

# Einfluss von Standorts- und Vegetationseigenschaften auf das Schneegleiten am Davoser Dorfberg



Bachelorarbeit

**Verena Eichenberger**

Bachelor Umweltnaturwissenschaften

Sonnmattweg 2, 3671 Brenzikofen

verenaei@student.ethz.ch

Betreut durch:

**Dr. Peter Bebi**

Eidgenössische Forschungsanstalt WSL/SLF

Davos, Departement Umweltsystemwis-

senschaften ETH Zürich



Zürich, April 2013

Departement Umweltsystem-  
wissenschaften

ETH Zentrum, CHN H41

CH-8092 Zürich

WSL Institut für Schnee-

und Lawinenforschung SLF

Flüelastr. 11

CH-7260 Davos Dorf

*„Bei Naturkatastrophen wie Lawinen zeigt sich die elementare Zerstörungskraft der entfesselten Natur, die stärker ist als alles Menschenwerk!“ (Munter, 1991)*

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Dank

1	Einleitung.....	6
2	Schneebewegungen .....	8
2.1	Einflussfaktor- Mensch.....	8
2.2	Einflussfaktor- Verhältnisse .....	8
2.3	Einflussfaktor- Gelände.....	9
2.4	Lawinentypen.....	14
3	Schneegleiten .....	15
4	Methode.....	20
4.1	Das Untersuchungsgebiet Davoser Dorfberg.....	20
4.2	Datenaufnahme .....	21
4.3	Datenanalyse.....	32
5	Resultate.....	35
6	Diskussion.....	55
7	Schlussfolgerung.....	60
8	Literaturverzeichnis.....	61
9	Tabellenverzeichnis .....	64
10	Abbildungsverzeichnis.....	65

Eigenständigkeitserklärung

## Zusammenfassung

Das Phänomen der Schneebewegungen beschäftigt die Wissenschaft schon seit langer Zeit. Durch aktive Forschung ist der mechanische Vorgang der unterschiedlichen Lawinentypen weitgehend verstanden. Unklarheiten herrschen über die Einflussfaktoren, die zum Auslösen von Schneebewegungen führen. Das Gelände, die klimatischen Verhältnisse sowie der Mensch gelten als übergeordnete Faktoren, welche von grosser Bedeutung sind, um in Zukunft Schneebewegungen in gefährdeten Zonen zu verringern. Bezüglich der Geländefaktoren dokumentieren einige Studien die Hangneigung und Exposition, eine Untergrundvernässung sowie das Wachsen spezifischer Pflanzengemeinschaften im Bezug auf Schneebewegungen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, den Einfluss der Standorts- sowie Vegetationsfaktoren auf das Eintreten der Schneebewegungsart des Schneegleitens zu untersuchen. Die möglichen Einflussfaktoren (Hangneigung, Exposition, Höhe über Meer, Untergrundvernässung, Auftreten eines Hindernisses, Vegetation, Topographie, landwirtschaftliche Nutzung) werden indessen analysiert, inwiefern sie gleitschneefördernde wie auch hemmende Eigenschaften aufweisen und kombiniert die Gleitschneeaktivität beeinflussen. Forschungsfragen, wie Flächen welches Vegetationstypen zeigen mehr Gleitschnee oder ob Hindernisse trotz gleitschneefördernden Faktoren Lawineneignisse verhindern können, werden diskutiert. Das Untersuchungsgebiet befindet sich am Davoser Dorfberg (Davos, Schweiz), das in den Wintermonaten stark geprägt ist von gleitenden Schneemassen. Die Erfassung der 37 Ereignis- bzw. 108 Kontrollflächen ist während einer Woche Ende September 2012 durchgeführt worden. Anschliessend ist die Beeinflussung der verschiedenen Faktoren auf Gleitschneeaktivität mittels univariaten und multivariaten statistischen Methoden aufgezeigt worden. Das Vorhandensein eines Hindernisses sowie dessen Abstand zur Auslöserzone resultierten mit höchster Signifikanz ( $p=0.0008$ ;  $0.001$ ). Der Vegetationstyp der niederliegenden Zwergsträucher, eine Topographie mit Rutschzonen, eine Bodenvernässung sowie die Hangneigung stellen weitere wichtige Einflussfaktoren dar. Mittels der multivariaten Analyse konnte gezeigt werden, dass die Gleitschneeaktivität vermindert wird (<10% Ereignisflächen), wenn sich ein Hindernis in einer Entfernung von bis zu 40 Meter vom Aufnahmestandpunkt befindet und wenn in diesem Gebiet keine niederliegende Zwergstrauchvegetation vorkommt. Wachsen hingegen niederliegende Zwergsträucher kombiniert mit Grasgemeinschaften, wird das Auslösen gleitender Schneemassen gefördert (60% Ereignisflächen). Die Aktivität gleitender Schneemasse ist nur bedingt ausschliesslich durch die Standorts- und Vegetationsfaktoren erklärbar. Die Erkenntnisse dieser Fallstudie bieten eine quantitative Dokumentation der Geländefaktoren auf Gleitschneeaktivität. Sie eignen sich, in weiteren Untersuchungen den möglichen zusammenhängenden Einfluss von Standorts-, Vegetations- sowie während des Winters vorherrschenden Verhältnisfaktoren spezifischer zu analysieren.

## **Dank**

Für die Unterstützung meiner Bachelorarbeit möchte ich mich bei allen beteiligten Personen bedanken. Einen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer, Peter Bebi, widmen. Er hat mir diese Arbeit ermöglicht und ist mir mit tatkräftigem Rat und umgehenden Feedbacks stets zur Seite gestanden. Für die nette Unterkunft während der Datenaufnahme möchte ich mich bedanken. Herzlich danken möchte ich Lisa Dreier. Sie hat mir ihre Daten zur Gleitschneeaktivität am Davoser Dorfberg zur Verfügung gestellt und hilfreiche Hinweise für die Datenauswertung vermittelt. Weiter möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die sich Zeit genommen haben, ihr Wissen über die Datenauswertungen mir weiterzugeben, meine Arbeit durchzulesen sowie mich moralisch zu unterstützen.

# 1 Einleitung

Schneegleiten ist eine Art von Schneebewegung, bei der die ganze Schneedecke relativ langsam auf dem Untergrund talwärts gleitet (McClung et al., 2006). Der vollziehende Mechanismus des Schneegleiten ist weitgehend erforscht, welche Faktoren dazu führen, ist jedoch nur teilweise verstanden. Schon früh ist die Schutzwirkung des Waldes erkannt worden (Brücker, 1981; Munter, 1991; Mössmer et al. 1994; Bebi et al. 2009). Weitere standortsgebundene Gegebenheiten wie die Hangneigung und Exposition sind gut dokumentiert. So ereignen sich vermehrt Gleitschneelawinen ab einer Steilheit von über 25° und in südexponierter Lage (McClung et al., 2006). Der Faktor der Bodenvernässung hängt mit der lokal herrschenden Temperatur zusammen. Durch Schmelzen oder durch aufgrund von Niederschlag eingedrungenes Wasser verringert sich die Rauigkeit an der Grenzschicht und somit die talwärts gerichtete Reibung zwischen den Schichten (McClung et al., 2006). Seit nicht allzu langer Zeit befassen sich Studien mit anderen möglichen Einflussfaktoren. Beispielsweise hat Newesely et al. (2000) in seiner Untersuchung festgestellt, dass mit dem Rückgang der landwirtschaftlichen Nutzung von Almflächen die Anfälligkeit für Gleitschneeaktivität zunimmt. Hohe Gleitraten werden in Gebieten mit niederliegenden Zwergstrauchbeständen dokumentiert. Durch die Vernachlässigung einst genutzter Gebiete erfolgt eine Sukzession der Vegetation, wobei sich zuerst niederliegende Zwergsträucher etablieren. Zudem gilt langwüchsiges Gras als Gleitschnee fördernd (Zischg et al., 2011). Einerseits hat die Vegetation einen Effekt auf das Vorkommen von Gleitschnee, andererseits wird diese durch Schneegleitereignisse beeinflusst (Brücker, 1981). Eine durch Kuhtritte, Steine, Baumstrunke und weiterem verursachte Bodenunebenheit dient als möglicher Stützpunkt für die Schneedeckenstabilität (Newesely et al., 2000; McClung et al., 2006; Höller, 2008; Zischg et al., 2011).

Die Kombination der einzelnen Standorts- und Vegetationseigenschaften ist Bestandteil deutlich weniger Untersuchungen. Sie stellt jedoch eine entscheidende Rolle dar, da hemmende wie auch fördernde Faktoren an einem gemeinsamen Standort auftreten können. Dadurch ist es möglich, dass die Kombination einiger Faktoren den Einfluss auf Gleitschneeaktivität verstärken oder sich gegenseitig aufheben. Um die Gleitschneeaktivität in gefährdeten Gebieten einzuschränken, ist es von grosser Bedeutung, die Faktoren zu kennen, die gleitende Schneemasse beeinflussen. Änderungen von Umweltbedingungen (beispielsweise steigende Temperaturen, was möglicherweise eine vermehrte Bodenvernässung zur Folge hat) und zunehmende Aufgabe der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, könnte die Gleitschneeaktivität in Zukunft an geeigneten Standorten erhöhen.

Die vorliegende Arbeit erweitert das Forschungsgebiet der Einflussfaktoren auf die Gleitschneeaktivität, in welchem kaum quantitative Untersuchungen dokumentiert sind ausser der Fallstudie von Newesely et al. (2000). Mögliche Einflussfaktoren wie die Vegetation, Topographie, land-

wirtschaftliche Nutzung, Vernässung des Untergrundes, Hangneigung, Exposition, Höhe über Meer sowie das Auftreten eines Hindernisses sind in einem Gebiet mit vermehrter Gleitschneeaktivität in den Schweizer Alpen analysiert worden. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss möglicher Standorts- und Vegetationsfaktoren, einzeln sowie in Kombinationen, auf Gleitschneeaktivität zu untersuchen.

Folgende Fragen sind gestellt worden:

- > Welchen Einfluss hat die Vegetation auf das Vorkommen von Gleitschneeanrissen und Lawinen?
- > Gibt es einen Vegetationstyp/ Vegetationstypen, auf dem es relativ zu dessen Vorkommen häufig zu Gleitschneeanrissen kommt?
- > Welche topographischen Kategorien treten vermehrt in Anrisszonen auf?
- > Tragen Hindernisse (Bodenrauigkeitselemente) dazu bei, dass Lawinen trotz anfälliger Vegetation verhindert werden? Falls Hindernisse vorhanden sind, in welchem Abstand zur Zone des Auslösens haben sie eine signifikante Schutzwirkung?

## **2 Schneebewegungen**

In diesem Kapitel werden die Einflussfaktoren von Schneebewegungen im Allgemeinen sowie die verschiedenen Lawinentypen erläutert. Das Geschehen von Gleitschnee ist das zentrale Thema dieser Arbeit. Demzufolge ist ein separates Kapitel der Schneebewegung durch Gleitschnee gewidmet worden.

Lawinen sind eine Art von Naturgefahren. Diese natürlichen Ereignisse stellen eine Grundkonstante im Gebirge dar und prägen die Landschaft. Schneebewegungen stellen ein ernsthaftes Problem für Menschen sowie für Tiere dar. Beeinträchtigt wird der Mensch direkt durch Verletzung oder Tod, aber auch indirekt. Indirekte Beeinträchtigungen entstehen beispielsweise, wenn Lawinen Transportwege unterbrechen. Dadurch sind Dörfer zeitweise un erreichbar. Hin und wieder sind ganze Siedlungen betroffen. Schutzmassnahmen wie Lawinenzonen, Lawinenüberwachungen und Verbauungen tragen dazu bei, den Schaden zu minimieren. Trotzdem fordern Schneebewegungen Opfer und monetäre Kosten (McClung et al., 2006).

Zur Einschätzung der Lawinengefahr ist das Zusammenwirken von meist wenigen lawinenbildenden Elementen entscheidend. Diese können in die Fachrichtungen Gelände, Verhältnisse und Mensch gegliedert werden (Harvey et al., 2012).

### **2.1 Einflussfaktor- Mensch**

Zunächst wird der Einfluss des Menschen kurz angesprochen. Durch den zunehmenden Tourismus wird das Hochgebirge immer besser zugänglich. Der technische Fortschritt animiert Menschen dazu, Wintersport im Hochgebirge zu betreiben. Festgestellt geworden ist, dass Lawinen meist von den Menschen selbst ausgelöst werden und auch die heutige Technik die Folgen nicht verhindern kann. Auf Gruppentouren gilt, je mehr Leute miteinander unterwegs sind, desto grösser ist das Risiko der Lawinenauslösung. Einerseits wird die Schneedeckenbelastung erhöht und andererseits besteht eine grössere Wahrscheinlichkeit, durch die freie Spurenwahl während der Abfahrt einen Schwachpunkt der Schneedecke zu tangieren (McClung et al., 2006; Harvey et al., 2012). Zudem beeinflusst der Mensch durch Nutzung oder Verbauung der Natur das Gelände. Dadurch ist der menschliche Einfluss zu jeder Zeit nicht zu unterschätzen.

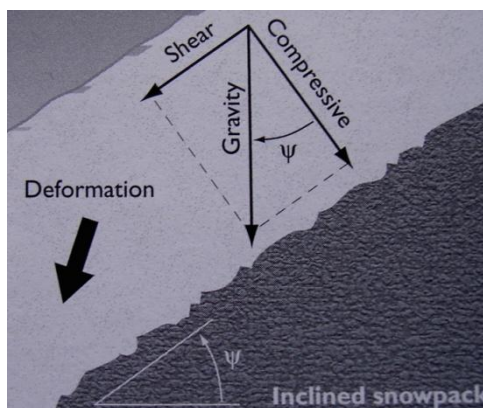
### **2.2 Einflussfaktor- Verhältnisse**

Der Faktor der Verhältnisse ist eine wichtige Komponente für die Zuweisung der Gefahrenstufen, lokal wie auch regional. (Harvey et al., 2012). Der Zustand der Schneesicht ist beeinflusst vom Moment des ersten Schneefalls bis zur letzten Abschmelze. Damit ein schneebedeckter Hang eine Lawine ausbildet, interagieren viele kombinierte Wetterelemente mit der Schneedecke. Beginnend mit der Schneebildung spielt der Zustand des Bodens eine entscheidenden Rolle. Wenn der Untergrund zuerst abgekühlt hat, oder sogar Permafrost liegt, bildet sich eine stabile-

re unterste Schneesicht (McClung et al., 2006). Munter (1991) erwähnt das Mikroklima als eine weitere wichtige Einflussgrösse auf die Schneesichtstabilität. Topographische Unebenheiten des Geländes bilden besonders charakteristische und verschiedene Mikroklima. Dadurch wird die Schneedecke unregelmässiger und unstabiler aufgebaut (Munter, 1991). Während der Schneebildung beeinflussen die Temperatur der Luft sowie der Schneepartikel, die Niederschlagsmenge, die Windstärke und -richtung die Schneesicht (McClung et al., 2006). Im Verlaufe des Winters wird die Schneedecke durch weitere Phänomene manipuliert. So verändert zum Beispiel die einfallende Sonnenstrahlung sowie die gegensätzliche Reifbildung die oberste Schneesicht. Bei der Neuschneeildung sind die Schneekristalle locker angelegt. Mit der Zeit durchlaufen sie eine Metamorphose, wodurch ihre Form ändert. Es resultiert eine Kriechbewegung in der Schneedecke. Zusätzlich werden die Schneekristalle komprimiert. Abhängig von den zurzeit bestehenden klimatischen Bedingungen bildet sich eine stabilere oder instabilere Schneesicht (McClung et al., 2006). Das Wetter beeinflusst die Schneesicht während minimalster Zeitspanne. Für die Entwicklung von Lawinengefahr ist oft eine Reihe von kombiniert vorherrschenden Wettergeschehen verantwortlich. Beispielsweise wird Treibschnee oft bei intensivem Schneefall und kräftigem Wind gebildet. Durch die tagaktive Sonneneinstrahlung wird das Potential zur Lawinenauslösung verstärkt. Harvey et al. (2012) formuliert, dass eine Veränderung der Lawinengefahr eine Wetteränderung voraussetzt. Umgekehrt ändert aber nicht jede Wetteränderung die Lawinengefahr (Harvey et al., 2012).

### 2.3 Einflussfaktor- Gelände

Die dritte Komponente der lawinenbildenden Faktoren befasst sich mit dem Gelände. In der praktischen Durchführung dieser Arbeit wird die Gleitschneeaktivität im Bezug auf Geländeelemente untersucht. Aus diesem Grunde wird, im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren, das Gelände in einem detaillierteren Kapitel geschildert. Das Gelände beeinflusst die Schneesicht auf unterschiedlicher Skala. Vorerst wird der Fokus auf die Ebene der ganzen Schneesicht gelegt.



**Abb. 1:** Deformationskomponenten der Schneedecke. Graphik: McClung et al. (2006)

Innerhalb jeder Schneesicht wirken Kräfte. Die Gravitationskraft richtet sich zur Erdoberfläche aus, rechtwinklig zur Schneeoberfläche wirkt die Kompression und horizontal zur Schneesicht die Scherspannung. Ganz allgemein sind die Schneebewegungen des Kriechens sowie des Gleitens folgen von unausgeglichener Kräftebilanz. Durch ihr Eigengewicht bewegt sich die Schneemasse an Hängen talwärts. Als Folge der ständig einwirkenden Metamorphose des Schnees, wird die

Schneedecke lotrecht deformiert (Abb. 1), wodurch das Kriechen in nahezu allen Schneedecken resultiert (McClung et al., 2006). Aufgrund der Reibung mit der Bodenoberfläche kriechen Schichten nahe der Schneeoberfläche schneller als bodennahe. Die dadurch vorherrschende Geschwindigkeitsdifferenz erzeugt eine Spannung zwischen den Schichten (Munter, 1991). Rutscht die ganze Schneedecke auf dem Untergrund hangabwärts wird dies als Gleiten definiert. Ob und wann eine Schneebewegung eingeleitet wird, hängt oft von miteinander kombinierten Faktoren ab. Eine wichtige Einflussgröße ist die Hangneigung. So ereignen sich die meisten Lawinen in einem Winkel von 25°-55° (McClung et al., 2006). Harvey et al. (2012) schreibt, ein Berghang sei umso gefährlicher, je steiler dessen Neigung sei. Weiter ist die Expositionslage des Gebietes zu nennen. Schattige, nordseitlich vom Bergkamm liegende Gebiete sowie Talsenken erfahren weniger direkte Sonneneinstrahlung. Sie verlieren Wärme durch Abstrahlung langwelliger Strahlung. Folglich weist die Schneedecke kalte Schichten auf, stabilisiert nur langsam und tendiert dazu, Schwachschichten von Kristallen und Raureif auszubilden. Der Sonne zugewandte Gebiete stabilisieren schneller durch die wärmeren Schneetemperaturen. Im Spätwinter kann die Schneedecke durch die intensivere Sonneneinstrahlung sowie durch das Eindringen von Wasser via Niederschlag oder Schmelze schnell instabil werden (McClung et al., 2006). Die Höhenlage hat einerseits Einfluss auf die abiotischen Faktoren wie auch auf die Vorkommende Vegetation. Die Lufttemperatur nimmt mit der Höhe ab und die Niederschlagsmenge sowie die Windstärke nehmen zu. (Harvey et al., 2012) Letztere ist unter anderem auch von der Waldgrenze beeinflusst (McClung et al., 2006).

Auf kleinskaliger Ebene betrachtet beeinflusst das Gelände die nivologischen Eigenschaften, welche zur Änderung der Schneestabilität beitragen. Geländeeinflüsse variieren je nach Stelle in der Lawine. Zu unterscheiden ist zwischen Anrissgelände, Sturzbahn-, Ablagerungs- und Wirkungsgelände (De Quervain, 1979).

### **Topographie**

Die Topographie, welche bereits im Zusammenhang mit dem Mikroklima bei der Schneedeckenausbildung kurz angesprochenen wurde, spielt in weiteren Zusammenhängen spielt eine wichtige Rolle. Newesely et al. (2000) beschreibt die Kontaktzone zwischen dem Schnee und dem Untergrund als sehr wichtig. Das Abgleiten von Lawinen ist bedeutend beeinflusst durch die Beschaffenheit der Oberfläche und deren Rauigkeit. Eine allgemeine Bodenrauigkeit gilt in Anriss und Sturzbahnflächen als lawinenhindernd (De Quervain, 1979). Ob Unebenheiten des Untergrundes die Schneedecke verankern, ist abhängig von der Art der Schneebewegung. Bodenrauigkeiten wie Felsblöcke, Kuhtritte und Stufen können Bodenlawinen hemmen (Munter, 1991).

Topographische Unebenheiten beeinflussen die Schichtung beim Einschneien im Frühwinter (vgl. Abb. 2). Der Erstsnee gleicht kleinere Unebenheiten aus, wodurch der nachfolgende Neu-



**Abb. 2:** Standort mit unterschiedlicher Topographie (Davos).

Foto: V. Eichenberger

schnee auch instabile Schichten bilden kann (Munter, 1991). Unebene Topographie sowie eine aus der Schneeschicht herausragende Vegetation beeinträchtigen den Schneedeckenaufbau und fragmentieren die Schneedecke. Dadurch wird der Energiehaushalt beeinflusst und das Ausbilden von Spannungen innerhalb der Schneedecke wird gehemmt (Zischg et al., 2011). In einem Gelände, das aus dem Schnee ragende Felsen beinhaltet, wird das Abgleiten der Schneedecke

nicht verhindert, denn das Ausbilden von Schwachschichten ist ausgeprägt. Um die Gesteine herum ist die Schneemächtigkeit geringer und folglich der Temperaturgradienten höher. Schneebrüche werden unweit von Felsen oft einfacher losgelöst. Nebstdem weist felsdurchsetztes Gelände oft eine Hangneigung von über 40° auf (Harvey et al., 2012).

Die Geländeform hat auch einen entscheidenden Einfluss auf die Verteilung des Schnees durch Winde. In windgeschützten Mulden lagert sich die Schneemasse an. Hingegen auf Kuppen oder entlang von Graten ist die Schneeschicht dünner als Folge des Abtragens durch Winde. Die Temperaturverhältnisse in der gesamten Schneedecke sind infolge unterschiedlicher Mächtigkeit verschieden. An abgetragenen Stellen entwickelt sich eine aufbauende Metamorphose, wodurch instabiler Schwimmschnee gebildet wird (McClung et al., 2006).

### **Vegetation**

Einerseits beeinflusst die Vegetation die Schneebewegungen, andererseits wird der Pflanzenwuchs auch durch Lawinenereignisse geprägt. Talwärts treibende Schneemassen reißen Pflanzen aus, tragen den Boden ab und deponieren Schutt im Ablagerungsgebiet. Folglich bilden sich erschwerte Bedingungen für Pflanzen sich zu etablieren. Die Pflanzendecke im Stauchwall (d.h. die Grenze in der Falllinie der Lawine, wo der Schnee gestaut wird) sowie im Ablagerungsgebiet (d.h. das Gebiet unmittelbar nach dem Stauchwall, das der abgetragene Schnee akkumuliert) wird für lange Zeit unter dem Schnee vergraben. Eine verspätete Schmelze sowie das kalte Schmelzwasser verkürzt die Vegetationszeit (Brücker, 1981). Positive Auswirkungen der Schneebewegungen auf die Vegetation sind auch von Bedeutung. Lawinen schaffen durch entwurzelte oder weggerissene Pflanzengemeinschaften Erosionsflächen und folglich neue Standorte (Newesely et al., 2000) und fördern die Heterogenität in der Landschaft (Bebi et al., 2009). Ereignisflächen können auch Gebiete düngen durch die Ablagerung von feinem Staub und Humus, Arten verbreiten und Schutz bieten gegen Frühjahrsfröste (Brücker, 1981).

