

Interaktionen zwischen verschiedenen Baumeigenschaften und Lawinen



Masterarbeit an der Professur Waldökologie
Departement Umweltwissenschaften, ETH Zürich

Reto Tiri

Dezember 2009

Referent: Dr. Christof Bigler, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)

Korreferent: Dr. Peter Bebi, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF)

Titelseite: Bild von entwurzelten, gebrochenen und stehen gebliebenen Lärchen beim Lawinenzug Lareit.

Zusammenfassung

Der Wald hat einen stabilisierenden Einfluss auf die Schneedecke und bietet einen guten Schutz vor dem Anbrechen von Lawinen in bewaldeten Gebieten. Lawinen, die mehr als 150 m durch offenes Gelände fließen, bevor sie durch den Wald fließen, können bei einer ähnlich bleibenden Hangneigung nicht mehr von den Bäumen zum Stillstand gebracht werden. Der Wald bremst grosse Lawinen mit sehr hohen Fließenergien kaum ab. Bremswirkung können nur bei Kleinlawinen mit Kubaturen von weniger als 10 000 m³ erwartet werden. Um die Bremswirkung des Waldes auf Kleinlawinen einzuschätzen, muss bekannt sein, bei welchen Druckkräften der Lawine Bäume von verschiedenen Baumarten und mit unterschiedlichen Durchmessern brechen. In früheren Arbeiten wurden als kritische Druckkräfte Werte angegeben zwischen 10 und 50 kPa (=kN/m²) bei Fließlawinen und 3-5 kPa bei Staublawinen, welche auf den ganzen Baum wirken und nicht nur am Stamm wie Fließlawinen. Es ist wenig darüber bekannt, wie gross dabei der Einfluss der Baumart und des Durchmessers ist.

Das Ziel dieser Arbeit war, mehr darüber herauszufinden, welche Baumeigenschaften einen Baum anfällig auf die Wirkung von Lawinen machen. Dafür wurden 617 Bäume in sechs verschiedenen Lawinenzügen im Kanton Graubünden, Schweiz, untersucht. Dabei wurden im Feld Daten zum Baumzustand (entwurzelt, gebrochen, stehend), Durchmesser, zur kleinräumigen Topografie, und zu den Nachbarbäumen aufgenommen. Von 222 der untersuchten Bäumen wurden Bohrkerne entnommen, aus denen mit Hilfe von dendrochronologischen Analysen Daten zur Wachstumsgeschichte, zum Baumalter und zur Gesundheit gewonnen wurden. Mit dem numerischen Modell RAMMS (Rapid Mass Movement) wurden die sechs Lawinen simuliert und für jeden Baum die maximalen Druckkräfte, Fließhöhen und Fließgeschwindigkeiten der Lawine berechnet. Diese Daten wurden mit deskriptiver und schliessender Statistik analysiert. Bei baumartenspezifischen Analysen wurden aufgrund der Stichprobengrösse nur die Fichte und die Lärche betrachtet.

