1989).

Das berechnete Modell wurde mit einer schrittweisen Reduktion der Variablen vereinfacht, indem diejenigen Variablen, die das Modell am wenigsten beeinträchtigten, entfernt wurden (Venables and Ripley 1994). Das Vorgehen dauerte solange, bis nur noch diejenigen Variablen im Modell waren, die einen wesentlichen Beitrag zum Modell leisteten.

Es gibt eine geringe Zahl von Beobachtungen, die den vom Modell beschriebenen Zusammenhang nicht aufweisen und das Ergebnis deutlich verzerren. Deshalb sollte jedes logistische Regressionsmodell eine Ausreisserdiagnostik beinhalten (Backhaus et al. 2000). Mit der Pearson-Residuenanalyse können die Ausreisser gut erkannt werden. Das Residuum ist die Differenz zwischen dem geschätzten Wahrscheinlichkeitswert p ($y_i = 1$) und der tatsächlich beobachteten Wert y_i (Backhaus et al. 2000; Dorigo 1999). Sie können in einem Streudiagramm abgebildet werden. Ist die Diskrepanz zwischen der tatsächlichen Gruppenzugehörigkeit und der ermittelten Wahrscheinlichkeit gross, nimmt der Zähler einen Wert zwischen 0.5 und 1 an. Im Anhang 2 ist die Residuenanalyse detailliert festgehalten.

4.7 Waldlawinenanrissmodellierung für die Landschaft Davos

4.7.1 Waldlawinenprojekt 1985 - 1990

In den Wintern 1985/86 bis 1989/90 wurden im ganzen schweizerischen Alpenraum aktuelle Waldlawinenereignisse aufgenommen. Mit Methoden der deskriptiven Statistik und univariater Teste wurden die zur Lawinenbildung wichtigen Gelände- und Bestandesparameter bestimmt und dazu kritische Werte angegeben (Meyer-Grass und Schneebeli 1992). Die Anrissstellen wurden jeweils unmittelbar nach dem Lawenniedergang und im folgenden Sommer begangen. Im Winter wurden die Merkmale der Lawine und der Schneedecke aufgenommen, im Sommer konzentrierten sich die Erhebungen auf die Bestandesparameter und die Eigenschaften der jeweiligen Standorte. Bei jeder Anrissstelle wurden drei bis vier Flächen abgegrenzt, auf denen die Parameter erhoben wurden: einmal die eigentliche Anrissstelle, dann links und rechts sowie eventuell oberhalb der Anrissstelle etwa gleich grosse Vergleichsflächen.

Insgesamt bildeten 118 Anriss- und 131 Vergleichsflächen die Basis der Auswertungen. Einige der Beobachtungen wurden in Laubwäldern gemacht und konnten für ein Modell in subalpinen Nadelwäldern nicht berücksichtigt werden. Aus der Fülle möglicher Bestandes- und Standortparameter konnten 25 als für die Analyse relevant bezeichnet werden (Meyer-Grass und Schneebeili 1992).

4.7.2 Modellbildung

Ausgehend von diesen Daten untersuchten Pfister (1997) und Bebi (2000) mit der multiplen logistischen Regression, welche Parameter die Lawinenanrisse massgeblich beeinflussen und bauten daraus ein logistisches Regressionsmodell auf, das die Wahrscheinlichkeit eines Anrisses in Abhängigkeit der wichtigsten Bestandes- und Standortparameter voraussagt. Um die Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit mit möglichst wenigen signifikanten Merkmalen auszudrücken, haben Pfister (1997) und Bebi (2000) eine schrittweise Reduktion der Variablen durchgeführt und redundante Variablen eliminiert (Stahel 1995; Venables and Ripley 1994; Chambers and Hastie 1993). Dazu wurde jede Variable einzeln weggelassen und beobachtet, wie sich das Modell ändert. Diejenige Variable, die das Modell am wenigsten beeinträchtigte, wurde aus dem Modell entfernt. Dieses Vorgehen wurde solange wiederholt, bis nur noch Variablen vorhanden waren, die einen wesentlichen Beitrag zum Modell leisteten und selber signifikant waren.

Die Modelle von Pfister (1997) und Bebi (2000) stimmten mehrheitlich überein. Einzig die Variable Neigungsänderung wurde von Bebi (2000) so eingeschränkt, dass damit nur konvexe Neigungsänderungen berücksichtigt wurden. Nicht anrissgefährdete Stellen am Hangfuss wurden somit im Modell „entschärft“, und es ergab sich bei gleichbleibenden Signifikanzen folgendes Modell:

Tab. 3: Variablen und Koeffizienten (a und B_i) für das Waldlawinenmodell. Die Werte für a und B_i wurden in die Formel der multiplen logistischen Regression eingesetzt (siehe Kap. 4.6.5). Aus: Bebi 2000.

Variable (x)	B_i	Std.Err	Z_appr.	Pr (> z)	Signif.
Kronenprojektion ² aller Baumarten (%)	-0.051	0.016	-3.15	0.002	**
Lückenbreite (m)	0.105	0.032	3.27	0.001	**
Mittlere Neigung (°)	0.153	0.035	4.33	0.000	***
Neigungsänderung	1.106	0.560	1.97	0.048	*
Intercept (a)	-5.784	1.591	-3.64	0.000	***

Alle in Tabelle 3 aufgeführten Merkmale konnten aus der Strukturkartierung oder dem Geländemodell DHM-25 abgeleitet werden und sind plausibel (siehe Kapitel 2.3) :

- Eine grössere Kronenprojektion führt zu einer unregelmässigen Schneeablagerung und einer differenzierten Schichtung in der Schneedecke und hemmt somit die Lawinenbildung
- Sobald die interzeptierende Wirkung der Kronen verloren geht, bauen sich homogene Schneeschichten auf. Je grösser die Lücke, desto grösser die Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit.
- Die Hangneigung hat im Wald die gleiche Bedeutung wie im Freiland. Je steiler der Hang, desto eher lösen sich Lawinen.
- Konvexe Neigungsänderungen führen zur Schwächung der Schneedeckenstabilität.

Die Exposition wurde im Waldlawinenprojekt nicht mitberücksichtigt, da die Anriss- und Kontrollflächen meist nebeneinander bei ungefähr gleicher Exposition angeordnet waren (Meyer-Grass und Schneebebi 1992). Es zeigte sich jedoch, dass sich 75% aller Anrisse in den Expositionen Nordwest bis Ost, und nur 25% in den Expositionen Südost bis West ereigneten (Meyer-Grass und Schneebebi 1992). Da die Expositionen Nordwest bis Ost in den vom Westwind geprägten Gebieten der Alpennordseite als lawinengefährdeteste Expositionen angesehen werden (Ammann 2002), wurde der Faktor Exposition von Bebi (2000) zusätzlich für das Modell berücksichtigt.

² Kronenprojektion = Ab Luftbild gemessener Anteil der projizierten Kronenfläche an der Gesamtfläche. Die Kronenprojektion entspricht dem Deckungsgrad.

4.7.3 Räumliche Umsetzung des Modells

Das logistische Modell wurde von Bebi (2000) mit Hilfe eines aml-Programmes (arc macro language) im GIS räumlich modelliert. Sein Modell beschränkte sich jedoch auf die Region des Dischmatal und den Äbiwald im Flüelatal. Für die in dieser Arbeit vorliegende Strukturtypenkartierung der ganzen Landschaft Davos wurde das Modell von Bebi (2000) angepasst und im ArcGIS mit der Programmiersprache visual basics von Grêt-Regamey (in progress) neu berechnet. Die Variablen des Modells wurden dabei in das Rasterformat von ArcGIS umgewandelt (die Berechnung des Modells ist detailliert im Anhang 3 beschrieben):

1. Die Kronenprojektion konnte aufgrund der Korrelation vom Schlussgrad der Strukturtypenkartierung abgeleitet werden. Dabei wurden folgende Werte für die Berechnung verwendet:

Tab. 4: Kronenprojektionswerte

Strukturtyp	Kronenprojektion
gedrängt	95%
locker	80%
räumig	55%
aufgelöst	30%

Da für einen Lawinenanriss die Nachbarschaft einer Grid-Zelle auch relevant ist, wurde jeder Zelle mit Hilfe eines Moving Windows der Mittelwert seiner 40 X 40 m Umgebung zugeordnet.

2. Für die Bestimmung der Lückenbreite wurden aus der Strukturtypenkartierung alle Lücken extrahiert und in ein separates Raster umgewandelt.
3. Die Hangneigung und die Neigungsänderung konnten mit den Befehlen *slope* und *curvature* direkt aus dem dhm25 abgeleitet werden.

4. Die Exposition konnte über das dhm25 ermittelt werden. Sie kam als Faktor entsprechend den Häufigkeiten im Waldlawinendatensatz folgendermassen ins Modell: Faktor 1 für die Expositionen Nordwest bis Ost und Faktor 0.33333 für alle übrigen Expositionen (Grêt-Regamey, in progress; Bebi 2000).

Für die weitere Verwendung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeitsdaten von 1954 und 2000 wurden zwei Klassen gebildet (Klasse 1: Standorte mit einer Anrisswahrscheinlichkeit grösser oder gleich 50%; Klasse 2: Standorte mit einer Anrisswahrscheinlichkeit kleiner als 50%). Es wurde angenommen, dass die Schutzwirksamkeit des Waldes an den Standorten der Klasse 1 nicht gewährleistet ist.

4.8 Feldarbeit

Im Sommer 2003 erfolgte die Datenerhebung im Feld. Sie diente hauptsächlich der Überprüfung der Luftbildanalyse vom Jahr 2000. Zusätzlich konnten daraus Informationen gewonnen werden, welche aufgrund der Luftbild- und GIS-Analysen allein nicht erhoben werden konnten.

Aus dem 200 m Stichprobenraster der statistischen Analysen wurden zufällig Aufnahmepunkte bestimmt, bei denen sich die Waldstruktur verändert hat. Mit Hilfe der Standortsfaktoren wurde das Untersuchungsgebiet stratifiziert. Dabei wurden die Standorte in Klassen mit gleicher Punkteanzahl geteilt (siehe Tabelle 5):

Tab 5: Klassenbildung und Stichprobenanzahl für die Feldaufnahmen: Es wurden je 32 Stichprobenpunkte für die dichter- und offener gewordenen Bestände bestimmt (N = Nord, O = Ost, S = Süd, W = West)

	Klasse 1				Klasse 2				Klasse 3				Klasse 4			
Höhe m ü. M	≥ 1800 m. ü. M				≥ 1800 m. ü. M				< 1800 m. ü. M				< 1800 m. ü. M			
Hangneigung	≥ 30°				< 30°				≥ 30°				< 30°			
Exposition	N	O	S	W	N	O	S	W	N	O	S	W	N	O	S	W
Anzahl Punkte	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Sowohl für die dichter gewordenen Bestände wie auch für die offener gewordenen Bestände ergaben sich insgesamt 32 Stichprobenpunkte, wobei jeweils 8 Punkte einer Klasse angehörten (siehe Anhang 4).

An Standorten mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit über 50% im Jahre 2000 wurden ebenfalls vom 200 m Stichprobenraster Punkte ausgewählt. Die Berücksichtigung der Standortfaktoren war in diesem Fall schwieriger, da die betroffenen Stellen nicht an allen Standorten vorkommen. An südexponierten Stellen gibt es keinen Punkt aus dem Stichprobenraster, an welchem die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit über 50% ist. Die Standortfaktoren wurden deshalb nur beschränkt berücksichtigt (siehe Tabelle 6). Im ganzen ergaben sich 21 Stichproben für die Untersuchung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Feld (siehe Anhang 4). Die Punkte wurden mit dem GPS, der Landeskarte 1:25000 und dem Höhenmesser im Feld lokalisiert.

Tab. 6: Klassenbildung und Stichprobenanzahl für Standorte mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit über 50%.

	Klasse 1			Klasse 2			Klasse 3			Klasse 4		
Höhe m ü. M	≥ 1800 m. ü. M			≥ 1800 m. ü. M			< 1800 m. ü. M			< 1800 m. ü. M		
Hangneigung	≥ 30°			< 30°			≥ 30°			< 30°		
Exposition	Nord	Ost	West	Nord	Ost	West	Nord	Ost	West	Nord	Ost	West
Anzahl Stichprobenpunkte mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit > 50% im Jahr 2000	4		2	2	1	2	3	2	1	1	1	2

War der Punkt im Feld lokalisiert, wurden in einem Umkreis von 30 m verschiedene Bestandesparameter aufgenommen. Der wichtigste Parameter für die Überprüfung der Luftbildanalyse war der Strukturtyp. Die terrestrische Typologie wurde von Bebi (2000) übernommen und auf die in dieser Arbeit großflächig erfolgte Untersuchungen angepasst:

- Jungwald: Wenn die Oberhöhe der Bäume durchschnittlich kleiner als 10 m ist, wird der Bestand als Jungwald bezeichnet (siehe Kap. 4.3.2).
- Um die Aufnahmen mit der Luftbildinterpretation zu vergleichen, wurden für den Schlussgrad und die Bestandesstruktur die selben Klassen gebildet wie bei der Luftbildinterpretation (siehe Kap. 4.3.2):

Schlussgrad: - gedrängt
 - locker
 - räumig
 - aufgelöst

Bestandesstruktur: - stufig
 - nicht stufig

- Rotten oder Rotten ähnliche Strukturen im Bestand wurden bei der Aufnahme gleich wie in der Luftbildinterpretation speziell gekennzeichnet (siehe Kap. 4.3.2)
- Mischungsart: Die Mischungsart beschreibt die verschiedenen Baumarten im Bestand. Für die Feldarbeit war dies ein bedeutender Parameter, da die Baumartenzusammensetzung im Luftbild schlecht analysiert werden konnte. Neben der Fichte kommen in einem Bestand oft auch Lärche und Arve vor. Bei der Lärche ist die Interzeptionswirkung anders als bei den immergrünen Baumarten. Dies kann einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Schutzwirksamkeit in einem Bestand haben (Meyer-Grass und Schneebeli 1992; Konetschny 1990).

Als weiterer Parameter wurde die Bodenvegetation aufgenommen. Meist handelt es sich um wenige Pflanzenarten, die sich in aufgelichteten Beständen breit machen (Ott et al. 1997). Es bilden sich Farnfluren, Reitgrasrasen, hüfthohe Hochstaudenfluren mit Alpendost, oder Zwergstrauchheiden mit Heidelbeeren und Preiselbeeren. Zu grosse und üppige Vegetationsteppiche sind verjüngungsfeindlich. Es verstreichen oft Jahrzehnte, bis die leichtsamigen Nadelbäume an solchen Standorten wieder Fuss fassen können (Ott et al. 1997).

Die Nutzungsfaktoren im Bestand sind weitere wichtige Parameter, die im Feld untersucht wurden. Dazu zählt die Waldweide und die Holznutzung:

- Vorhandene Baumstrünke im Bestand geben Aufschluss über die Holznutzung. Je nach Vermoderungszustand der Strünke lässt sich der Zeitpunkt der Holznutzung ungefähr abschätzen. Für die Feldaufnahmen wurde unterschieden zwischen lang vergangener Holznutzung und erst kürzlich erfolgter Holznutzung.
- In einem Bestand zählen die Baumstrünke zum Totholz,. Totholz entsteht meist auf natürliche Weise und wirkt sich während vieler Jahrzehnten ununterbrochen als ansamungsgünstige Kleinstandorte aus. Moderholz ist chemisch kein idealer

Nährboden. Der Vermorschungsprozess setzt jedoch Wasser frei, der zu einer ausgeglichenen Wasserversorgung für die jungen Pflanzen führt. Das Moderholz bietet zudem Schutz vor Vegetationskonkurrenz, Kriechschnee und Schneepilzschädigungen. Durch die erhöhte Lage findet die Ausaperung früher statt als am Boden. Besonders in kalten schattigen Lagen herrscht auf dem Totholz ein günstigerer Wärmehaushalt als im Boden (Ott et al. 1997). Für die Feldaufnahmen wurde der Anteil des Totholzes in einem Bestand in drei Klassen geteilt:

- Totholzanteil im Bestand < 5%
- Totholzanteil im Bestand zwischen 5-10%
- Totholzanteil im Bestand > 10%

Dabei wurde jeweils unterschieden zwischen intaktem und zersetztem Totholz.

- Alle Merkmale, welche auf Waldweide hindeuten (Zäune, Hufspuren, Kuhfladen) wurden aufgenommen. Es wurden bei den Feldaufnahmen unterschieden zwischen keiner -, eindeutiger - und wahrscheinlicher Waldweide.
- Wild: Wenn Anzeichen auf Wildvorkommen vorhanden waren (Verbiss, Kots Spuren), wurden diese ebenfalls festgehalten.

5 Resultate

5.1 Erfassung der Gebirgswaldstrukturen

Aus dem Luftbildschlüssel konnten folgende Strukturtypen abgeleitet werden:

- **Einschichtige Strukturen:**

Die Kronen der bestandesbildenden Bäume befinden sich in der Oberschicht. Der Kronenschluss ist horizontal, der Bestand gleichförmig. Die Deckungsgrade der Unterschicht und Mittelschicht betragen weniger als 20% (Bebi 2000; LFI 1994). Die Mittelschicht ist jedoch von geringer Bedeutung, da sie in subalpinen Wäldern im Vergleich zur Unter- und Oberschicht sehr schnell durchlaufen wird (Bebi 2000). Die einschichtigen Strukturen wurden nach dem Merkmal „Schlussgrad“ in vier Klassen unterteilt (siehe Abb. 20).