Ein Waldbestand hemmt Lawinenereignisse oder kann sie sogar verhindern. Schon früh ist die Schutzwirkung des Waldes vor Lawinen erkannt worden. In der Schweiz sind Ende des 14. Jahrhunderts in Flüelen und Andermatt die ersten Wälder zur Prävention angelegt worden. Der Einfluss des Waldes auf die Schneedecke ist vielseitig und unterschiedlich je nach Zusammensetzung von Laub- oder Nadelbaumarten (Munter, 1991). Die Baumarten Fichte und Tanne sind empfindlich gegenüber Schneegleiten, jedoch erfüllen sie eine hohe Schutzwirkung im Endbestand (Mössmer et al., 1994). Einerseits wird durch die Interzeptionswirkung der Neuschnee unregelmässig verteilt. Andererseits ist der Strahlungshaushalt ausgeglichener und der Wind weniger ausgeprägt. Weiter bietet der Wald eine Stützwirkung durch stehende und gestürzte Stämme (Bebi et al., 2009). Durch die Interzeption wird der Neuschnee von den Baumkronen auf verschiedenen Ebenen aufgefangen. Durch die anschliessende Erwärmung fällt die Masse sukzessive zu Boden. Folglich weist die Schneeschicht ganz andere Qualitäten im Vergleich zu offenen Flächen auf. Die Mächtigkeit der Schneedecke ist geringer und es werden weniger homogene Schichten und damit auch weniger Schwachschichten gebildet. Die Oberflächenreifbildung, örtliche Verhärtung durch Tropfwasser sowie behinderter Windzutritt sind weitere Phänomene, die durch das Holzgewächse eintreten. Diese Eigenschaften des Waldes sind stark abhängig von dessen Deckungsgrad. Die Stützfunktion der Baumstämme reduziert das Auslösen von Schneebrettlawinen stark. Ein geschlossener Wald mit Unterholz bietet vermehrten Schutz vor der Lawinenbildung. Wald schützt aber nicht unter allen Umständen vor Lawinen. Trifft eine bereits ausgelöste Lawine auf einen Waldbestand, ist die Bremswirkung sehr beschränkt. Meist können Baumstämme der wirkenden Kraft nicht widerstehen und werden gänzlich beschädigt (Munter, 1991; De Quervain, 1979).

Büsche und Sträucher können einerseits hemmend, andererseits auch fördernd, auf das Geschehen von Schneebewegungen einwirken. Frühere Untersuchungen dokumentieren, dass Gebüsche wie Alpenerlen, Legföhren und teilweise auch Alpenrosen die Bildung von Lawinen fördern, sofern sie vollkommen mit Schnee überdeckt sind (De Quervain, 1979). Dieses Phänomen wird als Folge der unregelmässigen Setzung des Schnees durch Sträucher erklärt. Eine aufbauende Metamorphose des Schnees wirkt unter diesen Bedingungen vermehrt in den untersten Schichten der Schneemasse (Zischg et al., 2011). Dies führt zu einer erhöhten Ausbildung einer Schwimmschneeschicht an der Kontaktfläche der Schneeschicht mit dem Boden (De Quervain, 1979). Konträr dazu kann die durch die bodennahe Vegetation verstärkte Oberflächenrauigkeit, analog zur Topographie, das Ausbilden von Lawinen hemmen. Newesly et al. (2000) stellt in seiner Untersuchung fest, dass grössere Sträucher und Bäume als Hindernisse wirken. Sie stabilisieren die Schneedecke, wodurch die Gleitraten stark abnehmen. An Standorten mit starken Schneebewegungen wachsen bevorzugt Grünerlen und Bergföhren. Die Grünerle verfügt über

eine sehr hohe Stammelastizität. Einerseits steigt dadurch die Überlebensfähigkeit an lawinengeprägten Standorten. Andererseits werden Schneebewegungen auch durch das Vorkommen von Grünerlen gefördert (Mössmer et al., 1994).

Der Einfluss der Vegetation Gras auf Schneebewegungen wird meist in Verbindung mit der landwirtschaftlichen Nutzung beschrieben. McClung et al. (2006) erwähnt den Zusammenhang der Schneebewegungen und der Landwirtschaft als prägnant. Beobachtungen in den Alpen haben gezeigt, dass Lawinen häufiger vorkommen auf nicht mehr gemähten Grasflächen an steilen offenen Hängen. Der Zustand des Grases spielt bei feuchten Bodenlawinen eine Rolle. Diese gleiten häufig direkt auf der Grasnarbe ab, wobei ein Unterschied zwischen gemähtem oder nicht gemähtem Gras besteht (Munter, 1991). Newesely et al. (2000) hat aktuell bewirtschaftete Flächen und nicht bewirtschaftete Flächen auf ihre Anfälligkeit für das Schneegleiten untersucht. Als wichtige Erkenntnis ist die deutliche Zunahme der Anfälligkeit der Almflächen mit Rückgang der Bewirtschaftung beschrieben worden. Es zeigte sich in der Fallstudie von Newesely et al (2000) ein klarer Unterschied der Geschwindigkeit und der totalen Gleitdistanz zwischen beweideten und verlassenen Flächen. Dieser Zusammenhang kann die Folge der unterschiedlichen Vegetation ausdrücken. Ein Untergrund mit kurzgeschnittenem Gras ist geeigneter für das Verhindern von Schneegeiten. Bedeutend ist auch die durch Kuhtritte geprägte Bodenrauigkeit. Jedoch können Ereignisse auch auf solchen Flächen ausgelöst werden (Newesely et al., 2000).



**Abb. 3:** Verlassenen Landwirtschaftsfläche mit der Vegetation Gras und niederliegende Zwergsträucher. Vereinzelt wachsen Erlen oder Fichten. Foto: V. Eichenberger

Landwirtschaftlich genutzte Flächen weisen meist eine ganz andere Struktur auf als nicht bewirtschaftete. Beispielsweise sind Steine weggetragen oder junge Bäume vernichtet worden, um den Ertrag zu steigern. Wenn das Gebiet bei Beendigung der Bewirtschaftung der Natur überlassen wird, etablieren oft zu Beginn der Sukzession Pflanzengemeinschaften mit Zwergsträuchern (Abb. 3) (Zischg et al., 2011).

## 2.4 Lawinentypen

Zur Klassifikation von Schneebewegungen werden Lawinen nach unterschiedlichen Kriterien in Typen unterteilt. Unterschieden wird nach der Art des Schnees (nass/trocken), Art des Anrisses (Schneebrett/Lockerschnee), Art der Bewegung oder Lage der Gleitfläche (Ober-/Grundlawine). Die Klassifikation differenziert sich je nach Literatur. McClung et al. (2006) klassifiziert in seinem Buch „the avalanche handbook“ die Lawinen in zwei allgemeine Typen, beschrieben als Lockerschnee- und Schneebrettlawinen. Diese grobe Unterscheidung wird kurz erläutert, wobei verschiedene Formen je nach vorherrschenden Bedingungen entstehen. Eis-oder Gletscherlawinen sowie Sommerlawinen sind weitere grobe Einteilungsklassen.

Die Klasse der Lockerschneelawinen ist gekennzeichnet durch eine punktuelle Auslöserstelle. Die anschliessende Weiterentwicklung hat einen kegelförmigen Verlauf. Je nach Zustand des Schnees wird zwischen nasser und trockener Lockerschneelawine unterschieden (McClung et al., 2006; Harvey et al. 2012). Eine weitere Klasse von Lawinen sind Schneebrettlawinen. Schneemassen gleiten auf so genannten schwachen Schneeschichten talwärts. Sie sind im Allgemeinen sehr gefährlich, denn schon bei kleiner Anrisszone ist das Potential, mitgerissen zu werden, hoch (McClung et al. 2006). Staublawinen brechen meist als Schneebrett ab. Anfänglich fliesst der Schnee an der Oberfläche, wodurch einzelne Schneekristalle aufgewirbelt werden. Unter den Kräften der sich bewegenden Staubwolke gelingt werden vermehrt Schneepartikel unterschiedlicher Grösse in die Luft geschleudert. Diese leichten Teile treten vor allem an der Spitze der Lawine auf. Auf ihrem Weg ins Tal erreichen sie mit grosser Fallhöhe sehr hohe Geschwindigkeiten (über 300km/h). Diese Art von Schneebewegung richtet oft grosse Schäden an (Munter, 1991; Harvey et al., 2012).

Das Phänomen des Schneegleitens ist der zentrale Teil dieser Arbeit, in der die beeinflussenden Eigenschaften der Vegetation und des Standorts untersucht werden. Zur Klassifikation dieses Lawinentyps ist zu erwähnen, dass die Gleitschneelawine wie die Schneebrettlawine einen scharfkantigen Anriss hat. Obwohl diese zwei Lawinentypen Gemeinsamkeiten aufweisen, ist der klare Unterschied in der Art der Gleitfläche zu finden (McClung et al., 2006). Die Gleitfläche der Schneebrettlawinen besteht aus einer Schneeschicht, wohingegen bei Schneegleitereignissen die gesamte Schneeschicht auf dem Boden abrutscht. Daher werden sie auch als Grundlawinen beschrieben (Harvey et al., 2012). Nachfolgend werden die Bedingungen und Vorgänge für die Ereignisse des Schneegleitens in einem eigenen Kapitel ausführlicher erläutert.

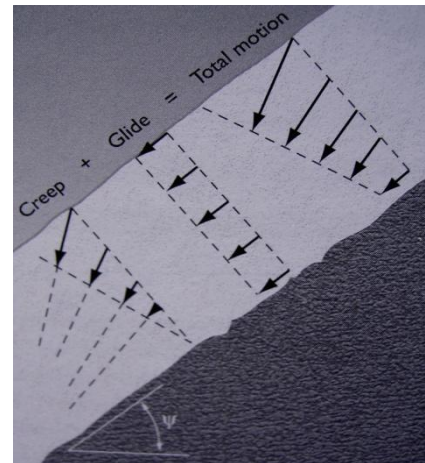
### 3 Schneegleiten



**Abb. 4:** Gleitschneeriss am Hagelstock (Kanton Uri)  
Foto: V. Eichenberger

Das Gleiten der ganzen Schneeschicht über dem Untergrund, wie es in Abb. 4 bildlich dargestellt ist, ist eine Art von Schneedeckendeformation. Diese langsame Bewegung der Schneemasse ereignet sich an Hängen mit einer Grenzschicht zur Schneedecke. Die Grenzschichten, beispielsweise eine Eisschicht oder der Bodenuntergrund, weisen andere Eigenschaften auf, wodurch die Schneeschicht in der Falllinie talwärts gleitet (McClung et al., 2006). Folglich wird die ganze Schneedecke disloziert (Grand et al., 1965).

Die wirkenden Kräfte in einer Schneedecke sind bereits im Kapitel (2.3) erläutert worden. Fokussiert auf Gleitschneeaktivität, wird nun das der Vorgang des Gleitens näher betrachtet. Die Bewegung des Gleitens muss klar unterschieden werden vom Kriechen. Sie beschreibt die Verschiebung der ganzen Schneedecke in der Falllinie talwärts (vgl. Abb. 5). Das Gleiten hängt von der Scherspannung (vgl. Abb. 1) ab und als wichtigster Faktor wird die glatte Grenzschicht beschrieben (McClung et al., 2006). Gleitet die Schneeschicht im Gebiet unterschiedlich stark, entstehen Gleitschneerisse. Unterhalb so genannter Fischmäuler bewegt sich die Schneemasse schneller als oberhalb. In der Druckzone, dem unteren Bereich



**Abb. 5:** Kriechen und Gleiten der Schneedecke. Graphik: McClung et al. (2006)

des Anrisses, können sich Falten sowie Druck- oder Scherbrüche bilden. Solche Zugrisse können sich über mehrere Wochen hinweg relativ langsam weiterentwickeln, bis allfällig eine Gleitschneelawine ausgelöst wird. Die Bewegung der Schneemasse kann sehr unterschiedlich sein. So können Perioden mit kontinuierlichem Gleiten durch stabile oder ruckartige Perioden abgelöst werden. Ob und wann eine Gleitschneelawine plötzlich abbricht, ist abhängig von den örtlichen Reibungsverhältnissen, der Beschaffenheit der Grenzfläche, der zurzeit herrschenden Witterung sowie allfälligen Abstützungspunkten (Grand et al., 1965). Newesely et al. (2000) untersuchte in einer Fallstudie fünf Gebiete (Lechtal (A), Stubaital (A), Passeiertal (I), Monte Bondone (I), Rotenbach (CH)) mit einer Exposition von Süden bis Südost. Während zwei Wintern (1996/97 und 1997/98) sind einst bewirtschaftete sowie nicht bewirtschaftete Flächen bezüglich der Geländefaktoren und der damit Verbundenen Gleitdistanz und Entwicklung des Gleitens beobachtet

worden. Newesely et al. (2000) stellten fest, dass die Wahrscheinlichkeit der Gleitschneeanrisse und Gleitschneelawinen mit einer Zunahme der Gleitrate erhöht ist. Wird die Gleitgeschwindigkeit der Fischmäuler kontinuierlich beobachtet, kann wegen der allfälligen Zunahme der Gleitbewegung auf einen Lawinenabgang hingedeutet werden (Newesely et al., 2000).

Gleitschneelawinen ereignen sich meistens spontan und werden nicht durch Menschen ausgelöst. Im Gegensatz zu anderen Lawinen sind die Bedingungen, welche zur Gleitschneelawine führen, weitgehend unabhängig von der Tageszeit. Die Sonneneinstrahlung bewirkt eine tageszeitliche Temperaturschwankung nur in den obersten Dezimeter der Deckschicht. Diese oberflächlichen Veränderungen sind meist bedeutungslos für die Verhältnisse der gesamten Schneeschicht und den Untergrund. Infolge dieser Erkenntnisse ist eine vorsorgliche Sprengung kaum durchführbar (McClung et al., 2006).

Die allgemeine Bedeutung der Geländefaktoren sind bereits geschildert worden. Nachfolgend werden speziell Gleitschnee beeinflussende Faktoren genauer diskutiert. Nicht auszuschliessen ist, dass einige Standesfaktoren gekoppelt auf Gleitschneeaktivität einwirken. Anhand der Abb. 5 ist leicht ableitbar, dass die Hangneigung eine zentrale Rolle spielt beim Gleitschneeprozess. Mehrere Untersuchungen bestätigen diesen Zusammenhang. Die Resultate der Untersuchung von Newesly et al. (2000) zeigen, dass die Hangneigung einen bedeutenden Einfluss hat auf die Gleitschneeaktivität. Für raue Untergründe wird eine minimale Hangneigung von  $15^\circ$  als Bedingung beschrieben. Ist die Hangneigung steiler als  $25^\circ$  findet laut McClung et al. (2006) vermehrt starkes Schneegleiten statt. Die grösste Gleitdistanz hat sich bei Newesly et al. (2000) bei einer Hangneigung von  $35^\circ$ - $40^\circ$  gezeigt. In Flächen mit steilerer Neigung hat die Gleitschneeintensität abgenommen, was mit dem Zustand des Bodens erklärt werden kann.

Gleitende Schneemassen kommen tendenziell eher an Südhängen zustande (McClung et al., 2006). Die Resultate von Newesly et al. (2000) zeigen erhöhte Gleitraten von Südost ( $< 160^\circ$ ) bis Südwest ( $200^\circ$ ) auf. Die weiteste Gleitdistanz erreichten Gebiete mit sonnenzugewandter Exposition am Mittag. Einerseits ist die Sonneneinstrahlung auf die Schneeschicht intensiver und andererseits bestehen wärmere Böden. Langanhaltende Wärmeperioden erhöht das Auslösen von Gleitschneelawinen. Ist die Schneedecke am Boden festgefroren, werden Gleitschneeereignisse verhindert (McClung et al., 2006).

Zum Zusammenhang zwischen der Höhenlage und der Gleitschneeaktivität äussert sich Newesely et al. (2000). Die Gleitdistanz nimmt an Hängen über 1900 Meter über Meer zu. Dies könnte durch die erhöhte Schneemenge sowie dessen Gewicht auf die Schneedecke erklärt werden. Als weiterer Einfluss wird die Veränderung der Vegetation, beispielsweise die Waldgrenze, mit der Höhe gesehen. Ein Faktor, der die Gleitschneeaktivität mit der Höhe vermindern würde, wäre die

Temperatur der Grenzschicht. In tieferen Lagen mit wärmeren Bedingungen sind instabilere Kontaktflächen prognostiziert (McClung et al., 2006).

Wie bereits erwähnt, spielt die Grenzschicht eine wichtige Rolle in Gleitschneeprozessen, demzufolge werden im Weiteren einflussreiche Parameter diskutiert. Die Schnee- und Bodentemperatur, welche den Wassergehalt des Schnees bestimmt, ist in der Untersuchung von Newesely et al. (2000) dokumentiert worden. Die Gleitschneeaktivität ist nahezu verhindert, wenn die Kontaktzone eine Temperatur unter 0°C aufweist. Das Vorkommen von freiem Wasser an der Grenzschicht führt zu einer nassen Gleitreibung. Unterschiedliche Gleitraten folgen dem Wassergehalt im Boden sowie an der Grenzschicht. Durch Schmelzen oder Niederschlag eingedrungenes Wasser verringert sich die Rauigkeit und somit die talwärts gerichtete Reibung zwischen den Schichten. Dadurch wird die Viskosität und folglich die Stabilität der Schneedecke reduziert (McClung et al., 2006). Der Schnee kann in Bodennähe auch geothermal aufgewärmt werden, wodurch der Vorgang des Schmelzens eintritt. Dies ereignet sich besonders in Wintern mit frühem Schneefall, wenn dem Boden keine Zeit zum Abkühlen blieb (Zischg et al., 2011).

Liegt eine Topographie ohne markante Unebenheiten oder mit einer glatten Vegetationsdecke vor, ist die Gleitschneeaktivität erhöht (Newesely et al., 2000; Zischt et al., 2011). Höller et al. (2008) stellt fest, je glatter die Erdoberfläche und je nasser die Grenzschicht ist, desto schneller ist die Gleitrate. Vor allem langes Gras fördert das Schneegleiten (Zischg et al., 2011). Raue Flächen verankern die Schneeschicht. Beispielsweise Steine, Baumstrunke, kurze und stabile Sträucher sowie Baumstämme werden als gute Stützpunkte geschildert (McClung et al., 2006).

Ob die Schneeschicht eine mögliche Verankerung im Boden aufbauen kann, wie beispielsweise in Abb. 6, hat einen bedeutenden Einfluss auf den Prozess des Schneegleitens. Laut Newesely et al. (2000) verringern Hindernisse wie Bäume oder Sträucher die Gleitdistanz signifikant. Bei geringer Schneemasse ist es möglich, dass



**Abb. 6:** Bodenunebenheit durch Steine und Vegetation (Davos).

Foto: V. Eichenberger

stabile Pflanzenarten und eine horstartig wachsende Grasvegetation das Gleiten hemmen. Liegt eine mächtige Schneeschicht über der Vegetation, so kann diese durch hangabwärtstreibende Kräfte die Pflanzen entwurzeln und erodieren (Tasser et al., 2005). Die mögliche Beeinflussung des Schneegleitens durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung ist von Zischt et al. (2011) im Schlussbericht des Aktionsplans PLANAT Projekt B 11

von der nationalen Plattform für Naturgefahren behandelt worden. Die landwirtschaftliche Nutzung kann die klimatischen und standortsgebundene Gegebenheiten positiv wie auch negativ beeinflussen (Zischg et al., 2011). Etliche Autoren haben sich mit der Gleitdistanz von verlassenen Beweidungs- oder Mähflächen befasst (Tasser et al. 2005; Newesely et al. 2000; Zischg et al., 2011). Beispielsweise Viehtritte gestalten die Oberflächen und tragen zur vermehrten Bodenrauigkeit bei. Die dadurch entstehende Reibung mit der Schneedecke kann zu einer verminderten Gleitschneeaktivität in beweideten Gebieten beitragen (Tasser et al., 2005).

Newesly et al. (2000) haben sich mit dem Zusammenhang der landwirtschaftlichen Nutzung und der Gleitschneeaktivität auseinander gesetzt. Der Rückgang der agronomischen Bewirtschaftung erfolgt oft initial in steilem Gelände. Während der ersten Sukzessionsphase etablieren sich weiche niederliegende Zwergsträucher, welche das Schneegleiten fördern. Seine Resultate der Gleitraten zeigen, dass besonders hohe Gleitraten auf niedrigen, weichen Zwergstrauchbeständen erfolgen. Diese Erkenntnis wird von der Untersuchung von Tasser et al. (2001) bestärkt. Weiche Zwergsträucher werden durch den Schnee leicht niedergedrückt und stellen keinen Befestigungspunkt für die Schneedecke dar (Newesely et al., 2000). Eine verringerte Gleitschneeaktivität wurde bei stärker lignifizierten Sträucher wie Rhododendron oder kleinen Bäumen beobachtet (Newesly et al., 2000).

Abgesehen der Fallstudie von Newesly et al. (2000) liegen kaum quantitative Studien vor, die den Einfluss der Vegetation auf die Gleitschneeaktivität untersucht haben. Kombinierte Untersuchungen der Standorts- und Vegetationseigenschaften von gleitschneegeprägten Gebieten ist eine Forschungsnische, wodurch mit den Untersuchungen in der vorliegenden Fallstudie erste Erkenntnisse erfasst werden.



**Abb. 7:** Rutschanrisse sowie Lawinenverbauung (Davos).

Foto: V. Eichenberger

Die typische Gleitschneegeschwindigkeit von 1-100mm pro Tag ist relativ gering. Trotzdem können sie Schäden verursachen. Beispielsweise kann die Bodenoberfläche beeinträchtigt werden, die Vegetation verletzt oder abgetragen werden (Grand et al., 1965). Gleitende Schneemassen spielen eine wichtige Rolle bei der Ausbildung der Art von Schneebrettlawinen, welche die ganze Schneedecke mitreisst. Die dadurch entstehenden immensen Kräfte haben das Potential, exponierte Objekte wie Skilif-

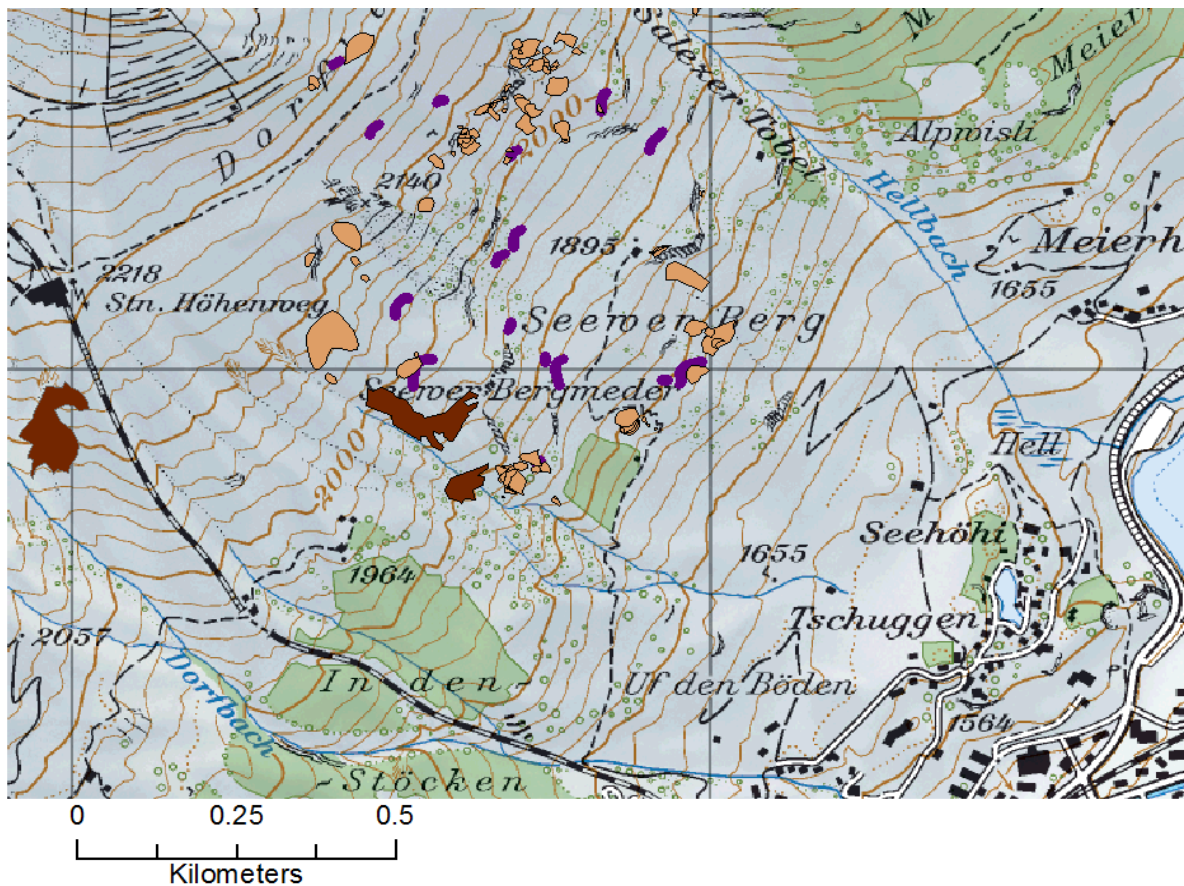
te, Strommasten und weitere Konstruktionen umzustürzen oder zu überdecken (McClung et al., 2006). Sogar Gebäude oder Infrastrukturen erfahren eine Zerstörung aufgrund des hohen Druckes der Schneegleitprozesse. Selten aber nicht ausgeschlossen sind auch Personen direkt betroffen (Zischg et al., 2011). Gleitende Schneemassen beeinträchtigen das Strassennetz, wovon vor allem ländlichen Wege betroffen sind (Zischg et al., 2009). Schutz vor gleitenden Schneemassen gewährleisten, nebst dem Wald, bauliche sowie planerische Massnahmen. Beispielsweise Stützwerke (vgl. Abb. 7), Dreibeinböcke und Holzschwellen verstärken die Bodenrauigkeit und somit die Heterogenität des Geländes. Mithilfe von Beobachtungen und Dokumentation der Ereignisse können potentielle Gefahrenzonen identifiziert werden. Durch anschliessende Erstellung von Lawinengefahrenkarten können strategische Massnahmen erarbeitet werden, welche zum Schutz von Menschen und Infrastrukturen eingesetzt werden können (McClung et al., 2006).