Es zeigte sich, dass von den Baumeigenschaften der Durchmesser und die Baumart den grössten Einfluss darauf haben, ob ein Baum bei einer Lawine stehen bleibt, bricht oder entwurzelt wird. Bei Fichten und Lärchen steigt die Wahrscheinlichkeit, eine Lawine stehend zu überleben mit zunehmendem Durchmesser. Die Simulation der Lawinen zeigte auf, dass die gebrochenen Bäume durchschnittlich einer grösseren Druckkraft ausgesetzt waren als die stehenden oder entwurzelten Bäume. Die Anzahl der Nachbarbäume und die kleinräumigen, topographischen Verhältnisse am Baumstandort der untersuchten Bäume korrelierten nicht mit den Baumzuständen. Die untersuchten Baumarten Fichte (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*), Arve (*Pinus cembra*), Grünerle (*Alnus viridis*), Vogelbeere (*Sorbus acuparia*) und Salweide (*Salix caprea*) zeigten unterschiedliche Anfälligkeiten gegenüber der Wirkung der Lawinen auf. Auch zwischen den Lawinenzügen gab es beim Vergleich der Baumeigenschaften mit dem Baumzustand Unterschiede, was auf die verschiedenen Lawinen und Waldstrukturen sowie topographischen Verhältnisse zurückzuführen ist. Die Unterschiede zwischen den Baumarten können neben der grösseren Anfälligkeit von Fichten auf Fäulepilze und der grösseren Flexibilität der jungen Lärchen gegenüber jungen Fichten zum Teil auch dadurch verstärkt worden sein, dass in einigen Lawinenzügen die Fichte, in anderen die Lärche die dominierende Baumart ist. Somit wurden die Baumarten nicht gleich stark von allen sechs Lawinenzügen beeinflusst.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 1 |
| Abbildungsverzeichnis | 4 |
| Tabellenverzeichnis | 6 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 2 Untersuchungsgebiete | 9 |
| 2.1 Cresta..... | 10 |
| 2.2 Dischma | 12 |
| 2.3 Klosters..... | 14 |
| 2.4 Lareit und La Rösa..... | 16 |
| 2.5 Splügen..... | 19 |
| 3 Material und Methoden | 21 |
| 3.1 Feldaufnahmen | 21 |
| 3.2 Aufbereitung und Analyse der Bohrproben | 24 |
| 3.3 Lawinensimulation mit RAMMS..... | 25 |
| 3.3.1 Benötigte Daten | 25 |
| 3.3.2 Simulation | 26 |
| 3.4 Statistische Analyse | 27 |
| 3.4.1 Deskriptive Statistik | 27 |
| 3.4.2 Schliessende Statistik..... | 27 |
| 4 Resultate | 30 |
| 4.1 Deskriptive Statistik..... | 30 |
| 4.1.1 Baumart | 30 |
| 4.1.2 Durchmesser | 31 |
| 4.1.3 Baumalter | 32 |
| 4.2 Lawinensimulation mit RAMMS..... | 34 |
| 4.3 Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren und dem Baumzustand nach dem Lawinenereignis | 40 |
| 4.3.1 Baumart | 40 |
| 4.3.2 Stammdurchmesser | 42 |
| 4.3.3 Baumalter | 43 |
| 4.3.4 Wachstumstrends vor dem Lawinenereignis..... | 44 |
| 4.3.5 Abrupte Wachstumsänderungen | 47 |
| 4.3.6 Druckkraft | 49 |
| 4.3.7 Nachbarbäume | 50 |
| 4.3.8 Topografie..... | 50 |
| 4.3.9 Bruchhöhe | 51 |
| 4.4 Klassifikationsbäume zum Baumzustand | 52 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.5 | Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit | 56 |
| 5 | Diskussion | 60 |
| 5.1 | Untersuchte Einflussfaktoren | 60 |
| 5.1.1 | Baumart | 60 |
| 5.1.2 | Stammdurchmesser | 61 |
| 5.1.3 | Jahrringe..... | 63 |
| 5.1.4 | Umgebung der untersuchten Bäume | 65 |
| 5.2 | Vergleich der realen Lawinenwirkung auf die Bäume mit den Daten der Lawinensimulation mit RAMMS | 66 |
| 5.2.1 | Druckkraft | 66 |
| 5.2.2 | Fliesshöhe, Fliessgeschwindigkeit und Auslaufgebiet | 67 |
| 6 | Schlussfolgerungen | 68 |
| 7 | Dank | 69 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 70 |
| 9 | Anhang/Appendix | 72 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Übersicht der sechs Lawinenzüge | 9 |
| Abbildung 2: Lawinenzug Cresta..... | 10 |
| Abbildung 3: Fotos des Lawinenzugs Cresta | 11 |
| Abbildung 4: Lawinenzug Dischma | 12 |
| Abbildung 5: Fotos des Lawinenzugs Dischma..... | 13 |
| Abbildung 6: Lawinenzug Klosters | 14 |
| Abbildung 7: Fotos des Lawinenzugs Klosters..... | 15 |
| Abbildung 8: Lawinenzug Lareit (links) und La Rösa (rechts)..... | 16 |
| Abbildung 9: Fotos des Lawinenzugs Lareit..... | 17 |
| Abbildung 10: Fotos des Lawinezugs La Rösa | 18 |
| Abbildung 11: Lawinenzug Splügen | 19 |
| Abbildung 12: Fotos des Lawinenzugs Splügen | 20 |
| Abbildung 13: Bestimmung der 20 Punkte für die Feldaufnahmen | 22 |
| Abbildung 14: Auswahl der 5 untersuchten Bäume pro Punkt | 22 |
| Abbildung 15: Baumartenzusammensetzung pro Standort..... | 31 |
| Abbildung 16: Durchmesserverteilung | 32 |
| Abbildung 17: Altersverteilung..... | 33 |
| Abbildung 18: Altersverteilung der gesunden Bäume (n=182) und faulen Bäume (n=42). | 33 |
| Abbildung 19: Resultate der Lawinensimulation bei Cresta | 34 |
| Abbildung 20: Resultate der Lawinensimulation im Dischmatal..... | 35 |
| Abbildung 21: Resultate der Lawinensimulation bei Klosters..... | 36 |
| Abbildung 22: Resultate der Lawinensimulation bei Lareit..... | 37 |
| Abbildung 23: Resultate der Lawinensimulation bei La Rösa | 38 |
| Abbildung 24: Resultate der Lawinensimulation bei Splügen | 39 |
| Abbildung 25: Anteil der entwurzelten, gebrochenen und stehenden Bäume pro Baumart...40 | |
| Abbildung 26: Anteil der entwurzelten, gebrochenen und stehenden Bäume pro Standort...41 | |
| Abbildung 27: Baumzustand und Durchmesser aller Bäume..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 28: Baumzustand und Durchmesser aller Fichten und Lärchen | 43 |
| Abbildung 29: Baumzustand und Baumalter | 43 |
| Abbildung 30: Jahrringbreitenkurven der Fichten (n=95) und Lärchen (n=114) der jeweiligen Lawinenzüge | 45 |
| Abbildung 31: Wachstumstrend | 46 |
| Abbildung 32: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Bäume | 47 |
| Abbildung 33: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Fichten | 48 |
| Abbildung 34: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Lärchen | 48 |
| Abbildung 35: Baumzustand, Durchmesser und maximale Druckkraft der Lawinen..... | 49 |
| Abbildung 36: Maximale Druckkraft und Baumzustand..... | 49 |
| Abbildung 37: Maximale Druckkraft und Baumzustand bei Fichte und Lärche | 50 |
| Abbildung 38: Vergleich der Bruchhöhe mit der Druckkraft a) und dem Durchmesser b) der Bäume..... | 51 |
| Abbildung 39: Bruchhöhen aufgeteilt nach Standorten | 51 |
| Abbildung 40: Klassifikationsbaum für alle Baumarten | 52 |
| Abbildung 41: Klassifikationsbaum für Fichte a) und Lärche b) | 53 |
| Abbildung 42: Klassifikationsbäume für die Bäume der einzelnen Standorte | 55 |
| Abbildung 43: Modellierte Überlebenswahrscheinlichkeit für Fichte und Lärche abhängig vom Durchmesser | 57 |
| Abbildung 44: Modellierte Überlebenswahrscheinlichkeit für die Bäume in den verschiedenen Lawinenzügen | 58 |
| Abbildung 45: Modellierte Überlebenswahrscheinlichkeit für Fichte und Lärche abhängig von der Druckkraft..... | 59 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Im Feld aufgenommene Parameter pro Baum | 23 |
| Tabelle 2: Lawinendaten die für die Simulation mit RAMMS verwendet wurden | 26 |
| Tabelle 3: Einflussfaktoren | 29 |
| Tabelle 4: Quantilen der Durchmesservertelung aufgeteilt nach Standort und Baumart | 32 |
| Tabelle 5: Logistische Regressionsmodelle mit der Zielvariable „Zustand 2“ (Baum stehend, Baum nicht stehend) und den Einflussfaktoren..... | 56 |

1 Einleitung

Lawinen waren für die Bergbewohner schon immer eine der bedeutendsten Naturgefahren. Die Schutzfunktion des Waldes gegen das Anbrechen von Lawinen wurde schon früh erkannt, was Jahrhunderte alte Bannbriefe für Wälder oberhalb von Siedlungen bezeugen. Ein bekanntes Beispiel ist der Bannwald oberhalb von Andermatt, welcher bereits im Jahre 1397 durch scharfe Schutzbestimmungen vor Rodungen geschützt wurde (Margreth 2004). Im 20. Jahrhundert begann man, mit Lawinenverbauungen oberhalb von Siedlungen und Verkehrswegen die Lawinenabgänge technisch zu verhindern. Damit wurde es möglich, das Anreissen von Lawinen oberhalb der Waldgrenze mit baulichen Massnahmen einzuschränken. Der Wald spielt jedoch noch immer eine sehr wichtige Rolle im Schutz von Siedlungen und Verkehrswegen vor Lawinen und anderen Naturgefahren. Die Wirkung des Waldes auf die Schneedecke ist recht gut erforscht, dagegen ist wenig über die Bremswirkung des Waldes auf bereits angerissene Lawinen bekannt. In seltenen Fällen kann der Wald eine bereits angerissene Lawine aufhalten. Hat eine Lawine eine freie Sturzbahn von mindestens 150 m bevor sie auf den Wald trifft, kann sie bei einer ähnlich bleibenden Hangneigung nicht mehr von den Bäumen zum Stillstand gebracht werden (Bebi et al., 2004). Je nach Hangneigung, Mächtigkeit der angerissenen Schneedecke, Schneebeschaffenheit und Eigenschaften des Waldes ergeben sich Abweichungen von dieser Annahme. Das Fliessverhalten einer Lawine durch Wälder wurde von Bartelt und Stöckli (2001) untersucht. Sie stellten fest, dass das Brechen der Bäume durch die Lawine wenig Fliessenergie konsumiert und darum kaum bremsend wirkt. Deswegen können grosse Lawinen Wälder zerstören, ohne signifikant abgebremst zu werden. Kleinere Lawinen jedoch können von stabilen Wäldern gebremst werden. Vor allem Bäume, die entwurzelt und von der Lawine mitgerissen werden, haben eine gewisse Bremswirkung. Wie stark der Wald Lawinen abbremsen kann und wie stark dabei Baumartenzusammensetzung, Brusthöhendurchmesser, Bedeckungsgrad und Gesundheitszustand der Bäume ins Gewicht fallen, ist schwierig abzuschätzen, und es existieren wenige Forschungsarbeiten in diesem Bereich. Um die Bremswirkung des Waldes besser zu verstehen, muss mehr darüber bekannt sein, bei welchen Druckkräften der Lawine, verschiedenen Baumarten mit verschiedenen Durchmessern brechen. Als kritische Druckkräfte für Fliesslawinen gelten Werte zwischen 10 und 50 kPa (=kN/m²) (de Quervain 1978, Margreth 2008) und 3-5 kPa für Staublawinen, welche auf den ganzen Baum wirken und nicht nur am Stamm wie Fliesslawinen (Margreth, 2008). In dieser Arbeit wurde untersucht, was die Bäume anfällig gegenüber Lawinen macht und welche Eigenschaften der Bäume die Bremswirkung des Waldes auf Lawinen beeinflussen. Dafür wurden eine Auswahl von Bäumen und Stöcken in verschiedenen Lawinenzügen untersucht. Es wurden die Baumarten unterschieden und der Stammdurchmesser, das Baumalter und die Jahrringbreiten gemessen. Zusätzlich wurde auf Anzeichen von Fäulnis und Stammverletzungen geachtet und als räumliche Komponente wurde geprüft, ob der Baum auf einer Kuppe oder in einer Mulde wächst und ob der Baum alleine oder in einem Verband steht. Mit dem Modellierungssystem „RAMMS“ konnten die untersuchten Lawinenniedergänge in einem Geländemodell simuliert werden. Es wurden Auslaufdistanzen, Geschwindigkeiten und Druckkräfte der Lawinen berechnet. Damit war es möglich, abzuschätzen, was für eine Kraft während des Lawinenabganges auf die untersuchten Bäume gewirkt hatte. Der Vergleich zwischen dem simulierten und dem realen Lawinenereignis zeigte, wie genau die Modellberechnungen sind, und es zeigte sich, wie realistisch die Bremswirkung der Bäume als Reibungsparameter im Modell berücksichtigt werden.