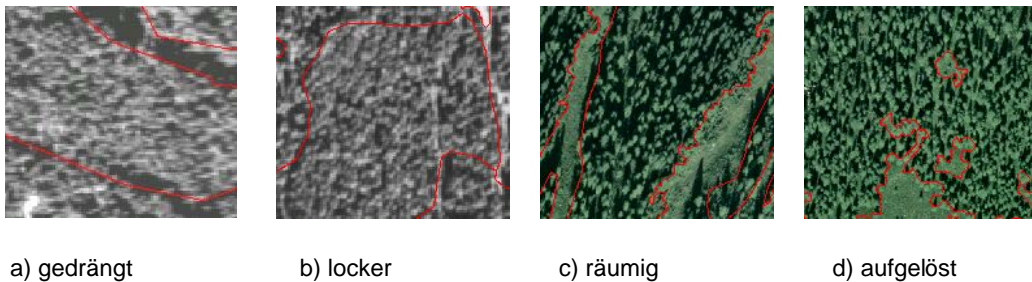
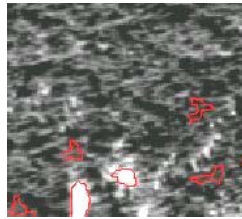


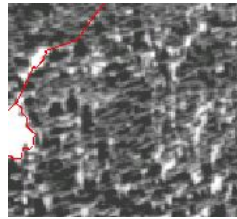
Abb. 20 a – d: Schlussgradabgrenzung im Jahr 1954 und im Jahr 2000.

- **Stufige Strukturen:**

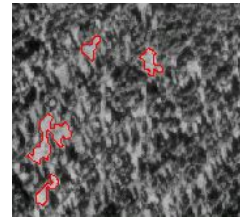
Die bestandesbildenden Bäume befinden sich in allen Schichten. Die Unterschicht ist mit einem Deckungsgrad von mehr als 20% deutlich vorhanden. Die Mittel- und die Oberschicht weisen einen Deckungsgrad von mindestens 10% auf. Es ergaben sich drei stufige Strukturen, die sich in ihrem Schlussgrad unterscheiden (siehe Abb. 21). Einen stufigen Bestand mit gedrängtem Schlussgrad gibt es nicht. In gedrängten Beständen sind die Schichten zusammengewachsen und der Lichtmangel verhindert infolge des dichten Kronenschlusses das Nachkommen von neuen Bäumen in der Unterschicht.



a) stufig, locker



b) stufig, räumig



c) stufig, aufgelöst

Abb. 21 a – c: stufige Baumstrukturen im Jahr 1954

- Rottenstrukturen:

Die meisten Bäume gehören dicht zusammenstehenden Baumgruppen an mit gemeinsamem Kronenmantel. Die Baumkollektive bestehen aus 2-10 Bäumen, die teilweise ineinander übergehen (Rottenansätze). Die Durchmesser der Rotten betragen meist nie mehr als 7-15 m (Bebi 2000 ; LFI 1994). Die Rottenstrukturen wurden nach Schlussgrad und Stufigkeit unterschieden (siehe Abb. 22). Strukturen mit dem Schlussgrad „aufgelöst“ sind oft an der oberen Waldgrenze anzutreffen. Der Nichtwaldanteil dominiert gegenüber dem Waldanteil (siehe Abb. 22c und 22e). Im Gegensatz dazu dominiert in Rottenstrukturen mit „räumigem“ oder „lockerem“ Schlussgrad der Waldanteil (siehe Abb. 22a, 22b, 22d).



a) Rotten, locker



b) Rotten, räumig



c) Rotten, aufgelöst



d) Rotten, stufig, räumig

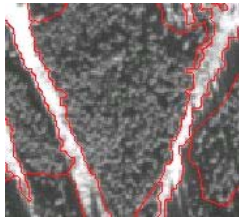


e) Rotten, stufig, aufgelöst

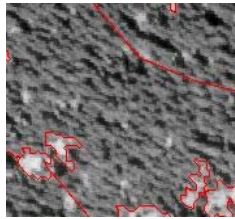
Abb. 22 a – e: Rottenstrukturen im Jahr 2000

- Jungwald:

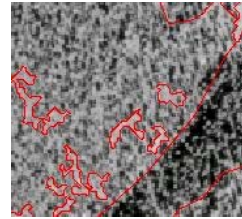
Die maximal dominierende Oberhöhe im Bestand ist kleiner als 10 m. Die Höhe konnte in den Orthofotos nur abgeschätzt werden. Es wurde immer der angrenzende Bestand als Vergleich genommen. Im Jungwald wurden drei Schlussgradkategorien unterschieden (siehe Abb. 23):



a) gedrängter Jungwald



b) stark deckender Jungwald



c) schwach deckender Jungwald

Abb. 23 a – c: Jungwald im Jahr 1954.

Die Luftbildkartierungen von 1954 und 2000 sind detailliert im Anhang 5 abgebildet. Mit den im Feld erhobenen Stichprobenpunkte konnte die Luftbildkartierung vom Jahr 2000 überprüft werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Probeflächen im Feld im Vergleich zur Luftbildkartierung kleinflächiger erhoben wurden. Dies wirkt sich vor allem bei dichtgedrängtem Jungwald und stufigen Kleinstandorten negativ aus bei der Überprüfung.

Für den Schlussgrad konnte von den 85 Stichprobenpunkten in 61 Fällen (71.7%) eine Übereinstimmung zwischen Luftbildkartierung und terrestrischer Verifikation festgestellt werden (siehe Abb. 24). Die gedrängten und lockeren Bestände wurden für die Darstellung zusammengefasst zu einer Kategorie, weil die gedrängten Bestände in der Luftbildkartierung flächenmässig gering vertreten sind und fast keine Stichprobenpunkte darin zu liegen kamen.

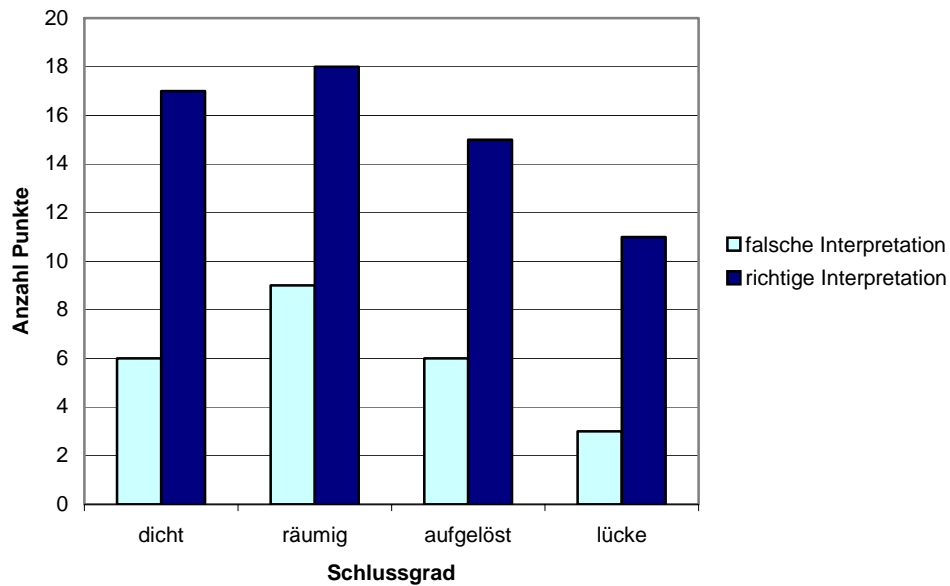


Abb. 24: Terrestrische Verifizierung der Schlussgradabgrenzung im Luftbild

Die Bestände mit dichtem Schlussgrad sowie die Lücken wurden mit über 70% Übereinstimmung gut erkannt im Luftbild. Die räumigen und aufgelösten Bestände stimmen mit 66% (bzw. 65%) wesentlich schlechter mit den Feldaufnahmen überein. Infolge der kleinflächig erfolgten Kartierung im Feld darf dieses Resultat jedoch nicht überbewertet werden. Vor allem die kleinflächig aufgelösten und räumigen Waldrandbereiche eignen sich für den Vergleich mit der grossflächig erfolgten Luftbildkartierung nicht. Sie wurden oft in die Klasse mit lockerem Schlussgrad eingeteilt. Das selbe Problem tritt auch bei den stufigen Beständen auf, die ebenfalls oft kleinflächig auftreten. Sie stimmten in 53 Fällen (62%) mit den Feldaufnahmen überein.

Der Jungwald wurde im Luftbild oft als Lücke interpretiert. Von den 85 Stichprobenpunkten wiesen jedoch 25 (rund 30%) reine Jungwaldflächen oder junge stufige Bestände mit sehr hohem Jungwaldanteil auf.

Die Rottenstrukturen waren auch im Feld mit 12% (11 Punkte) eher untervertreten und wurden für den Vergleich deshalb nicht weiter berücksichtigt.

5.2 Entwicklungsdynamik der Waldstruktur

5.2.1 Gesamtes Untersuchungsgebiet

Ein Vergleich der Zeitschnitte von 1954 und 2000 zeigt eine Zunahme des reinen Waldflächenanteils um 13%. 1954 betrug die Waldfläche rund 3690 ha, im Jahre 2000 vergrösserte sie sich auf 4170 ha. Die Zunahme erfolgte kleinflächig, vor allem in Lücken und Waldrandgebieten. Es gibt nur vereinzelt Flächen, wo sich der Wald grossflächig ausgedehnt hat (siehe Anhang 6).

Am meisten zugenommen haben die lockeren Bestände. Sie machen 46% des gesamten Untersuchungsgebietes aus (gegenüber 24.8 % im Jahre 1954). Auch die gedrängten Bestände haben zugenommen, machen jedoch gemäss Luftbildinterpretation sowohl 1954 wie auch 2000 nur einen geringen Anteil der gesamten Fläche aus und wurden deshalb zusammen mit den lockeren Beständen in der Kategorie „dicht“ zusammengefasst (siehe Abb. 25). Die räumigen Bestände haben am stärksten abgenommen. Im Jahre 1954 machten sie 29% des Untersuchungsgebietes aus, im Jahre 2000 waren es noch 18.8 % (siehe Abb. 25).

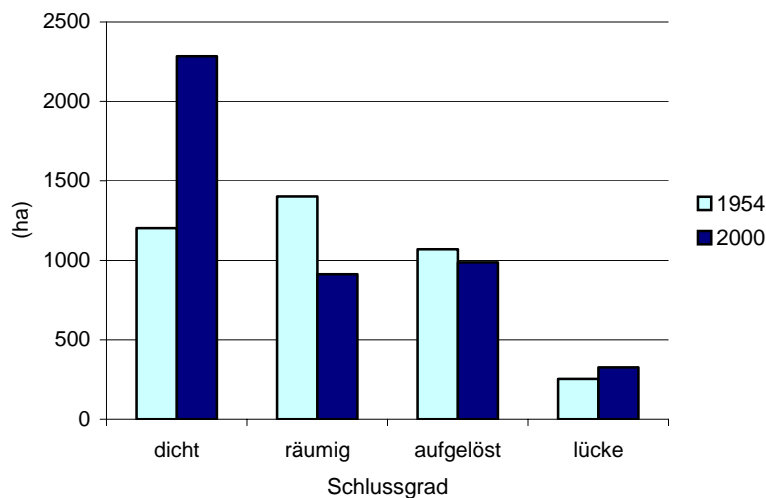


Abb. 25: Flächenvergleich der Schlussgradkategorien von 1954 und 2000

Vergleicht man die auf den Luftbildern von 1954 und 2000 kartierten Strukturtypen, so lässt sich eine deutliche Tendenz der Zunahme der einschichtigen Typen feststellen. Insbesondere die dichten Bestände haben sich im Vergleich zu 1954 ausgedehnt. Im Gegensatz dazu sind die stufigen Bestände seit 1954 um 15% zurückgegangen. Einzig der Strukturtyp stufig, dicht hat ebenfalls zugenommen. Hier gilt zu vermerken, dass die auf dem Luftbild kartierten stufigen Bestände eher schlecht mit den Stich-

probenpunkten im Feld übereinstimmen und dass dieses Resultat deshalb mit Vorsicht behandelt werden muss. Die Rottenstrukturen haben sich nicht verändert. Ihr Flächenanteil am gesamten Untersuchungsgebiet macht nur 0.9% aus. Auch der Jungwald ist flächenanteilmässig mit 48.5 ha sehr gering vertreten. Eine detaillierte Tabelle mit der Strukturtypenveränderung im gesamten Untersuchungsgebiet ist im Anhang 7 zu finden.

Der grösste Teil der räumigen-, und ein kleiner Teil der aufgelösten Bestände ist in einen lockeren Schlussgrad übergegangen (siehe Tab. 7). Neues Waldgebiet ist oft dicht zusammengewachsen bis ins Jahr 2000. Auch in den Lücken ist teilweise dichter Wald gewachsen.

Tab. 7: Schlussgradveränderung von 1954 bis 2000: Die Zahlen geben an, zu wieviel Prozent ein Strukturtyp aus dem Jahr 1954 persistent geblieben ist oder sich in einen anderen Typ entwickelt hat (übrige Zahlen). Signifikante Veränderungen sind fett dargestellt.

		2000					Summe
		gedrängt (1)	locker (2)	räumig (3)	aufgelöst (4)	Lücke (0) / kein Wald	
1954	gedrängt (1)	0.00	0.35	0.02	0.00	0.03	0.41
	locker (2)	0.64	16.86	3.30	1.29	2.76	24.85
	räumig (3)	0.03	13.36	6.44	5.54	3.62	29.00
	aufgelöst (4)	0.11	7.35	4.16	7.44	3.06	22.11
	Lücke (0) / kein Wald	0.13	8.26	4.94	6.15	4.16	23.64
	Summe	0.91	46.19	18.86	20.42	13.63	100.00

Insgesamt ist 45.1% der untersuchten Waldfläche dichter geworden, 34.9% haben ihren Zustand behalten und 20% sind offener geworden (siehe Abb. 26).

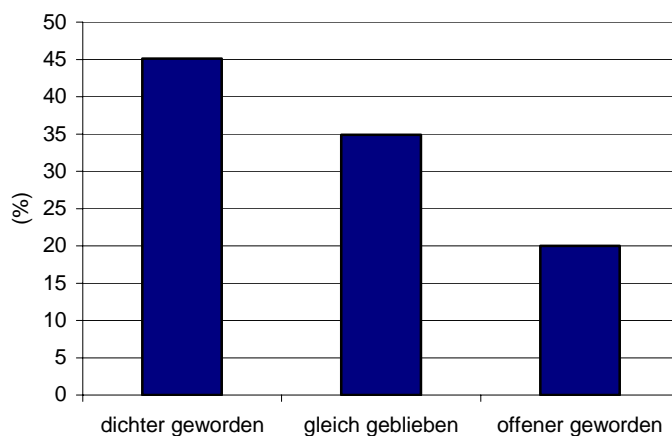


Abb. 26: Prozentualer Anteil der gleichgebliebenen-, dichter- und offener gewordenen Bestände

5.2.2 Schutzwald

Die vom Amt für Wald Graubünden ausgeschiedene Schutzwaldfläche umfasst rund 2368 ha des Untersuchungsgebietes. Im Jahr 2000 waren 2070 ha dieser Fläche mit Wald bedeckt (gegenüber 1912 ha im Jahr 1954). Der Wald hat in diesem Gebiet somit um 8% zugenommen. Dies ist 5% weniger als im gesamten Untersuchungsgebiet. Die Zunahme erfolgte hauptsächlich in den Gebieten Schatzalp, Schiatobel, Albertitobel und im Bärenental (siehe Karte im Anhang 3).

Die Strukturveränderungen sind sehr ähnlich wie im übrigen Untersuchungsgebiet. Einschichtige Bestände haben im Schutzwaldgebiet wie im übrigen Untersuchungsgebiet stark zugenommen. Die stufig räumigen bis aufgelösten Bestände zeigen eine deutliche Abnahme zwischen 1954 und 2000. Die dichten stufigen Bestände waren sowohl 1954 wie auch 2000 flächenmässig gut vertreten. Eine detaillierte Tabelle mit der Strukturtypenveränderung im Schutzwaldgebiet ist im Anhang 4 zu finden.

Seit 1954 haben sich 40.4% der Schutzwaldflächen verdichtet. Dies ist etwas weniger als im übrigen Untersuchungsgebiet (siehe Abb. 27). Demgegenüber sind im Schutzwaldgebiet etwas mehr Bestände offener geworden oder gleichgeblieben (siehe Abb. 27).

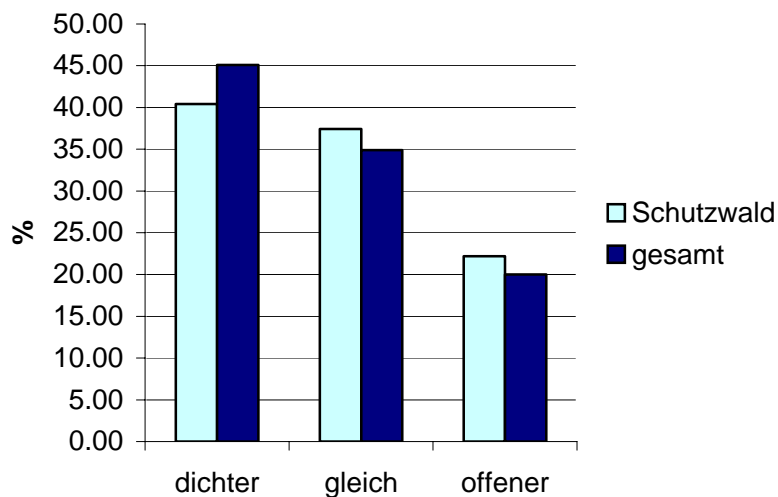


Abb. 27: Vergleich der Veränderung des Schlussgrades (dichter geworden, gleich geblieben, offener geworden) zwischen Schutzwald und gesamtem Untersuchungsgebiet.

5.3 Einfluss von Standorts- und Bestandesparametern auf die Waldveränderung

5.3.1 Waldverdichtung

Die Verdichtung des Waldes zwischen 1954 und 2000 ist vor allem abhängig von verschiedenen Standortsfaktoren. Die Variablen *Hangneigung*, *Höhe m ü. M* und *Exposition (westexponiert)* sind sowohl im Schutzwaldgebiet wie im gesamten Waldgebiet hoch signifikant. Die Waldverdichtung ist stark abhängig von diesen Faktoren (siehe Tab. 8).

Tab. 8: Univariate Analyse mit dem Chi²-Test: Signifikante Faktoren (p<0.05), welche die Waldverdichtung beeinflusst haben, sind fett dargestellt.