## 4 Methode

### 4.1 Das Untersuchungsgebiet Davoser Dorfberg

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist der Davoser Dorfberg, der sich nordwestlich von Davos Dorf befindet. Die höchstgelegene Stadt Europas liegt auf 1'560 Meter über Meer im Landwassertal des Kanton Graubündens (Schweiz). Der Kur- und Wintersportort Davos verzeichnet eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 2.8°C und einen jährlichen Niederschlag von 999 mm (meteo Schweiz, Stand 2012). Von Anfang Dezember bis Anfang April liegt eine mittlere Schneehöhe von 185 cm (Dreier, 2013). Das Untersuchungsgebiet reicht von 1750 bis auf 2300 Meter über Meer und ist gegen Südwesten exponiert. In seinem Auslaufgebiet liegt der Davosersee. Die Standseilbahn Parsenn führt aufs Weissfluhjoch, wovon ein Stück dessen Bahntrasses kurz vor der Mittelstation im Untersuchungsgebiet liegt. Im Winter werden die Hänge entlang der Bahn von begeisterten Wintersportlern befahren (davos.ch).

Anhand der geomorphologischen Karte von Davos ist die Hangneigung des Davoser Dorfbergs abzulesen, welche Werte von 20° bis über 60° aufweist. Vernässte Gebiete, Kuppen, Zugrisse sowie weitere topographische Eigenschaften kennzeichnen das Gebiet (Schaub, 1985). Die Vegetationskarte des Davoser Dorfbergs illustriert die Flora, worin Arten in Vegetationseinheiten zusammengefasst wurden. Zu erwähnen ist, dass sich die Pflanzendecke bemerkbar mit der Höhe ändert. Im unteren Bereich dominieren Wald und Gebüschbestände sowie Fettwiesen. Diese werden zunehmend durch subalpine Magerwiesen, Zwergstrauch- und Hochgradgesellschaften abgelöst. Auf ca. 1950 Meter über Meer ist die Waldgrenze abzulesen (Abb. 8; Zumbühl, 1985). Landwirtschaftlich genutzte Gebiete sind auf der Karte der Landnutzung und Nutzungsänderung seit 1950 aufgezeigt. Im unteren Bereich des Untersuchungsgebiets tritt eine Intensivierung der Wiesen auf. In früheren Jahren einjährig geschnittene Flächen sind im Jahre 1982 ein bis zweimal geschnitten und nachgeweidet worden. Extensivierungen sind in höher liegenden Untersuchungsflächen anzutreffen. Südwestlich am Davoser Dorfberg liegt ein Weidegebiet, das früher zusätzlich einmal geschnitten worden war. Im nördlichen Teil fand in den 1950-er Jahren ein Schnitt pro Jahr statt, während in den 80-er Jahren keine landwirtschaftliche Nutzung mehr ausgeführt wurde (Günter, 1985).



**Abb. 8:** Untersuchungsgebiet am Davoser Dorfberg (Schweiz) mit den Gletschneelawinen (orange und rot) und Anrissflächen (violett). Kartenmaterial: geodata © swisstopo

## 4.2 Datenaufnahme

Die Gletschneeeaktivität am Davoser Dorfberg ist während zwei Wintern vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) genau beobachtet und dokumentiert worden. Während der auswertbaren Aufnahmezeit vom 09.12.2008-02.04.2009 und 08.12.2011-09.03.2012 sind im 15-minütigen Zeitintervall Fotos aufgenommen worden. Eine automatische Nikon-Coolpix 4300 Kamera (3x optischer Zoom, 4 Megapixel) ist im SLF Büro aufgestellt worden. Diese Daten sind analysiert und mit Meteoparametern verglichen worden (Dreier L.; 2012).

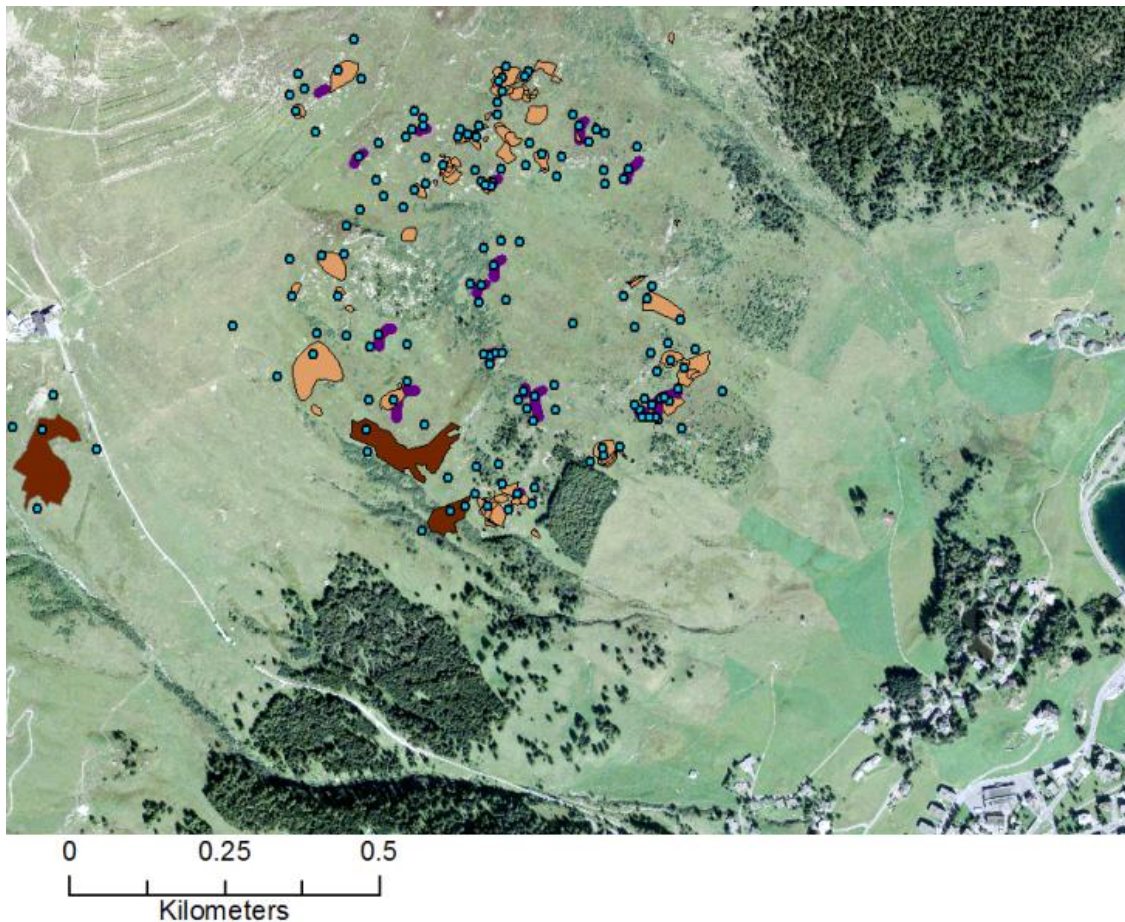
Die Kartierung der Gletschneeeaktivität am Davoser Dorfberg ist die Grundlage der vorliegenden Arbeit. Durch das Aufzeichnen der Schneebewegungen sind dessen Auslöserzonen mittels Koordinatenzuweisung lokalisierbar. Für die nachfolgende Datenaufnahme ist ein Koordinatenpunkt an der Anrissfläche gewählt worden. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Gebietsaufnahmen meist punktuelle Aufnahmen sind. Zum Beispiel der Abstand zum nächsten Hindernis könnte deutlich andere Werte aufweisen, wenn von einem anderen Standpunkt aus gemessen worden wäre. Auch die Hangneigung oder Exposition kann in einer Untersuchungsfläche variieren. Die Art der Topographie sowie der Vegetationstyp wurden in Talrichtung und bis zu ca. 30 Meter vom Koor-

datenerhebung bestmöglich dokumentiert. Innerhalb einer Woche im September 2012 sind die folgenden Parameter erfasst worden.

Eine Übersicht aller erhobenen Parameter bietet Tabelle 1. auf der Seite 31.

### **Ereignis- Kontrollfläche**

Den kartierten Ereignisflächen sind für die Datenaufnahme im Feld auf einem ausgedruckten Satellitenbild Nummern zugeordnet worden. Einerseits ist hierbei auch vermerkt worden, ob es sich um einen Anriss oder ein Lawinenereignis handelt. Andererseits ist auf der Karte in Abb. 9 gut erkennbar, dass die Lawinen in der linken Hälfte des Satellitenbilds (mit einer roten Farbe gekennzeichnet) die ausgedehnteste Fläche einnehmen. Diese Ereignisgebiete sind mittels eines lokal aufgestellten GPS genau verfolgt worden. Sie werden von Fachleuten als besonders grosse und bedeutende Ereignisse bezeichnet, unter anderem weil sie Schäden verursacht haben. Insgesamt sind Parameter von 37 Ereignisflächen und 108 Kontrollflächen gemessen worden. Um einen allfälligen Einfluss von Parametern auf die Gleitschneeaktivität feststellen zu können, sind alle Einflussgrößen auf vergleichbar homogenen, aber zufällig ausgewählten Kontrollflächen in gleicher Weise dokumentiert worden. Liegen beispielsweise Lawinenverbauungen in einer potenziell eingestuftem Kontrollfläche vor, blieb dessen Parametermessung erspart. Wenn immer möglich sind vier Kontrollflächen (ober- und unterhalb, links und rechts) um die Ereignisfläche herum gewählt worden. Falls Überschneidungen einer Kontrollfläche mit einer benachbarten Ereignisfläche erfolgt wären, wurde auf dessen Dokumentation verzichtet. 108 Kontrollflächen sind in den Analysen untersucht worden. Obwohl es für die Auswertung interessant sein könnte, die Kontrollflächen links und rechts sowie ober- und unterhalb der Ereignisfläche in der statistischen Analyse paarweise zu analysieren, werden alle Kontrollflächen in eine Kategorie zusammengefasst. Somit können die Flächen ohne Ereignis denjenigen mit Gleitschneeaktivität gegenübergestellt werden. Ob die Kontrollflächen tatsächlich in einer Zone ohne Gleitschneeaktivität liegt, ist mit ArcGIS überprüft worden. Die kartierten Lawinen- und Rissgebiete dienen als Unterlage für die Kontrolle. Für die Datensammlung sind die Koordinaten der Ereignisse des Winters 2008/09 verwendet worden. Die zusätzlichen Daten vom Winter 2011/12 liegen meist im gleichen Gebiet, wobei einige Lawinen grössere Flächen beanspruchten. Drei Datensätze liegen unter Berücksichtigung der Lawinendaten 2011/12 im Gebiet einer Gleitschneeaktivität. Folglich sind diese Daten bei der Auswertung zu der Kategorie „Lawine“, beziehungsweise „Anriss“ eingestuft worden.

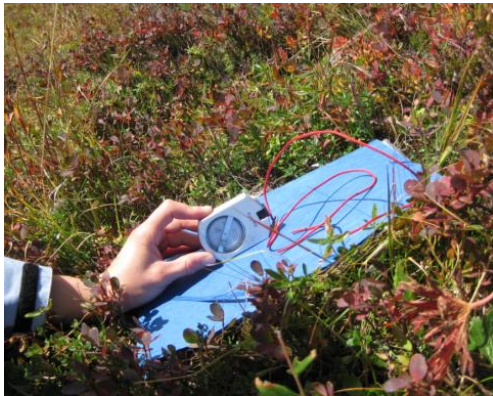


**Abb. 9:** Satellitenbild des Untersuchungsgebiets am Davoser Dorfberg (Schweiz) mit den Untersuchungsstandorten (grüne Punkte). Speziell gekennzeichnet sind Gleitschneelawinen (orange und rot) und Anrissflächen (violett). Kartenmaterial: geodata © swisstopo

In der Felddaufnahme ist unterschieden worden, ob es sich um einen Gleitschneeanriss oder eine entwickelte Lawine handelt. Für einige Analysen bietet diese Aufteilung die Möglichkeit eine allfällige Unterscheidung von Lawinen-, Anriss- und Kontrollflächen festzustellen. So wurde diese Aufgliederung beispielsweise in der Vegetations- wie auch in der Topographieanalyse in einer ersten Untersuchung eingesetzt. Die meisten Analysen dieser Arbeit können nur mit binären Variablen ausgeführt werden, wodurch die Anriss und Lawinenzonen als Ereignisflächen vereint worden sind. Die Ereignisflächen verfügen damit über mehr Datensätze (37 Flächen), als wenn die Datenmenge in Lawinen (21) und Anrisszonen (16) unterteilt ist. Dieser Zusammenschluss dient auch der Studie mit mehreren Variablen beispielsweise beim Demonstrieren eines Klassifikationsbaumes.

In der Datenanalyse und den Resultaten sind für die die Kontrollflächen die Abkürzung „k“, für Lawinen „l“ und für Anrisszonen „r“ gewählt worden. In Analysen, welche mit binären Zielvariablen rechnen sind die Anriss- und Lawinenfläche als Ereignisflächen mit Kürzel „r“ zusammengefasst worden.

## Hangneigung



**Abb. 10:** Messung der Hangneigung.

Foto: V. Eichenberger

in Abb. 10 visualisiert, wurde mittels Auflegen auf eine feste, ebene Unterlage (Mappe, Messband) die Hangneigung bestmöglich erfasst. Die Hangneigung ist in der Datenanalyse als kontinuierliche Variable behandelt worden.

## Exposition

Die Himmelsausrichtung des Gebiets ist im Feld mit einem GPS gemessen worden (Abb. 11). Das Gerät ist auf eine möglichst stabile Unterlage platziert worden. Diese ist bestmöglich in Richtung der exponieren Lage ausgerichtet worden, das heisst senkrecht zum horizontalen Hangverlauf.



**Abb. 11:** Messung der Exposition.

Foto: V. Eichenberger

Die Hangneigung ist in der Felduntersuchung mittels Hangneigungsmesser gemessen worden. Der Wert ist möglichst genau abgelesen worden, wobei eine nachfolgende Umrechnung vorgenommen werden musste. Das Gerät zeigt eine Prozentskalierung auf und zum Vergleich mit den Literaturwerten sind Gradangaben erforderlich (gemessener Wert  $\cdot 0.9$ ). Die Daten des Hangneigungsmessers sind mit Vorsicht zu geniessen. Wegen der Topographie im Feld ist es oft eine Herausforderung das Gerät bestmöglich zu positionieren. Wie

Auf Flächen, dessen Topographie wie ein Tal geformt ist, ist die Exposition an dessen Mittelpunkt gemessen worden. Durch diese Methode lässt sich die tatsächliche Ausrichtung nicht ganz genau bestimmen. Der Zusammenhang der Exposition mit Schneebebewegungen ist bereits umfassend erforscht worden und ist damit nicht Kernpunkt dieser Arbeit. Die mögliche Messungenaugigkeit lässt sich deshalb vernachlässigen. Dieser Parameter wird in der statistischen Analyse als kontinuierliche Variable eingesetzt.

## Höhe über Meer

Die Höhenlage ist, analog zur Exposition, mit dem GPS gemessen worden (in Abb. 11 den Wert am linken Rand, hier 2203m). Dieser Parameter ist eine indirekte Bestimmung der Klimadaten wie Temperatur und Niederschlag. Die Analyse der meteorologischen Parameter liegt nicht im Rahmen dieser Arbeit. Vielmehr dient diese in der Datenbank als kontinuierliche aufgenommene Variable zur groben Analyse, wie sich Gletschneaktivität mit der Höhe verändert. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich jedoch über einen zu geringen Höhenunterschied, damit eine klare

Aussage über den allfälligen Einfluss der Höhe auf Gleitschnee gemacht werden kann. Die Karte in Abb. 8 bietet auch eine Übersicht der Verteilung von Ereignissen in Abhängigkeit der Höhe.

Die Standortfaktoren der Hangneigung, Exposition sowie Höhenlage sind weit erforscht. Deren Analyse dient in dieser Arbeit vielmehr zur Überprüfung, dass Gleitschneeereignisse nicht ausschliesslich von diesen Variablen signifikant beeinflusst werden.

### **Nässe**

In der Literatur (Kapitel 3 Schneegleiten; Newesly et al. 2000; McClung et al., 2006) ist beschrieben worden, dass ein vernässter Untergrund einen Einfluss auf die Gleitschneeaktivität hat. Demzufolge sind nasse Stellen dokumentiert worden, falls diese in den Untersuchungsflächen vorzufinden waren. Es ist lediglich unterschieden worden, ob eine Vernässung auftritt oder nicht. Auf eine Unterteilung der Art der Vernässung sowie dessen Ausmass wurde verzichtet. Für die Datenanalyse stellt der Parameter der Nässe eine binäre Variable dar. Als vernässt vermerkte Gebiete weisen teilweise nur einzelne Stellen, sei es durch ein Rinnsal oder Bodennässe, mit einer Vernässung auf. Eine flächeninterne Unterscheidung wurde ausgeschlossen.

### **Hindernis**

Der Einfluss einer grösseren Unebenheit im Gebiet ist in der Fallstudie von Newesly et al. (2000) erforscht worden sowie in weitere Literatur (De Quervain, 1979, McClung et al. 2006) dokumentiert worden. Ob für die Schneemasse in den Untersuchungsflächen eine mögliche Verankerung vorliegt, soll auch im Untersuchungsgebiet des Davoser Dorfbergs festgehalten werden. Eingangs wird erfasst, ob ein Hindernis vorliegt oder nicht und somit geht eine binäre Variable hervor. Mögliche Hindernisse sind beispielsweise Grünerlen (Abb. 12), Birken, Totholz, Alpenrosenge-



**Abb. 12:** Mögliche Hindernisse für Gleitschneeereignisse (hier Grünerlengemeinschaften, Davos)

Foto: V. Eichenberger

meinschaften, eine alleinstehende Tanne oder grosse Steine. Das Hindernis sollte das Potential haben, einen Gleitschneeriss aufzuhalten, damit sich keine Lawine daraus entwickeln kann. Die Minimalhöhe ist auf 0.5 Meter festgelegt worden. Die Art des Hindernisses ist möglicherweise auch entscheidend, da beispielsweise Grünerlen oder Alpenrosen je nach deren Stabilität von der Schneemasse niedergedrückt werden können. Dies ist bei der Datenauswertung dieser Arbeit aber nicht speziell analysiert worden.

### **Grösse des nächsten Hindernisses**

Weil beim Schneegleiten schon kleine Hindernisse relevant sind, ist die Mindestgrösse des nächstgelegenen Hindernisses auf 0.5 Meter festgelegt worden. Wie hoch ein Hindernis sein muss, um ein Ereignis zu beeinflussen, hängt von der lokal vorliegenden Schneehöhe ab. Die Hindernisgrösse ist mit einem Messband oder Massstab erhoben worden. Diese Variable wird in der Analyse als kontinuierlich interpretiert.

### **Abstand des Hindernisses**

Wie weit das Hindernis von der Anrisszone entfernt liegt, hat möglicherweise einen Einfluss, ob Gleitschneeaktivität im Stadium eines Risses verweilt und sich keine Lawine ereignet. Eine allfällige Verhinderung von Gleitschneeereignissen könnte durch nah am Standpunkt gelegene Hindernisse realisiert werden. Der Abstand ist mit einem Messband in Meter vom Standpunkt aus talwärts gemessen worden. Eine maximale Entfernung des Hindernisses ist auf eine Distanz von 75 Meter festgelegt worden. Es ist angenommen worden, dass weiter entfernte Gegenstände Gleitschneeaktivität nicht mehr ausreichend beeinflussen könnten. Die Variable des Hindernisabstandes wird in der Datenanalyse als eine kontinuierliche Variable aufgenommen. In der multivariaten Analyse musste eine Problematik umgangen werden. Um eine multivariate Analyse durchführen zu können, sind Variablen mit gleicher Anzahl an Datensätzen erforderlich. Diejenigen Flächen, die kein Hindernis beinhalten, haben demzufolge auch keine Höhe und keinen Abstand zum Hindernis und müssten dementsprechend aus der Datenmenge selektiert werden. Damit trotzdem unter Berücksichtigung aller Datenpunkte eine multivariate Analyse errechnet werden konnte, ist den Gebieten ohne Hindernis für die Hindernishöhe 0 Meter zugeordnet worden. Analog dazu ist ein Abstand von 100 Metern gewählt worden, welcher weit über der maximalen Distanz der gemessenen Hindernisse (25 Meter) liegt.

### **Vegetation**



**Abb. 13:** Standort am Davoser Dorfberg mit verschiedenen Vegetationstypen. Foto: V. Eichenberger

Der Vegetationstyp, wie auch die Art der Topographie, unterscheiden sich oft markant von sehr nahe gelegenen Standorten am Davoser Dorfberg. In der Natur koexistieren oft mehrere Vegetationsgemeinschaften. Auch im Untersuchungsgebiet stellt sich die Herausforderung, einen einzigen Vegetationstyp der Fläche zuzuordnen. Deshalb wurde jeweils der Hauptvegetationstyp angesprochen, der das

Vorkommen des Vegetationstypens mit einem Deckungsgrad von geschätzt mehr als 50% der Fläche repräsentiert. Gemäss der Untersuchung von Newesly et al. (2000) zeigen Zwergsträucher eine unterschiedliche Beeinflussung der Gleitschneeaktivität, je nachdem ob sie stark verholzt (strong lignified shrubs) sind oder weich (soft dwarf shrubs) und damit instabil sind. Auch Grasvegetationstypen gelten als Gleitschnee fördernd. Um den Einfluss von niederliegenden Zwergsträucher sowie Graspflanzengemeinschaften genauer zu untersuchen, ist dessen Vorkommen als bemerkenswerte Begleitvegetation in Untersuchungsflächen zusätzlich dokumentiert worden. Nicht selten besiedeln die oben erwähnten Vegetationstypen gemeinsame Flächen (Abb. 13).