Forschungsfragen und Hypothesen:

Frage 1:

Was macht Bäume anfällig gegenüber Lawinen und in Bezug auf welche Merkmale unterscheiden sich die Bäume, die in einem Lawinenzug stehen geblieben sind von den Bäumen, die von der Lawine umgeworfen oder gebrochen wurden (Baumart, Stammdurchmesser, Wachstumsgeschichte, räumliche Komponente)?

Hypothese 1.1: Der Stammdurchmesser eines Baumes hat einen wichtigen Einfluss auf den Baumzustand nach dem Lawinenereignis, da ein grösserer Durchmesser einer grösseren Druckkraft der Lawine standhalten kann.

Hypothese 1.2: Die Anfälligkeit der Bäume auf Lawinen ist artspezifisch. Fichten brechen unter der Druckkraft der Lawine bei gleichem Stammdurchmesser eher als Lärchen, da sie weniger flexibel sind und eher von Fäulepilzen befallen werden.

Hypothese 1.3: Bäume, die auf einer Kuppe stehen, werden bei gleichem Stammdurchmesser seltener von einer Lawine umgeworfen als Bäume in einer Mulde, da sie einer kleineren Druckkraft ausgesetzt sind als die Bäume in der Mulde.

Frage 2:

Welche Einstellungen im Modell RAMMS müssen angepasst werden, um unterschiedliche Wald- und Baumeigenschaften im Beschleunigungs- und Auslaufgebiet von Lawinen besser zu berücksichtigen?

Hypothese 2.1:

Der Reibungsparameter, welcher die Bremswirkung des Waldes auf Lawinen simuliert, muss je nach Baumartenzusammensetzung, Durchmesser- und Struktur des Waldes angepasst werden.

2 Untersuchungsgebiete

Die Feldaufnahmen wurden in 6 Untersuchungsgebieten (Cresta, Dischma, Klosters, La Rösa, Lareit, Splügen) im Kanton Graubünden, Schweiz gemacht (Abbildung 1). Bei der Wahl der sechs Untersuchungsgebiete wurde darauf geachtet, dass es sich um Lawenzüge handelt, die zu einem grossen Teil durch den Wald verlaufen und noch einen Anteil an stehenden Bäumen aufweisen. Ein weiteres Kriterium war, dass in den Lawenzügen in den letzten Jahrzehnten vor dem Winter 2008/2009 nur kleinere oder gar keine Lawinen niedergegangen sind. Ausser bei Klosters wurden nur Lawinen untersucht, die im ersten Quartal des Jahres 2009 niedergegangen sind, damit die Wirkungen der Lawinen an den Bäumen bei der Feldarbeit im Frühsommer 2009 noch gut sichtbar waren. Die Lawine bei Klosters wurde ausgewählt, weil sie als einzige im Wald stoppte. Sie ist im Februar 1999 niedergegangen. Die untersuchten Bäume in den Lawenzügen liegen zwischen 1330 und 2220 m.ü.M. Es wurden folgende Baumarten untersucht: Fichte (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*), Arve (*Pinus cembra*), Grünerle (*Alnus viridis*), Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) und Salweide (*Salix caprea*).