Unabh. Variable	Gesamte Waldfläche der Landschaft Davos (528 Stichproben)		Schutzwaldfläche der Landschaft Davos (892 Stichproben)	
	p – Value (Chi ² -Test)	Bedeutung	p-Value (Chi ² -Test)	Bedeutung
Höhe m ü. M	5.34e-006	Mit zunehmender Höhenlage sind die Bestände dichter geworden	0	Mit zunehmender Höhenlage sind die Bestände dichter geworden
Hangneigung (°)	0.000049	An flachen Hängen sind die Bestände dichter geworden	5.58e-006	An flachen Hängen sind die Bestände dichter geworden
Exposition (ost-west)	0.000081	An westexponierten Hängen sind die Bestände dichter geworden	0.04	An westexponierten Hängen sind die Bestände dichter geworden
Exposition (nord-süd)	0.11	Nicht signifikant	0.03	An südexponierten Hängen sind die Bestände dichter geworden
Hangneigungsänderung (1,0)	0.35	Nicht signifikant	0.2	Nicht signifikant
Distanz zum nächsten Weg (m)	0.50	Nicht signifikant	0.37	Nicht signifikant
Distanz zum Waldrand (m)	0.10	Nicht signifikant	0.00049	In der Nähe vom Waldrand sind die Bestände dichter geworden
Weidrechte (1,0)	0.50	Nicht signifikant	0.06	Nicht signifikant

Mit zunehmender Höhenlage und an flachen Hängen ist der Wald dichter geworden (siehe Abb. 28a und b). Hanglagen, die eine mittlere Neigung unter 30° aufweisen, führten ebenfalls vermehrt zu Waldverdichtung. Die West-Ost Unterteilung der Exposition mit Hilfe der sinus-Funktion zeigt eine deutliche Überzahl der dichter gewordenen Bestände an westexponierten Hanglagen (negative Werte, siehe Abb. 28c).

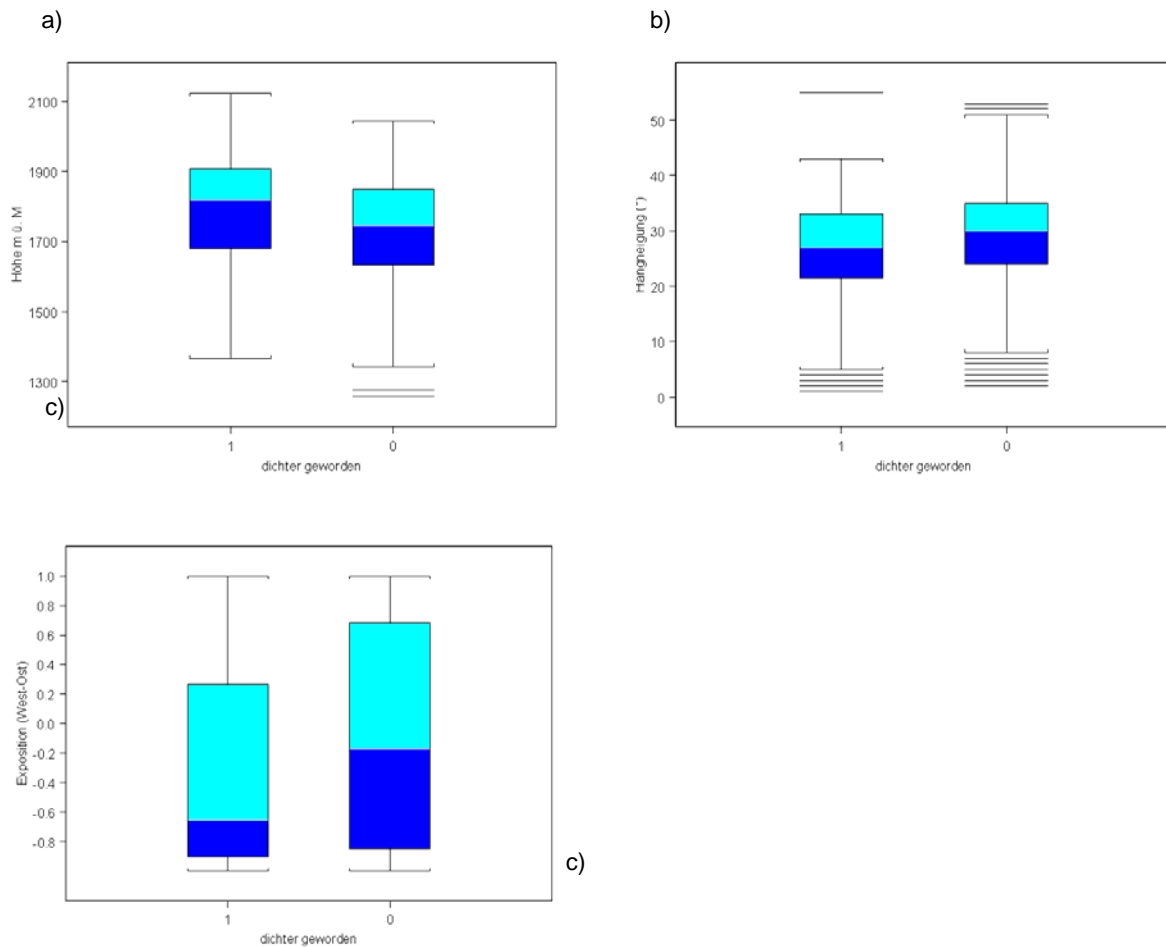


Abb. 28 a-c: Abhängigkeit der Waldverdichtung von den Standortparametern Höhe, Exposition und Hangneigung im gesamten Untersuchungsgebiet.

Ein Vergleich mit den Schutzwaldflächen zeigt, dass sich die Standortfaktoren ähnlich verhalten wie im gesamten Untersuchungsgebiet. Im Schutzwald verdichtete sich der Wald sowohl an west- wie auch an südexponierten Hängen (siehe Abb. 30 und Tab. 8). Die Nutzungsfaktoren haben weniger Einfluss auf die Waldverdichtung. Der einzige Faktor, welcher Einfluss hat auf die Waldverdichtung im Schutzwaldgebiet, ist die Distanz zum Waldrand. In Abb. 29 wird deutlich, dass die Verdichtung vor allem am Waldrand stattgefunden hat. Die Weiderechte und die Hangneigungsänderung haben keinen Einfluss auf die Waldverdichtung.

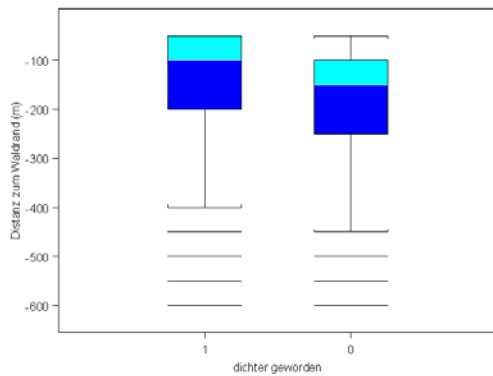


Abb. 29: Abhängigkeit der Waldverdichtung vom Abstand zum Waldrand (Schutzwaldgebiet)

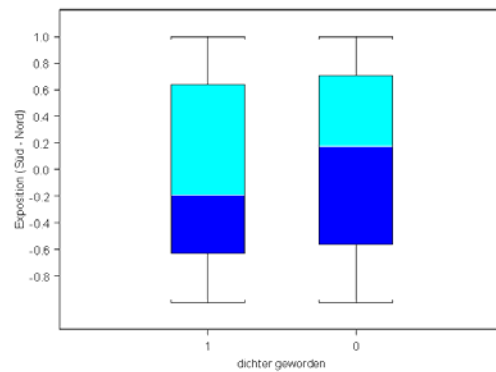


Abb. 30: Waldverdichtung in südexponierten Hängen (Südexponiert = negative Werte) (Schutzwaldgebiet)

Um zu sehen, welche Kombination von erklärenden Variablen die Waldverdichtung am meisten beeinflusst, wurde sowohl für das Schutzwaldgebiet wie auch für die gesamte Waldfläche ein multiples logistisches Modell berechnet, das alle Variablen aus Tab. 8 einschliesst. Die beiden Modelle sind mit p-values von 0.000001 hoch signifikant. Mit einer schrittweisen Reduktion wurden die Modelle so vereinfacht, dass nur die wichtigsten Variablen im Modell enthalten blieben.

Im Schutzwald wurde die Waldverdichtung am meisten beeinflusst von folgender Variablenkombination: der Höhe, der Hangneigung, der westexponierten Hängen und der Distanz zum nächsten Weg sowie zum Waldrand. Die südexponierten Hängen haben in Kombination mit den im Modell beibehaltenen Variablen keinen Einfluss auf die Waldverdichtung, dafür trägt die Variable „Distanz zum nächsten Weg“ zur Waldverdichtung bei, wobei die dichteren Bestände etwas weiter entfernt vom Weg liegen als die übrigen Bestände. Im gesamten Untersuchungsgebiet entspricht die Kombination der Variablen den univariaten Tests. Einzig die Distanz zum Waldrand blieb als signifikante Variable ebenfalls im Modell.

5.3.2 Schlussgradabnahme

Die Bestände, die sich geöffnet haben, sind nur von wenigen Standortsfaktoren abhängig, wie die Tabelle 9 zeigt. Im gesamten Untersuchungsgebiet hat der Schlussgrad vor allem in Höhenlagen zwischen 1700 und 1800 m ü. M. und an ostexponierten Stellen abgenommen (siehe Abb. 31 a und b).

Tab. 9: Univariate Analyse mit dem Chi²-Test: Signifikante Faktoren (p<0.05), welche die Schlussgradabnahme beeinflusst haben, sind fett dargestellt.

	Gesamte Waldfläche der Landschaft Davos (180 Stichproben)		Schutzwaldfläche der Landschaft Davos (426 Stichproben)	
Unabh. Variable	p – Value (Chi²-Test)	Bedeutung	p-Value (Chi²-Test)	Bedeutung
Höhe m ü. M	0.02783	Mit abnehmender Höhenlage sind die Bestände offener geworden	0.6502	Nicht signifikant
Hangneigung (°)	0.5847	Nicht signifikant	0.36903	Nicht signifikant
Exposition (ost-west)	0.000017	An ostexponierten Hängen sind die Bestände offener geworden	1.4648e-009	An ostexponierten Hängen sind die Bestände offener geworden
Exposition (nord-süd)	0.2431	Nicht signifikant	0.000039	An südexponierten Hängen sind die Bestände offener geworden
Hangneigungsänderung (1,0)	0.1825	Nicht signifikant	1	Nicht signifikant
Distanz zum nächsten Weg (m)	0.7649	Nicht signifikant	0.145823	Nicht signifikant
Distanz zum Waldrand (m)	0.3285	Nicht signifikant	0.50404	Nicht signifikant
Weiderecht (1,0)	0.50	Nicht signifikant	0.3125	Nicht signifikant

Im Schutzwaldgebiet hat die Höhenlage keinen Einfluss auf die Schlussgradabnahme. Die Abnahme ist nur von den ost- und südexponierten Hängen abhängig (siehe Abb. 32). Die Nutzungsfaktoren haben in der univariaten Analyse alle keinen Einfluss auf die Waldveränderung. Vor allem die erwartete Abhängigkeit von der Distanz zum nächsten Weg, die bei der Holznutzung von Bedeutung ist, war nicht signifikant.

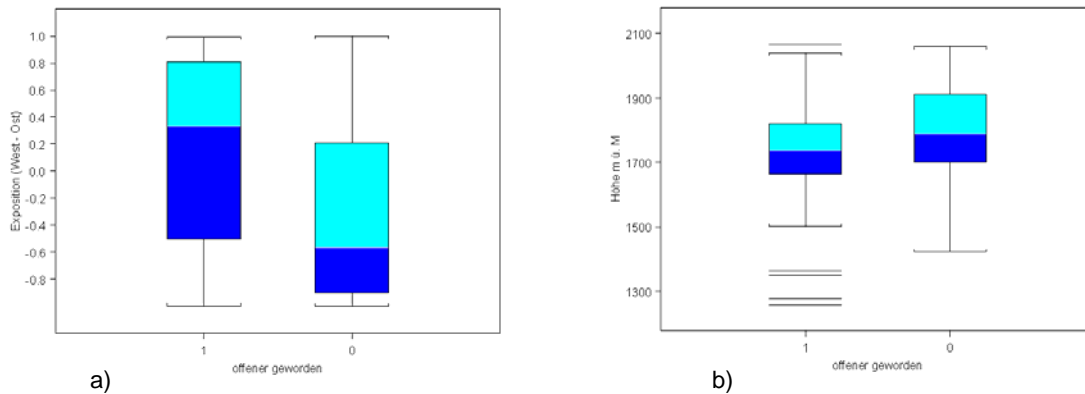


Abb. 31 a-b: Abhängigkeit der Schlussgradabnahme von den Standortsfaktoren “ostexponiert” (positive Werte) und “Höhe m. ü. M.” im gesamten Untersuchungsgebiet.

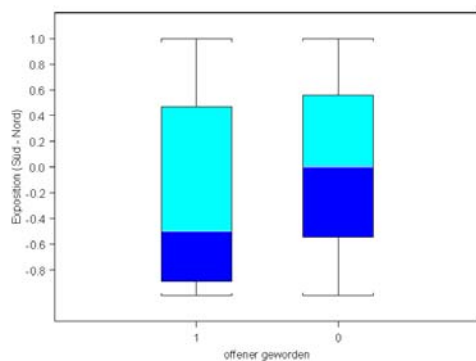


Abb. 32: Abhängigkeit der Waldveränderung vom Standortsfaktor „südexponiert“ (südexponiert = negative Werte) im Schutzwaldgebiet.

Die multiple Regressionsanalyse ergab für das ganze Untersuchungsgebiet die analogen Resultate wie die univariaten Analysen. Die einzigen Variablen, welche die Schlussgradabnahme stark beeinflussen, sind die Höhe m. ü. M. und die Variable ostexponiert. Im Schutzwald wurde das Modell der multiplen logistischen Regression auf die Variablen ostexponiert, südexponiert und Distanz zum Waldrand reduziert. Dies entspricht mehrheitlich den univariaten Analysen. Einzig der Faktor „Distanz zum Waldrand“ wurde zusätzlich im Modell beibehalten. Weiter entfernt vom Waldrand sind die Bestände eher offener geworden.

5.4 Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit in der Landschaft Davos

Die Wälder mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit von mehr als 50% machten im Jahr 1954 5.3% und im Jahr 2000 4.3% der Gesamtwaldfläche aus (siehe Abb. 33 a und b). Trotz der relativ grossen Waldverdichtung ist die Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit in den letzten 50 Jahren sehr wenig zurückgegangen. Die grössten potentiellen Anrisszonen befinden sich sowohl 1954 wie auch 2000 am Eingang des Flüelatal, am Seehorn, im Mattenwald bei Davos Dorf, an den steilsten Hangpartien der Seitentäler (Sertig und Dischma), im Chummertälli, im Zugwald sowie im Grabentobel bei Glaris, und in Monstein am Silberberg (siehe Abb. 33 a und b). Ausser den Hangpartien im Flüelatal, im Dischmatal und am Silberberg sind alle diese Gebiete in Schutzwäldern gelegen.



a) 1954



b) 2000

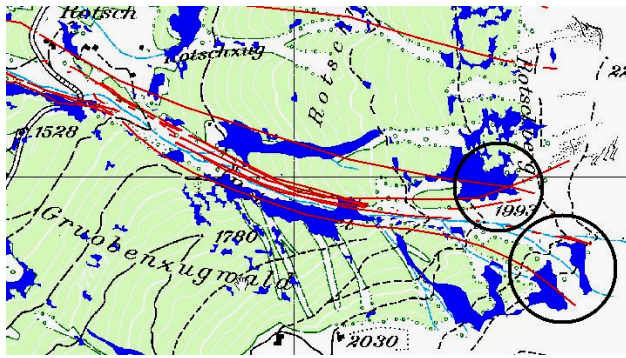
Abb. 33 a-b: Waldfläche in Davos für die Jahre 1954 und 2000. Gebiete, für die eine Lawinenanrisswahrscheinlichkeit von mehr als 50% berechnet wurde, sind rot dargestellt.

Im Jahr 1954 lagen 2.3 % der lawinenanrissgefährdeten Gebiete in Schutzwäldern. Im Jahr 2000 sind es 1.82%. Der Vergleich zwischen Schutzwald und gesamtem Untersuchungsgebiet zeigt, dass die anrissgefährdeten Waldflächen im Schutzwaldgebiet etwas weniger stark zurückgegangen sind als im gesamten Untersuchungsgebiet. Die Anrisszonen befinden sich hauptsächlich an steilen, nord- und ost-exponierten Hanglagen in offenen, von Lücken durchsetzten Waldtypen (v.a. einschichtig offene und stufig offene Bestände. Südexponierte Hanglagen stellen sowohl 1954 wie auch 2000 kein Risikogebiet dar (Anrisswahrscheinlichkeit < 50%). An westexponierten Hängen ist die Anrisswahrscheinlichkeit über 50% sehr gering.

Die Lawinenschutzwirksamkeit im Wald hat sich zwischen 1954 und 2000 nur kleinflächig und sehr gering verändert. Es zeigte sich, dass die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit in 3% der dichter gewordenen Bestände abgenommen hat und in 4.1% der offener gewordenen Bestände zugenommen hat. In 0.2% der offenen Beständen ist die Anrisswahrscheinlichkeit schon seit 1954 vorhanden gewesen.

Die Waldflächenveränderung hat sich ebenfalls auf die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit ausgewirkt. In 0.5% der Gesamtwaldfläche ist die Anrisswahrscheinlichkeit wegen der Waldzunahme zurückgegangen. Dort wo die Waldfläche abgenommen hat, ist in 0.6% des Gesamtwaldanteils die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit gestiegen. Daraus wird ersichtlich, dass sich die Anrisswahrscheinlichkeit in offener gewordenen Beständen schneller erhöht als in Beständen, die dichter geworden sind.