Zur Auswahl der Vegetationstypen ist insbesondere die Vegetationskarte Davos- Parsenn-Dischma (Zumbühl et al. 1985) berücksichtigt worden. Diese zeigt eine Übersicht der Vegetationsgemeinschaften bis hin zum detaillierten Vorkommen einzelner Arten auf.

Im Untersuchungsgebiet sind folgende Vegetationstypen erfasst worden:

-Wald: Fichte (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*)

-niedrige Laubbäume: Grünerlen (*Alnus viridis*), Birken (*Betula pendula*), Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*)

-stark lignifizierte Sträucher: Alpenrosen (*Rhododendron*), Wachholderstrauch (*Juniperus*)

-niederliegende Zwergsträucher: *Ericaceae*-Arten, Heidelbeeren (*Vaccinium*), Krähenbeeren (*Empetrum*)

-Fettwiese: Goldhafer (*Trisetum flavescens*), Alpen Ampfer (*Rumex alpinus*), Distel (*Sylbum*)

-subalpine Magerwiese: Borstgras (*Nardion*), Alpen Anemone (*Pulsatilla alpina*), Silberdistel (*Carlina acaulis*)

-Reitgraswiesen: *Calamagrostis villosa*

Die Vegetation wird in der statistischen Analyse als kategoriale Variable behandelt.

Um mit der anschliessend ausgeführten statistischen Analyse die Signifikanz zu berechnen sind binäre Variablen notwendig. Aus diesem Grund ist die bisher mehrstufige Variable der Vegetation zu einer zweistufigen Variable modifiziert worden. Weil der mögliche Einfluss der niederliegenden Zwergsträucher und der Grastypen von spezieller Bedeutung ist, sind diese beiden Kategorien sowie die Pflanzengemeinschaften Wald und Laubbäume für eine differenzierte Analyse selektioniert worden.

Eine Zusammenfassung der Kategorien wurde dreimal mit den Rohdaten durchgeführt. In einer ersten Modifizierung sind alle Flächen, die als Haupt- oder Begleitvegetation eine Grasvegetation aufweisen (Fettwiese, subalpine Magerwiese, Reitgraswiese), einer einheitlichen Kategorie

(„Grasstypen“) zugeordnet worden. Diese stand dem Zusammenschluss aller anderen Vegetationstypen in der Analyse gegenüber. Dasselbe ist für den Vegetationstyp der niederliegende Zwergsträucher programmiert worden. Als letztes sind die Pflanzengemeinschaften Wald und Laubbäume zu einer Kategorie („Wald und Laubbäume“) zusammengeschlossen worden und dadurch von den restlichen Vegetationstypen differenziert worden.

### **Höhe der Vegetation**

Die Daten zur Vegetationshöhe repräsentieren die durchschnittliche Höhe der Pflanzengemeinschaft in der Fläche. Gemessen mittels Masstab oder Messband, resultiert eine kontinuierliche Variable. Die Pflanzenhöhe ist nur in Flächen erfasst worden, falls sie ungefähr gleichmässig im Untersuchungsgebiet vorkommt. Die mittlere Höhe von Grasvegetationen zu ermitteln, erschien als beinahe unmöglich (Abb. 14). Die Bestände weisen sehr unterschiedliche Höhen und Flächenanteile auf. Somit ist vor Ort entschieden worden, auf eine bestmögliche Abschätzung der mittleren Vegetationshöhe der Grasvegetationen zu verzichten.



**Abb. 14:** Standort am Davoser Dorfberg mit unterschiedlicher Höhe der Grasvegetation.

Foto: V. Eichenberger

## Topographie

Unebenheiten im Gelände gibt es viele und in verschiedenster Art und Weise (Abb. 15). Bei der Festhaltung der Topographie wurden die zwei Bodenrauigkeiten aufgelistet, welche die grösste Unebenheit im Test- und Kontrollgebiet bilden. Vor Ort weisen die Unebenheiten sehr unterschiedliche Merkmale auf. Beispielsweise ein ausgeprägtes Murmeltierloch ist kaum vergleichbar mit einer Abstufung im Gelände. Somit sind viele verschiedene Typen erfasst worden, welche anschliessend aufgrund zu geringer Datenmenge zusammengefasst wurden. Folgende Kategorien repräsentieren die Topographie im Untersuchungsgebiet: Stufen und Murmeltierlöcher, Rutschanrisse, Kuppen, Fels (Wand oder eingebettete Steinflächen), Stein (einzelne, grosse) bedeutende Vegetation >0.5 m (Grünerlen, Birken, Tannen, Alpenrosen, Totholz), Kuhtritte sowie keine besondere Topographie. Zur Übersicht sind diese auch in der Tabelle 1 aufgelistet, eine Auswahl ist bildlich in Abb. 15 dargestellt. Als bedeutende Vegetation sind einzelne, kleine Bäume die nicht als Hauptvegetationstyp deklariert sind, aufgenommen worden. Sie sind somit nicht zu verwechseln mit der Variablen der Vegetation.

In einer ersten Analyse sind die Topographiekategorien einzeln betrachtet worden. In weiteren Datenauswertungen, analog zur Vegetation, sind die bedeutendsten Topographietypen zusammengefasst worden um binäre Variablen zu schaffen. Dies ist für Rutschanrisse, Felswände und Steine sowie Stufen, Kuhtritte und Kuppen durchgeführt worden. Sie standen den jeweils übrigbleibenden zusammengefassten Kategorie gegenüber. Eine binäre Variable ist somit erstellt worden, womit ein Signifikanztest ermöglicht wurde.



**Abb. 15:** Topographische Unebenheiten am Davoser Dorfberg. Foto: V. Eichenberger

## Höhe der Topographie

Die Höhe der Bodenrauigkeit ist mit Messband oder Massstab gemessen worden (Abb. 16). Während der Datenaufnahme ist aufgefallen, dass die Topographiehöhe innerhalb jeder Untersuchungsfläche sehr variiert. Somit ist beispielsweise bei der Erfassung von der Topographie „Stufen“ bestmöglich eine Auswahl von Stufen getroffen worden und dessen mittlere Höhe auf-

geschrieben worden. Herausfordernd war, Felswände zu messen. Bei Rutschungen wurde nur die Höhe des Anrisses in die Datenauswertung übernommen. In dieser Arbeit konnte jedoch nicht untersucht werden, welchen Einfluss dessen Längen und Breiten haben könnten. Die Mindestgröße der topographischen Unebenheiten (vor allem bei Stufen) ist auf 0.15 Meter festgelegt worden.



**Abb. 16:** Messung einer Stufe sowie einer Steinfläche am Davoser Dorfberg. Foto V. Eichenberger

### **Landwirtschaft**

Der Einfluss der landwirtschaftlichen Nutzung auf Lawinen ist im Kapitel 2.3 & 3 erläutert worden. In dieser Arbeit wurde dieser Parameter auch erfasst. Einerseits um den möglichen Einfluss speziell auf Gleitschnee zu überprüfen. Andererseits kann anhand der Karte Landnutzung 1982 und Nutzungsänderung seit 1950 in Davos-Parsenn-Dischma (Günter, 1985), die Landnutzungsänderung aktualisiert werden. Zum Zeitpunkt der Datenerfassung waren die Flächen bereits abgeweidet und die Tiere zurück im Tal. Anhand von Zäunen, Tritten oder Exkrementen sind die landwirtschaftlich genutzten Gebiete erkannt worden. Bei der Datenaufnahme im Feld sind einige verlassenere Ställe sowie umgenützte Alphütten gesichtet worden. Diese Variable wird in der statistischen Analyse als binäre Variable mit einbezogen.

**Tab. 1:** Übersicht der dokumentierten Variablen.

<b>Parameter</b>	<b>Dimension, Kategorien</b>	<b>Art der Variable</b>
Ereignis- Kontrollfläche	Nummerierung der Gebiete	
Riss-Lawine-Kontrollfläche	Riss Lawine Kein Ereignis	Kategorial
Ereignis- Kontrollfläche	Riss &Lawine Kein Ereignis	Kategorial (binär)
X	Koordinate W-O	
Y	Koordinate N-S	
Hangneigung	Grad	Kontinuierlich
Exposition	Grad (0°-360°)	Kontinuierlich
Höhe über Meer	Meter	Kontinuierlich
Nässe	Vernässt Trocken	Kategorial (binär)
Hindernis	Vorhanden Nicht vorhanden	Kategorial (binär)
Abstand zum Hindernis	Meter	Kontinuierlich
Höhe des Hindernis	Meter	Kontinuierlich
Vegetation (Haupt-)	Wald Niedrige Laubbäume Stark lignifizierte Sträucher Niederliegende Zwergsträucher Fettwiese Subalpine Magerwiese Reitgraswiesen	Kategorial
Begleitvegetation	Niederliegende Zwergsträucher Grasvegetation	Kategorial
Höhe der Vegetation	Meter	Kontinuierlich
Topographie	Stufen und Murmeltierlöcher Rutschanrisse Kuppen Felswände Einzelne Steine bedeutende Vegetation Kuhtritte keine besondere Topographie	Kategorial
Topographie2	Stufen und Murmeltierlöcher Rutschanrisse Kuppen Felswände Einzelne Steine bedeutende Vegetation Kuhtritte keine besondere Topographie	Kategorial
Höhe der Topographie	Meter	Kontinuierlich
Landwirtschaftliche Nutzung	Genutzt Nicht genutzt	Kategorial (binär)

### **4.3 Datenanalyse**

Die gemessenen Daten sind in einer Exceltabelle abgespeichert worden. Die Computerprogramme GIS (Geoinformationssystemtechnologie) und R (statistische Analysen) werten die Datenmenge aus. Zum Erlernen der wichtigsten Funktionen im Programm GIS ist ein Kursangebot von der ETH Zürich absolviert worden. GIS ist ein rechnergestütztes System, das raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten bearbeiten und darstellen lassen. (Bill, 2010). Zum Darstellen und zur Koordinatenüberprüfung der Ereignisflächen ist GIS (ESRI GIS, Version 10.1, akademische Lizenz der ETH) angewendet worden. Für die statistischen Rechnungen (u. a. Mittelwerte, prozentuale Anteile, Signifikanz, Tests) und das Erstellen von Graphiken (Boxplot, Säulendiagramm, Klassifikationsbaum) ist die freie Programmiersprache R (RStudio, Version 2.15.1) eingesetzt worden.

#### **Univariate Analysen**

Um festzustellen, ob die Variablen einen relevanten Einfluss auf Gleitschneeaktivität haben, sind univariate Regressionsrechnungen (nur eine Variable) programmiert worden. Genauer erklärt, sind Generalisierte lineare Modelle (glm) errechnet worden. Mittels des resultierenden P-Wertes von binären Variablen resultiert, ob die Variablen einen deutlichen Einfluss haben. Je tiefer der P- Wert (auch Signifikanz genannt) liegt, desto signifikanter ist der Einfluss der Variable. Zu erwähnen ist, dass der P-Wert des 5%-Signifikanzniveaus als Grenze des signifikanten Einflusses gewählt wurde. Bei kleiner Datenmenge (Schwellenwert: weniger als 15 Datensätze) und bei den Analysen der Zusammengefassten Variablen ist zusätzlich zur glm-Analyse ein Chisquare- und Fisher-test programmiert worden. Diese zwei Tests berechnen auch die Signifikanz der erklärenden Variablen (Faktoren) auf die Zielvariable (Gleitschnee) und sind besser geeignet für eine kleine Datenmenge. Die Resultate des Chisquare- und Fisher- tests zeigen meist leicht höhere, aber mit dem Generalisierten linearen Modell vergleichbare Werte.

#### **Boxplot**

Die graphische Darstellung eines Boxplots (Box- Whiske- Plot) zeigt die Streuung der Daten auf. Dabei enthält die Box die Daten des ersten bis dritten Quantil der Datenmenge. Die Werte ausserhalb der Box werden mit einer ausgezogenen Linie (Antennen) abgebildet. Liegen extrem Werte, sogenannte Ausreisser, vor, werden diese mit Punkte eingezeichnet. Weiter wird der Median durch eine Querlinie in der Darstellung verdeutlicht.

## **Multivariate Analysen**

Folgend den ersten Untersuchungen, in welchen einzelne Variablen (univariat) analysiert worden sind, bilden multivariate Analysen (mehrere Variablen) den zweiten Teil. Alle als sinnvoll resultierenden Variablen der univariaten Analyse sind im Modell der multivariaten Rechnung berücksichtigt worden. Mittels „stepwise model selection“ Reduzierung der Variablen sind vom Programm R selber die unbedeutendsten Variablen vernachlässigt worden. Schlussendlich wurden nur noch die im Zusammenhang mit Gleitschneeaktivität relevanten Variablen im Modell beibehalten. Spezifische Erläuterungen zum Vorgehen sind im Kapitel Resultate erwähnt. Die Signifikanz-Werte der multivariaten Regression sind feiner aufgegliedert worden. So ist unterschieden worden, ob der P- Wert das 5%-, 1%- oder sogar 0.1%-Signifikanzniveau erreicht.

In der univariaten Analyse der Hindernisse (Höhe und Abstand des Hindernisses), sind jene Daten aus dem Datensatz ausgeschlossen worden, die kein Hindernis aufweisen. Um eine multivariate Analyse durchführen zu können, müssen alle Variablen die gleiche Anzahl von Daten haben. Damit die Flächen mit keinem Hindernis auch mit eingerechnet werden können, wurde für dessen Abstand 100m gewählt. Dieser Abstand liegt somit 25 Meter weiter entfernt als bei Flächen, die tatsächlich ein Hindernis aufweisen.

## **Klassifikationsbaum- Methode**

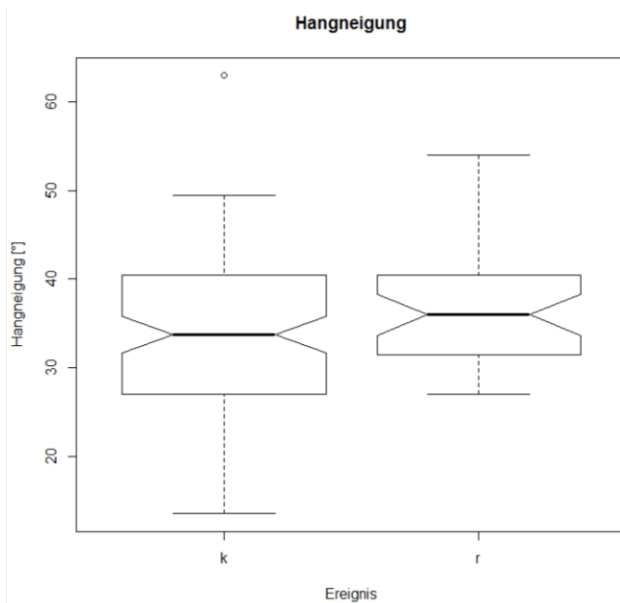
Die Klassifikationsbaum- Methode ist eine statistische Methode zur Klassifikation einer multivariater Datenmenge. Ein Klassifikationsbaum stellt die Verteilung einer Kombination von signifikanter Variablen dar (Michaelis, 2006). Ein binärer Klassifikationsbaum teilt die Daten in zwei Klassen, in dieser Arbeit in Ereignisfläche (Gleitschneeanriss oder – lawine) und Kontrollfläche. Die Variablen (Standorts- und Vegetationsparameter) werden zuerst aufgrund ihrer testrelevanten Aspekte selektiert. Das heisst, die Eingangsvariablen werden einzeln auf die Null-Hypothese der Unabhängigkeit zur Zielvariablen (Ereignis/ Kontrolle) getestet. Wird diese wiederlegt, werden die Parameter mit den kleinsten p-Werten ausgewählt. Die Knotenpunkte im Klassifikationsbaum teilen die Datenmenge aufgrund der signifikanten Wahrscheinlichkeit (>95%). Anschliessend wird der Datensatz nach diesen Parameter in unterschiedlicher Farbe bezüglich der zwei Klassen (Ereignis/ Kontrolle) dargestellt. Die Klassifikationsbäume sind im R-Studio mit der Funktion `ctree()` des R-Pakets „party“ programmiert worden.

### **Testung der Modelle**

Durch eine Testung der verwendeten Modelle wird geprüft, ob die Voraussetzungen für lineare Modelle erfüllt sind. Mittels eines Tukey-Anscombe Plots sind Residuenanalysen durchgeführt worden. Diese Darstellungen stellen die Residuen (Abstand zwischen der Regressionsgerade und den Messwerten) den geschätzten Werten (fitted values) graphisch gegenüber. Idealerweise liegen die resultierenden Punkte um die horizontale Nulllinie. Um eine mögliche Abweichung erkennen zu können, ist in dieser Arbeit ein Loess-Glätter dargestellt worden. Zeigt der Tukey-Anscombe Plot eine systematische Beziehung der Abweichungen, sollten die Eingangsvariable transformiert werden. Für die Testung der multivariaten Modelle eignet sich die Darstellung eines Tukey-Anscombe Plots. Dieser Test ist auch für univariate Modelle mit kontinuierlichen Variablen durchgeführt worden. Für univariate Modelle mit kategorialen Variablen stellt sich dieser Test als nicht geeignet heraus. Eine Transformation konnte nicht ausgeführt werden, da die meisten Eingangsvariablen Faktoren (nicht numerisch) sind.

## 5 Resultate

### Hangneigung

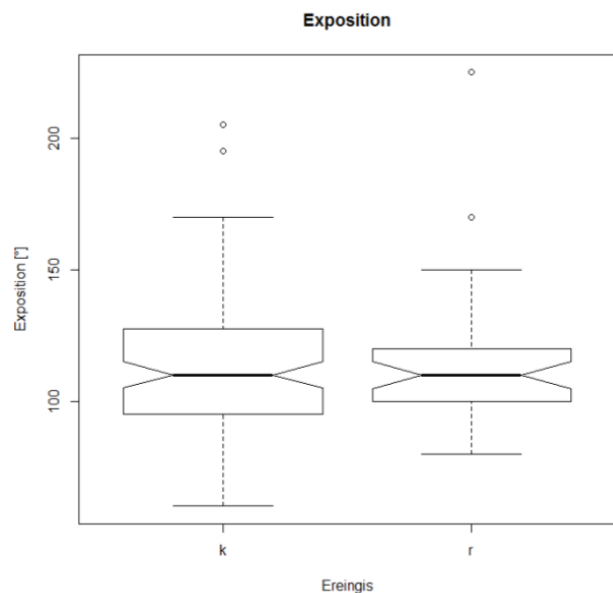


**Abb. 17:** Streuung der Hangneigung in den Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts.

Die Boxplots der Abb 17 zeigen, dass die Hangneigung in Ereignisflächen etwas grösser ist verglichen mit den Kontrollflächen ( $p= 0.049$ , vgl. Tab. 2 auf S. 46), wobei der Median in den Kontrollflächen bei  $33.7^\circ$  und in Gleitschneeflächen  $36^\circ$  beträgt. Die Spannweite, damit ist der Abstand zwischen dem grössten und kleinsten Datenwert gemeint, ist bei den Ereignisflächen weniger ausgedehnt im Vergleich zu den Kontrollflächen.

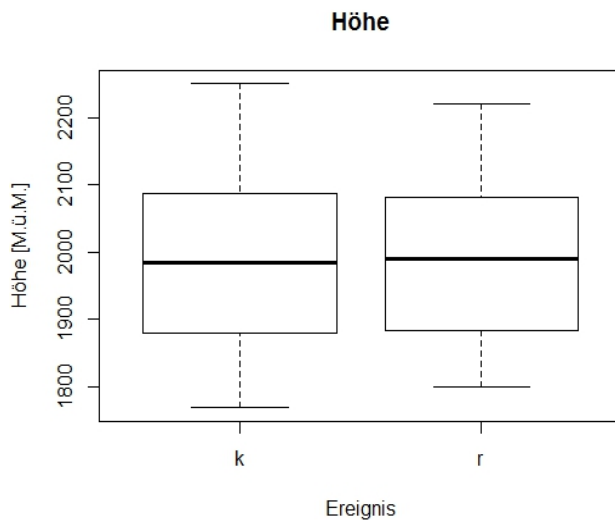
### Exposition

Anriss- und Lawinengebiete von Geleitschnee ereigneten sich fast ausschliesslich in einem Expositionsbereich von  $80^\circ$  bis  $120^\circ$ , was eine Südostausrichtung beschreibt (Abb. 18). Der Mittelwert liegt sowohl bei den Kontrollflächen wie bei den Ereignisflächen bei  $110^\circ$ . Werden die Spannweiten der Boxplots in Abb. 18 miteinander verglichen, fällt auf, dass diese sich in den Kontrollflächen über einen weiteren Bereich erstreckt.



**Abb. 18:** Streuung der Exposition in den Kontrollflächen (k) links sowie den Ereignisflächen (r) rechts.

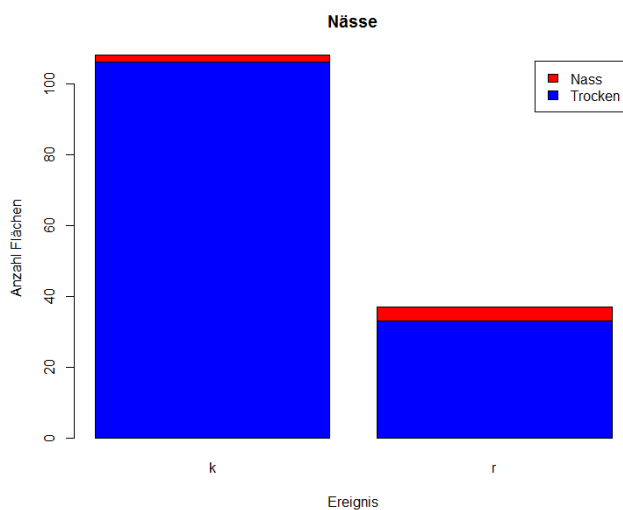
## Höhe über Meer



**Abb. 19:** Streuung der Höhe in den Kontrollflächen (k) links sowie den Ereignisflächen (r) rechts.

Die Verteilung der Höhe über dem Meeresspiegel unterscheidet sich in dieser Feldstudie kaum in Flächen mit oder ohne Gleitschneeaktivität (Abb. 19). Wird die Lage der Boxen im Vergleich zur ganzen Streuung betrachtet, wird ersichtlich, dass sich diese eher im unteren Bereich befinden.

## Nässe



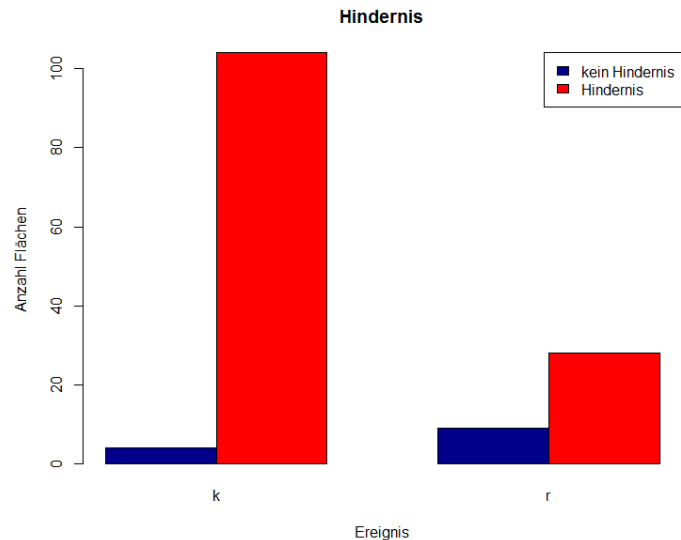
**Abb. 20:** Absolute Anzahl Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts mit Vernässung (rot) sowie ohne (blau).

Vernässte Zonen im Untersuchungsgebiet kommen selten vor (Abb. 20). Lediglich 4 von 37 Untergründen auf Ereignisflächen sind vernässt, was einem prozentualen Anteil von 11% entspricht. In den untersuchten Kontrollflächen weisen nur 2 von insgesamt 108 Gebieten (1.8%) Nässe an der Bodenoberfläche auf. Das univariate lineare Regressionsmodell ( $p=0.036$ ) und der Fisher-test ( $p=0.037$ ) errechnet einen relevanten Einfluss der Nässe auf Gleitschnee, wobei der Chi-square test ( $p=0.059$ ) diese Variable als nicht signifikant darlegt.