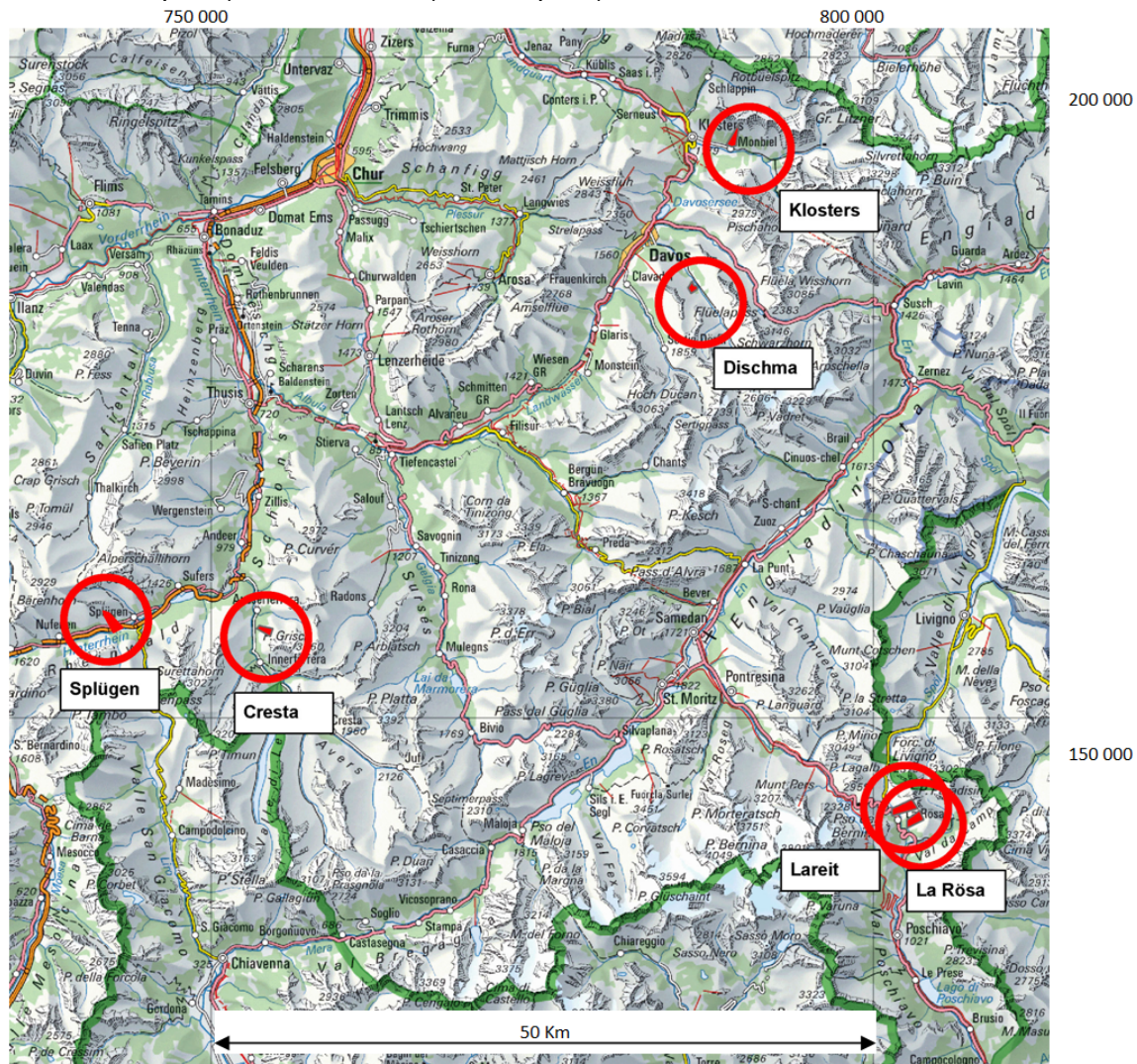


Abbildung 1: Übersicht der sechs Lawenzüge

Die Lawenzüge befinden sich im südlichen und östlichen Teil Graubündens. Der Abstand zwischen den geografischen Längen- (750 000, 800 000) und Breitengraden (150 000, 200 000) beträgt 50 km.

2.1 Cresta

Der Lawenzug bei Cresta befindet sich auf der orographisch rechten Talseite oberhalb von Ausserferrera im Val Ferrera (Abbildung 2) in einem Westhang. Das Anrissgebiet der Lawine lag circa auf 2150 m (über Meer), etwa 100 Höhenmeter oberhalb der Waldgrenze. Die Trockenschneelawine floss 410 m entlang eines Baches durch den von Fichten dominierten Wald und blieb auf circa 1630 m im Wald stehen (Abbildung 3). Das Lawinenereignis fand am 7. Februar 2009 statt. Vom 5. bis zum 7. Februar fielen etwa 80 cm Neuschnee. Die Mittagstemperatur am 7. Februar auf 2000m war -5°C und es herrschten mässige bis starke Südwinde. Die Lawingefahr wurde mit „Gross für alle Expositionen“ oberhalb 1800 m eingestuft.

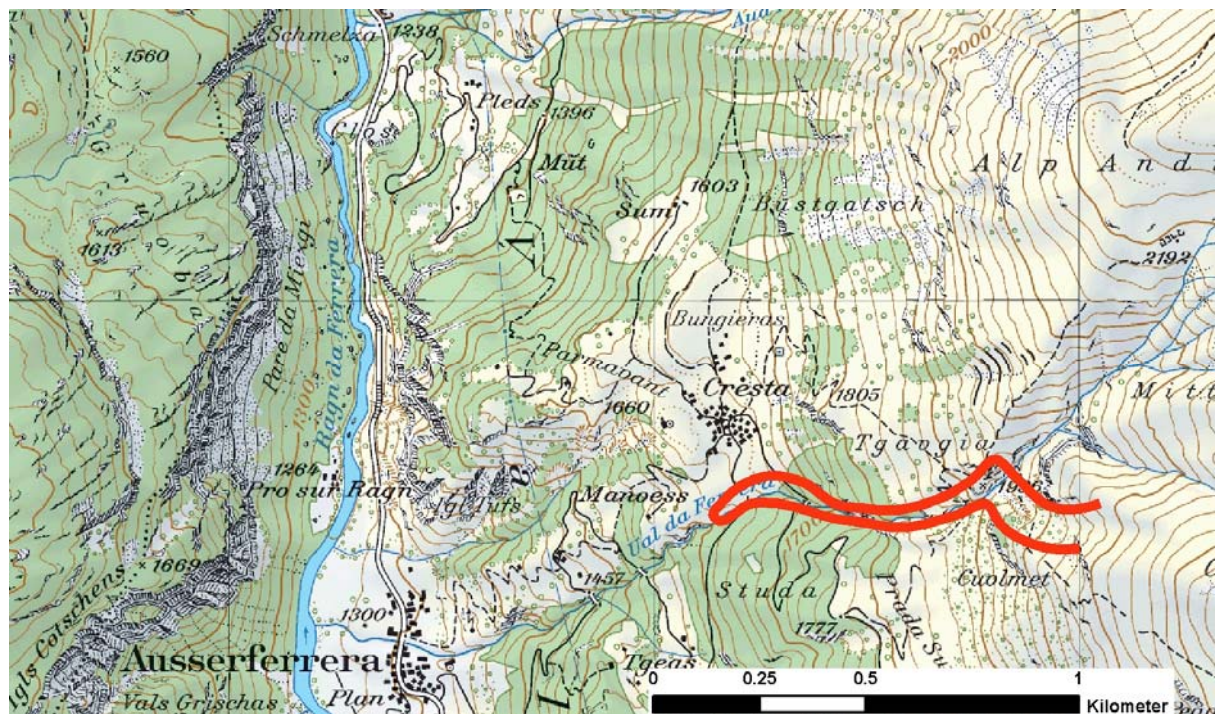


Abbildung 2: Lawenzug Cresta

Rot eingezeichnet ist der ungefähre Lawenzug mit dem Auslaufgebiet

Für die Simulation mit dem Lawinsimulationsmodell RAMMS (siehe Kap.3.3) wurde die Wiederkehrdauer der Lawine auf 30 Jahre und die Volumenategorie auf klein geschätzt. Als Anrisshöhe wurde 1.0 m und als Erosionshöhe 0.8 m verwendet. Der Standort und die Fläche des Anrissgebietes wurden anhand der topographischen Gegebenheiten geschätzt.

a)



b)