Ein Vergleich der Waldausdehnung mit allen Lawinenniedergängen im Raum Davos zwischen 1954 und 1980 hat gezeigt, dass sich einige Lawinenanrisszonen damals noch nicht im Wald befanden. Bis ins Jahr 2000 jedoch hat sich der Wald zu den Anrisszonen ausgedehnt (siehe Abb. 34 a und b). Gemäss Berechnung ist dort die Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit im Jahr 2000 nicht grösser als 50%.



a): Grubenzugwald bei Monstein

Abb. 34 a-b: Lawinenniedergänge zwischen 1950 und 1980 im Vergleich mit der Waldausdehnung bis ins Jahr 2000. (rot = Lawinenniedergänge zwischen 1950 und 1980 aus der Lawinendatenbank vom SLF, violett = Waldausdehnung bis ins Jahr 2000).



b) : Steinschlagwald im Flüelatal

Es gibt jedoch vor allem in steilem Gelände auch Lawinenanrisszonen, wo sich der Wald seit 1954 nicht ausgedehnt hat (siehe Abb. 35).

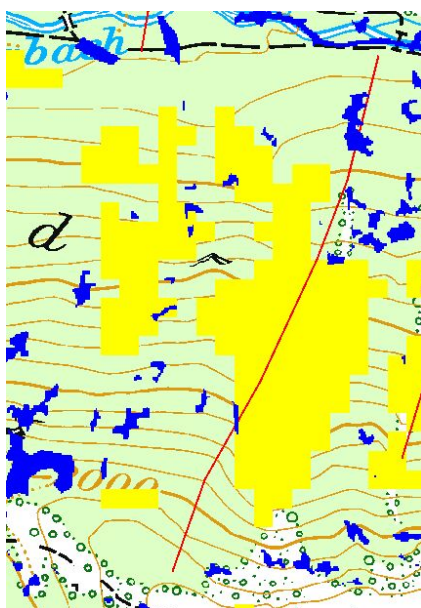


Abb. 35: Lawinenanrisszone in steilem Gelände oberhalb des Flüelabachs, wo sich der Wald nicht ausgedehnt hat. (violett = Waldausdehnung bis im Jahr 2000, rot = Lawinenniedergänge zwischen 1950 und 1980 aus der Lawinendatenbank vom SLF, gelb = Standorte mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit > 50%).

5.5 Feldanalysen

Insgesamt wurden je 32 Stichprobenpunkte an offener- und dichter gewordenen Waldstandorten im Feld lokalisiert. Zusätzlich wurden 21 Punkte in lawinenanrisswahrscheinlichem Gebiet aufgesucht. Die 85 Punkte dienten hauptsächlich der Überprüfung der Luftbildkartierung vom Jahr 2000 (vergl. Kap. 5.1). Zusätzlich konnten daraus Informationen gewonnen werden, welche aufgrund der Luftbild- und GIS-Analysen allein nicht erhoben werden konnten, wie zum Beispiel die Bodenvegetation, die Baumartenzusammensetzung und der Totholzanteil:

Baumartenzusammensetzung

Es gibt im Untersuchungsgebiet zwischen den offener- und dichter gewordenen Standorten keine Unterschiede in der Baumartenzusammensetzung. Auch an den Lawinenanrissgefährdeten Stellen unterscheidet sich die Baumartenzusammensetzung nicht von den übrigen Standorten. Die Fichte stellt in fast allen untersuchten Flächen die dominierende Baumart dar. Von den 85 Stichproben sind 35 reine Fichtenbestände. Die Lärche ist die Baumart, welche am zweithäufigsten vorkommt. Sie ist in 31 untersuchten Beständen zusammen mit der Fichte anzutreffen, wobei jedoch die Fichte den Hauptanteil der Bäume im Bestand bildet. Nur eine einzige Untersuchungsfläche bildet einen reinen Lärchenbestand. Föhren und Arven kommen an den untersuchten Stellen nur vereinzelt in Fichten dominierten Beständen vor.

Jungwald

Die Feldaufnahmen haben gezeigt, dass in der Landschaft Davos im Jahr 2003 grundsätzlich viel Verjüngung vorhanden ist. Von den 85 Stichprobenpunkten waren 25 reine Jungwaldbestände oder stufige Bestände mit einem sehr hohen Jungwaldanteil. Die Stichprobenpunkte mit grosser Lawinenanrisswahrscheinlichkeit unterschieden sich dabei nicht von den übrigen Standorten. Auch zwischen den Beständen, die sich verdichtet bzw. aufgelöst haben, konnte kein Unterschied in der Anzahl der Jungwälder festgestellt werden.

Bodenvegetation

Die Bodenvegetation in den untersuchten Beständen setzte sich hauptsächlich aus Reitgras, Alpendost und Farn zusammen. In 44.7% der Stichprobenpunkte war die Bodenvegetation nur kleinflächig vorhanden. Sie stellte nur manchmal sehr lokal eine Konkurrenz zum Waldbestand dar. In 38.8% der Bestände bedeckte die Bodenvegetation die gesamte untersuchte Fläche, wobei die Konkurrenz zum Waldbestand dabei deutlich höher war. Vor allem an waldlawinenanrissgefährdeten Standorten stellte die Bodenvegetation mehrheitlich eine Konkurrenz zum Waldbestand dar. An den übrigen Standorten war die Bodenvegetation teilweise ausgiebig vorhanden, stellte aber für die Verjüngung keine Konkurrenz dar (siehe Abb. 36).

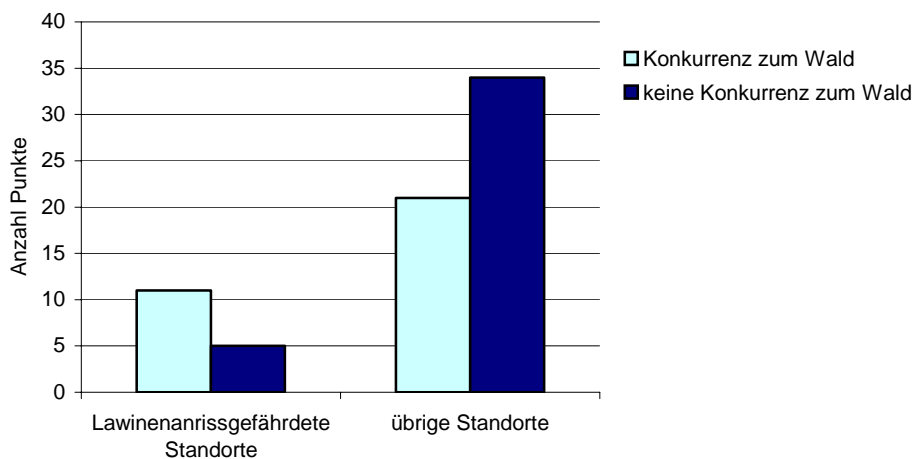


Abb. 36: Mit dem Wald konkurrenzierende und nicht konkurrenzierende Bodenvegetation an Standorten mit und ohne Lawinenanrisswahrscheinlichkeit

Totholz

Für die Feldaufnahmen wurde der Anteil des Totholzes in einem Bestand in eine der drei Klassen geteilt: Totholzanteil im Bestand < 5% , Totholzanteil im Bestand zwischen 5-10%, Totholzanteil im Bestand > 10%.

Stichprobenflächen mit einem Totholzanteil grösser als 10% kamen nur sehr selten vor. In über 80% der untersuchten Punkte machte der Totholzanteil weniger als 5% der untersuchten Fläche aus. In den offenen Beständen war die Klasse „5-10% Totholzanteil“ häufiger vertreten als in den übrigen untersuchten Flächen. Es konnte kein Zusammenhang zwischen grösseren Totholz mengen und Jungwaldvorkommen festgestellt werden. Die Stichprobenflächen mit viel Verjüngung befinden sich fast ausschliesslich in Beständen mit geringeren Totholz mengen (Kategorie <5%).

Nutzung

In den untersuchten Flächen fanden in den letzten Jahren kaum forstliche Eingriffe statt. Die Baumstrünke sind stark überwachsen und vermodert und deuten auf eine schon lang vergangene Nutzung hin. Vor allem in den letzten fünf Jahren wurde nur noch an wenigen Orten Holznutzung betrieben.

Es lässt sich jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen lawinenanrisswahrscheinlichen- und offener- bzw. dichter gewordenen Beständen feststellen. In den untersuchten Standorten, die sich aufgelöst haben, wurde doppelt so viel genutzt wie in den Standorten, welche sich verdichtet haben. Die waldlawinenanrissgefährdeten Zonen wurden fast nicht genutzt (siehe Abb. 37).

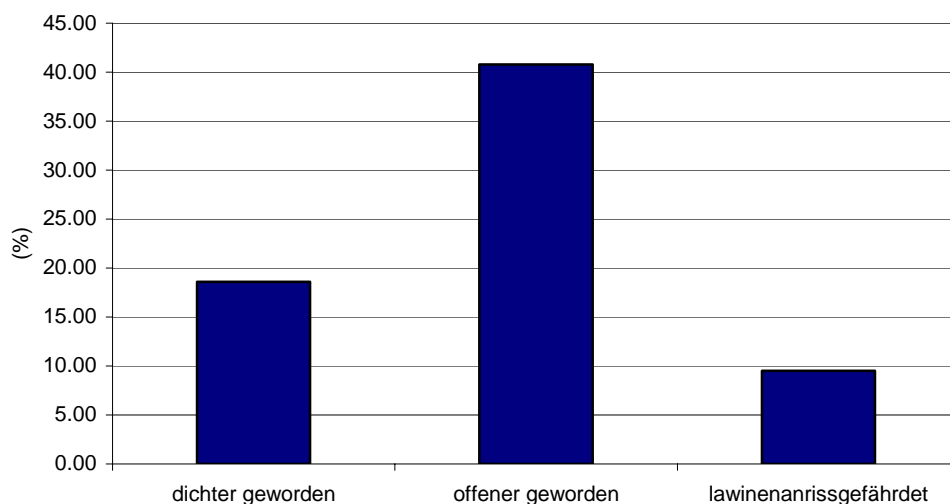


Abb. 37: Seit 1954 genutzte Stichprobenflächen in lawinenanrissgefährdeten Waldgebieten und in Beständen, die sich verdichtet oder aufgelöst haben.

Im Gegensatz zur Holznutzung wurde an den untersuchten Stichprobenpunkte nur sehr selten Waldweide festgestellt.

Wild

In 72% der Stichprobenpunkte konnte Spuren von Wild eindeutig festgestellt werden. Dabei wurden in den Beständen, die sich aufgelöst haben oder lawinenanrissgefährdet sind etwas mehr Wildvorkommen festgestellt als in den Stichprobenflächen, die sich verdichtet haben.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Entwicklungsdynamik im Untersuchungsgebiet

Die Analyse der Waldstrukturtypenkartierung von 1954 und 2000 zeigt sowohl im Schutzwaldgebiet wie auch im gesamten Waldgebiet von Davos eine deutliche strukturelle Waldveränderung, welche im folgenden interpretiert und in einen grösseren Zusammenhang gebracht werden:

Waldzunahme

Die Waldfläche hat seit 1950 im Schutzwaldgebiet um 8% - und im gesamten Untersuchungsgebiet um 13% zugenommen. Die Zunahme erfolgte kleinflächig, vor allem in Lücken und Waldrandgebieten. Bei den Untersuchungen von Bebi (2000) im Dischmatal ergab sich zwischen 1930 und 1997 eine Waldflächenausdehnung von 22.5%. Im gesamtschweizerischen Alpenraum nahm die Waldfläche im 20. Jahrhundert um rund 30% zu (siehe Abb. 37 und Abb. 38), wobei die Zunahme zwischen 1950 und 2000 etwa 20% ausmachte (Brändli 2000).

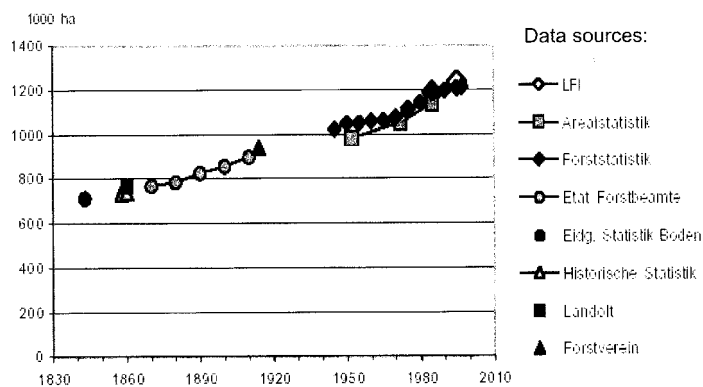


Abb. 38: Waldzunahme im schweizerischen Alpenraum (Aus: Brändli 2000)

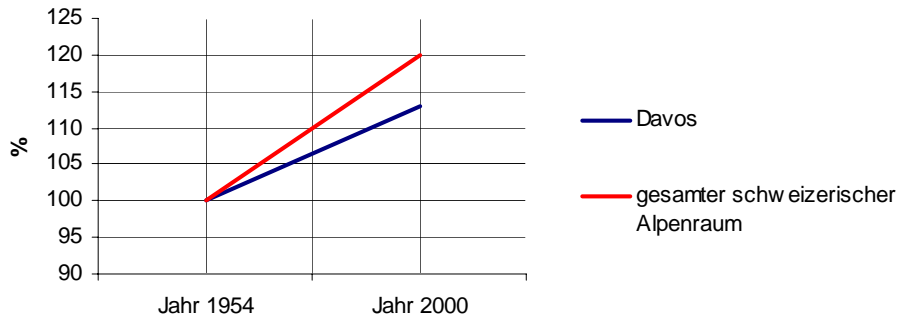


Abb. 39: Vergleich der prozentualen Waldflächenzunahme im gesamtschweizerischen Alpenraum und in der Landschaft Davos.

Aus den Resultaten wird ersichtlich, dass die Waldausdehnung im Vergleich zu den übrigen Alpenregionen in der Landschaft Davos nicht ganz so gross ist. Dies kann damit erklärt werden, dass die Landwirtschaft in Davos im Vergleich zu anderen Bergregionen nicht so stark zurückgegangen ist. Die Gemeinde besitzt immer noch 90 landwirtschaftliche Betriebe. Der Tourismusort Davos mit einer gut ausgebauten Infrastruktur und guten Wohn- und Arbeitsalternativen sowie sehr guten Möglichkeiten zur Direktvermarktung lässt die Landwirtschaft im Vergleich zu anderen Berggebietsregionen attraktiv bleiben.

Waldveränderung

Sowohl in den Schutzwäldern wie auch im gesamten Untersuchungsgebiet bestand eine starke Tendenz zum Zuwachsen der Bestände in einschichtige, geschlossene Waldstrukturen. Die stufigen, schwach deckenden Bestände haben tendenziell abgenommen. Reine Jungwaldflächen und Rottenstrukturen waren selten kartiert worden. Insgesamt ist in den Schutzwäldern 40% und im gesamten Waldgebiet 45% der Waldfläche dichter geworden. Die Verdichtung erfolgte vor allem in höhergelegenen, westexponierten Standorten mit flacher Hangneigung. In rund 20% der untersuchten Waldflächen erfolgte eine Schlussgradabnahme. Sie konnte vor allem an tiefer gelegenen, ostexponierten Lagen festgestellt werden. Im folgenden wird auf die wichtigsten Variablen, welche die Waldveränderung beeinflusst haben, eingegangen:

Höhe: Waldverdichtung mit zunehmender Höhe

Im Jahre 1930 waren noch viele Waldflächen nach intensiven Holz- und Weidenutzungen aufgelichtet (Günter 1985). Durch die Beweidung wurde der Boden aufgeschürft. Auf der blossgelegten Mineralerde konnten sich vor allem Fichten und Lärchen häufig flächendeckend ansamen. In der Zeit nach 1930 herrschten zudem sehr verjüngungsgünstige und wachstumsfördernde Verhältnisse (Bebi 2000), was zur Folge hatte, dass viele Waldbestände im Raum Davos dicht zusammenwuchsen. Daraus lässt sich erklären, warum die Waldverdichtung hauptsächlich in höheren Lagen erfolgte. Die tiefergelegenen Wälder waren 1954 schon relativ dicht. An der oberen Waldgrenze besaßen die Waldbestände vor 50 Jahren meist aufgelöste Strukturen, die bis ins Jahr 2000 dann häufig in Strukturen mit räumigem Schlussgrad übergingen. Der Grund dafür liegt in der landwirtschaftlichen Umstrukturierung, die auch in der Landschaft Davos vorhanden ist und zur Folge hatte, dass viele Heimweiden brach gelegt wurden (Bischoff 1987). Die für den Graswuchs günstigen Lichtungen wuchsen endgültig ein und wurden zu geschlossenem Wald.

Hanglagen: Waldverdichtung an flachen Hängen

Die stärkere Waldverdichtung an flachen Hängen kann ebenfalls mit der Änderung der landwirtschaftlichen Nutzung erklärt werden. Die standörtlichen Bedingungen in steilem Gelände sind sehr hart (vergl. Kapitel 6.2) . Im Gegensatz zu den steilen Flächen, die gar nie bewirtschaftet oder bereits vor 1950 aufgegeben wurden, eigneten sich ebene Flächen besser für die landwirtschaftliche Nutzung. Durch die landwirtschaftliche Umstrukturierung wurden jedoch innerhalb der letzten 50 Jahre auch diese Fläche teilweise aufgegeben und der Wald konnte sich verdichten.