## Hindernis

Wie in Abb. 21 zu erkennen ist, ist ein Hindernis bis zu einer Entfernung von 75 Meter oft vorhanden ( $p= 0.0009$ ). Jedoch ist eine Differenzierung der Gebiete sehr aufschlussreich. Wie aufgezeigt wird, existiert auf Ereignisflächen in 9 von 37 Gebieten kein Hindernis. Mit 24.5 % ist dieser Anteil markant grösser als auf Kontrollflächen mit einem prozentualen Anteil von 3.5% der Zonen ohne Hindernis (4 von 108).

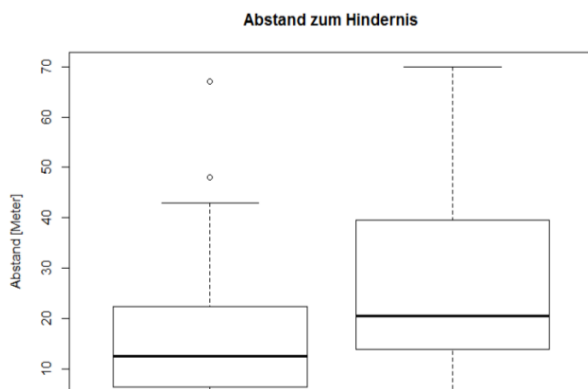
Eine andere Betrachtungsweise ergibt sich mit einem Klassifikationsbaum. 9 der 13 Flächen, die kein Hindernis in der gewählten Entfernung beinhalten, sind Ereignisflächen. Somit ist auf knapp 70% der Gebieten ohne Hindernisse Gleitschnee aktiv.



**Abb. 21:** Vorkommen von einem Hindernis (rot) im Abstand von höchstens 75 Meter von der Anrisszone entfernt, respektive keinem Hindernis (blau), auf Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts.

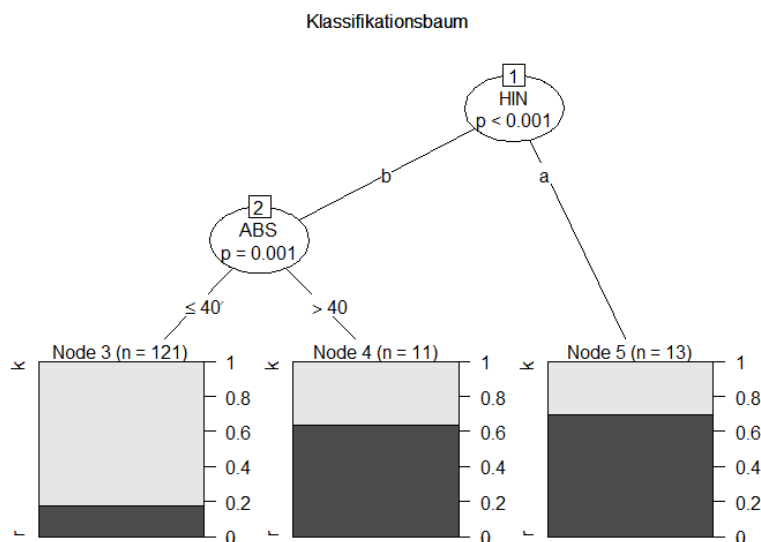
## Abstand zum nächsten Hindernis

Die Abstände der Hindernisse zum Koordinatenstandpunkt unterscheiden sich in Ereignisflächen von Kontrollflächen ( $p= 0.001$ ). Der Mittelwert der Ereignisflächen liegt bei 20.5 Meter. Im Vergleich der 12.5 Meter auf den Kontrollflächen ist ein markanter Unterschied von 8 Metern feststellbar. In Abb. 22 ist klar ersichtlich, dass sich die Box bei den Ereignisflächen über ein längeres Intervall erstreckt



**Abb. 22:** Abstand zum nächsten Hindernis gemessen vom Standpunkt der Kontrollflächen (k) links sowie der Anrisszone der Ereignisflächen (r) rechts mit einer Obergrenze von 75 Meter Entfernung.

Dieser Klassifikationsbaum in Abb. 23 demonstriert den relativen Anteil der Gleitschneereignisse und der Kontrollflächen für Flächen ohne Hindernis (Node5) und mit Hindernis (Node 3 und 4). Letztere wird nach dem Hindernisabstand weiter unterteilt. Diese Methode zeigt einen hohen relativen Anteil der Ereignisse, wenn kein Hindernis existiert. Vergleichsweise häufig tritt Gleitschneeaktivität auf, wenn ein Hindernis vorhanden ist, welches jedoch weiter als 40 Meter vom Ausgangspunkt distanziert liegt.



**Abb. 23:** Klassifikationsbaum mit Variablen Hindernis (a: kein Hindernis, b: Hindernis vorhanden) und Abstand des Hindernisses.

### Höhe des Hindernisses



Die Abb. 24. demonstriert eine weite Streuung der Hindernishöhen auf den Kontrollflächen relativ zu den Ereignisflächen, dessen höchsten Hindernis 3 Metern aufweist ( $p = 0.13$ ). Werden die Mittelwerte genauer analysiert, resultiert ein Wert von 1.5 Meter auf Kontrollflächen sowie 1.0 Meter auf Ereignisflächen.

**Abb. 24:** Streuung der Höhe des nächsten Hindernisses mit einer Obergrenze von 75 Meter Entfernung. Gegliedert nach Kontrollflächen (k) links sowie der Ereignisflächen (r) rechts.

Der Klassifikationsbaum in Abb. 25 ist mit den Eingangsvariablen Höhe des Hindernisses sowie Abstand des Hindernisses programmiert worden. Die Höhe des Hindernisses wird nicht aufgezeigt, was hindeutet, dass diese Variable keinen signifikanten Einfluss hat. Aus dem Klassifikationsbaum in Abb. 25 ist zu erkennen, dass über 60% der Flächen mit einem Abstand grösser als 40 Metern zum Hindernis (Node 1), Hingegen ereignen sich Gleitschneerisse in weniger als 20% der Flächen mit einem Hindernis im Abstand bis zu 40 Meter (Node 2).

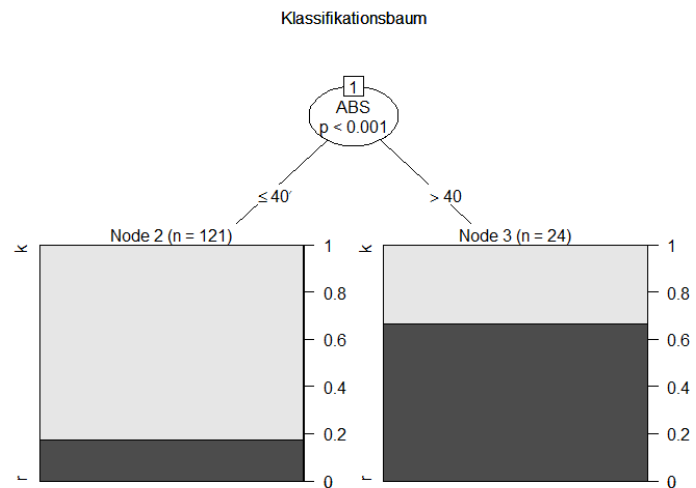


Abb. 25: Klassifikationsbaum des Hindernisabstandes. Schwarz: Ereignisflächen; Grau: Kontrollflächen

## Vegetation

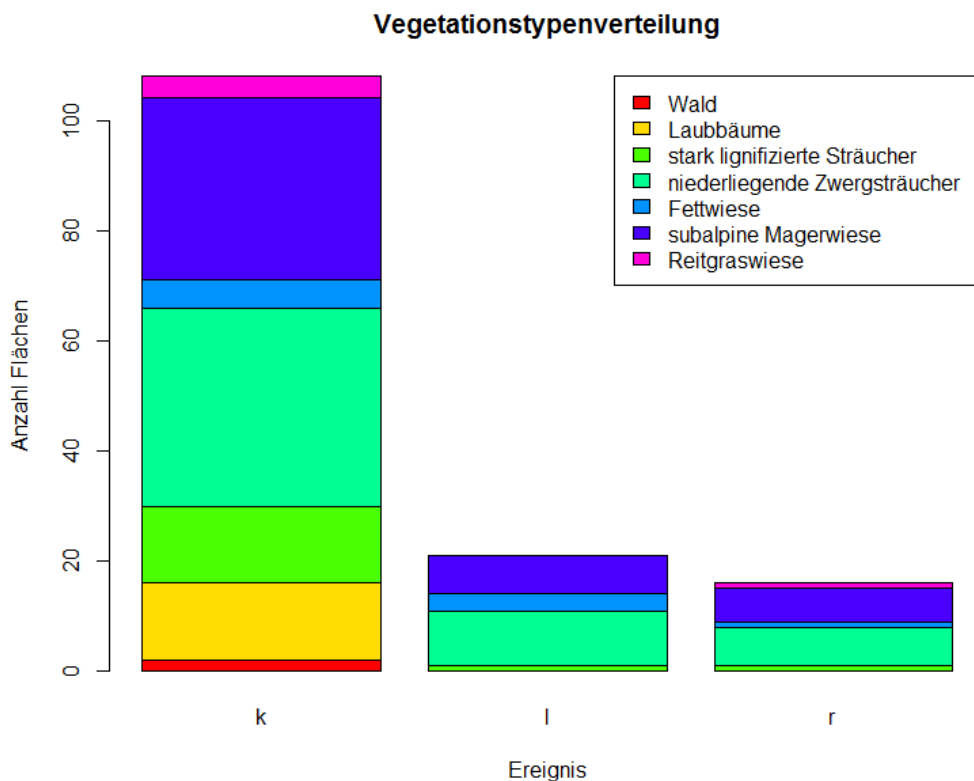
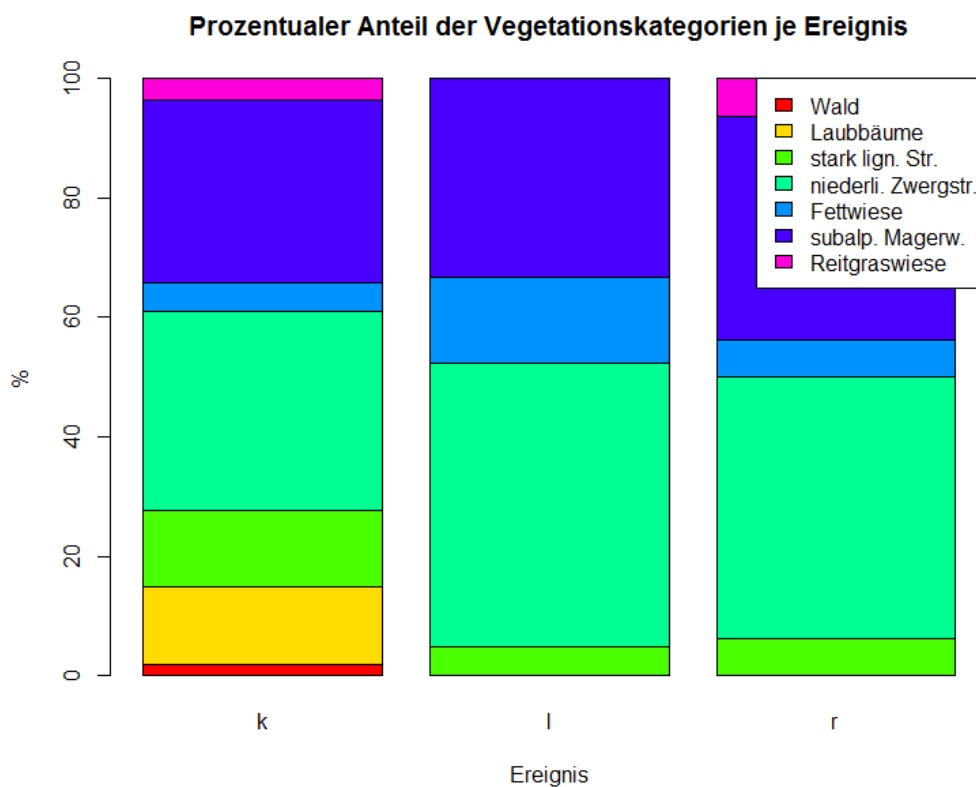


Abb. 26: Absolute Anzahl Flächen der Vegetationstypen unterteilt nach Kontroll- (k), Lawinen- (l) und Rissflächen (r).

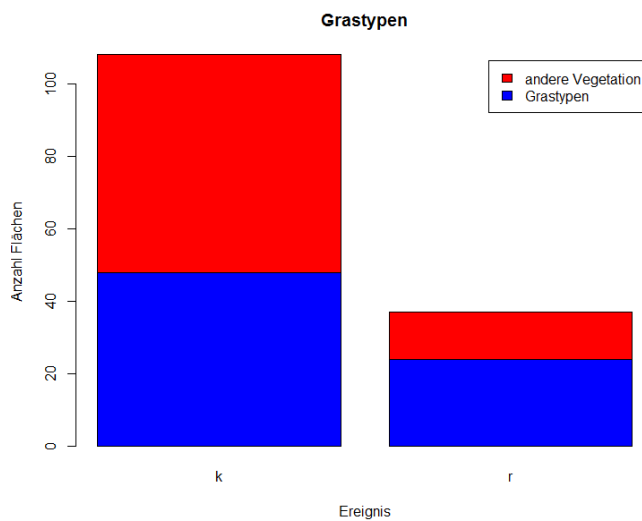
Vegetationstyp Wald, Laubbäume und stark lignifizierte Sträucher kommen fast ausschliesslich nur in Kontrollflächen vor. Die Typen der niederliegenden Zwergsträucher und subalpinen Magerwiesen sind sowohl in Kontrollflächen wie auch in Gleitschneelawinen- und Risszonen oft vertreten (Abb. 26). Niederliegende Zwergsträucher bedecken 10 von insgesamt 21 Lawinenzonen (47%) und bilden damit die dominante Kategorie bei Lawinenergebnissen. Ein ähnliches Muster (43%) zeigt sich auf Rissflächen. Subalpine Magerwiesen wachsen auf 33% der Gleitschneelawinenzonen sowie auf 37% der Rissgebiete. (vgl. Abb. 27). Grasgemeinschaften wie Fettwiesen und Reitgraswiesen sind in Ereignisgebieten wie auch in den Kontrollflächen mit einem geringeren Anteil in diesem Untersuchungsgebiet vertreten (Abb. 26, 27).

Damit die Häufigkeitsverteilung je Gebietstyp besser zum Vorschein kommt, ist in Abb.27. ein erweitertes Säulendiagramm erstellt worden.



**Abb. 27:** Prozentualer Anteil der Vegetationstypen aufgliedert nach Kontrollflächen (k), Lawinen- (l) und Risszonen (r).

## Vegetation als zweistufige Variable - Grastypen



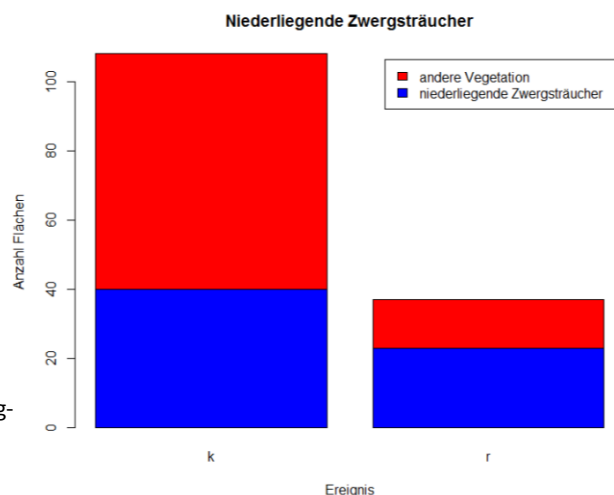
Die Abbildung 28 visualisiert die modifizierte Vegetationsvariable der Grastypen. Knapp 65% der Ereignisflächen enthalten Grasgemeinschaften. Der Vergleich mit den Kontrollarealen (44%) verdeutlicht, dass Gras einen möglichen Einfluss hat auf Gleitschneeaktivität hat ( $p=0.034$ ).

**Abb. 28:** Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit Grastypenvegetation sowie anderer Vegetation.

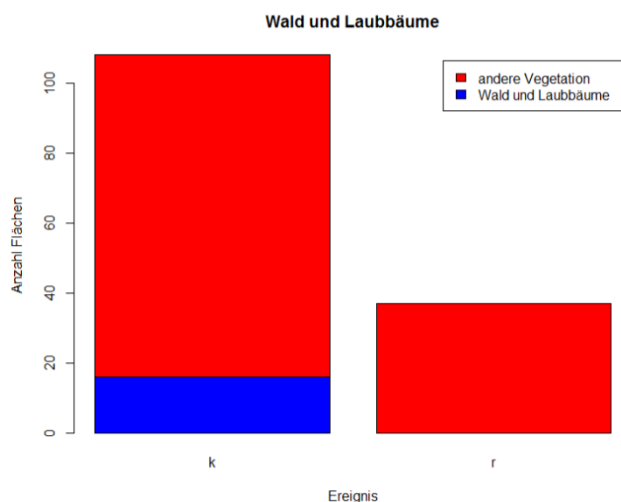
## Vegetation als zweistufige Variable - niederliegende Zwergsträucher

Den möglichen Einfluss die niederliegenden Zwergsträucher auf Gleitschneeaktivität zeigt Abb. 29. Auf 62% der Ereignisflächen wachsen niederliegende Zwergsträucher. Werden die Kontrollflächen betrachtet, sind dies lediglich 37%. ( $p=0.009$ )

**Abb. 29:** Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit der Vegetation niederliegende Zwergsträucher sowie anderer Vegetation.



## Vegetation als zweistufige Variable - Wald und Laubbäume

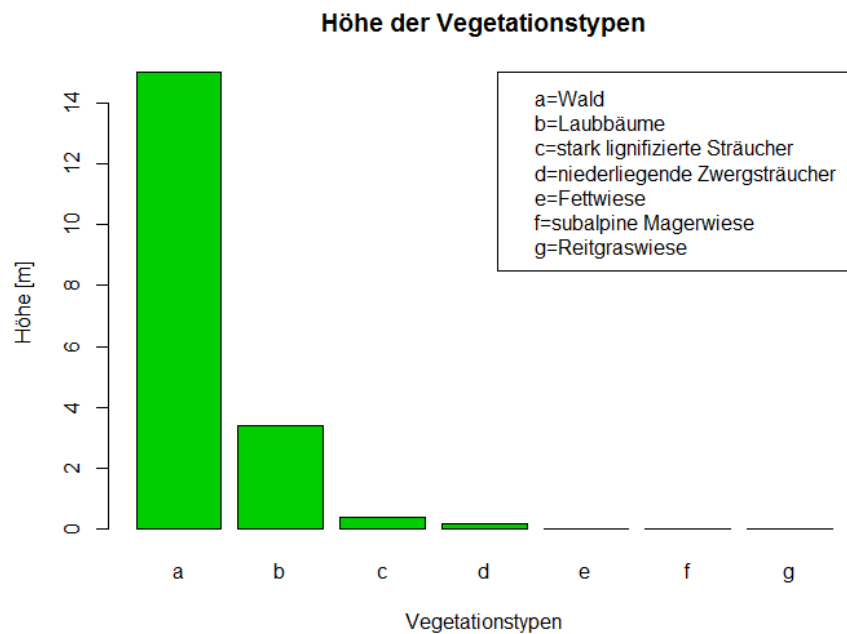


Wald und Laubbäume kommen ausschließlich auf Kontrollflächen vor, durch dessen Vorhandensein Schneegeliten einschränkt wird. (Abb. 30).

**Abb. 30:** Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit der Vegetation Wald oder Laubbäume sowie der anderen Vegetation.

## Höhe der Vegetation

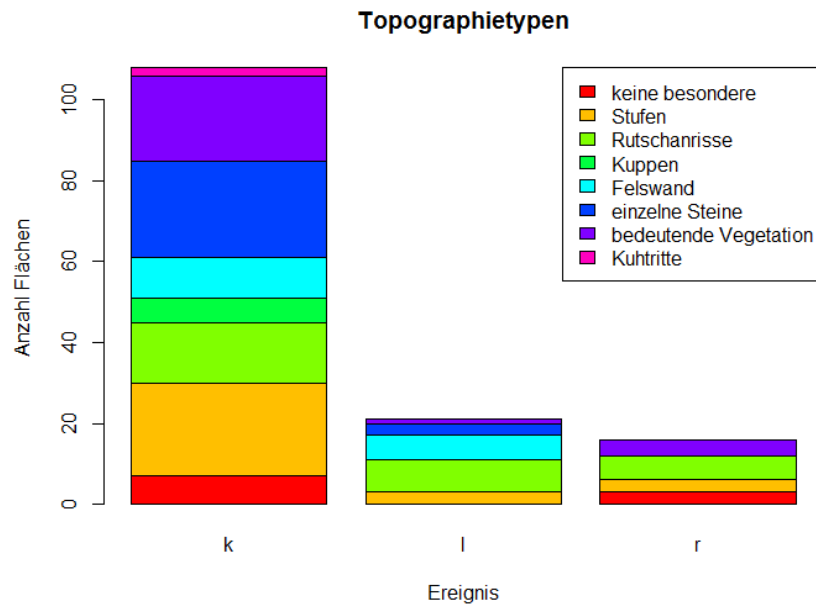
Wird die Vegetationshöhe als erklärende Variable der Gletschneereignisse untersucht, sind die Resultate kaum aussagekräftig, wenn sie nicht nach den einzelnen Vegetationstypen aufgegliedert wird. Ein hoher Waldbestand hat möglicherweise einen hemmenden Einfluss auf die Bildung von Anrissen. Dem gegenüber könnte eine Fläche mit niederliegenden Zwergsträuchern grösseren Wachstums Gletschneeeaktivität fördern.



**Abb. 31:** Mittlere Höhe der einzelnen Vegetationskategorien. Bemerkung: Für die Kategorien e bis g sind keine Grössen gemessen worden.

Offensichtlich erscheint in Abbildung 31, dass die Bestandhöhe der Vegetationskategorie Wald den anderen überlegen ist. Mit einer durchschnittlichen Höhe von 15 Meter der Nadelbäume folgen die Laubbaumbestände mit 3.42 Meter. Stark lignifizierte Sträucher (0.36 Meter) sind durchschnittlich grösser als niederliegende Zwergsträucher (0.17 Meter). Wichtig zu bemerken ist, dass bei den Graskategorien keine Höhen dokumentiert wurden. Die Grasvegetation in den Versuchsflächen weist sehr unterschiedliche Höhen auf. Auf eine bestmögliche Abschätzung der durchschnittlichen Grösse ist explizit verzichtet worden. Folglich enthält die Abb. 31 für die Grasvegetationen keine Werte.

## Topographie



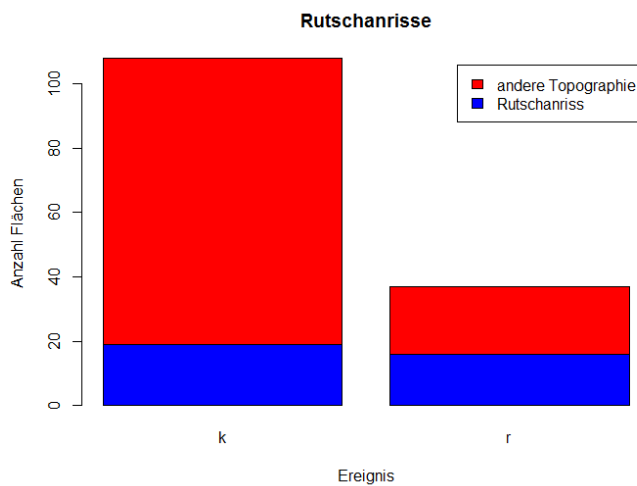
**Abb. 32:** Absolute Anzahl Flächen der Topographietypen unterteilt nach Kontroll- (k), Lawinen- (l) und Rissflächen (r)

Die Abbildung 32 demonstriert, dass in den Kontrollflächen die Topographiecharakteren „Stufen“ (21%), „einzelne Steine“ (22%) und „bedeutende Vegetationsobjekte“ (20%) am häufigsten vorkommen (Abb. 33). In Lawinenzonen sind Rutschanrisse des Untergrundes mit 38% der häufigste Topographietyp (vgl. Abb. 33). Bodenrauigkeiten wie eine Felswand oder Steine sind mit 29% in Flächen mit ausgelösten Lawinen relativ oft anzutreffen. Die Rissflächen zeigen ein vermehrtes Vorkommen von Rutschanrisse (38%) sowie bedeutender Vegetationsobjekte (25%). Kuppen sowie Kuhtritte sind ausschliesslich in Kontrollflächen vorzufinden.