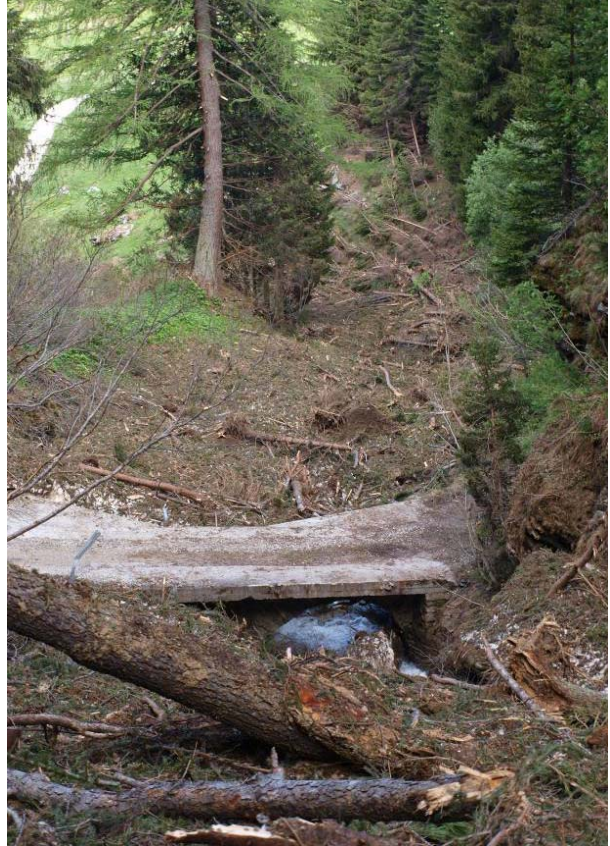


Abbildung 3: Fotos des Lawinenzugs Cresta

a) Blick auf den oberen Teil des Lawinenzugs.

b) Man erkennt die Betonbrücke der Strasse im unteren Teil der Lawine bei Cresta. Die gebrochenen Äste bei der Lärche im Foto oben links lassen Rückschlüsse auf die Fließhöhe zu. Die Metallstreben des Geländers wurden von der Druckkraft der Lawine weggerissen oder waagrecht gebogen.

2.2 Dischma

Der Lawinenzug Dischma befindet sich auf der orographisch linken Talseite des Dischmatal, südöstlich von Davos (Abbildung 4) in einem Nordosthang. Die Nassschneelawine löste sich auf circa 2080 m.ü.M an der Baumgrenze und blieb anfangs der Talsohle auf circa 1690 m.ü.M stehen (Abbildung 5). Der Lawinenzug verläuft über 345 Höhenmeter unterhalb der Waldgrenze durch einen lichten Wald mit Arven, Lärchen, Fichten, Vogelbeere und Grünerlen. Die Lawine bei der Teufi im Dischmatal floss in der Nacht vom 22. auf den 23. April 2008 ins Tal. Der Schnee wurde teilweise bis auf den Boden erodiert. Bis zum Ereignis fielen innerhalb von 3 Tagen etwa 20 cm Neuschnee. Bis circa 2200 m lag der Neuschnee auf einer durchnässten Altschneedecke. Die Mittagstemperatur am 22. April auf 2000 m war -1°C und der Nordwestwind blies mässig bis stark. Die Lawinengefahr wurde mit „Erheblich für Steilhänge aller Expositionen“ oberhalb 1600 m eingestuft.

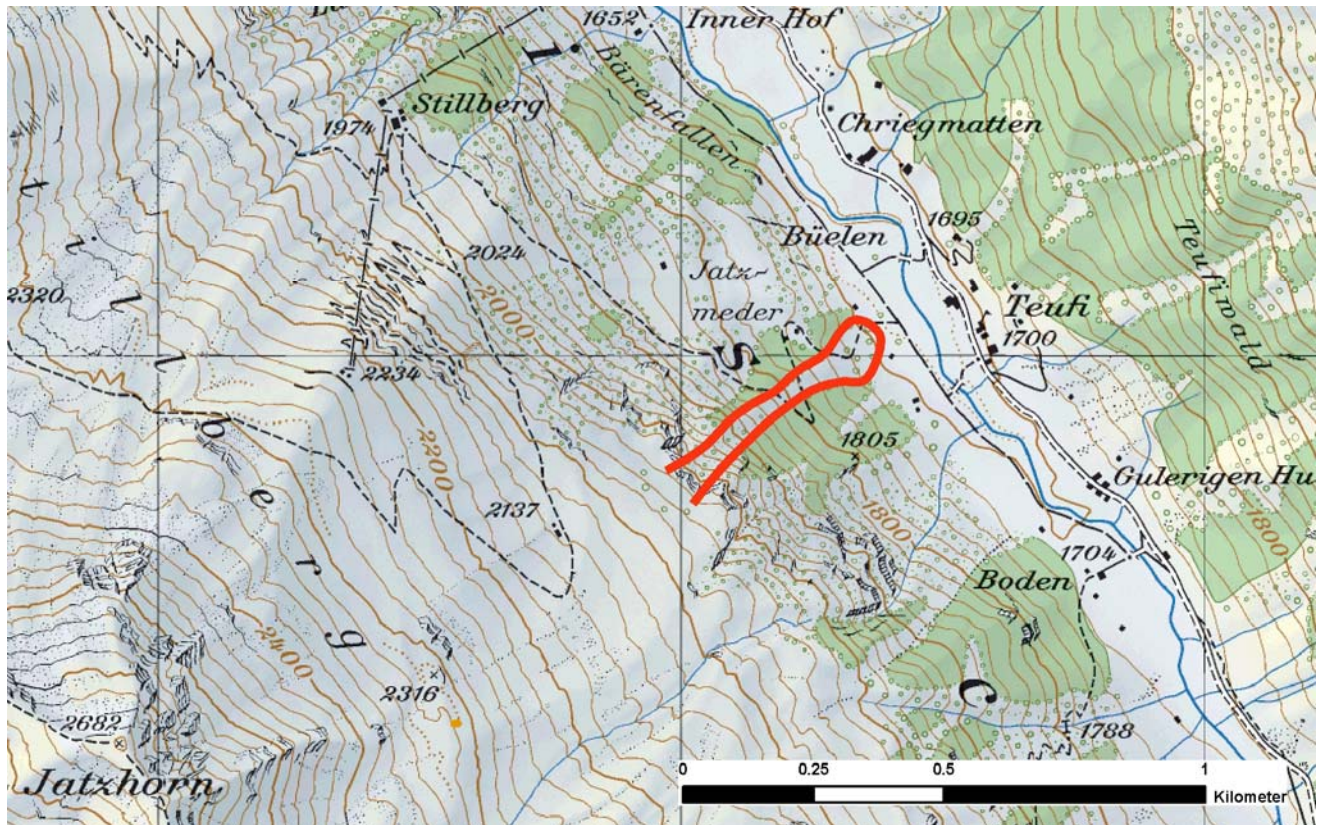


Abbildung 4: Lawinenzug Dischma

Rot eingezeichnet ist der ungefähre Lawinenzug mit dem Auslaufgebiet

Für die Simulation wurde die Wiederkehrdauer der Lawine auf 10 Jahre und die Volumenategorie auf sehr klein geschätzt. Die tiefe Einstufung der Volumenategorie hatte zum Zweck, höhere Reibungswerte zu erhalten, um die Nassschneelawine zu simulieren. Als Anrisshöhe wurde 0.5 m und als Erosionshöhe 0.35 m verwendet. Da es eine Nassschneelawine war, wurde als Schneedichte 400 kg/m^3 gewählt, was einen Einfluss auf die berechnete Druckkraft hat.

a)



b)



Abbildung 5: Fotos des Lawinenzugs Dischma

a) Blick nach unten zum Auslaufbereich der Lawine in der Talsohle. Auf der anderen Talseite ist der Weiler Teufi sichtbar.
b) Blick auf die Lawine und das Auslaufgebiet kurz nach dem Lawinenabgang (Foto: Peter Bebi, 2008).