Exposition: Waldverdichtung an westexponierten Hängen

Die Exposition ist in Bezug auf die Waldveränderung ein schwierig zu interpretierender Faktor. Als mögliche Erklärungen kommen klimatische und nivologische Prozesse in Frage. Die Tatsache, dass die Waldbestände an ostexponierten Hängen offener und an westexponierten Hängen dichter geworden sind, lässt die Vermutung aufkommen, dass das Waldwachstum von den Niederschlägen beeinflusst wird. Davos liegt jedoch genau an der Wetterscheide: das obere Landwassertal gehört zusammen mit dem Prättigau zur niederschlagsreichen Klimazone der Nordalpen; das untere Landwassertal zählt bereits zum gemässigten kontinentalen eher trockenen inner-

alpinen Gebirgsklima und wird von Niederschlägen, die aus Süden kommen, beeinflusst (Zingg 1961). Die Waldzunahme erfolgte aber im ganzen Raum Davos stark und beschränkte sich nicht auf ein bestimmtes Gebiet (siehe Anhang 6). Gellrich (2003, mündliche Mitteilung) untersuchte unter anderem die Einflüsse der Niederschläge und der Strahlung auf die Waldausdehnung im gesamten schweizerischen Alpenraum. Seinen Berechnungen zufolge hat der Niederschlag keinen Einfluss auf die Waldveränderung, die Strahlung jedoch zeigt einen grossen Unterschied der Waldveränderung zwischen nord- und südexponierten Hängen. Im Raum Davos kann ein solcher Unterschied nicht festgestellt werden. In den südexponierten Hanglagen der Schutzwälder sind die Bestände sowohl offener wie auch dichter geworden. Infolge der häufig starken Westwinde im Alpenraum, welche den Schnee auf die ostexponierten Hänge verfrachten, könnten die westexponierten Hanglagen im Winter bezüglich Tribschneeansammlung etwas bevorzugt sein. Dies wirkt sich jedoch nicht im Waldinnern, sondern nur am Waldrand und in Lücken massgeblich aus. Im Sommer dagegen erhalten die westexponierten Hänge durch die am Nachmittag aufkommende Quellbewölkung weniger Sonneneinstrahlung, was für die dort gelegenen Bestände eher ein Nachteil ist. Die Waldzunahme an den westexponierten Hängen lässt sich somit aus den vorliegenden Untersuchungen nicht genau erklären.

Weiderechte

Zwischen den Weiderechten und der Waldveränderung konnte kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Bebi (2000) hat jedoch den Einfluss der Waldweide auf die Waldveränderung basierend auf den MAB-Daten im Dischmatal untersucht und dort starke Unterschiede in der Waldentwicklung festgestellt. Obwohl die Waldweide tendenziell eher rückgängig ist, hat sie im Raum Davos lokal noch einen sehr hohen Stellenwert (Meyer 2003). Vor allem im Dischmatal wird relativ stark beweidet. Somit wird deutlich, dass die Weiderechte nicht geeignet sind, um den Einfluss der Waldweide auf die Waldveränderung zu untersuchen, weil sie nicht mit der tatsächlich betriebenen Waldweide übereinstimmen.

Holznutzung

Auch die Holznutzung hat in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen. Bis Mitte der 80er Jahre bildete der Reinerlös aus der Holzproduktion die finanzielle Grundlage für alle forstlichen Aktivitäten der Waldeigentümer. Eine Wende kam mit den neuen Ansprüchen an die Waldbewirtschaftung und mit der Liberalisierung des Holzhandels. Von verschiedener Seite wurden immer vielfältigere Ansprüche an den Wald und damit an die Waldeigentümer gestellt, ohne dass eine finanzielle Entschädigung dieser Ansprüche jemals in Aussicht gestellt wurde (Hefti und Bebi 2003). Die Liberalisierung des Holzhandels und die bedeutend billigeren Produktionsmethoden in Skandinavien oder Osteuropa trugen zusätzlich zu immer schwierigeren Situationen der einheimischen Waldeigentümer bei. Dies hatte zur Folge, dass in der Landschaft Davos in den vergangenen Jahrzehnten weit weniger genutzt wurde als nachgewachsen ist, was zu einer massiven Vorratzzunahme führte. Dies obwohl die Gemeinde in den letzten 20 Jahren die privaten Waldbesitzer durch Mitfinanzierung von Erschliessungsanlagen, Schutzbauten und waldbaulichen Massnahmen unterstützt hat (Hefti und Bebi 2003). Teufen (1987) weist in seiner Analyse auf die massiv übervertretenen Bäume mit mittlerem Durchmesser von 20 – 55 cm hin und begründet diese Tatsache mit den restriktiven Nutzungsbeschränkungen der letzten Jahrzehnte. Diese hatten zur Folge, dass sich die Bestände in Richtung eines gleichaltrigen, dichten Aufbaus verändert haben.

Schutzwirksamkeit

Die zunehmende Ausdehnung und Dichte des Davoser Waldes in den letzten Jahrzehnten und das grossflächige Zusammenwachsen in gleichaltrige, dichte Bestände ist für die aktuelle Lawinenschutzwirksamkeit des Waldes sicher positiv zu werten. Gleichzeitig ist aber zu bedenken, dass gleichförmige Wälder mit kurz-kronigen, schlanken Bäumen allgemein als eher anfällig gelten gegenüber äusseren Einflüssen, wie zum Beispiel Windwurf, Schneebruch oder Borkenkäfer (Rottman 1985). Wenn gleichförmige, dichte Wälder zusammenbrechen, dauert es besonders lange, bis sich ein neuer Wald entwickelt hat, weil in der Regel keine Verjüngung vorhanden ist. Zudem wächst durch den plötzlichen Lichteinfall oft schnell eine üppige Bodenvegetation, die für die Verjüngung eine grosse Konkurrenz darstellt.

Die Waldauflösung erfolgte in der Landschaft Davos jedoch nur sehr kleinflächig. Weder in den GIS basierten Analysen noch in den Feldbegehungen konnte in der Landschaft Davos eine grossflächige Waldauflösung festgestellt werden. Es konnten

nur wenig Standorte gefunden werden, wo sich der Wald von einer sehr dichten Struktur in eine sehr offene Struktur verändert hat (siehe Abb. 39).



Abb. 40: Zerfallender, instabiler Waldbestand im Eggenwald (Sertigtal, westexponiert). Die Baumstrünke am Boden deuten darauf hin, dass dieser Bestand in den letzten Jahrzehnten einmal aufgelichtet wurde.

Von den grossen Windwürfen der Stürme Vivian und Lothar war Davos nur gering betroffen. Der Sturm Vivian hinterliess im Wald einzig bei der Schatzalp und auf der Gegenseite am Jakobshorn kleinflächige Windwurfflächen, die jedoch die Schutzwirksamkeit nicht gravierend beeinträchtigten. Eine eindrückliche, jedoch ebenfalls kleinflächige Windwurffläche vom Jahr 2003 befindet sich im Bodenwald beim Chummertälli in Glaris. Der Waldbestand war dort sehr dicht und die Bäume kurzkrönig und schlank. Trotz der grossen Menge an Totholz und umgeworfenen Stämmen ist der Bestand auch jetzt noch relativ dicht (siehe Abb. 40). Steilränder mit kurzen Kronen gelten jedoch als besonders sturmgefährdet.



Abb. 41: Windwurffläche im
Bodenwald bei Glaris (Aufnahme
Sommer 2003)

Jungwald

Die Übereinstimmung der Luftbildanalyse vom Jahr 2000 mit den Feldbegehungen zeigt, dass mehr Jungwald vorhanden ist als auf den Luftbildern abgegrenzt wurde. Im Gebirgswald trifft man meist keine grossen Verjüngungsflächen an, weil die waldbaulichen Strategien vor allem auf die Erhaltung der Schutzwirksamkeit ausgerichtet ist und forstliche Eingriffe auf wenige Aren räumlich limitiert sind. Deshalb trifft man die Verjüngung kleinflächig in lockeren bis aufgelösten Beständen an, was die Interpretation im Luftbild wesentlich erschwert. Auf Infrarot-Luftbildern wären Lawinenzüge und Aufforstungen wesentlich einfacher zu erkennen, weil grüne Pflanzen im Nahinfrarotbereich besonders stark reflektieren.

Die Feldanalysen haben gezeigt, dass ein Drittel der untersuchten Flächen reine Jungwaldflächen oder stufige Bestände mit sehr hohem Jungwaldanteil sind. In den Feldbegehungen wurde auch ausserhalb der Stichprobenflächen sowohl in dichteren Beständen wie auch in stufigen und offenen Beständen viel Jungwald angetroffen. An Standorten mit üppiger Bodenvegetation konnten viele Jungpflanzen auf Baumstrünken und Totholz beobachtet werden (siehe Abb. 41).



Abb. 42: Fichtenanwuchs auf morschem Baumstrunk

Dank den klimatischen Bedingungen der letzten Jahre und dem guten Samenjahr 2003 weist der Davoser Wald sehr viel Verjüngung auf. Für die Nachhaltigkeit der Schutzwirksamkeit ist das ein Vorteil. Häufig zitierte Befürchtungen, dass die härteren Standortsbedingungen im Gebirge infolge Schneebruchs, Pilzbefall oder zu grosser Wildbelastung die Schutzwirksamkeit des Waldes beeinträchtigen könnten, bewahrheiten sich in Davos zur Zeit nicht.

6.2 Diskussion der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit in der Landschaft Davos

Trotz der Waldverdichtung hat die Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit nur gering abgenommen zwischen 1954 und 2000. In rund 4% des Waldes ist sie grösser als 50%. Die Schutzwirksamkeit des Waldes ist vor allem an steilen, nord- und ostexponierten Hanglagen in offenen, von Lücken und Felsen durchsetzten Waldtypen nicht gewährleistet.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich die gefährdeten Anrissgebiete meist in Beständen befinden, die bereits 1954 offen waren und sich seither nicht verdichtet haben. Dies kann begründet werden mit den ausgesprochen schwierigen natürlichen

Bedingungen, die an diesen Standorten herrschen. An steilen, nordexponierten Hanglagen sind die mechanischen Einwirkungen der Schneedecke insbesondere für die Waldverjüngung besonders stark. Genügend Wärme und direkte Sonneneinstrahlung, die für das Aufwachsen der Fichte notwendig sind, fehlen an diesen Hängen. Infolge der Steilheit reissen auch oberhalb des Waldes häufig Lawinen an und zerstören den Wald und die Verjüngung kontinuierlich (siehe Kap. 5.4). An Lawinenzügen ist die Lärche infolge der guten Lichtbedingungen und der freigelegten Mineralerde oft begünstigt. Lärchen besitzen eine geringere Interzeptionswirkung als die immergrünen Nadelbäume und sind deshalb insbesondere bei kalten Bedingungen weniger schutzwirksam gegenüber Lawinen (Schneebeli und Bebi, in press).

Die Resultate der Feldbegehungen zeigen, dass sich in den relativ offenen Beständen häufig eine grossflächige, üppige Bodenvegetation bildet, die zur Konkurrenz wird für die Waldverjüngung (vergl. auch Imbeck und Ott 1987). Im Raum Davos konnte jedoch an den lawinenanrissgefährdeten Standorten kleinräumig teilweise viel Moderholz mit Verjüngung festgestellt werden.



Abb. 43:
Lawinenanrissgefährdete Zone an der rechten Hangseite des Chummertällis bei Glaris. Deutlich zu erkennen ist das üppige Reitgras und die zum Teil morschen oder umgefallenen Bäume.

Die harten Standortsbedingungen sind in Bezug auf die Entwicklung der Schutzwirksamkeit eindeutig negativ zu werten. Für das Waldökosystem stellen sie jedoch auch eine grosse Chance dar. Die krautigen Pflanzen und das Totholz schaffen ausgezeichnete Bedingungen für eine vielfältige Biodiversität (vergl. Brugger 2002).

6.3 Diskussion der Methoden

Die Resultate zeigen, dass mit Luftbild- und GIS-gestützten Zeitreihenanalysen wichtige Aussagen zur langfristigen Veränderung und zur Lawinenschutzfunktion von Gebirgswäldern gemacht werden können. Um festzustellen, wie sich ein Bestand längerfristig entwickelt hat, würden historische Gegenhangaufnahmen und dendro-ökologische Analysen eine gute Ergänzung bilden zu den bestehenden Methoden, welche nun im folgenden diskutiert werden.

automatische Waldabgrenzung

Die automatisierte Waldabgrenzung erwies sich als geeignete Ergänzung für die visuelle Waldstrukturerefassung. Der Wald wurde im Grossen und Ganzen gut vom übrigen Gebiet getrennt, wie eine visuelle Überprüfung an verschiedenen Standorten zeigte. Es entstanden jedoch einige Fehler, die mit dem erstellten Programm schwierig zu beheben waren:

- Legföhren: Die Legföhren konnten in der Klassierung nicht vom Wald unterschieden werden (siehe Abb. 43). Sie zählen nicht zum Wald und sind für die Schutzwirksamkeit nicht von Bedeutung (siehe Kap 4.3.2). Besonders im Dischmatal sind Legföhren häufig.
- Schlagschatten: Sowohl die Luftbilder von 1954 wie auch die Orthofotos von 2000 sind im Spätsommer aufgenommen worden. Diese Jahreszeit eignet sich gut für Luftbildaufnahmen, denn der Sonnenstand ist im Sommer am höchsten und die Schlagschatten können so minimiert werden. Trotzdem sind die Schlagschatten auf den Bildern teilweise beträchtlich und konnten bei der Klassierung nicht abgegrenzt werden (siehe Abb. 44). Wenn die Schlagschatten in kleinen Lücken ausgeprägt vorhanden waren, hatte das zur Folge, dass die Lücken als Wald klassiert wurden (siehe Abb. 45). Mit aufwendigen Klassierungsverfahren wäre es möglich, mit Hilfe des Sonneneinstrahlungswinkels die Schatten zu eliminieren (Frei et al. 2003). Da dies jedoch für diese Arbeit nicht möglich war, wurden die Klassierungsfehler nach dem Verschneiden mit den Waldstrukturen von Hand im ArcGIS so gut wie möglich ausgebessert.



Abb. 44: Falsch klassierte Legföhren (Orthofoto 2000)

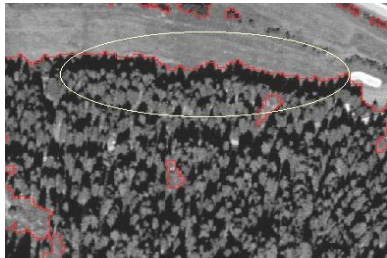


Abb. 45: Schlagschatten
(Orthofoto 1954)

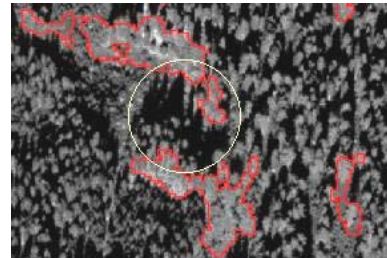


Abb. 46: Schlagschatten in Waldlücken
(Orthofoto 1954)

Zwischen den farbigen Orthofotos von 2000 und den Luftbildern von 1954 gab es keine bemerkenswerten Unterschiede in den Klassierungsergebnissen. Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse der Bilder von 1954 hatten keine Auswirkungen auf die Klassierung, da das Programm für jedes Bild neu angepasst wurde. Der Zeitaufwand war dementsprechend jedoch höher für die Klassierung dieser Bilder.

Die Orthofotos vom Jahr 2000 stellten für die Strukturtypenabgrenzung eine gute Grundlage dar. Die Verifizierungsergebnisse unterstreichen die grossen Möglichkeiten der heutigen Standards von farbigen Orthofotos. Die aus den Luftbildern von 1954 entstandenen Orthofotos waren qualitätsmässig weniger gut. Die Strukturabgrenzungen konnten auch nicht verifiziert werden. Dennoch genügten sie für eine grossflächige Strukturabgrenzung. Mit Hilfe der buffers (systematische Abstände von 15m um die Flächen) konnten die geometrischen Fehler für alle weiteren Analysen, welche mit den Waldstrukturflächen durchgeführt wurden, minimiert werden.

Visuelle Waldstrukturfassung

Das Merkmal „Schlussgrad“ konnte auf den Bildern im allgemeinen gut erfasst werden. In der Übereinstimmung der Luftbildanalyse mit den Stichprobenpunkten im Feld wurde ersichtlich, dass die gedrängten Bestände im Allgemeinen sehr schlecht erkannt wurden und dem lockeren Schlussgradtyp zugeordnet wurden. Die Feldbegehungen haben jedoch gezeigt, dass viele einschichtige Bestände einen

gedrängten Schlussgrad aufweisen. Auch in den Analysen von Bebi (2000) sind die gedrängten Waldbestände stärker vertreten. Es muss jedoch vermerkt werden, dass dichtgedrängte Bestände im Feld häufig kleinflächig angetroffen wurden. Da die Luftbildkartierung grossflächiger erfolgte, ist der Vergleich mit den Feldaufnahmen nicht optimal. Dasselbe gilt für das Merkmal „Stufigkeit“, das teilweise gut erkannt wurde im Luftbild. Die kleinflächigen Bestände konnten mit der grossflächig erfolgten Erfassungsmethode jedoch nicht immer abgegrenzt werden. Die Verjüngung wäre mit Infrarot-Luftbildern besser erfassbar gewesen als mit Schwarz-weiss-Luftbildern oder Farbbildern, weil gesunde grüne Pflanzen im Nahinfrarotbereich besonders stark reflektieren. Als Nachteil der visuellen Strukturtypenerfassung wurde eine nicht zu vermeidende Subjektivität bei der Abgrenzung der verschiedenen Typen empfunden. Zudem erwies sich die Methode als sehr zeitaufwendig. Für grosse Untersuchungsgebiete würde es sich lohnen, die Waldstrukturen automatisch abzugrenzen. In den 90er Jahren lag der Erfolg der automatischen Erfassung der Waldstrukturen vor allem auf der Ebene der Wald-Nichtwaldausscheidung mit Hilfe von Satellitenbildern (zB. Kellenberger 1996). Die Erfassung der Waldstrukturen konnte nur auf sehr wenige Typenklassen beschränkt werden (Hildebrandt 1996). Als geeignete Methode erwies sich die unüberwachte Klassifikation mit Hilfe von Klassifikationsbäumen (Lee and Kaneyuki 1996). Bebi (2000) erzielte mit der automatischen Bildverarbeitung vor allem bei der Erfassung der wichtigsten Strukturtypen und der Einzelbäume vielversprechende Resultate. Für die Zukunft stellt die objekt- und damit segmentbasierte Software *eCognition* neue Möglichkeiten für die Klassierung von Waldstrukturen dar. Zusammen mit Laserscannerdaten lassen sich Waldstruktur, Schlussgrad und Schlagschatten innerhalb des Bestandes sowie die Baumkronenbreite von Einzelbäumen sehr präzise unterscheiden (Frei et al. 2003, in Bearbeitung).