**Abb. 33:** Prozentualer Anteil der Topographietypen aufgedgliedert nach Kontrollflächen (k), Lawinen- (l) und Risszonen (r).

## Topographie als zweistufige Variable - Rutschanrisse



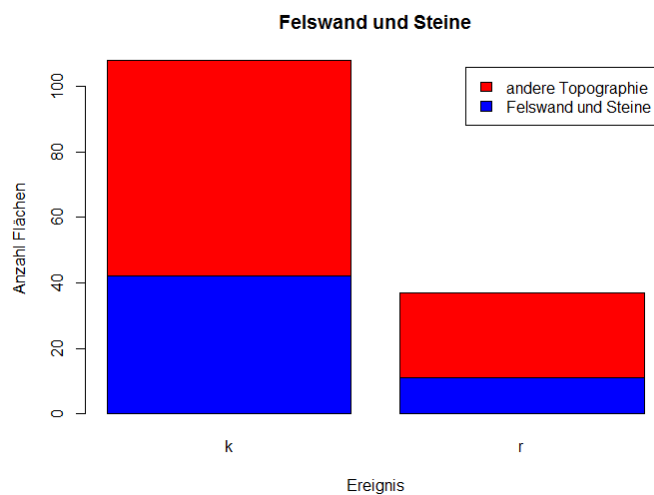
Anhand der Darstellung 34 ist ablesbar, dass die absolute Anzahl der Rutschanrisse der Ereignisflächen beinahe deren der Kontrollflächen ist. Prozentual liegen auf 43% der Ereignisflächen und 18% der Kontrollflächen Rutschanrisse des Untergrundes vor ( $p=0.003$ ).

**Abb. 34:** Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit dem Topographietyp Rutschanrisse sowie den anderen Topographietypen.

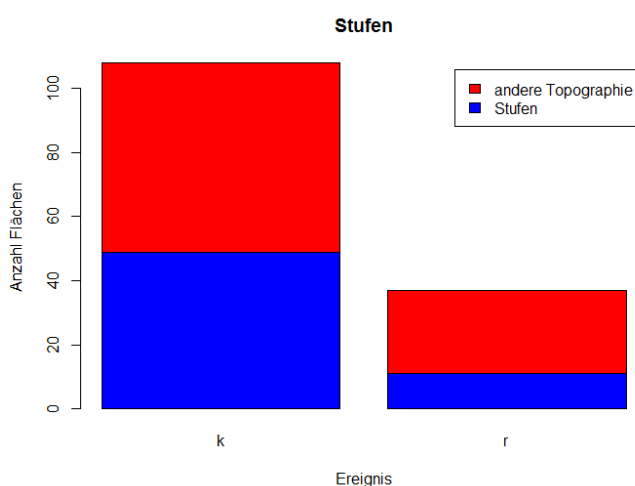
## Topographie als zweistufige Variable - Felswand und Steine

Wie die Abbildung 35 visualisiert, beinhalten mehr Kontrollflächen Felswände und Steine (40%). Knapp ein Drittel der Ereignisflächen sind mit diesem Topographietyp versehen ( $p=0.32$ )

**Abb. 35:** Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit den Topographietypen Felswand und Steine sowie den anderen Topographietypen.



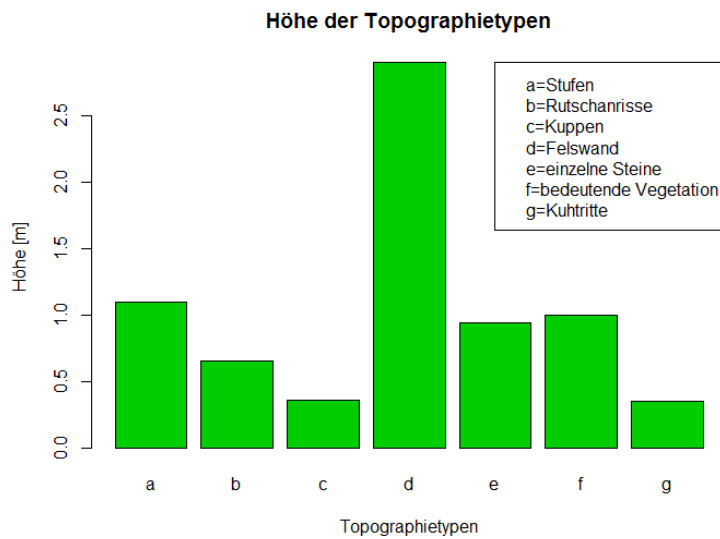
## Topographie als zweistufige Variable - Stufen



Das Diagramm in Abbildung 36 zeigt, dass 45% der Kontrollgebieten und 30% der Ereignisflächen mit Stufen gekennzeichnet sind ( $p=0.1$ ).

**Abb. 36:** Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit dem Topographietyp Stufen sowie den anderen Topographietypen.

## Höhe der Topographie

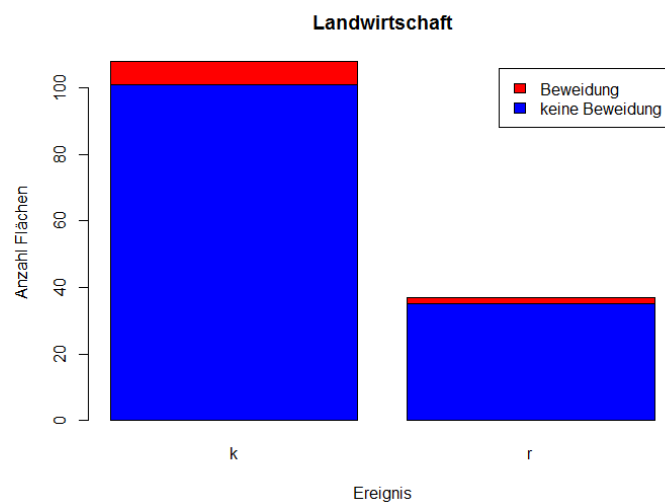


Die Höhen der Topographietypen sind sehr unterschiedlich (Abb. 37). Felswände weisen eine durchschnittliche Grösse von über 2.5 Metern auf. Stufen, Steine und Vegetationsobjekte erreichen ein Meter Höhe, wobei die restlichen Kategorien durchschnittlich weniger als ein Meter gross im Untersuchungsgebiet vorzufinden sind.

**Abb. 37:** Mittlere Höhe der einzelnen Topographiekategorien. Bemerkung: Die Topographiekategorie „keine bedeutenden Topographie“ wurde ausgeschlossen, da die Werte folglich 0 sind.

## Landwirtschaftliche Nutzung

Klar abzulesen aus Abb.38 ist, dass das Untersuchungsgebiet kaum noch landwirtschaftlich genutzt wird. Insgesamt liegen neun Flächen mit Beweidung vor, wovon acht in Kontrollflächen und eine in einem Lawinengebiet vorzufinden sind. Eine statistische Auswertung muss daher mit Vorsicht angesehen werden ( $p=0.82$ ).



**Abb. 38:** Absolute Anzahl beweidete sowie landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen, aufgegliedert nach Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts.

## Überblick der errechneten P-Werte aus der univariate Analyse

**Tab. 2:** Zusammenzug der errechneten P-Werte mittels generalized linear Model (glm)

\*\*\* Signifikanz auf dem 0.1% Niveau, \*\* Signifikanz auf dem 1% Niveau \*: Signifikanz auf dem 5% Niveau

Variable	P-Wert	Signifikant
Hangneigung	0.049	*
Exposition	0.92	
Höhe	0.85	
Nässe	0.036	*
Hindernis	0.0009	***
Abstand zum Hindernis	0.001	**
Höhe Hindernis	0.13	
Vegetation	0.96-1	
VEG_GRAS	0.034	*
VEG_ZWERG	0.009	**
VEG_WALD	0.98	
Höhe Vegetation	0.11	
Topographie	0.18-0.99	
TOP_RUTSCH	0.003	**
TOP_FELS	0.32	
TOP_STUFEN	0.1	
Höhe Topographie	0.16	
Landwirtschaft	0.82	

Wird ein Klassifikationsbaum mit allen Eingangsvariablen der Tab. 2 errechnet, zeigt sich überraschend dasselbe Resultat wie der Klassifikationsbaum des Hindernisses mit dessen Abstand (Abb.23). Werden nur die Variablen, welche in der univariaten Analyse als signifikant beschrieben wurden (Hangneigung, Nässe, Hindernis, Abstand des Hindernisses, VEG\_GRAS, VEG\_ZWERG, TOP\_RUTSCH) untersucht, resultiert dasselbe Muster.

## Multivariate Analyse

In einem ersten Model 1 sind alle sinnvollen Eingangsvariablen durch eine „stepwise model selection“ aufgrund ihrer Signifikanz selektioniert worden. Die Eingangsvariablen sind folgende: Hangneigung, Exposition, Höhe über Meer, Nässe, Abstand Hindernis, Höhe Hindernis, landwirtschaftliche Nutzung, Vegetationstyp Gras, Vegetationstyp niederliegende Zwergsträucher, Vegetationstyp Wald, Topographie Rutschanriss, Topographie Felswände und Steine sowie die Topographie der Stufen. Als wichtige, signifikante Variablen wurden Hangneigung, Nässe, Abstand und Höhe des Hindernis, landwirtschaftliche Nutzung, Vegetationstyp Gras, Vegetationstyp niederliegende Zwergsträucher und der Vegetationstyp Wald von der „stepwise model selection“ im R dem Model beibehalten. Wobei die Vegetation Wald, welche den höchsten P-Wert in der Selektion aufzeigt, für das Model2 zusätzlich selektiert wurde. Zur klaren Übersicht dient die Tabelle 3 welche zusätzlich die P- Werte enthält. Das Model 2 wird durch den Befehl anova im R getestet. Anova testet, ob sich das selektierte Model 2 signifikant von Model 1 unterscheidet. Für die Auswertung darf sich Model 2 nicht signifikant unterscheiden, was das Resultat von anova auch bestätigt mit einem P-Wert von 0.412.

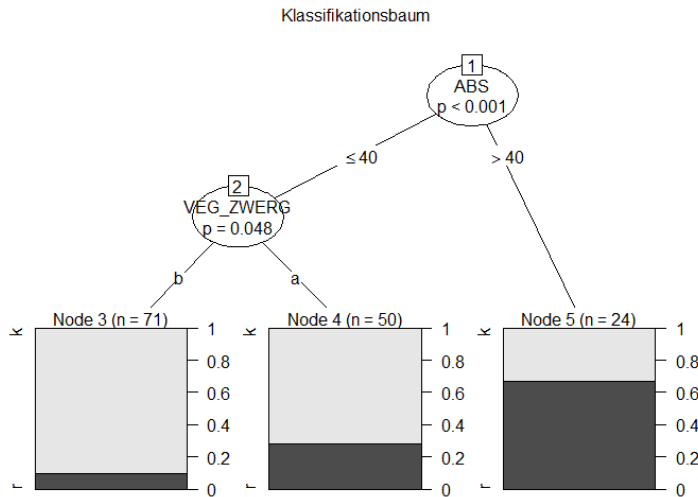
**Tab. 3:** Errechnung der Signifikanzwerte von selektiertem Model 2

\*\*\* Signifikanz auf dem 0.1% Niveau, \*\* Signifikanz auf dem 1% Niveau

Variable	P-Wert	Signifikanz
Hangneigung	0.0048	**
Nässe	0.0062	**
Landwirtschaft	0.06	
Abstand zum Hindernis	0.0062	**
Höhe des Hindernis	0.07	
VEG_GRAS	0.0002	***
VEG_ZWERG	0.0003	***

Wird ein Klassifikationsbaum mit den in der multivariate Analyse signifikanten Variablen (Hangneigung, Nässe, Abstand des Hindernisses, VEG\_GRA, VEG\_ZWERG) erstellt, zeigt sich Folgendes (Abb. 39). Als wichtigste Variable gibt diese Methode den Abstand des Hindernisses bekannt. Ist dieser grösser als 40 Meter, ist der Anteil der Ereignisflächen zweidrittel (Node5). Liegt ein Hindernis in der Entfernung von bis zu 40 Metern, ist entscheidend, ob der Vegetationstyp der niederliegenden Zwergsträucher die Fläche bedeckt. Ist dies der Fall (Node 4), ist auf 28% der Flächen Gleitschnee aktiv. Nur ein geringer Anteil von knapp 10% der Gebiete mit einem Hindernis in naher Entfernung und einem anderen Vegetationstyp als niederliegende Zwergsträucher gel-

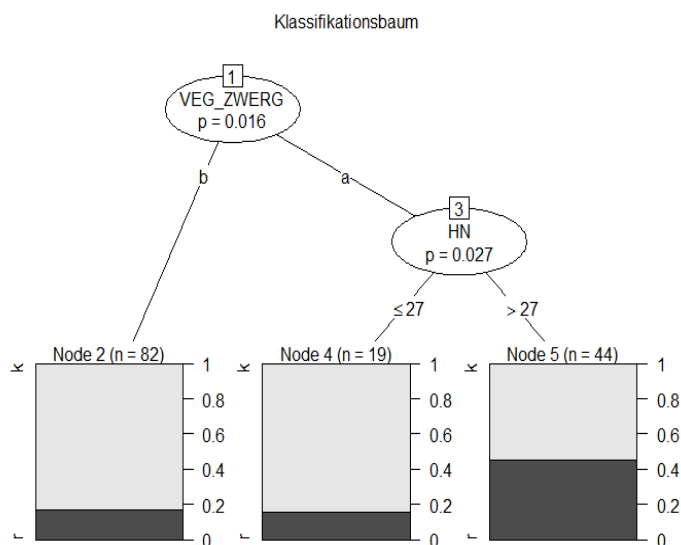
ten als Ereignisflächen. Interessanterweise zeigt sich exakt dasselbe Muster, wenn nur der Abstand des Hindernisses und die Vegetation der niederliegenden Zwergsträucher als Eingangsvariablen gewählt werden.



**Abb. 39:** Klassifikationsbaum mit allen im Model 2 als signifikant selektierten Variablen. ABS= Abstand zum Hindernis [m]; VEG\_ZWERG: Niederliegende Zwergsträucher: a= vorhanden, b= nicht vorhanden; schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k)

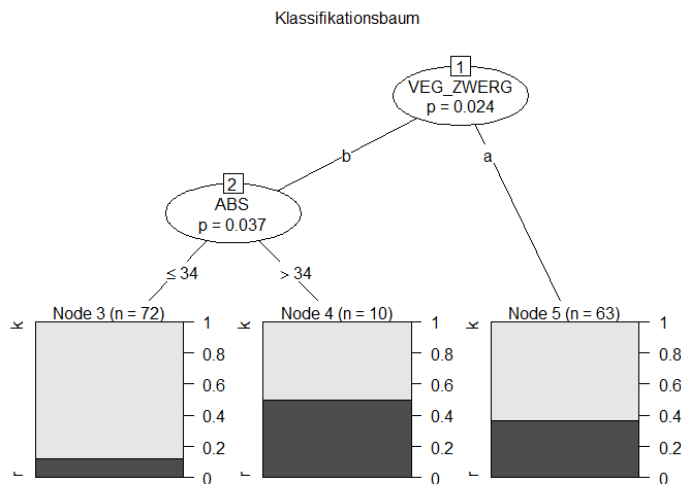
### Weitere kombinierte Analysen

Als Eingangsvariablen sind die Vegetation der niederliegenden Zwergsträucher sowie die Hangneigung gewählt worden. Als bedeutendstes Resultat des Klassifikationsbaumes in Abbildung 40 gilt die Säule in Node 5. Wachsen niederliegende Zwergsträucher im Gebiet mit einer Hangneigung steiler als 27°, ist auf knapp der Hälfte der Flächen Gleitschnee aktiv. Sind niederliegende Zwergsträucher vorhanden jedoch die Hangneigung maximal 27° (Node 4) sind Ereignisflächen ungefähr gleich häufig, wie wenn keine niederliegende Zwergsträucher wachsen auf Gebieten verschiedenster Hangneigung (Node 2).



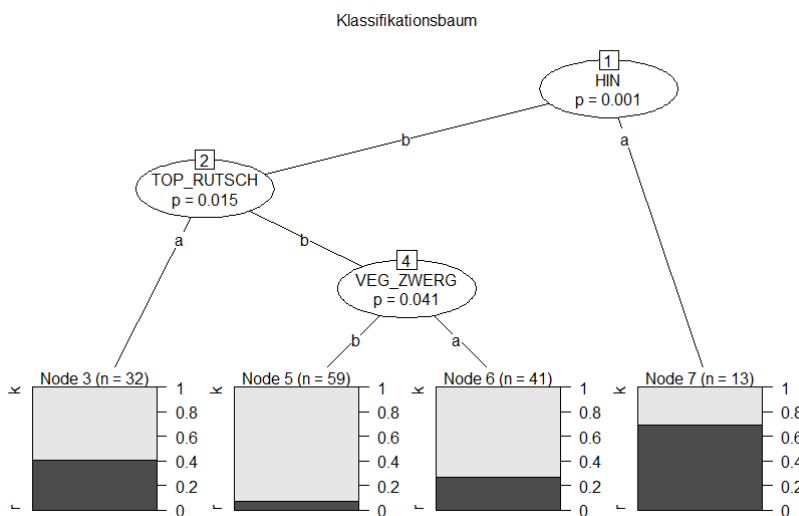
**Abb. 40:** Klassifikationsbaum der Variablen Hangneigung und niederliegende Zwergsträucher. VEG\_ZWERG: Niederliegende Zwergsträucher: a= vorhanden, b= nicht vorhanden; HN= Hangneigung [°];schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k)

Der Klassifikationsbaum in Abb. 41 zeigt einerseits den Einfluss des Vegetationstyps der niederliegenden Zwergsträucher, andererseits die hohe Bedeutung des Hindernisses bzw. dessen Abstand (ABS). Wachsen niederliegende Zwergsträucher (Abb. 41, Node 5), dann ist Gleitschnee beinahe so aktiv, wie wenn keine niederliegende Zwergsträucher wachsen und ein Hindernis in weiter Entfernung von über 34 Meter liegt (Abb. 41, Node 4).



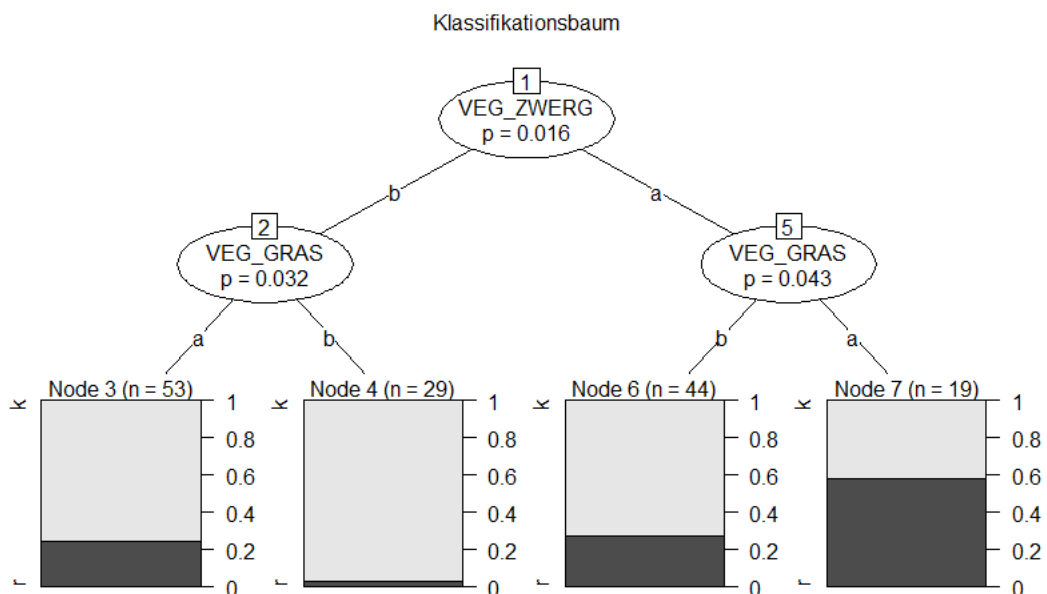
**Abb. 41:** Klassifikationsbaum der Variablen Abstand des Hindernisses (ABS), Vegetation mit niederliegenden Zwergsträucher (VEG\_ZWERG) a=vorhanden, b= nicht vorhanden; schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k)

Im Zusammenhang mit den drei in Abbildung 42 eingekreisten Variablen stellt sich das Vorkommen eines Hindernisses, gefolgt von der Topographie Rutschzonen sowie die Vegetation der niederliegenden Zwergsträucher als wichtigste Variable in den Vordergrund. Das Resultat der Unterteilung, ob ein Hindernis vorhanden ist oder nicht zeigt, dass in knapp 70% der Flächen ohne Hindernis (Node 7) Gleitschneeaktivität auftritt. Liegt ein Hindernis vor, wird weiter analysiert, ob der Boden Rutschzonen (TOP\_RUTSCH) beinhaltet. Falls ja (Node3), sind immer noch 40% Ereignisflächen. Schneegleiten ist weit eingeschränkt, wenn ein Hindernis vorhanden ist, das Terrain nicht erodiert ist und keine niederliegende Zwergsträucher wachsen (Node 5).



**Abb. 42:** Klassifikationsbaum der Variablen Hindernis (HIN: a= kein Hindernis, b= Hindernis vorhanden), Topographie mit Rutschnarisse (TOP\_RUTSCH: a= vorhanden, b= nicht vorhanden) und Vegetation niederliegende Zwergsträucher (VEG\_ZWERG: a= vorhanden, b= nicht vorhanden); schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k)

Wie sich aus der Vegetationsanalyse herausgestellt hat, beeinflussen die niederliegenden Zwergsträucher und die Grasgemeinschaften die Gleitschneeaktivität am meisten. Interessant auszuwerten ist, wie sich die zwei Vegetationskategorien in einer kombinierten Abfrage verhalten, also ob sich mehr Gleitschnee ereignet, wenn beide Vegetationstypen in denselben Flächen auftreten. Für diese Auswertung ist für die Variablenkategorien Vegetation mit Gras (VEG\_GRAS), Vegetation ohne Gras (VEG\_O\_GRAS), Vegetation mit niederliegende Zwergsträuchern (VEG\_ZWERG) und Vegetation ohne niederliegende Zwergsträucher (VEG\_O\_ZWERG) ein Klassifikationsbaum (Abb. 43) entworfen worden. Dabei steht ein „a“ für Vegetation vorhanden bzw. ein „b“ für Vegetationstyp nicht vorhanden. Das Vorkommen von niederliegenden Zwergsträucher kombiniert mit Vegetationstyp Gras ist in Node 7 dargestellt. Anhand der schwarzen Fläche für die Ereignisse ist zu erkennen, dass dessen relativer Anteil im Vergleich zu den anderen Nodes am grössten ausfällt. Auf knapp 60% der Gebiete mit diesen zwei Vegetationstypen ist Gleitschnee aktiv. Konträr zu diesem Resultat zeigt sich Node 4. Wächst im Gebiet weder eine Vegetation mit niederliegende Zwergsträucher noch mit Gras, ist der relative Anteil der Kontrollflächen im Vergleich zum Anteil der Ereignisse mit 96% stark dominant. Wachsen nur niederliegende Zwergsträucher (Node 6), sind Ereignisflächen mit weniger als 30% vertreten. Ein ähnliches Resultat zeigt sich für Flächen mit Grasvegetation (Node 3).