2.3 Klosters

Der Lawenzug Klosters befindet sich oberhalb von Monbiel, circa 3 km östlich von Klosters in einem Südhang (Abbildung 6). Die Trockenschneelawine riss auf circa 2340 m an. Sie floss bis circa 350 Höhenmeter in freiem Gelände und danach etwa 650 Höhenmeter durch den von Fichte dominierten Wald bis auf 1330 m.ü.M (Abbildung 7). Die Lawine kam nach starken Schneefällen am 21. Februar 1999 ins Tal. Bis zum Ereignis fielen innerhalb von 3 Tagen etwa 50 cm Neuschnee bei teilweise starkem Nordwestwind. Die Lawinengefahr wurde mit „Gross“ eingestuft.

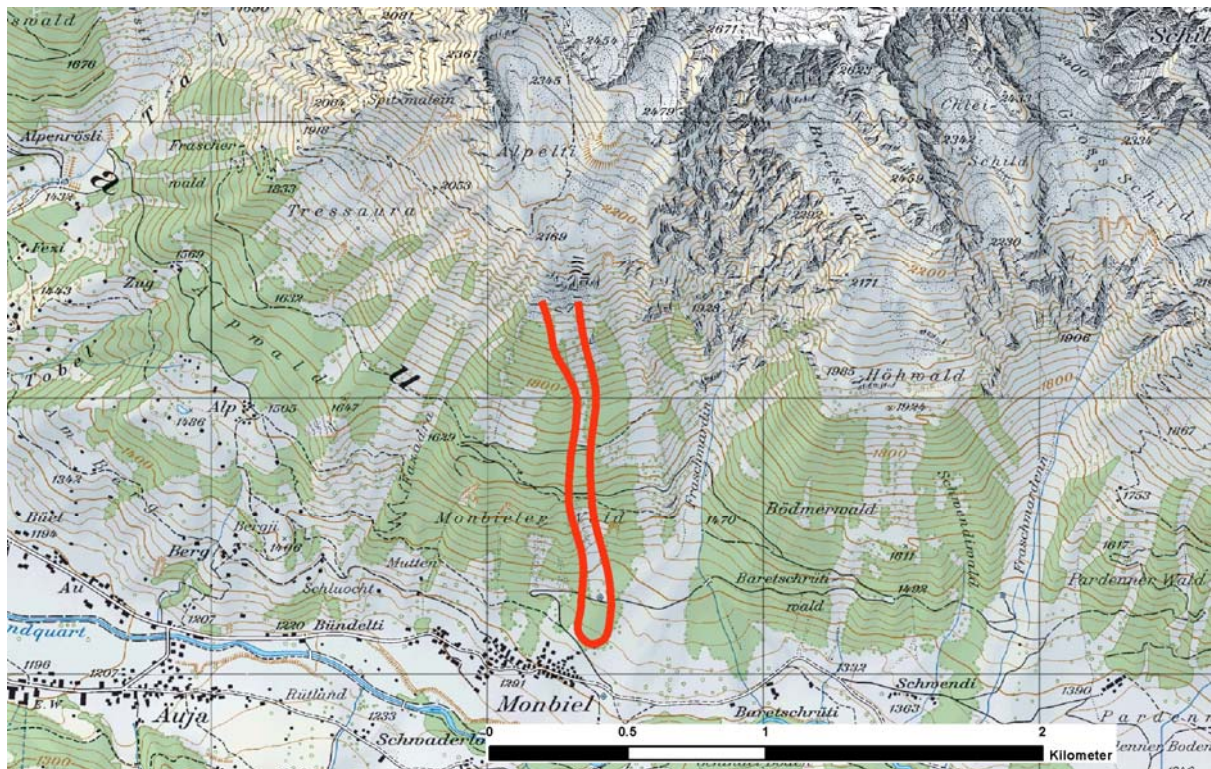


Abbildung 6: Lawenzug Klosters

Rot eingezeichnet ist der ungefähre Lawenzug mit dem Auslaufgebiet

Für die Simulation wurde die Wiederkehrdauer der Lawine auf 100 Jahre und die Volumenkategorie auf mittel geschätzt. Als Anrisshöhe wurde unter Berücksichtigung der starken Schneeverfrachtung 1 m und als Erosionshöhe 0.6 m verwendet. Das Anrissgebiet wurde anhand der topographischen Gegebenheiten und der Berechnungen mit RAMMS abgeschätzt.

a)



b)



Abbildung 7: Fotos des Lawinenzugs Klosters

- a) Blick nach unten zum Auslaufbereich der Lawine im Wald. Am rechten oberen Rand sind die Häuser von Monbiel sichtbar.
b) Blick vom Auslaufgebiet nach oben bis zu den untersuchten Bäumen an der Waldgrenze.

2.4 Lareit und La Rösa

Die Lawinenzüge Lareit und La Rösa befinden sich südlich des Berninapasses im Val Poschiavo auf der orographisch linken Talseite in einem Südwesthang (Abbildung 8). Die beiden Lawinenzüge sind nur etwa 700 m auseinander gelegen. Beide flossen durch einen von Lärchen dominierten Wald.