Statistische Analysen

Die multiple logistische Regression eignet sich gut für die Analyse von Datensätzen mit unabhängigen Variablen, die kontinuierlich sind. Eine interessante Alternative zum multivariaten logistischen Modell wäre eine Analyse mit Klassifikationsbäumen gewesen. Während bei den klassischen Verfahren der logistischen Regression alle Merkmale gleichzeitig zur Entscheidungsfindung benutzt werden, hat die Methode der Klassifikationsbäume den Vorteil, dass man bei der Entscheidungsfindung sequentiell vorgehen kann. Hierbei werden nacheinander Ja-Nein-Fragen gestellt, wobei eine

Frage in Abhängigkeit von der vorhergehenden Antwort ausgewählt wird (Venables and Ripley 1996).

Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit

Die Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit ergab plausible Resultate. Dies deutet darauf hin, dass die ausgeführte Waldstrukturerfassung im Zusammenhang mit den vom Geländemodell abgeleiteten Standortfaktoren interessante Möglichkeiten bieten, um die Schutzwirksamkeit in Gebirgswäldern zu beurteilen. Als Nachteil erwies sich die schlechtere räumliche Auflösung der Standortfaktoren im Gegensatz zu derjenigen der Waldstrukturen. Für eine Verbesserung des logistischen Modells wären mehr Daten über die Struktur- und Geländemerkmale sowie über die Schneesituation nötig. Bezüglich der Gewichtung der Exposition wären Daten von extremen Schneesituationen wie Beispielsweise dem Ereignis im Jahr 1951 erforderlich³. Das logistische Modell lässt sich einfach in die GIS-Modellierung übertragen, hat aber den Nachteil, dass damit keine Einflüsse von Struktur- oder Standortmerkmalen in Abhängigkeit mit anderen Merkmalen modelliert werden können. Mit Klassifikationsbäumen wäre dies jedoch möglich. Versuche von Bebi (2000) haben gezeigt, dass mit Klassifikationsbäumen zum Teil eine andere Gewichtung der Faktoren vorgenommen wird im Vergleich zum logistischen Modellansatz. In Waldabschnitten ohne grössere Lücken käme dann auch das Merkmal „Lärchenanteil“ als bedeutender Faktor hinzu.

³ Die extreme Schneesituation im Februar 1999 konnte wegen der günstigen Schneedeckenentwicklung innerhalb des Waldes bezüglich der Waldlawinensituation nicht als ein solches Extremereignis gewertet werden (Bebi 2000).

7 Schlussfolgerung

Wie im grössten Teil der Alpen hat sich der Wald auch in der Landschaft Davos in den letzten Jahrzehnten ausgedehnt und verdichtet. Diese Waldausdehnung hat sich tendenziell positiv auf die Lawinenschutzwirksamkeit der Wälder ausgewirkt. Allerdings ist dieser Effekt kleiner, als aufgrund der Wald- und Walddichtezunahme zu erwarten gewesen wäre. Auch bleibt offen, ob die in den letzten Jahrzehnten häufig festgestellte Überführung in kurzchronige, dichte Waldstrukturen nicht langfristig eine höhere Anfälligkeit gegenüber grossflächigen Störungen und somit eine Verminderung der Schutzwirksamkeit bewirken könnte. Ein entsprechender Zusammenhang zwischen Waldstrukturveränderung und Störungsanfälligkeit bzw. grossflächigen Waldauflösungen konnte zwischen 1954 und 2000 jedoch nicht festgestellt werden.

An steilen, nordexponierten Hanglagen hat sich die Lawinenschutzwirksamkeit seit 1954 nicht verbessert. Die Verjüngung an diesen Standorten wird oft von Lawinen, die oberhalb des Waldes anreissen, zerstört. Dies deutet darauf hin, dass sich diese Waldbestände infolge der ungünstigen Standortbedingungen und den zahlreichen Störungen auch in Zukunft nicht verdichten und ausdehnen werden. Eine aktive Verbesserung der Schutzwirksamkeit an diesen Standorten wäre nur mit Aufforstungen in Kombination mit Lawinenverbauungen möglich und deshalb mit einem sehr grossen finanziellen Aufwand verbunden. Da die öffentlichen finanziellen Beiträge für die Schutzwaldpflege zur Zeit stark unter Druck sind und tendenziell wahrscheinlich weiter abnehmen, werden auch in Zukunft und bei fortschreitender allgemeinen Waldzunahme im Alpenraum Schutzwälder mit ungenügender Schutzwirksamkeit auftreten. Forstliche Eingriffe zur Verbesserung der Schutzwirksamkeit müssen sich deshalb in Zukunft immer stärker auf Standorte konzentrieren, wo der Wald Siedlungen und Infrastruktur mit hohem Schadenpotential schützt. Forstliche Eingriffe müssen somit auch in Lawinenschutzwälder in zunehmendem Mass einer Kosten – Nutzen Analyse unterzogen werden, wobei nebst dem Standort und dem Schadenpotential vermehrt auch der Aspekt der erhöhten Biodiversität von solchen häufig gestörten Wäldern und der wichtigen Bedeutung von Moderholz für die Verjüngung von Schutzwäldern berücksichtigt werden sollte.

Die in dieser Arbeit angewendeten GIS- und luftbildgestützten Methoden haben sich als geeignete Werkzeuge erwiesen, um langfristige Veränderungen in Gebirgswäldern flächendeckend zu analysieren. Insbesondere konnten damit auch wertvolle Hinweise gewonnen werden, bei welcher Kombination von Standortfaktoren gewisse Waldveränderungen stattfanden. Um die Repräsentativität der Resultate für die ganze

Schweiz zu testen, wären analoge Untersuchungen in anderen Regionen sehr wertvoll. Allerdings wäre die Waldstrukturerfassung von noch grösseren Gebieten als der Landschaft Davos mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln sehr aufwendig. Um Waldstrukturen noch weiter in die Vergangenheit zurückzuverfolgen, könnten solche Analysen mit terrestrischen Gegenhanganalysen und dendroökologischen Methoden ergänzt werden. Für aussagekräftigere Angaben zum Einfluss von Nutzungsfaktoren auf die Waldveränderung wären zusätzlich zu den relativ schlecht mit der realen Nutzung übereinstimmenden Weiderechts-GIS-Karten mehr Informationen zur tatsächlichen Beweidung und detailliertere Informationen von forstlichen Eingriffen nötig.

Literaturverzeichnis

- Ammann, W. 2002: Skript zur Vorlesung „Schnee- und Lawinenkunde“. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- Amt für Wald Herrschaft/Prättigau/Davos, 2002: Davos und seine Schutzwälder. Exkursionsunterlagen. Davos.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. und R. Weiber 2000: Multivariate Analysemethoden. Springer. Heidelberg. 626 S.
- Bahrenberg, G., Giese, E. und J. Nipper 1999: Statistische Methoden in der Geographie. B. G. Teubner Stuttgart. Leipzig. 232 S.
- Baltes-Götz, B. 2002: Binäre logistische Regressionsanalyse mit SPSS. Universitäts-Rechenzentrum Trier. Trier. 42 S.
- Bebi, P., Kulakowski, D. und Th.T. Veblen 2003: Interactions between fire and spruce beetles in a subalpine rocky mountain forest landscape. *Ecology* 84: 362-371.
- Bebi P. und P. Bauer 2002: Waldausdehnung in den Schweizer Alpen: Eine quantitative Analyse von bio-physikalischen und sozio-ökonomischen Ursachen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 119. Heft 3/4, 217-230.
- Bebi, P., Kienast, F. und W. Schönenberger 2001: Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests' dynamics and protective function. *Forest Ecology and Management* 145: 3-14.
- Bebi, P. 2000: Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen. Dissertation an der ETH Zürich.
- Bischoff, N. 1987: Pflege des Gebirgswaldes. Leitfaden für die Begründung und forstliche Nutzung von Gebirgswäldern. Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz. Bern.
- Brändli, U.-B. 2000: Waldzunahme in der Schweiz - gestern und morgen. Informationsblatt Forschungsbereich Landschaft. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). 45: 1-4.
- Brito, J.C., Crespo, E.G. und O.S. Paulo 1999: Modelling wildlife distributions: Logistic multiple regression vs overlap analysis. *Ecography* 22: 251-260.
- Brugger S. 2002: Auswirkungen von Lawinen auf die Vegetation. Eine Studie im Dischmatal. Diplomarbeit am Geographischen Institut Zürich. 65 S.
- Bühler, U., Meier, A., Barandun, P. und A. Sandri 1995: Bericht über die Ausscheidung von Wäldern mit besonderer Schutzfunktion. Arbeitsgruppe besondere Schutzfunktion. Forstinspektorat Graubünden. Chur. 18 S.
- Cadisch, J. 1929: Zur Geologie von Davos. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Graubündens.

- Cadisich, J. 1929: Zur Talgeschichte von Davos. Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubündens.
- Chambers, J.M. und T.J. Hastie 1993: Statistical models in S. Chapman & Hall. London. 608 S.
- Chauvin, C., Renaud, J.P. und C. Rupé 1994: Stabilité et gestion des forets de protection. *ONF-Bulletin Technique 27* : 37-52.
- Dorigo, G. 1999 : Skript zur Vorlesung „Statistische Analyse in der Geographie“. 113 S.
- Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Hrsg.). 2000: Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 588 S.
- Ferdmann, J. 1938: Die Anfänge des Kurortes Davos. Verlag der Davoser Revue. Davos. 164 S.
- Frei, U., Kellenberger, T., Meuret, P., Lencinas, J.D., Ginzler, C. und M. Schwarz 2003: Pilotprojekt LB-SNP 2000, Schlussbericht, In Bearbeitung. Remote Sensing Laboratories (RSL) der Universität Zürich und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Zürich.
- Frey, W. 1977: Wechselseitige Beziehungen zwischen Schnee und Pflanze – eine Zusammenstellung anhand von Literatur. *Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Mitteilung*. Nr. 34.
- Gellrich, M. 2003: Mündliche Mitteilung zu ersten Ergebnissen des Projektes "WaSAIp – Waldausdehnung in den Schweizer Alpen". Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf.
- Gremminger, P. und H. M. Bürki-Spycher 2002: Ohne Schutzwald – kein Lebensraum in den Alpen. *Umwelt 1*: 18-20.
- Grêt-Regamey, A. In progress.: Spatially explicit valuation of ecosystem services in the alps as a support tool for regional decision making. Dissertation an der ETH Zürich.
- Günter, Th. F. 1985: Landnutzungsänderung in einem alpinen Tourismusort. *Schlussbericht zum Schweizerischen MAB-Programm 13*.
- Haeberli, W. 1975: Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). *Mitteilung VAW 17*.
- Haefner, H. 1963: Vegetation und Wirtschaft der oberen subalpinen und alpinen Stufe im Luftbild. Dargestellt am Beispiel des Dischmatales und weiteren Teilen der Landschaft Davos. Dissertation an der Universität Zürich. 117 S.
- Hefti, H. und P. Bebi 2002: Sind Ökonomie und Ökologie in einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung vereinbar? Artikel zum Tag des Waldes vom 21. März.
- Hefti, R. und U. Bühler 1986: Zustand und Gefährdung der Davoser Waldungen. *Schlussbericht zum Schweizerischen MAB –Programm 23*.

- Hildebrandt, G. 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskunde und Landschaftsökologie. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Imbeck, H. 1984: Lawinenbildung im Wald und deren Wirkung in der Region Davos. *Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Interner Bericht 626.*
- Imbeck, H. und E. Ott 1987: Verjüngungsökologische Untersuchungen in einem hochstaudenreichen subalpinen Fichtenwald, mit spezieller Berücksichtigung der Schneeablagerung und der Lawinenbildung. *Mitteilung Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 42: 1-202.*
- Kääh, A. 2002: Skript zur Vorlesung „Erfassung und Modellierung räumlicher Daten in der physischen Geographie“. Universität Zürich.
- Kellenberger, T. 1996: Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten. Dissertation an der Uni Zürich. Zürich.
- Konetschny, H. 1990: Schneebewegungen und Lawinentätigkeit in zerfallenen Bergwäldern. *Informationsberichte Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft, München 3: 1-25.*
- Krause, M. 1986: Die Böden von Davos: Ertragspotential, Belastbarkeit und Gefährdung durch Nutzungsänderungen. *Schlussbericht zum Schweizerischen MAB-Programm 18.*
- Laely, A. 1984: Der Wald in der Geschichte der Landschaft Davos. In: Davoser Heimatkunde: Beiträge zur Geschichte der Landschaft Davos. Genossenschaft *Davoser Revue*, S. 62-126.
- Landesforstinventar (LFI). 1994: Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebungen von 1993-1995. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Birmensdorf.
- Landesforstinventar (LFI). 1999: Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Birmensdorf.
- Lee, N. J. und N. Kaneyuki 1996: Forest vegetation classification and biomass estimation based on Landsat TM Data in a mountainous region of west Japan. In: H.L. Gholz, K. Nakane und H. Shimoda. The use of remote sensing in the modeling of forest productivity. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Netherlands. S. 159-171.
- Leibundgut, H. 1959: Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. *Schweiz. Z. Forstwes.* 110: 111-124.
- Lindemann, J.D. und W. L. Baker 2002: Using GIS to analyse a severe forest blowdown in the southern rocky mountains. *International Journal of Geographical Information Science.* Vol. 16. Nr. 4: 377-399.

- Maisch, M. 1981: Glazialmorphologische und gletschergeschichtliche Untersuchungen im Gebiet zwischen Landwasser- und Albulatal (Kt. Graubünden, Schweiz). Geographisches Institut der Universität Zürich. 215 S.
- Mauser, H. 1997: Die Verwendung des Luftbildes bei Inventuren im Schutzwald mit besonderer Berücksichtigung photogrammetrischer Messungen an Einzelbäumen zur Beurteilung von Entwicklungsphasen. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien. 159 S.
- Mayer, A. C. 2003: Waldweide mit Rindern: Futterqualität und Auswirkungen auf die Walddynamik. Dissertation an der Universität Freiburg, Deutschland. 104 S.
- Mayer, H. und E. Ott. 1991: Gebirgswaldbau – Schutzwaldpflege. Gustav Fischer, Stuttgart. 587 S.
- McCullagh, P. and J.A. Nelder. 1989: Generalized Linear Models, 2nd edn, Chapman and Hall, London. 511 S.
- Meyer-Grass M. 1987: Waldlawinen und deren Abhängigkeit von Standorts- und Bestandesverhältnissen. Erste Ergebnisse des Forschungsprojektes 351. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Davos. Davos.
- Meyer-Grass, M. und M. Schneebeli 1992: Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnisse. In: *Interpraevent 92: Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren und Lawinen*. Bern. S. 443-455.
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H.U. und P. Lüscher 1997: *Gebirgsnadelwälder*. Haupt. Bern. 287 S.
- Pfister, R. 1997: Modellierung von Lawinenanrissen im Wald. Diplomarbeit Nachdiplomkurs für Statistik, ETH Zürich. 20 S.
- Phillips M. 2000: Das Naturphänomen Permafrost, Vorkommen in der Landschaft Davos. *Davoser Revue*. Davos.
- Salm, B. 1987: *Avalanche formation, movement and effects*. IAHS Press, Institute of Hydrology Wallingford.
- Schneebeli, M. und P. Bebi, in press.: Hydrology: Forest and snow and avalanche control. In: *Encyclopedia of forest science*. Elsener. London.
- Schüepp, M. 1961: Klimatologie der Schweiz. Lufttemperatur, C, 2. Teil. *Annalen der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt, Beiheft 2*. 15-62.
- Senn, U. 1952: Die Alpwirtschaft der Landschaft Davos. Dissertation an der Universität Zürich. S. 265-350.
- Stahel, W.A. 1995: *Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler*. Vieweg. Braunschweig. 359 S.