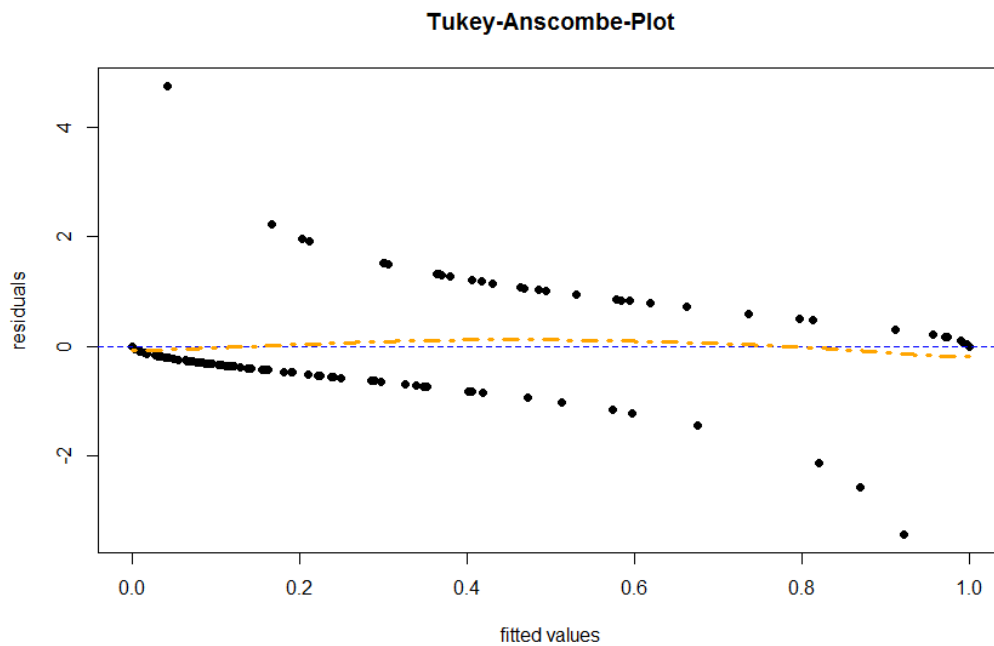


**Abb. 43:** Klassifikationsbaum der Variablen der Vegetation niederliegenden Zwergsträucher (VEG\_ZWERG: a= vorhanden, b= nicht vorhanden) und mit Gras (VEG\_GRAS: a= vorhanden, b= nicht vorhanden). schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k)

## Testung der Modelle

### Multivariates Regressionsmodell

Das Modell 2 beinhaltet die aus der multivariaten Analyse als signifikant selektierten Variablen (HN + NAE+ ABS + VEG\_GRAS + VEG\_ZWER). Dieses Modell ist mittels eines Tukey-Anscombe-Plots getestet worden. Der Plot in Abbildung 44 zeigt eine leicht gebogene Linie (Loess-Glätter: gelb). Diese Abweichung von der Nulllinie ist jedoch minimal und das Modell kann als geeignet angesehen werden.

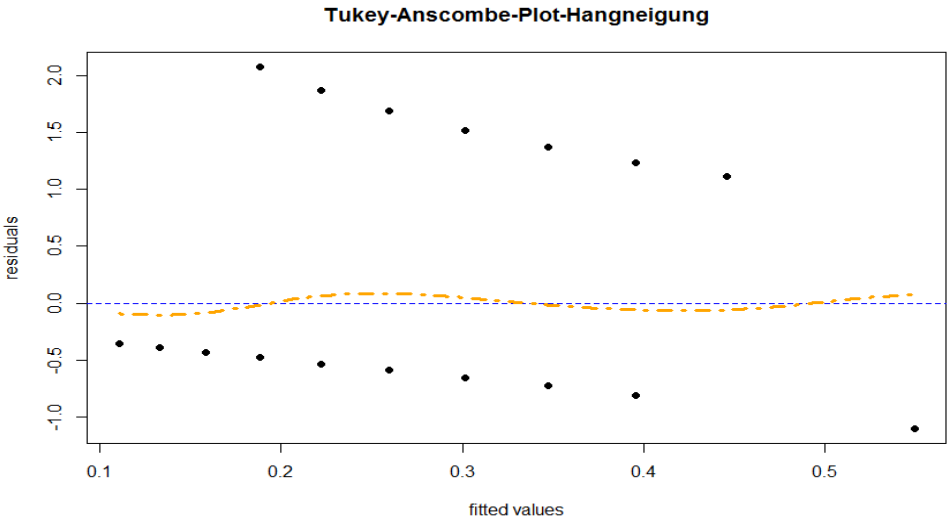
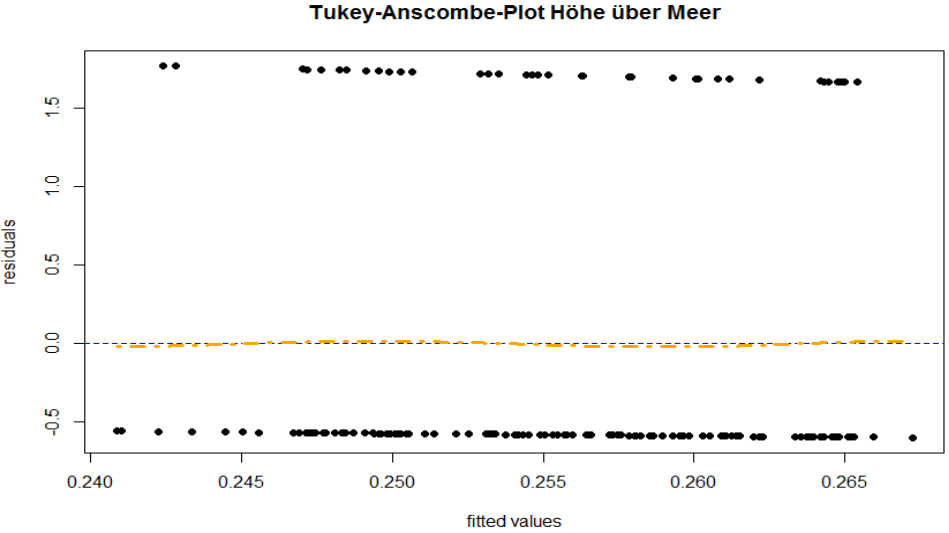


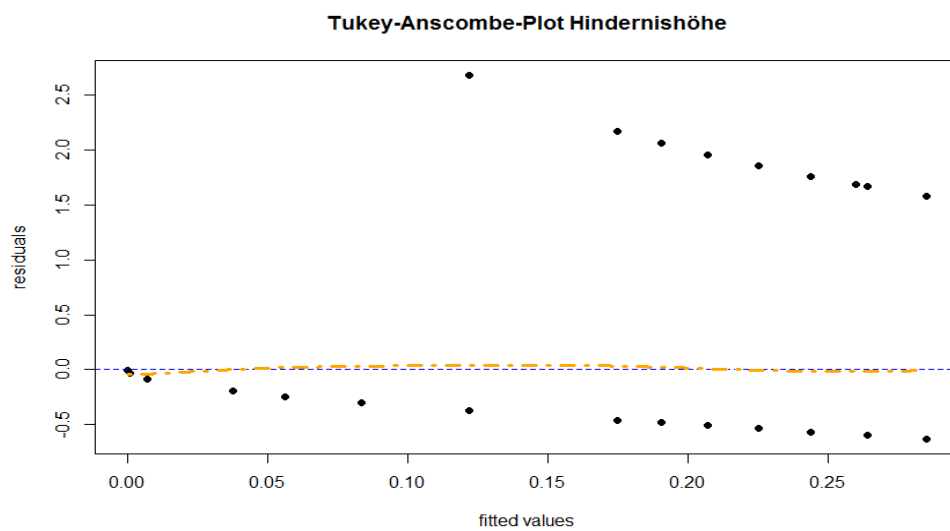
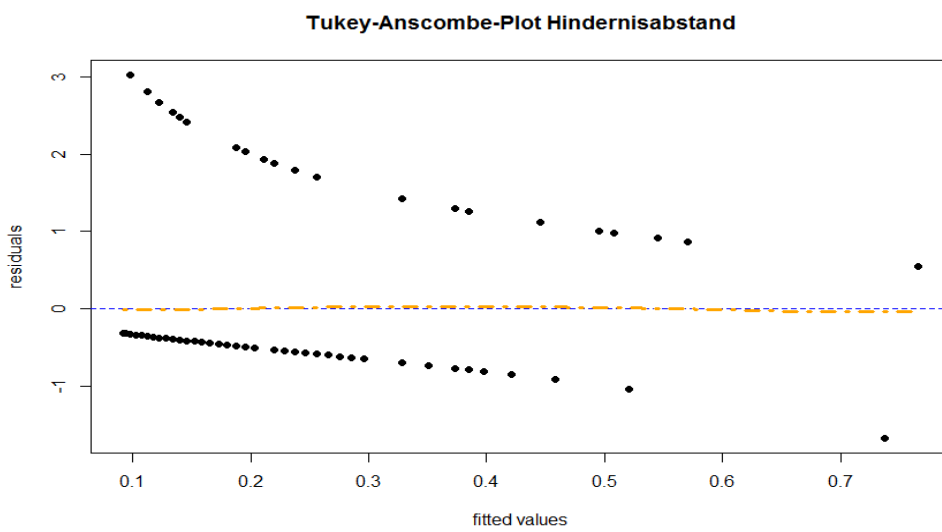
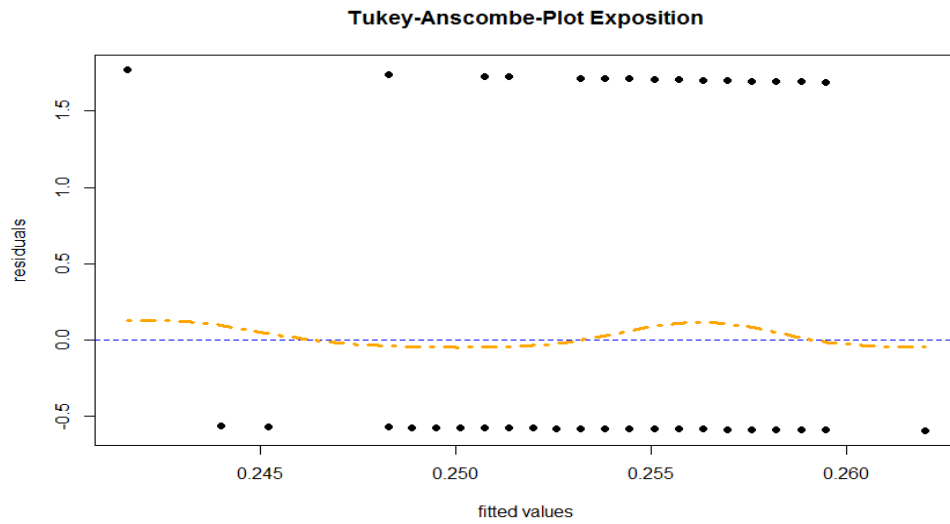
**Abb. 44:** Tukey- Anscombe- Plot der multivariaten Analyse des Modell 2 mit Loess- Glätter.

### Univariates Regressionsmodell

Die kontinuierlichen Variablen der univariaten Analysen sind die Höhe über Meer, Hangneigung, Exposition, Hindernishöhe und der Hindernisabstand. Diese sind auch mittels eines Tukey- Anscombe- Plot auf ihre Eignung getestet worden und in der Abbildung 45 graphisch dargestellt. Der Loess-Glätter der Variable der Höhenlage liegt, so gut wie keine andere, nahe an der Nulllinie. Daraus wird gefolgert, dass das Modell geeignet ist. Werden die Variablen der Hangneigung und Exposition analysiert, zeigen diese eine leichte Struktur auf. Diese Ergebnisse sind jedoch für beide Modelle unwesentlich. In der Plotaufzeichnung der Variablen Hindernishöhe und Hindernisabstand approximiert der Loess-Glätter sehr gut die Nulllinie. Diese Graphiken sind mit den selektierten Daten vorgenommen worden, wobei nur diese Flächen mit einem Hindernis für die Testung der Modelle berücksichtigt wurden. Anschliessend ist ein gleicher Test mit Einbezug aller Daten vorgenommen worden. Wie im Kapitel der Methode erklärt wurde, sind für entspre-

chende Flächen ohne Hindernis bei der Variable des Hindernisabstandes eine Distanz von 100 Meter gewählt und eine Höhe von 0 Meter. Der Tukey- Anscombe- Plot dieser Analyse zeigt eine leicht gebogene Struktur auf. Obwohl dieser Effekt nicht gravierend ist, wurde wenn immer möglich mit der selektierten Datenmenge gerechnet. Für die multivariate Analyse konnte diese Annäherung der Datenwerte aber nicht umgangen werden (vgl. Kapitel 4.3).





**Abb. 45:** Tukey- Anscombe- Plot mit Loess-Glätter für die univariaten Analysen mit den kontinuierlichen Variablen Höhe über Meer, Hangneigung, Exposition, Hindernisabstand und Hindernishöhe.

### **Testung kategoriale Variablen**

Wie bereits im Kapitel 4.3 der Methode zur Datenanalyse beschrieben, eignet sich die Testung der kategorialen Variablen mittels eines Tukey- Anscombe- Plot nicht. Verschiedene Graphiken sind dargestellt worden, unter anderem mit den Variablen der Vegetation, die Variable der niederliegenden Zwergsträucher, des Hindernis oder der Nässe. Der Plot der mehrstufigen kategorialen Variable der Vegetation zeigt eine stark gebogene Struktur. Die zweistufige Variable der niederliegenden Zwergsträucher zeigt eine Gerade, welche jedoch entfernt von der Nulllinie liegt. Weder für die Graphik der zweistufigen Variablen des Hindernisses noch für die Nässe ist die Struktur aussagekräftig. Für dieses Modell ist aufgrund der geringen Datenmenge ein Test mittels eines Tukey- Anscombe Plot ungeeignet.

## 6 Diskussion

### Hangneigung

In der Literatur wird erläutert, dass die grösste Gleitdistanz bei einer Hangneigung von 35°-40° vorzufinden ist (Newesely et al., 2000). Die Untersuchungen am Davoser Dorfberg bestätigen diese Aussage mit einem Mittelwert der Hangneigung in gleitschneeaktiven Gebieten von 36°. Während der Datenaufnahme ist beobachtet worden, dass oft steile Gebiete mit nicht überwachsenen Steinfelsen gekennzeichnet sind. Somit kann der Schnee möglicherweise keine Schneedecke bilden, wodurch Ereignisse in steileren Lagen seltener auftreten. Der Boxplot (Abb. 17) zeigt auf, dass Gleitschneeaktivität bei einer Hangneigung von 27°- 55° auftritt. Interessant ist die multivariate Analyse der Hangneigung mit dem Vegetationstyp der niederliegenden Zwergsträucher (Abb. 40). Ist die Hangneigung im Untersuchungsgebiet unter 27° treten trotz gleitschneefördernde Vegetation deutlich weniger Ereignisse (3 vers. 20 Flächen) auf.

### Exposition

Da das Untersuchungsgebiet südöstlich ausgerichtet ist, deckt es nur ein kleines Spektrum möglicher Expositionslagen ab. Somit ist ein Vergleich zwischen Ereignisflächen und Kontrollflächen nur begrenzt aussagekräftig. Dass Gleitschneeaktivität in südost- bis südwestexponierter Lage auftritt (Newesely et al., 2000), kann durch die Südostausrichtung der Gebiete in der Analyse bestätigt werden.

### Höhe über Meer

Dass sich die Höhenlage der Ereignisflächen von den Kontrollflächen im Untersuchungsgebiet kaum unterscheidet (Abb. 19), ist von der Wahl der Kontrollflächen stark beeinflusst. Diese sind im Umkreis der Ereignisflächen aufgenommen wurden, folglich sind die tiefst sowie höchst gelegenen Flächen zur Kontrolle vorbestimmt. Die Änderung der Höhenlage geht auch mit einer Vegetationsveränderung einher. Im Untersuchungsgebiet ist diese zwar deutlich erkannt worden, da jedoch Kontrollflächen auf gleicher Höhenstufe protokolliert wurden, ist eine Aussage über vermehrtes Gleiten in bestimmter Höhenlage nicht möglich. Die Höhenlage ist indirekt ein Mass für die Temperatur (McClung et al., 2006). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über einen Höhenunterschied von 550 Meter. Die Streuung der Daten kann dazu dienen, die Höhenlage herauszufinden, in welcher Gleitschnee ausgeprägt aktiv ist. In dieser Untersuchung treten Gleitschneeereignisse vermehrt eher in tieferen Lagen (1880-2080) auf. Diese Feststellung ist nicht zur Verallgemeinerung geeignet, da das Untersuchungsgebiet des Davoser Dorfbergs sehr unterschiedliche Strukturen aufweist und für eine allgemein gültige Aussage mehr Daten über ein Gebiet mit grösserer Höhenausdehnung notwendig sind. Sie unterstützt die Resultate von Newesly (2000), welcher ein vermehrtes Schneegleiten ab einer Höhe von 1900 Meter über Meer doku-

mentiert. Messungen der Boden- und Schneetemperatur während des Winters wären eine Möglichkeit, den Zusammenhang von Gleitschneeaktivität mit der Höhe zu untersuchen.

### **Nässe**

In etlichen Untersuchungen ist aufgezeigt worden, dass eine Vernässung des Untergrundes die Gleitschneeaktivität fördert (Newesely et al., 2000; McClung et al., 2006). Die Datenerfassung im Untersuchungsgebiet ist Ende September bei gutem Wetter vorgenommen worden. Nur wenige Flächen mit Nässe sind dokumentiert worden, was möglicherweise mit den eher trockenen Bedingungen im Herbst zusammenhängt. Die Resultate zeigen, dass über 10% der Ereignisflächen Nässe aufzeigen, wobei der Anteil in den Kontrollflächen unter 2% liegt. Während der Datenaufnahme ist aufgefallen, dass die drei grössten Lawinenereignisse (siehe Karte Abb. 8; 9, Seite 22; 24) einen vernässten Untergrund beinhalten. Um den Einfluss eines vernässten Untergrundes auf Gleitschnee weiter zu erforschen, ist zu empfehlen, die Datenaufnahme kurz vor dem ersten Schneefall durchzuführen. Mittels Feuchtigkeitsmessgeräten kann der Grad der Vernässung qualitativ bestimmt werden, welcher bezüglich Gleitschnee analysiert werden könnte.

### **Hindernis**

Beinhaltet die Fläche kein Hindernis, tritt Gleitschnee vermehrt auf. Der Abstand von Hindernissen zur Auslöserzone sowie dessen Höhe gehen als wichtige Faktoren aus dieser Studie hervor. Frühere Untersuchungen (Newesely et al., 2000; Höller et al., 2008) stellten dies bereits fest und die Resultate dieser Fallstudie bestärken diese Aussage. Liegt ein Hindernis in einer Ereigniszone des Untersuchungsgebiets, so ist dies in weiterer Entfernung (durchschnittlich 8 Meter) als in Kontrollflächen zu finden. Ein Hindernis mit einem Abstand von bis zu 40 Metern bewirkt einen signifikanten Einfluss auf die Gleitschneeaktivität am Davoser Dorfberg. In der Analyse der Hindernishöhe resultiert, dass dessen Mittelwert bei Kontrollflächen (2.3 Meter) über einen halben Meter höher ist im Vergleich der Ereignisflächen.

Anfangs der Untersuchung ist die Frage gestellt worden, ob Hindernisse dazu beitragen, dass Lawinen trotz anfälliger Vegetation verhindert werden. Zur Beantwortung dieser Frage dienen die Klassifikationsbäume der Abbildungen 39 und 42. Das Fehlen eines Hindernisses hat im Untersuchungsgebiet gezeigt, dass auf knapp 70% der Flächen Gleitschnee aktiv ist. Stabilisiert ein Hindernis das Gebiet, so sind auf Topographien mit Rutschzonen (40%) oder Vegetationsuntergrund der niederliegenden Zwergsträucher (25%) deutlich weniger Flächen von Gleitschnee betroffen (Abb. 42). Weiter hat diese Untersuchung gezeigt, dass wenn ein Hindernis in weiter Entfernung (über 40 Meter) vorzufinden ist, ohne spezielle Berücksichtigung anderer Standortfaktoren, über 60% aller Flächen Ereignisflächen sind. Wachsen niederliegende Zwergsträucher in einem Ereignisgebiet mit einem Hindernisabstand näher als 40 Meter, ist nur auf nahezu 30% der Flächen Gleitschnee aktiv (Abb. 39). Diese Feststellungen sind Hinweise, dass Hindernisse

einen markanten gleitschneehemmenden Einfluss auf ein gleitschneegefährdetes Gebiet haben. In weiteren Studien könnte die Art des Hindernisses, dessen Abstand sowie Höhe genauer untersucht werden. Mit dessen Erkenntnissen könnte ein wesentlicher Beitrag zum Umsetzen von wirkungsvollen Schutzmassnahmen in gleitschneegefährdeten Gebieten geleistet werden.

### **Vegetation**

Wie erwartet, wachsen Bäume ausschliesslich auf Kontrollflächen. Deren Schutzwirkung ist schon länger bekannt (Munter, 1991; Mössmer et al.; 1994, Bebi et al, 2009; Höller et al., 2009; Zischg, 2009). Die Höhe dieser Vegetationstypen sowie der stark lignifizierten Zwergsträucher hat möglicherweise einen positiven Einfluss auf die Stabilität der Schneedecke, zeigt doch die Abbildung 31 dominante Höhen bei den genannten Vegetationsklassen. Bäume sowie stark lignifizierte Sträucher zeigen mit zunehmender Höhe einen stabilisierenden Einfluss auf die Schneedecke. Als einer der dominantesten Vegetationstypen in Lawinen- wie auch in Anrissflächen stellt sich die Klasse der niederliegenden Zwergsträucher heraus. Nicht überraschend beinhalten über 60% der Ereignisflächen niederliegende Zwergsträucher wie Heidelbeer- und Krähenbeergemeinschaften. Diese Resultate unterstützen die Erkenntnisse von früheren Untersuchungen (Newesely et al.2000; Tasser et al., 2001). Eine Vermutung ist, dass mit zunehmendem Höhenwachstum der niederliegenden Zwergsträucher der Einfluss auf Ereignisse gefördert wird. Dieser Zusammenhang ist nicht weiter untersucht worden, wobei es sich empfiehlt, in einem nächsten Experiment unterschiedliche Bestände mit ihrerseits bestenfalls einheitlicher Höhe der genannten Vegetation zu untersuchen. So könnte der mögliche Einfluss der Höhen zwischen den verschiedenen Beständen festgestellt werden. Ebenfalls erwähnenswert ist der Einfluss der subalpinen Magerwiesen auf Ereignisflächen. Werden alle Grastypen (subalpine Magerwiese, Fettwiese, Reitgraswiese) vereint, zeigt sich auf 65% der Ereignisflächen eine Grasvegetation, wobei dieser Anteil auf Kontrollflächen unter 45% liegt. Dies bestätigt die Hypothese und verdeutlicht, dass Grasgemeinschaften einen fördernden Einfluss auf Gleitschnee haben (de Quervain, 1979; Brückner, 1981; Newesely et al., 2000; Tasser et al., 2001).

Auf Flächen, die sowohl den Vegetationstyp der niederliegenden Zwergsträucher wie auch Grasgemeinschaften beinhalten, besteht offenbar eine erhöhte Gefährdung (knapp 60%) von Gleitschneeanrissen (Abb. 43). Im umgekehrten Fall, wo die Fläche weder niederliegende Zwergsträucher noch Grasvegetation beinhaltet, ist der Anteil der Ereignisflächen unter 5%. Dieses deutliche Resultat weist darauf hin, dass die Vegetationstypen der niederliegenden Zwergsträucher sowie der Grasgemeinschaften einen markant fördernden Einfluss haben auf die Gleitschneeaktivität. Für die Praxis kann diese Erkenntnis dazu beitragen, diese Vegetationszonen beispielsweise mit anderen Vegetationstypen (Wald, Laubbäume) zu durchsetzen oder aufzuforsten und dadurch die Sukzession zu beschleunigen.