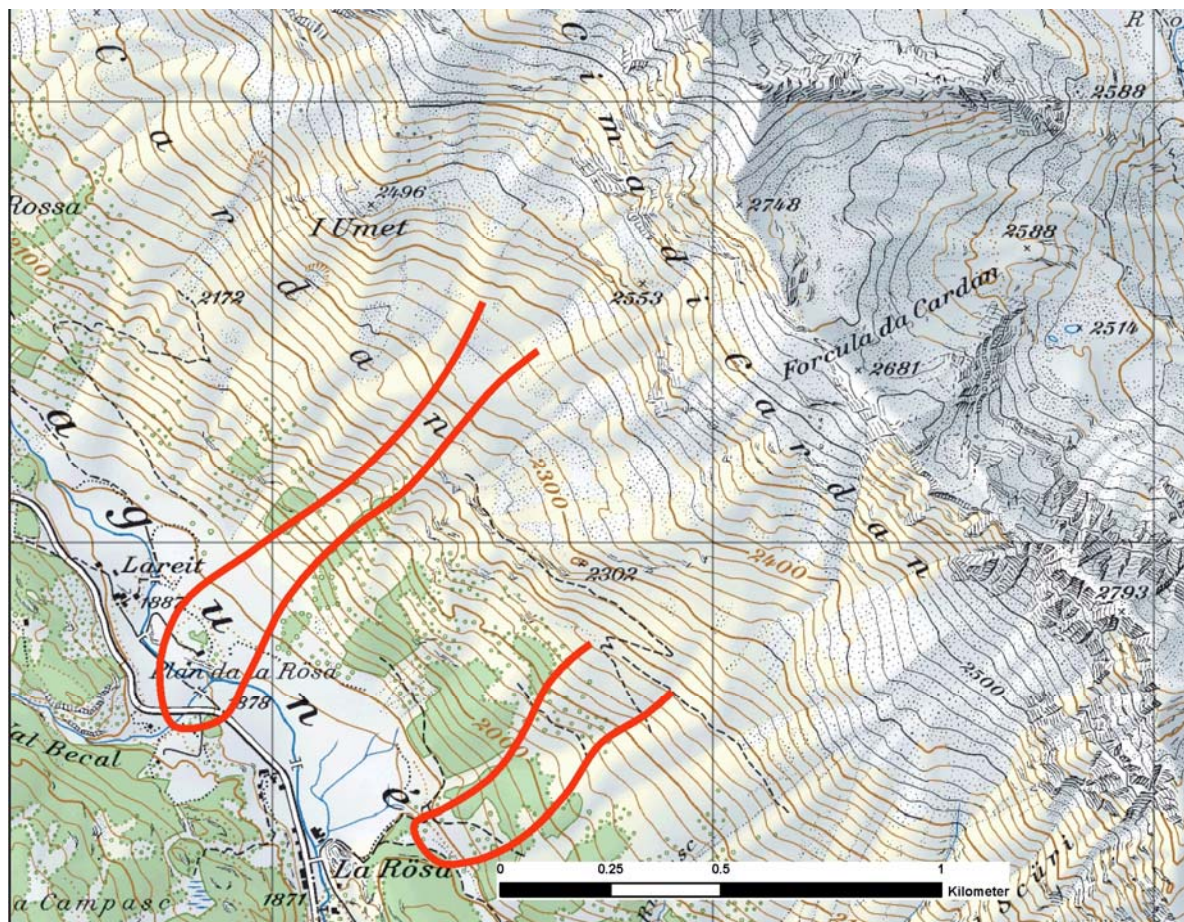


Abbildung 8: Lawinenzug Lareit (links) und La Rösa (rechts)

Rot eingezeichnet sind die ungefähren Lawinenzüge mit den Auslaufgebieten (Lareit links, La Rösa rechts)

Die Trockenschneelawine Lareit hatte das Anrissgebiet wahrscheinlich auf circa 2740 m.ü.M und floss bis zur Waldgrenze auf 2220 m.ü.M durch freies Gelände (Abbildung 9) und danach bis zur Talsohle auf 1880 m durch einen lichten und jungen Lärchenwald. In der Talsohle floss die Lawine durch eine etwas erhöhten, kleinen Lärchenwald bis über die Kantonsstrasse. Der Lawinenabgang fand am 8. Februar 2009 statt. Bis zum Ereignis fielen in 3 Tagen etwa 50 cm Neuschnee, innerhalb von 4 Tagen sogar 80 bis 120 cm. Der Südwind blies am 7. Februar teilweise stark und drehte am 8. Februar auf Nord. Die Mittagstemperaturen lagen bei -8°C auf 2000 m. Die Lawengefahr wurde mit „Gross“ eingestuft. Für die Simulation wurde die Wiederkehrdauer der Lawine auf 100 Jahre und die Volumenategorie auf klein geschätzt. Als Anrisshöhe wurde 0.8 m und als Erosionshöhe 0.4 m verwendet.

a)



b)



Abbildung 9: Fotos des Lawinenzugs Lareit

a) Blick von der Baumgrenze nach unten zum Auslaufgebiet. Die Lawine kam auf der anderen Seite der Strasse zum Stillstand
b) Abgebildet sind die Lärchen in der Talsohle, welche beim Lawinenniedergang schräggestellt oder entwurzelt und gebrochen wurden, das Haus wurde kaum beschädigt. Es ist durch einen Erdwall auf der lawinenexponierten Seite geschützt.

Die Nassschneelawine bei La R6sa hatte das Anrissgebiet wahrscheinlich auf etwa 2370 m. Sie floss bis auf circa 2170 m durch offenes Gel6nde und danach durch einen relativ alten L6rchenwald bis zum Auslaufgebiet in einer Gel6ndesenke auf circa 1880 m (Abbildung 10). Die Lawine kam zwischen dem 5. und 6. April 2009 ins Tal. In den letzten 3 Tagen vor dem Ereignis gab es keine Schneef6lle. Die Mittagstemperatur lag am 6. April bei 2°C auf 2000 m. Die Lawinengefahr f6r Nassschneelawinen wurde mit „Erheblich“ eingestuft. F6r die Simulation wurde die Wiederkehrdauer der Lawine auf 100 Jahre und die Volumenkategorie auf mittel gesch6tzt. Als Anriss-h6he wurde 0.5 m und als Erosions-h6he 0.3 m verwendet. Da es sich um eine Nassschneelawine handelte, wurde die Schneedichte von 400 kg/m³ verwendet.

a)



b)



Abbildung 10: Fotos des Lawinezugs La R6sa

a) Blick auf den oberen Teil des Lawinezugs

b) Blick vom Auslaufbereich hangaufw6rts. Auff6llig ist die grosse Menge an abgelagerten L6rchen.

2.5 Splügen

Der Lawinenzug Splügen befindet sich etwa 1.3 km südwestlich von Splügen auf der orographisch linken Talseite an einem Südosthang (Abbildung 11). Die Lawine ist auf circa 1980 m.ü.M. angerissen und ab 1890 m.ü.M. durch den von Fichten dominierten Wald geflossen (Abbildung 12). Die Lawine kam am 16. März 2009 ins Tal. In den letzten 3 Tagen vor dem Ereignis gab es keine Schneefälle. Die Mittagstemperatur lag am 15. März bei etwa 0°C auf 2000 m. Die Lawinengefahr für Nassschneelawinen wurde mit „Erheblich“ eingestuft.