- Streckeisen A. 1966: Bericht über die Exkursion der Schweizerischen Mineralogisch Petrographischen Gesellschaft im Silvrettakristallin und in den Totalpserpentin, vom 26. bis 29. Sept. 1966. In: Bericht über die 41. Hauptversammlung der Schweizerischen Min. Petr. Gesellschaft in Solothurn. *Schweiz. Min. Petr. Mitteilung. Band 46, Heft 2.*
- Teufen, B. 1984: Davoser Wald – Wohin des Weges. Waldwirtschaftsplan. Kreisforstamt 18, Davos.
- Trepp, W. 1959: Die Waldgesellschaften im Landwassertal. In: *Bündnerwald 7.*
- Venables, W.N. und B.D. Ripley 1994: Modern applied statistics with S-Plus. Springer. NewYork. 462 S.
- Weibel, R. 2000: Skript zu den Übungen „Geographische Informationssysteme I“. Universität Zürich.
- Weibel, R. 2002: Skript zu den Übungen „Geographische Informationssysteme II“. Universität Zürich.
- Zingg, Th. 1961: Beitrag zum Klima von Weissfluhjoch. *Winterbericht des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 24: 102-107.*
- Zingg, Th. 1961: Wetter und Klima. *Winterbericht des Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung 24: 5-26.*

Anhang 1: arc macro language (aml) Programm zur Abgrenzung des Waldes vom übrigen Untersuchungsgebiet.

```
/* classend.aml
/* Mapextent einrichten

&if %:program% ne GRID &then grid
disp 9999 3
mapunits meters
pageunits cm
mapextent 781875.000 185000.000 786250.000 188000.000
pagesize 120 87
maplimits 1 1 86.2 75.6
mapposition LL LL

/* Ausgangsgrid (o_grid) als Ausschnitt waehlen
/* dhm25 von Davos auf den Ausschnitt anpassen
/* resampeln auf 2m Zellengrösse

setwindow o_grid
&type control dhm_res
&if [exists dhm_res -grid] &then &do
kill dhm_res
&end
dhm_res = resample (dhm25davos,2)

/* focalmean für o_grid berechnen: Moving Window, 5X5

&type control_o_fo5
&if [exists o_fo5 -grid] &then &do
kill o_fo5
&end
o_fo5 = focalmean (o_grid, rectangle, 5, 5)

/* Bedingung für Lücken und nicht-Waldgebiet
/* Werte > 110 werden als Lücken definiert(o_combneu=1)

&type control_o_combneu
&if [exists o_combneu -grid] &then &do
kill o_combneu
&end

if (o_fo5 ge 110 and o_grid gt 110) o_combneu = 1
else o_combneu = 0
endif
end

/* focalsum von o_combneu

&type control_o_el
&if [exists o_el -grid] &then &do
kill o_el
&end
```

```

o_el = focalsum (o_combneu, rectangle, 3, 3)

&type control_o_luc
&if [exists o_luc -grid] &then &do
kill o_luc
&end

/* nur grosse Luecken werden als Luecken definiert (o_luc =1)

if (o_el gt 5 and o_combneu == 1)then o_luc = 1
else o_luc = 0
endif
end

/* Standardabweichung vom Ausgangsgrid wird berechnet

&type control_o_homogen
&if [exists o_homogen -grid] &then &do
kill o_homogen
&end

o_homogen = focalstd (o_grid, rectangle, 5, 5)

/* Standardsumme von o_homogen wird berechnet

&type control_stdsum
&if [exists stdsum -grid] &then &do
kill stdsum
&end

stdsum = focalsum (o_homogen, rectangle, 5, 5)

/* die Argumente werden zusammengehängt:
/* Wenn Standardsumme grösser als 300 ist (heterogen für Wald)und
/* die Gridzelle vorher nicht als Luecke definiert wurde und
/* sich die Gridzelle unterhalb von 2200 m. ü. M befindet
/* wird die Gridzelle als Wald definiert (o_wald = 1)

&type control_o_wald
&if [exists o_wald -grid] &then &do
kill o_wald
&end

if (stdsum gt 300 and o_luc == 0 and dhm_res lt 2200) then o_wald = 1
else o_wald = 0
endif
end

quit

/* das Grid wird in eine Coverage verwandelt

&type control_wa_cov
&if [exists wa_cov -cover] &then &do
kill wa_cov
&end

```

```

gridpoly o_wald wa_cov

/* und wieder in ein Grid verwandelt (item ,area')

&type control_wa_grd
&if [exists wa_grd -grid] &then &do
kill wa_grd
&end

polygrid wa_cov wa_grd area

2

yes

grid

/* nur die Lücken >= 170 werden als Lücke definiert
/* die kleinen Lücken werden zum Wald gezählt
/* Waldflächen kleiner als 500 werden als Lücke definiert

&type control_grd_end
&if [exists grd_end -grid] &then &do
kill grd_end
&end

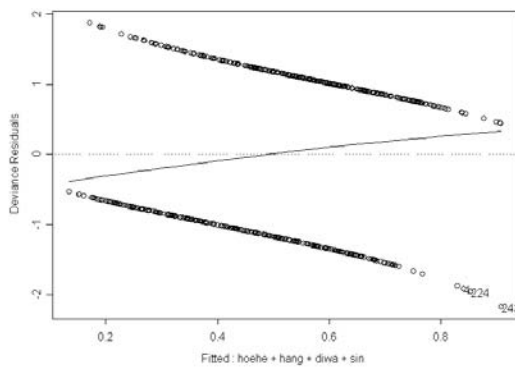
if (o_wald == 0 and wa_grd ge 170 or o_wald == 1 and wa_grd lt
500)then grd_end = 0
else grd_end = 1
endif
end

&type control_ERFOLG!!!

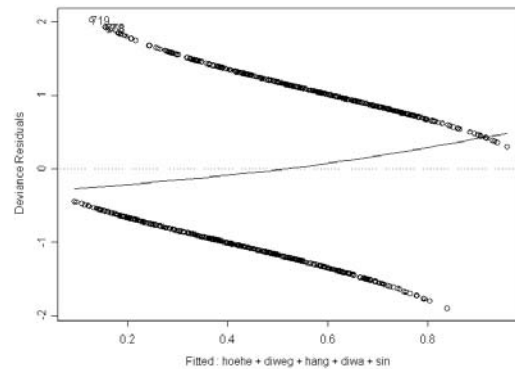
```

Anhang 2 : Residuenanalyse

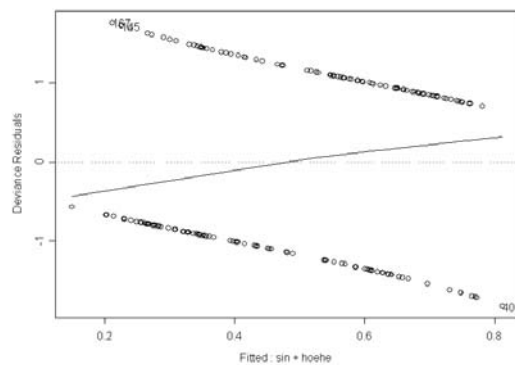
Von den reduzierten multiplen Regressionsmodellen wurde eine Residuenanalyse durchgeführt, um zu schauen, ob die Modelle aussagekräftig sind. Die Resultate der Residuenanalyse sind in den Abbildungen 47 a - d dargestellt. Die Diagramme zeigen sowohl für das ganze Untersuchungsgebiet wie auch für das Schutzwaldgebiet eine leicht gebogene Struktur. Die Effekte sind jedoch für beide Modelle unbedeutend.



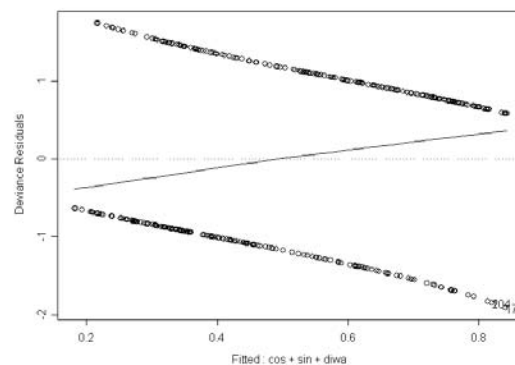
a) Waldverdichtung (ges. Untersuchungsgebiet)



b) Waldverdichtung (Schutzwald)



c) Schlussgradabnahme (ges. Untersuchungsgebiet)



d) Schlussgradabnahme (Schutzwald)

Abb. 47 a-d: Residuenanalyse der reduzierten multiplen Regressionsmodelle

Anhang 3: visual basic Script zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit (Grêt-Regamey, in progress)

```
'~~~~~HAUPTSKRIPT~~~~~
'BERECHNUNG DER LAWINENANRISSWAHRSCHEINLICHKEIT~~~~~

Sub UsingRasterModel()

' Get Map
Dim pMxDoc As IMxDocument
Dim pMap As IMap
Set pMxDoc = ThisDocument
Set pMap = pMxDoc.FocusMap

'~~~~~Get inputs~~~~~
' Get rasters from datasets
Dim pRasterDataset1 As IRasterDataset
Set pRasterDataset1 =
OpenrasterDataset("C:\ADRIENNE\GIS\DAVOS\Lawinenschutz\datasets", "dec")
Dim pDec As IRaster
Set pDec = pRasterDataset1.CreateDefaultRaster

Dim pRasterdataset2 As IRasterDataset
Set pRasterdataset2 =
OpenrasterDataset("C:\ADRIENNE\GIS\DAVOS\Lawinenschutz\datasets", "maxluc")
Dim pLumax As IRaster
Set pLumax = pRasterdataset2.CreateDefaultRaster

Dim pRasterdataset3 As IRasterDataset
Set pRasterdataset3 =
OpenrasterDataset("C:\ADRIENNE\GIS\DAVOS\Lawinenschutz\datasets", "neig")
Dim pNeig As IRaster
Set pNeig = pRasterdataset3.CreateDefaultRaster

Dim pRasterdataset4 As IRasterDataset
Set pRasterdataset4 =
OpenrasterDataset("C:\ADRIENNE\GIS\DAVOS\Lawinenschutz\datasets", "aspred")
Dim pAspred As IRaster
Set pAspred = pRasterdataset4.CreateDefaultRaster
```

```

Dim pRasterdataset5 As IRasterDataset
Set pRasterdataset5 =
OpenRasterDataset("C:\ADRIENNE\GIS\DAVOS\Lawinenschutz\datasets", "nei")
Dim pSlo5 As IRaster
Set pSlo5 = pRasterdataset5.CreateDefaultRaster

'~~~~~Create workspaces~~~~~
' Create a RasterModel object
Dim pRModel As IRasterModel
Set pRModel = New RasterModel

Dim pEnv As IRasterAnalysisEnvironment
Set pEnv = pRModel

' Set output workspace
Dim pWS As IWorkspace
Dim pWSF As IWorkspaceFactory
Set pWSF = New RasterWorkspaceFactory
Set pWS =
pWSF.OpenFromFile("C:\ADRIENNE\GIS\DAVOS\Lawinenschutz\AvalancheCalc",
0)
Set pEnv.OutWorkspace = pWS

'~~~~~ Set variables for Avalanche Probability Logit Model~~~~~
' From P.Bebi(1999, p.76)

Dim sngBetaCronProj As Double 'Koeffizient B fuer Kronenprojektion in %
Dim sngBetaWidthOpening As Double 'Koeffizient B fuer Lueckenbreite in m
Dim sngBetaAverageSlope As Double ' Koeffizient B fuer Mittlere Neigung in Grad
Dim sngBetaChangeSlope As Double ' Koeffizient B fuer Neigungsaenderung
Dim sngIntercept As Double ' Koeffizient A fuer Interecept

sngBetaCronProj = 0.051
sngBetaWidthOpening = 0.105
sngBetaAverageSlope = 0.153
sngBetaChangeSlope = 1.106
sngIntercept = 5.784

Dim MultipliedByBetaCronProj As String
MultipliedByBetaCronProj = CStr(sngBetaCronProj)
Dim MultipliedByBetaWidthOpening As String
MultipliedByBetaWidthOpening = CStr(sngBetaWidthOpening)
Dim MultipliedByBetaAverageSlope As String
MultipliedByBetaAverageSlope = CStr(sngBetaAverageSlope)
Dim MultipliedByBetaChangeSlope As String
MultipliedByBetaChangeSlope = CStr(sngBetaChangeSlope)
Dim MinusInterecept As String

```

```
MinusIntercept = CStr(sngIntercept)
```

```
'~~~~Avalanche Probability calculation~~~~~  
' Bind to raster  
pRModel.BindRaster pDec, "CronProj" ' "dec" layer: Kronenprojektion  
pRModel.BindRaster pLumax, "WidthOpening" ' "lumax": Maximale Lueckenbreite  
pRModel.BindRaster pSlo5, "AverageSlope" ' "nei": Mittlere Neigung  
pRModel.BindRaster pNeig, "ChangeSlope" ' "neig": Neigungsänderung  
  
' Set model  
pRModel.Script = "[out1] = " & -sngIntercept & _  
                " + [AverageSlope] * " & sngBetaAverageSlope & _  
                " - [CronProj] * " & sngBetaCronProj & _  
                " + [ChangeSlope] * " & sngBetaChangeSlope & _  
                " + [WidthOpening] * " & sngBetaWidthOpening  
  
' Run the model  
pRModel.Execute  
  
' Get outputs  
Dim pRasterOut1 As IRaster  
Set pRasterOut1 = pRModel.BoundRaster("out1")  
  
' Save to datasets  
Dim pRasterBandCollection As IRasterBandCollection  
Set pRasterBandCollection = pRasterOut1  
  
pRasterBandCollection.SaveAs "alawine4", pWS, "GRID"  
  
' Unbind raster  
pRModel.UnbindSymbol "CronProj"  
pRModel.UnbindSymbol "WidthOpening"  
pRModel.UnbindSymbol "AverageSlope"  
  
' Add the results into Map  
Dim pRLayerFinal2 As IRasterLayer  
Set pRLayerFinal2 = New RasterLayer  
pRLayerFinal2.CreateFromRaster pRasterOut1  
pMap.AddLayer pRLayerFinal2  
  
'~~~~~Calculation of Logit-Function: EXPONENT~~~~~  
  
' Create the RasterMathOps object  
Dim pMathOp As IMathOp  
Set pMathOp = New RasterMathOps  
  
' Declare the input raster object  
Dim pInputDataset As IGeoDataset  
Set pInputDataset = pRasterOut1
```

```

' Declare the output raster object
Dim pOutputRaster As IGeoDataset
Set pOutputRaster = pMathOp.Exp(pInputDataset) ' Calls the method
.....

' Declare the input raster object for second calculations
Dim pRModel2 As IRasterModel
Set pRModel2 = New RasterModel

' Bind to raster
pRModel2.BindRaster pOutputRaster, "ExpOut"
pRModel2.BindRaster pAspred, "aspect" ' "aspred": Reduktionsfaktor fuer Exposition

' Set calculation
pRModel2.Script = "[out2] = [aspect] * ([ExpOut] / (1 + [ExpOut]) * 100)"

' Run the model
pRModel2.Execute

' Unbind raster
pRModel2.UnbindSymbol "ExpOut"

' Get outputs
Dim pRasterOut2 As IRaster
Set pRasterOut2 = pRModel2.BoundRaster("out2")

' Save to datasets
Dim pRasterBandCollection2 As IRasterBandCollection
Set pRasterBandCollection2 = pRasterOut2

pRasterBandCollection2.SaveAs "afinal", pWS, "GRID"

'~~~~~Output~~~~~'

'Add the results into Map
Dim pRLayerFinal As IRasterLayer
Set pRLayerFinal = New RasterLayer
pRLayerFinal.CreateFromRaster pRasterOut2
pMap.AddLayer pRLayerFinal

End Sub

```

Anhang 4: Ausgewählte Stichprobenpunkte für die Feldanalyse und die Verifizierung der Luftbildkartierung vom Jahr 2000

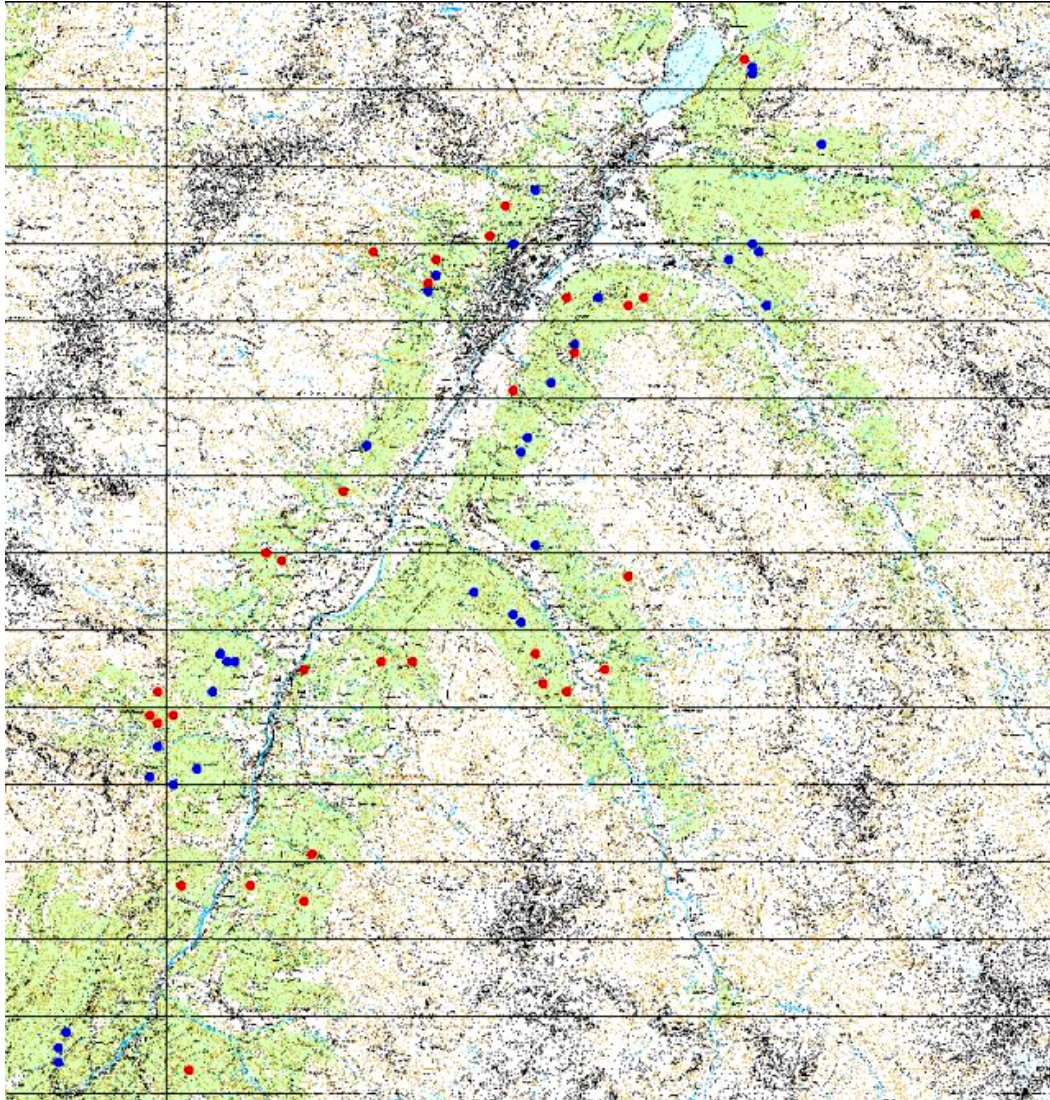


Abb. 48: Die Abbildung zeigt die anhand von verschiedenen Standortbedingungen zufällig ausgewählten Stichprobenpunkte für die dichter gewordenen (rot) und die offener gewordenen Bestände (blau). Die Punkte dienten zum einen der Verifikation der Luftbildkartierung von 2000 und zum anderen weiteren Feldanalysen.