## Topographie

Die verschiedenen Arten von Bodenrauigkeit können unterschiedlichen Einfluss auf die Gleitschneeaktivität ausüben. Abhängig von ihrer Beschaffenheit sowie ihrer Grösse relativ zur Schneedecke werden Ereignisse gefördert oder gehemmt (de Quervain, 1979; Munter, 1991; Newesely et al., 2000; McClung et al., 2006). Die Analyse verdeutlicht, dass ein erodierter Boden sowie Felswände im Vergleich zu den Kontrollflächen vermehrt in Ereignisflächen zu beobachten sind (vgl. Abb. 33). Rutschanrisse sind auf über 40% der Ereignisflächen vertreten. Wie Tasser et al. (2005) beschreibt, ist dieses Phänomen möglicherweise gegenseitig gekoppelt. Einerseits verursachen Gleitschneeereignisse vermehrt erodierte Bodenzonen. Andererseits können Rutschanrisse einen unstabilen Untergrund darstellen, wodurch Ereignisse gefördert werden. Jedoch ist es nicht ausgeschlossen, dass durch ihre gestaltende Bodenrauigkeit die Schneedecke stabilisiert wird. Den Einfluss der erodierten Bodenoberfläche benötigt spezifischere Untersuchung, um eine klare Aussage im Zusammenhang mit Gleitschneeaktivität zu formulieren. Felswände sowie markante alleinstehende Steine zeigen sich mit knapp einem Drittel auf gleitschneeaktiven Flächen als weitere wichtige Topographietypen. Ragt die Unebenheit aus der Schneedecke, wird der Energiehaushalt der Schneedecke beeinträchtigt (Zischg et al., 2011). Folglich muss deren Höhe relativ zur Schneehöhe berücksichtigt werden. Die durchschnittliche Höhe der Felswände liegt bei knapp drei Meter, wobei sie bei einzelnen Steinen ein Meter beträgt. Werden diese Feststellungen mit der mittleren Schneehöhe von 1.85 Meter (Dreier, 2013) verglichen, zeigt sich, dass viele der Felswände aus der Schneedecke herausragen. Im Allgemeinen ist eine Aussage über den Zusammenhang der Topographiehöhe und Gleitschneeaktivität nur im Bezug auf die lokal vorliegende Schneehöhe aussagekräftig. Dies ist in der Arbeit nicht weiter untersucht worden. Auch ist die Datenmenge eher klein und weitere Untersuchungen von Bedeutung.

Ebenfalls auffällig zeigt sich die vereinte Variable aller Stufentopographien mit 30% auf Ereignisflächen. Stufen bilden eine Bodenrauigkeit, wodurch für die Schneedecke mögliche Abstützpunkte geschaffen werden. Die durchschnittliche Höhe der vereinten Stufenvariablen liegt unter einem Meter. Im Bezug auf die mittlere Schneehöhe wird die Mehrheit der Stufen vollkommen mit Schnee überdeckt. Dies bedeutet, dass trotz einer Bodenrauigkeit eine einheitliche, geschlossene Schneedecke ausgebildet werden kann. Somit haben Unebenheiten durch Stufen möglicherweise einen fördernden Einfluss auf Gleitschnee. Zudem können die geringen Bodenunebenheiten ein durch andere Faktoren (beispielsweise die Vegetation oder eine steile Hangneigung) ausgelöstes Gleitschneeereignis kaum aufhalten. Überraschend zeigt sich, dass Flächen mit keiner besonderen Topographie sowohl in Kontroll- wie auch in Rissflächen auftreten, jedoch in Lawinenzonen fehlen (vgl. Abb. 33). Möglicherweise spielen andere Standortfaktoren in diesen Zonen eine wichtigere Rolle.

In dieser Fallstudie hat sich gezeigt, dass einzelne Bäume im Gebiet eine wichtige Topographieklasse in Anrissflächen sind, wohingegen sie in Lawinenzonen nicht dokumentiert wurden. Möglicherweise können schon einzelne grössere Erhebungen die Schneedecke beeinflussen, damit das Ereignen von Gleitschneelawinen eingeschränkt wird. Diese Erkenntnis bietet eine interessante Grundlage für spezifischere Untersuchungen. Für Schutzmassnahmen könnte daraus gelernt werden, dass schon ein geringer Eingriff mittels vereinzelter Aufforstung Gebiete von Gleitschneeereignissen schützen kann.

Zusammenfassend der Aussagen dieser Fallstudie kann für die Praxis mitgenommen werden, dass markante Bodenunebenheiten die Gleitschneeaktivität eingrenzen. Dementgegen fördern geringe Bodenunebenheiten möglicherweise das Ereignen von Gleitschnee. Die Datenmenge ist jedoch eher klein und um eine Aussage über die Grenzhöhe der Topographie festzulegen, sind weitere Studien nötig, die Stellen mit Bodenunebenheiten während der Wintermonate im Einbezug der lokal vorliegenden Schneehöhe untersuchen.

### **Landwirtschaft**

Der Einfluss der agronomischen Gebietsnutzung ist in vorgängigen Studien dokumentiert worden (Brücker, 1981; Newesely et al., 2000; Tasser et al., 2005; Zischg et al., 2011). Im Untersuchungsgebiet werden während des Sommers nur noch wenige Flächen beweidet. Es liegen demzufolge wenige Daten zur landwirtschaftlichen Nutzung vor. Die Auswertung der landwirtschaftlichen Nutzung zum Zeitpunkt der Analyse, dient dazu, den Wandel in den letzten 60 Jahren zu verfolgen. Die aktuelle Nutzfläche wird mit der auf der Karte der Landnutzung von 1982 und Nutzungsänderung seit 1950 dokumentierten Daten verglichen. Heutzutage werden landwirtschaftlich genutzte Flächen im Untersuchungsgebiet nur noch beweidet. Diese Gebiete sind auch im Jahr 1982 beweidet worden, wobei sie im Jahr 1950 noch einmal jährlich geschnitten wurden. Eine grosse Fläche des Untersuchungsgebiets ist Mitte des letzten Jahrhunderts agronomisch genutzt worden, sei es durch Mähen oder Beweiden. Diese Flächen erfuhren eine Nutzungsänderung bis zur heutigen totalen Verlassenheit. Extrem steile Hänge sind bereits 1950 als agronomisch nicht genutzt dokumentiert worden. Ob Gleitschneeaktivitäten direkte Folgen der Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung sind, stellt interessante Fragen für weitere Diskussionen. Nach dem Verlassen der einst bewirtschafteten Gebiete durchläuft das Gebiet eine Sukzession. Dieser zeitlich limitierte Effekt der Aufeinanderfolge von Pflanzengemeinschaften (von Gras bis hin zum Wald) kann vorübergehend dazu führen, dass mehr Gleitschneeanrisse zu erwarten sind.

Mit diesen Erkenntnissen erweitert die vorliegende Arbeit die Forschung der Einflussfaktoren auf die Gleitschneeaktivität und bestätigt einige bereits bekannte Faktoren.

## 7 Schlussfolgerung

Einen deutlichen Einfluss, anhand des tiefsten Signifikanzwertes in der univariaten Analyse dieser Arbeit, zeigt der Standortfaktor des Auftretens eines Hindernisses. Liegt dies in einer Entfernung von bis zu 40 Meter von Standpunkt, trägt es selbst bei gleitschneefördernden Geländefaktoren markant zur Gleitschneestabilisation bei. Auch die Topographiestruktur durch einzelne Bäume im Gebiet ist in dieser Fallstudie in Anrissflächen vermehrt anzutreffen, wohingegen sie in Lawinenzonen nicht dokumentiert wurde. Für Schutzmassnahmen könnte daraus gelernt werden, dass schon ein geringer Eingriff mittels vereinzelter Aufforstung oder Schaffung von relevanten Hindernissen Gebiete vor Gleitschneereignissen schützen kann. Dementgegen fördern aufgrund dieser Studie geringe Bodenunebenheiten möglicherweise das Ereignen von Gleitschnee. Ein erodierter Boden sowie Felswände sind in dieser Analyse in Ereignisflächen im Vergleich zu den Kontrollflächen vermehrt zu beobachten.

Die Vegetation beeinflusst die Gleitschneeaktivität in dieser Fallstudie unterschiedlich. Bäume sowie stark lignifizierte Sträucher bilden einen hemmenden Einfluss allerdings zeigen sich Grasgemeinschaften und niederliegende Zwergsträucher als gleitschneefördernd. Wobei in dieser Untersuchung gezeigt wird, dass die Kombination der beiden letzteren die Gleitschneeaktivität markant beeinflusst. Die Untersuchung hat weiter dargelegt, dass die Hangneigung sich im Untersuchungsgebiet mit geringerer Neigung trotz gleitschneefördernder Vegetation deutlich als stabilisierender Standortfaktor zeigt. Diese Erkenntnisse bieten eine Inspiration für Zukunftsmassnahmen. Beispielsweise durch Förderung von Baumgemeinschaften auf einst bewirtschafteten Flächen, auf welchen sich vorerst niederliegende Zwergsträucher etablieren, könnte die Sukzession beschleunigt werden.

Um den verschiedenartigen Einfluss von Standort- und Vegetationsfaktoren auf Gleitschnee besser zu verstehen, empfehlen sich weitere Studien mit mehr Ereignisflächen durchzuführen, welche sich insbesondere auf die Kombination verschiedener Faktoren fokussieren. Des Weiteren sind die Geländeeinflüsse auch mit den während den Wintermonaten herrschenden Verhältnissen kombiniert zu untersuchen. Beispielsweise empfiehlt es sich, die Art und Höhe des Hindernisses sowie Topographie in Bezug auf die Schneehöhe zu messen oder die Bodenvernässung mit den Boden- und Schneetemperaturen kombiniert zu dokumentieren. Auch sind weitere Langzeitstudien notwendig, um die zeitlich entwickelnden Auswirkungen der Landwirtschaftsänderung und die damit verbundene Sukzession der Vegetation auf Gleitschneeaktivität zu verfolgen. Mit dessen Erkenntnissen könnte ein wesentlicher Beitrag zum Umsetzen von wirkungsvollen Schutzmassnahmen in gleitschneegefährdeten Gebieten geleistet werden.

## 8 Literaturverzeichnis

### Bücher & Papers

- BUEHLMANN, P. & MAECHLER, M. (2008): Computational Statistics. Seminar für Statistik ETH Zürich.
- BEBI, P., KULAKOWSKI, D., RIXEN, CH (2009): Snow avalanche disturbances in forest ecosystems- State of research and implications for management, Forest Ecology and Management 257 (2009) 1883-1892.
- BILL, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme, 5. Völlig neu bearbeitete Auflage, Wichmann Verlag, Berlin.
- BRUECKER, W. J. (1981): Vegetationsuntersuchung in Lawinenablagerungsgebieten des Kantons Uri; Bericht der Naturforschenden Gesellschaft Uri 9. Heft; Juris Druck+ Verlag Zürich:7-12, 238-249.
- DE QUERVAIN, M. (1979): Schneekunde, Lawinenkunde, Lawinenschutz-Einführungsvorlesung Eidg. Tech. Hochschule Zürich; Buchbinderei Imhof Zürich: 105-107, 136-139.
- DREIER, L. (2012): WTW Fotoauswertung; Präsentation der Auswertung des Fotoarchives der automatischen Kameras, Davos/ Dorfberg und St. Antönien/ Chuenihorn.
- DREIER, L. (2013): Einfluss von Wetter und Gelände auf Gleitschneelawinen; Masterarbeit im Master- Studiengang Physische Geographie; Friedrich-Alexander- Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Geographie.
- FOWLER, J., COHEN, L., JARVIS, PH. (2000): Practical Statistics for Field Biology, Second Edition, John Wiley & Sons, Chichester.
- GRAND, H.R. & ZUPANCIC, M. (1965): Snow gliding and avalanches. Federal institute for snow and avalanche research Weissfluhjoch/ Davos. Extract of publication no. 69 of the I.A.S.H; International symposium of scientific aspects of snow and ice avalanches; PP. 230-242.
- HARVEY, S., RHYNER, H.R., SCHWEIZER, J. (2012): Lawinenkunde-Praxiswissen für Einsteiger und Profis zu Gefahren, Risiken und Strategien; Bruckmann Verlag GmbH München: 28-43, 60-67.

- HENNERMANN, K. (2006): Kartographie und GIS- eine Einführung, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt.
- HOELLER, P., FROMM, R., LEITINGER, G. (2009): Snow forces on forest plant due to creep and glide, *Forest Ecology and Management* 257 (2009) 546-552.
- McCLUNG, D. & SCHAERER P. (2006): The avalanche handbook; 3rd edition, the mountaineers books: 14-22, 44-67, 73-79, 114-122.
- MICHAELIS, T (2006): Die Klassifikationsbaum- Methode; Im Rahmen des Seminars „Spezifikationsbasierter Software- Test“, Humbolt Universität zu Berlin, Institut für Informatik.
- MOESSMER, E.M. & AMMER U. (1994): Forstliche Forschungsberichte München Nr. 140- Pioniereigenschaften von Gehölzen in Schneegleitgefährdeten Schutzwaldlagen im montanen und subalpinen Bereich der Bayerischen Kalkalpen, 93-104.
- MUNTER, W. (1991): Neue Lawinenkunde- Ein Leitfaden für die Praxis; 1. Auflage, Ott Verlag + Druck AG Thun: 12-37, 95-97
- NEWESELY, CH., TASSER, E., SPADINGER, P., CERNUSCA, A. (2000): Effects of land-use changes on snow gliding processes in alpine ecosystems. *Basic and Applied Ecology* 1, 61-67; Urban und Fischer Verlag
- PFISTER, R. (1997): Modellierung von Lawinenanrissen im Wald. Projektarbeit, Nachdiplomkurs in Angewandter Statistik. ETH Zürich
- TASSER, E., TAPPEINER, U., CERNUSCA, A. (2001): Südtirols Almen im Wandel- Ökologische Folgen von Landnutzungsänderungen. Athesia, Bozen.
- TASSER, E., MADER, M., TAPPEINER, U. (2005): Auswirkungen von Bewirtschaftungsänderungen auf die Blaikenbildung im Gebirge. *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft*
- ZISCHG, A., FLURY, CH., COSTA, R., HUBER, B., BERGER, S. (2011): Strategie Naturgefahren Schweiz; Umsetzung des Aktionsplanes PLANAT 2005-2008/ 2009-2011; Projekt B11; Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf die Naturgefahren; 72-75
- ZISCHG, A. (2009): Integrales Risikomanagement im Einzugsgebiet von Gebirgsbächen. Pilotgebiet Jaufental, Modul Land- und Forstwirtschaft. Projektbericht zu Handen der Abteilung

Wasserschutzbauten, Autonome Provinz Bozen- Südtirol.

VENABLES, W.N. & SMITH, D.M. (2012): An Introduction to R. Notes on R: Programming Environment for Data Analysis and Graphics. R Core Team

### **Kartenmaterial**

SCHAUB, D. & LESER, H. (1985): Geomorphologische Karte; Davos-Parsenn-Dischma; Massstab 1:25'000; Geographisches Institut der Universität Basel; Bundesamt für Landestopographie Wabern

ZUMBUEHL, G. & BURNAND, J. (1985): Vegetationskarte; Davos- Parsenn-Dischma; Massstab 1:25'000; Geobotanisches Institut ETH, Stiftung Rübel; Bundesamt für Landestopographie Wabern

GUENTER, T. (1985): Landnutzung 1982 und Nutzungsänderung seit 1950; Davos-Parsenn-Dischma; Massstab 1:25'000; Geographisches Institut der Universität Zürich; Bundesamt für Landestopographie Wabern

### **Webpages**

[www.slf.ch](http://www.slf.ch) (Stand 15.9.2012)

[www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch) (Stand 6.11.2012)

[www.davos.ch](http://www.davos.ch) (Stand 6.11.2012)

## 9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht der dokumentierten Variablen.	31
Tab. 2: Zusammenzug der errechneten P-Werte mittels generalized linear Model (glm) *** Signifikanz auf dem 0.1% Niveau, ** Signifikanz auf dem 1% Niveau *: Signifikanz auf dem 5% Niveau	46
Tab. 3: Errechnung der Signifikanzwerte von selektiertem Model 2	47

## 10 Abbildungsverzeichnis

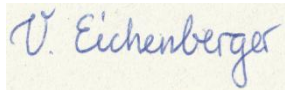
Abb. 1: Deformationskomponenten der Schneedecke. Graphik: McClung et al. (2006)	9
Abb. 2: Standort mit unterschiedlicher Topographie (Davos).	11
Abb. 3: Verlassenen Landwirtschaftsfläche mit der Vegetation Gras und niederliegende Zwergsträucher. Vereinzelt wachsen Erlen oder Fichten. Foto: V. Eichenberger	13
Abb. 4: Gleitschneeriss am Hagelstock (Kanton Uri) Foto: V. Eichenberger	15
Abb. 5: Kriechen und Gleiten der Schneedecke. Graphik: McClung et al. (2006)	15
Abb. 6: Bodenunebenheit durch Steine und Vegetation (Davos).	17
Abb. 7: Rutschanrisse sowie Lawinenverbauung (Davos).	18
Abb. 8: Untersuchungsgebiet am Davoser Dorfberg (Schweiz) mit den Gleitschneelawinen (orange und rot) und Anrissflächen (violett). Kartenmaterial: geodata © swisstopo	21
Abb. 9: Satellitenbild des Untersuchungsgebiets am Davoser Dorfberg (Schweiz) mit den Untersuchungsstandorten (grüne Punkte). Speziell gekennzeichnet sind Gleitschneelawinen (orange und rot) und Anrissflächen (violett). Kartenmaterial: geodata © swisstopo	23
Abb. 10: Messung der Hangneigung.	24
Abb. 11: Messung der Exposition.	24
Abb. 12: Mögliche Hindernisse für Gleitschneeereignisse (hier Grünerlengemeinschaften, Davos)	25
Abb. 13: Standort am Davoser Dorfberg mit verschiedenen Vegetationstypen. Foto: V. Eichenberger	26
Abb. 14: Standort am Davoser Dorfberg mit unterschiedlicher Höhe der Grasvegetation. Foto: V. Eichenberger	28
Abb. 15: Topographische Unebenheiten am Davoser Dorfberg. Foto: V. Eichenberger	29
Abb. 16: Messung einer Stufe sowie einer Steinfläche am Davoser Dorfberg. Foto V. Eichenberger	30
Abb. 17: Streuung der Hangneigung in den Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts.	35
Abb. 18: Streuung der Exposition in den Kontrollflächen (k) links sowie den Ereignisflächen (r) rechts.	35
Abb. 19: Streuung der Höhe in den Kontrollflächen (k) links sowie den Ereignisflächen (r) rechts.	36
Abb. 20: Absolute Anzahl Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts mit Vernässung (rot) sowie ohne (blau).	36
Abb. 21: Vorkommen von einem Hindernis (rot) im Abstand von höchstens 75 Meter von der Anrisszone entfernt, respektive keinem Hindernis (blau), auf Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts.	37

Abb. 22: Abstand zum nächsten Hindernis gemessen vom Standpunkt der Kontrollflächen (k) links sowie der Anrisszone der Ereignisflächen (r) rechts mit einer Obergrenze von 75 Meter Entfernung.	37
Abb. 23: Klassifikationsbaum mit Variablen Hindernis (a: kein Hindernis, b: Hindernis vorhanden) und Abstand des Hindernisses.	38
Abb. 24: Streuung der Höhe des nächsten Hindernisses mit einer Obergrenze von 75 Meter Entfernung. Gegliedert nach Kontrollflächen (k) links sowie der Ereignisflächen (r) rechts.	38
Abb. 25: Klassifikationsbaum des Hindernisabstandes. Schwarz: Ereignisflächen; Grau: Kontrollflächen	39
Abb. 26: Absolute Anzahl Flächen der Vegetationstypen unterteilt nach Kontroll- (k), Lawinen- (l) und Rissflächen (r).	39
Abb. 27: Prozentualer Anteil der Vegetationstypen aufgegliedert nach Kontrollflächen (k), Lawinen- (l) und Risszonen (r).	40
Abb. 28: Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit Grastypenvegetation sowie anderer Vegetation.	41
Abb. 29: Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit der Vegetation niederliegende Zwergsträucher sowie anderer Vegetation.	41
Abb. 30: Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit der Vegetation Wald oder Laubbäume sowie der anderen Vegetation.	41
Abb. 31: Mittlere Höhe der einzelnen Vegetationskategorien. Bemerkung: Für die Kategorien e bis g sind keine Grössen gemessen worden.	42
Abb. 32: Absolute Anzahl Flächen der Topographietypen unterteilt nach Kontroll- (k), Lawinen- (l) und Rissflächen (r)	43
Abb. 33: Prozentualer Anteil der Topographietypen aufgegliedert nach Kontrollflächen (k), Lawinen- (l) und Risszonen (r).	43
Abb. 34: Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit dem Topographietyp Rutschanrisse sowie den anderen Topographietypen.	44
Abb. 35: Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit den Topographietypen Felswand und Steine sowie den anderen Topographietypen.	44
Abb. 36: Absolute Anzahl der Kontrollflächen (k) und Ereignisflächen (r) mit dem Topographietyp Stufen sowie den anderen Topographietypen.	44
Abb. 37: Mittlere Höhe der einzelnen Topographiekategorien. Bemerkung: Die Topographiekategorie „keine bedeutenden Topographie“ wurde ausgeschlossen, da die Werte folglich 0 sind.	45
Abb. 38: Absolute Anzahl beweidete sowie landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen, aufgegliedert nach Kontrollflächen (k) links und Ereignisflächen (r) rechts.	45

- Abb. 39: Klassifikationsbaum mit allen im Model 2 als signifikant selektierten Variablen. ABS= Abstand zum Hindernis [m]; VEG\_ZWERG: Niederliegende Zwergsträucher: a= vorhanden, b= nicht vorhanden; schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k) 48
- Abb. 40: Klassifikationsbaum der Variablen Hangneigung und niederliegende Zwergsträucher. VEG\_ZWERG: Niederliegende Zwergsträucher: a= vorhanden, b= nicht vorhanden; HN= Hangneigung [°];schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k) 48
- Abb. 41: Klassifikationsbaum der Variablen Abstand des Hindernisses (ABS), Vegetation mit niederliegenden Zwergsträucher (VEG\_ZWERG) a=vorhanden, b= nicht vorhanden; schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k) 49
- Abb. 42: Klassifikationsbaum der Variablen Hindernis (HIN: a= kein Hindernis, b= Hindernis vorhanden), Topographie mit Rutschanrisse (TOP\_RUTSCH: a= vorhanden, b= nicht vorhanden) und Vegetation niederliegende Zwergsträucher (VEG\_ZWERG: a= vorhanden, b= nicht vorhanden); schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k) 49
- Abb. 43: Klassifikationsbaum der Variablen der Vegetation niederliegenden Zwergsträucher (VEG\_ZWERG: a= vorhanden, b= nicht vorhanden) und mit Gras (VEG\_GRAS: a= vorhanden, b= nicht vorhanden). schwarz= Ereignisflächen (r); grau= Kontrollflächen (k) 50
- Abb. 44: Tukey- Anscombe- Plot der multivariaten Analyse des Modell 2 mit Loess- Glätter. 51
- Abb. 45: Tukey- Anscombe- Plot mit Loess-Glätter für die univariaten Analysen mit den kontinuierlichen Variablen Höhe über Meer, Hangneigung, Exposition, Hindernisabstand und Hindernishöhe. 53

## **Eigenständigkeitserklärung**

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbstständig und in eigenen Worten - ausgenommen Korrekturvorschläge - verfasst zu haben.

A handwritten signature in blue ink on a light-colored rectangular background. The signature reads "V. Eichenberger" in a cursive script.

Zürich, den 30. 4. 2013