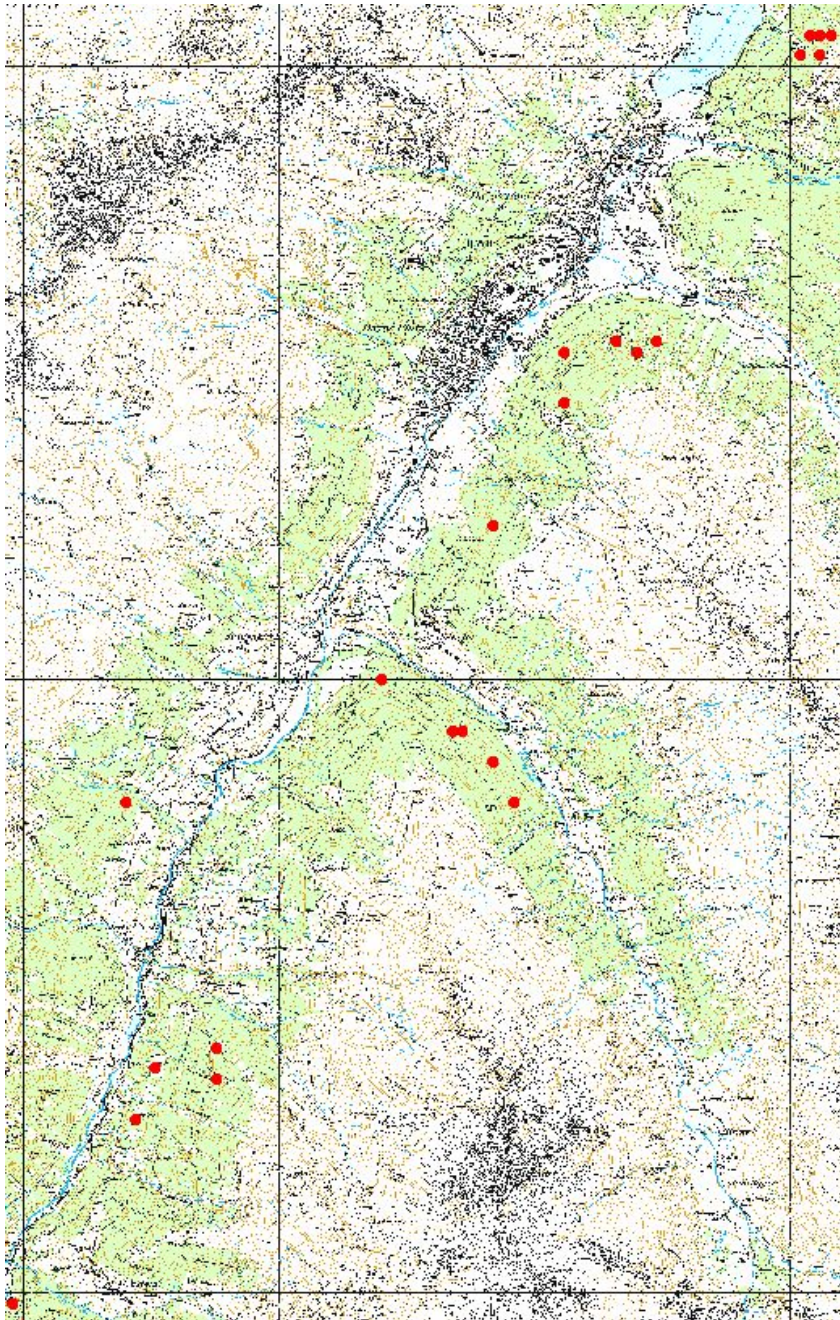
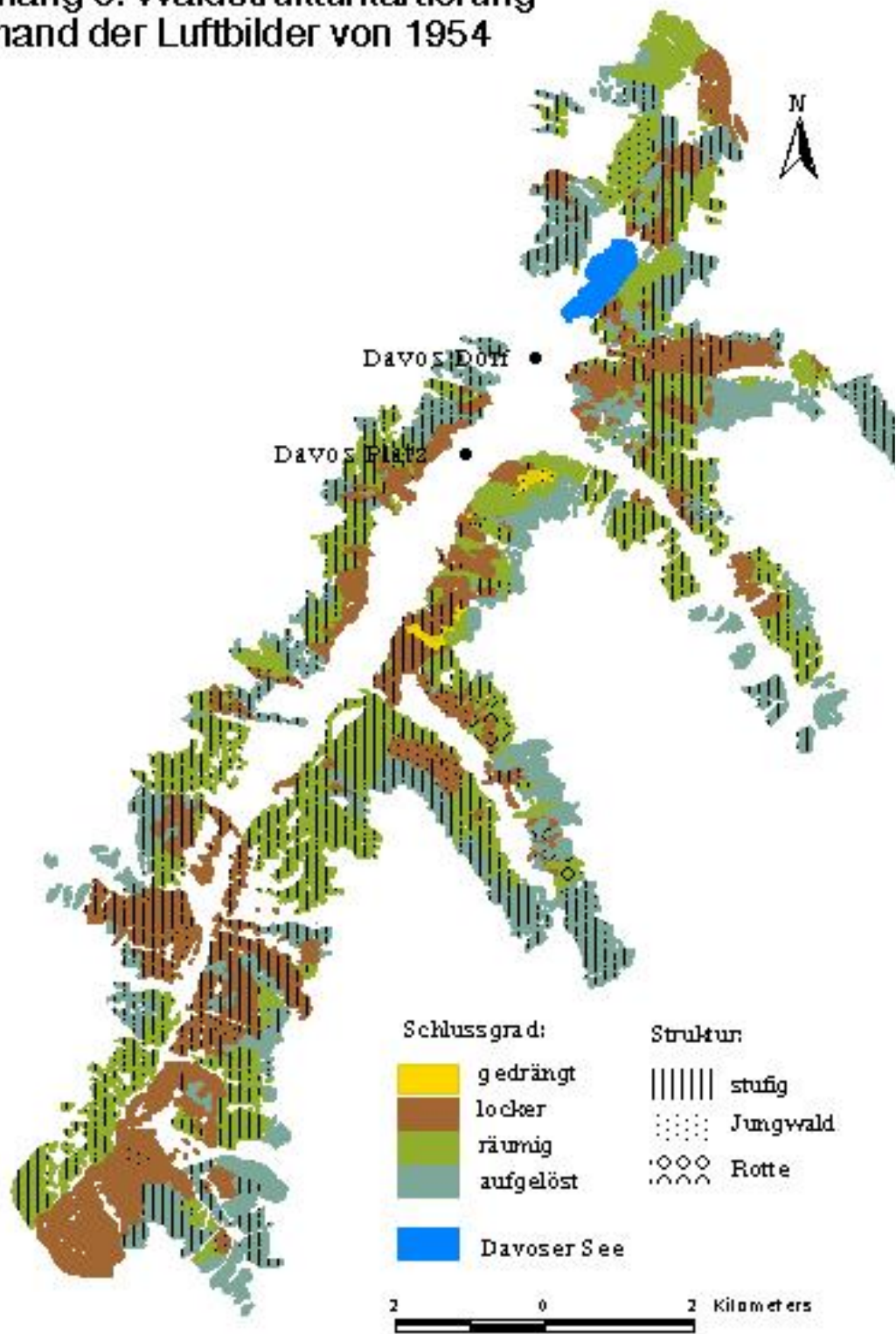
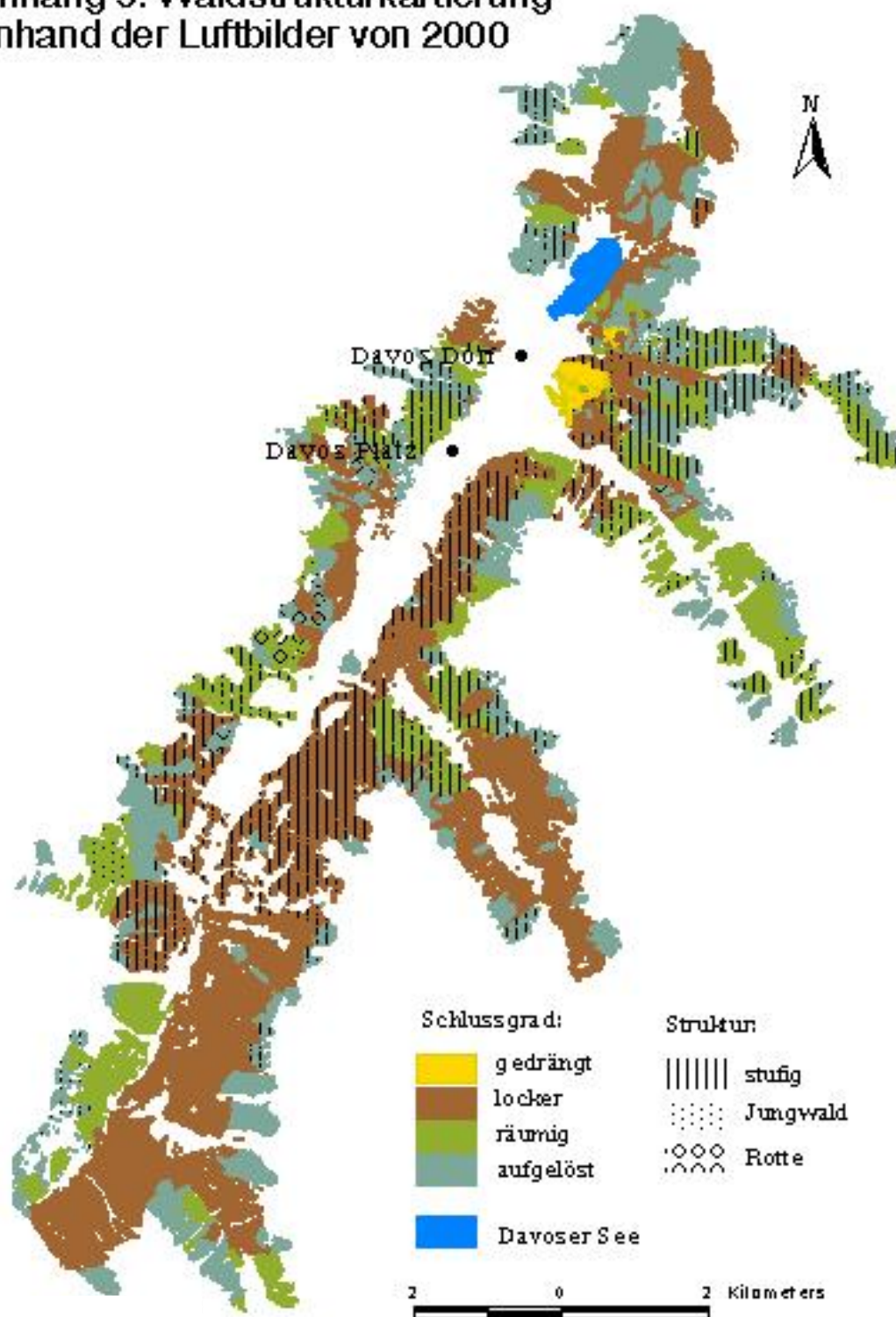


Abb. 49: Die Abbildung zeigt die Stichprobenpunkte mit einer Lawinanrisswahrscheinlichkeit >50%. Die Punkte dienen zum einen der Verifikation der Luftbildkartierung von 2000 und zum anderen weiteren Feldanalysen.

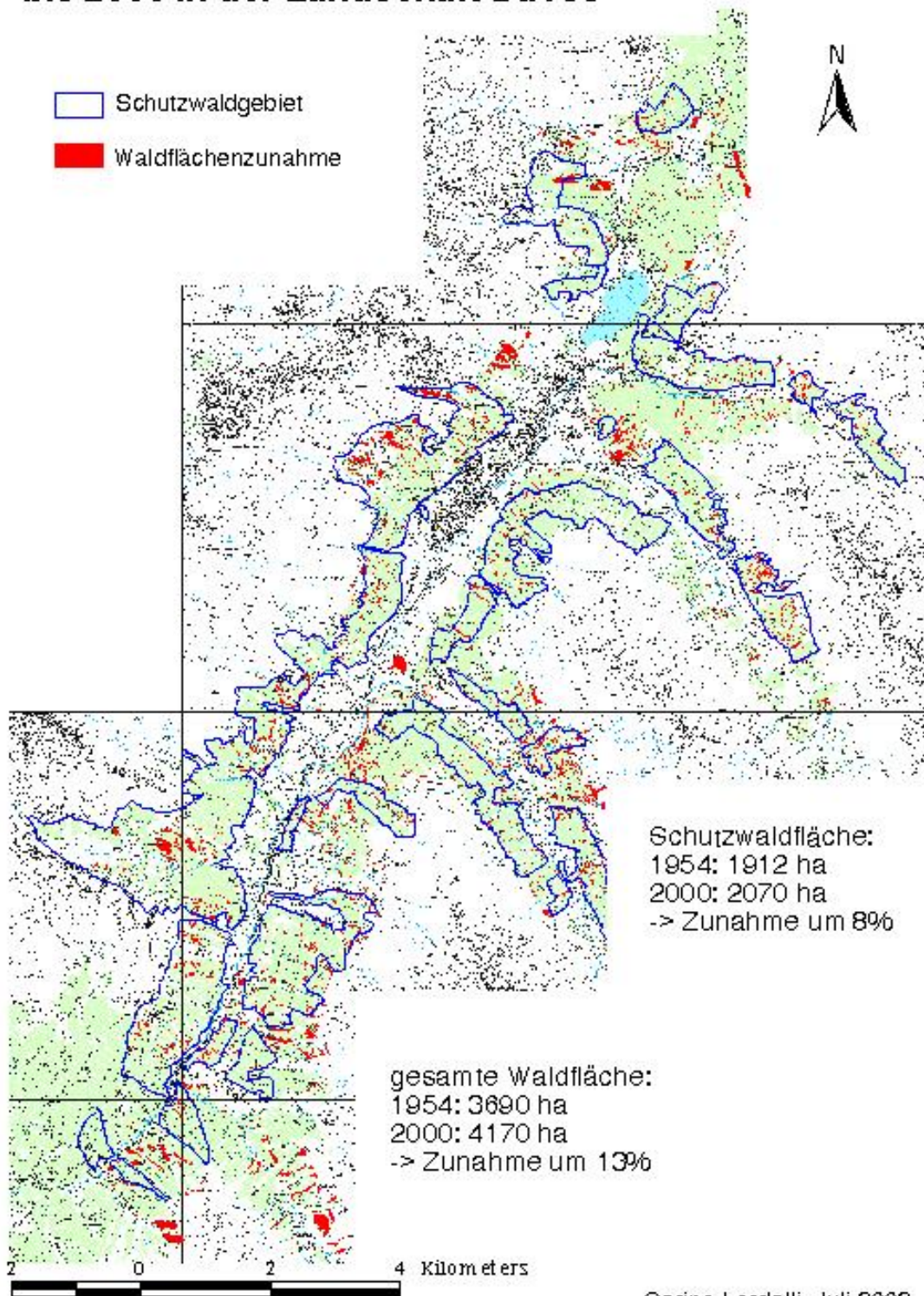
Anhang 5: Waldstrukturkartierung anhand der Luftbilder von 1954



Anhang 5: Waldstrukturkartierung anhand der Luftbilder von 2000



Anhang 6: Waldzunahme von 1954 bis 2000 in der Landschaft Davos



Anhang 7: Waldzustandsveränderung zwischen 1954 und 2000

Tab. 10: Flächenanteile der im Luftbild unterschiedenen Strukturtypen im gesamten Untersuchungsgebiet in den Jahren 1954 und 2000. Die markanten Veränderungen sind fett dargestellt.

Strukturtypen					
Strukturtyp	Abk.	Flächenanteil (ha)		Flächenanteil in %	
		1954	2000	1954	2000
gedrängt, einschichtig	E1	11.1	43.9	0.23	0.91
locker, einschichtig	E2	583.9	1509.4	12.07	31.20
räumig, einschichtig	E3	258.7	361.6	5.35	7.48
aufgelöst, einschichtig	E4	382.9	630.4	7.92	13.03
stufig, stark deckend	S2	516.2	719.5	10.67	14.87
stufig, schwach deckend	S3	1048.9	459.8	21.68	9.51
stufig, aufgelöst	S4	678.6	307.6	14.03	6.36
Rotten stark deckend, nicht stufig	R2	0	1.5	0.00	0.03
Rotten räumig, nicht stufig	R3	35.8	26.3	0.74	0.54
Rotten räumig, stufig	RS3	0	19.2	0.00	0.40
Rotten aufgelöst, nicht stufig	R4	7.8	38.2	0.16	0.79
Rotten aufgelöst, stufig	RS4	0	11.2	0.00	0.23
Jungwald gedrängt	J1	8.5	0	0.18	0.00
Jungwald stark deckend	J2	102	3.5	2.11	0.07
Jungwald schwach deckend	J3	59	45	1.22	0.93
Lücke/Nicht Wald	L	1143.8	660.1	23.65	13.65
Total		4837.2	4837.2	100.00	100.00

Tab. 11: Flächenanteile der im Luftbild unterschiedenen Strukturtypen im Schutzwaldgebiet in den Jahren 1954 und 2000. Die markanten Veränderungen sind fett markiert.

<i>Strukturtypen</i>					
Strukturtyp	Abk.	Flächenanteil (ha)		Flächenanteil in %	
		1954	2000	1954	2000
gedrängt, einschichtig	E1	6.8	9.3	0.29	0.39
locker, einschichtig	E2	262.9	677.2	11.10	28.60
räumig, einschichtig	E3	118.1	240.1	4.99	10.14
aufgelöst, einschichtig	E4	115.3	263.9	4.87	11.15
stufig, stark deckend	S2	354.7	364.6	14.98	15.40
stufig, schwach deckend	S3	576.5	277.8	24.35	11.73
stufig, aufgelöst	S4	368.9	122.4	15.58	5.17
Rotten stark deckend, nicht stufig	R2	0.0	1.6	0.00	0.07
Rotten räumig, nicht stufig	R3	22.2	21.4	0.94	0.91
Rotten räumig, stufig	RS3	0.0	11.0	0.00	0.46
Rotten aufgelöst, nicht stufig	R4	7.4	30.6	0.31	1.29
Rotten aufgelöst, stufig	RS4	0.0	10.9	0.00	0.46
Jungwald gedrängt	J1	6.6	0.0	0.28	0.00
Jungwald stark deckend	J2	69.5	2.9	2.93	0.12
Jungwald schwach deckend	J3	2.7	36.4	0.11	1.54
Lücke/Nicht Wald	L	456.5	297.7	19.28	12.57
Total		2367.9	2367.9	100	100