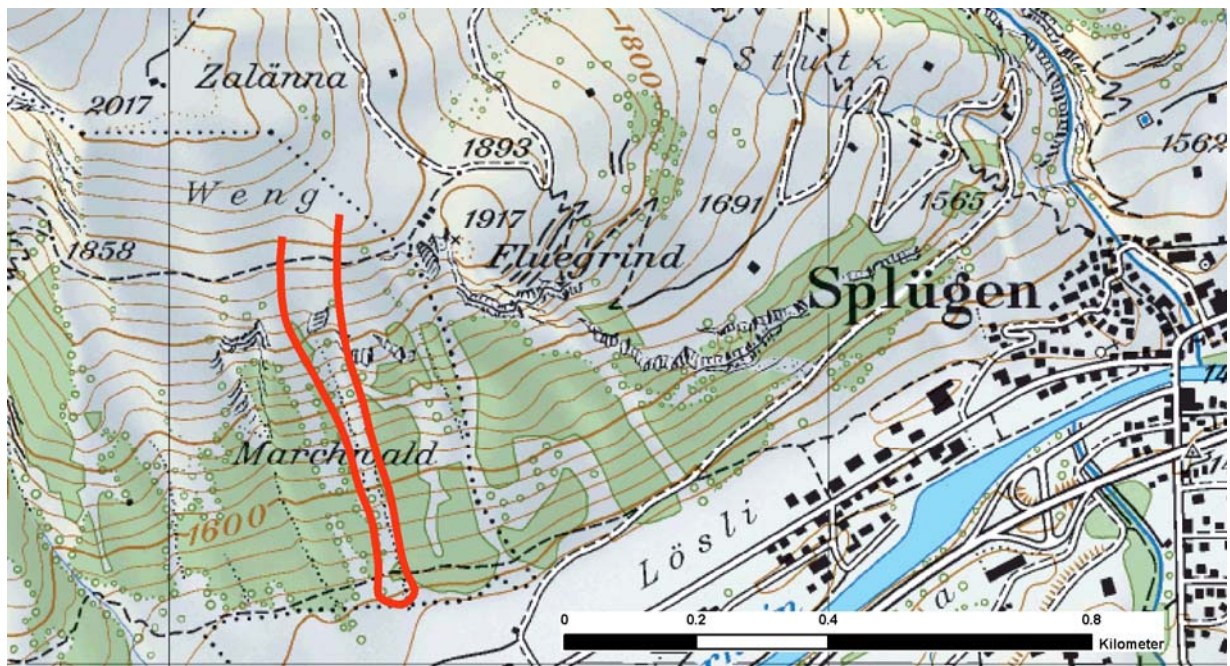


Abbildung 11: Lawinenzug Splügen

Rot eingezeichnet ist der ungefähre Lawinenzug

Für die Simulation wurde die Wiederkehrdauer der Lawine auf 30 Jahre und die Volumenategorie auf sehr klein geschätzt. Als Anrisshöhe wurde 0.3 m und als Erosionshöhe 0.2 m verwendet. Da es sich um eine Nassschneelawine handelte, wurde die Schneedichte von 400 kg/m³ verwendet.

a)



b)



Abbildung 12: Fotos des Lawinenzugs Splügen

- a) Abgebildet ist der obere Teil des Lawinenzugs. Die entwurzelten Fichten stehen in einer eingewachsenen Bergwiese.
- b) Blick nach unten im mittleren Teil des Lawinenzuges mit lichem Wald. In der Bildmitte erkennt man eine exponiert stehende Fichte, welche die Lawine stehend überlebt hat.

3 Material und Methoden

3.1 Feldaufnahmen

Auswahl der Lawinenzüge

Die Feldaufnahmen wurden im Frühsommer 2009 in sechs Lawinenzügen durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Es wurde darauf geachtet, dass die Lawine mehrere hundert Meter durch den Wald geflossen war, was voraussetzte, dass im Lawinenzug schon seit mehreren Jahrzehnten kein grosses Lawinenereignis mehr stattgefunden hat, damit sich ein geschlossener Wald entwickeln konnte. Es wurden Lawinenniedergänge ausgewählt, in denen neben den entwurzeltten oder gebrochenen auch noch stehende Bäume vorhanden waren. Eine Ausnahme bei der Auswahl der Lawinenzüge stellte die Lawine bei Klosters dar. Sie ging bereits im Winter 1998/1999 nieder und zerstörte über weite Strecken den ganzen Wald. Da sie im bewaldeten Auslaufbereich stoppte, sollten mehr Erkenntnisse über die Bremswirkung der Bäume auf Lawinen gewonnen werden.

Auswahl der Bäume

Pro Lawinenzug wurden jeweils mindestens 100 Bäume untersucht, über alle sechs Lawinenzüge total 617 Bäume. In der Regel wurden pro Lawinenzug an 20 stehenden und wenn möglich an 20 nicht stehenden (gebrochenen oder entwurzeltten) Bäumen jeweils zwei Bohrkerne entnommen, über alle sechs Lawinenzüge an total 222 Bäumen. Die Auswahl der zu untersuchenden Bäume erfolgte über den ganzen Lawinenzug. Dazu wurde die Höhendifferenz zwischen dem obersten und dem untersten Baum im Lawinenzug ermittelt und durch 20 geteilt (Abbildung 13). Damit wurden im Lawinenzug unterhalb der Waldgrenze 20 Höhenlinien definiert. Die 20 Punkte für die Feldaufnahmen wurden wenn möglich im Zentrum des Lawinenzuges auf jeder definierten Höhenlinie ausgewählt. Von jedem Punkt aus wurden dem nächsten stehenden und dem nächsten nicht stehenden Baum je zwei Bohrkerne entnommen und Messungen vorgenommen. An weiteren drei Bäumen wurden nur Messungen vorgenommen (Abbildung 14). Für die Untersuchungen wurden nur Bäume berücksichtigt, die mindestens einen Brusthöhendurchmesser von 10 cm hatten. An einigen Bäumen konnte aufgrund der schlechten Holzqualität (Fäule) keine Bohrkerne entnommen werden. Weil für die Entnahme der Bohrkerne jeweils ein stehender und ein gebrochener Baum pro Aufnahmepunkt nötig war, wurde die zufällige Stichprobenauswahl etwas beeinflusst.

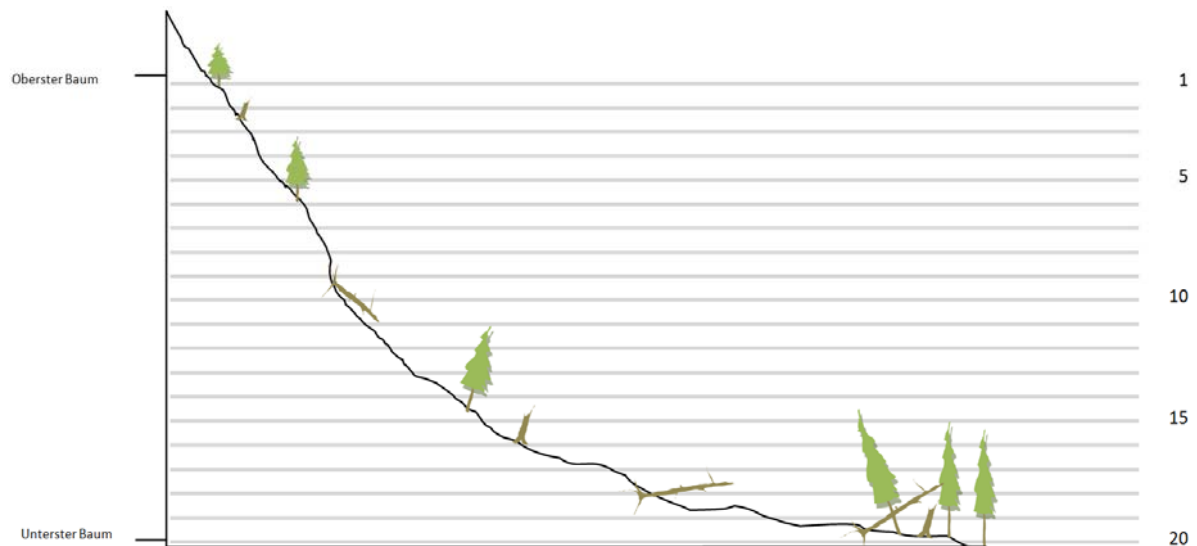


Abbildung 13: Bestimmung der 20 Punkte für die Felddatenentnahmen

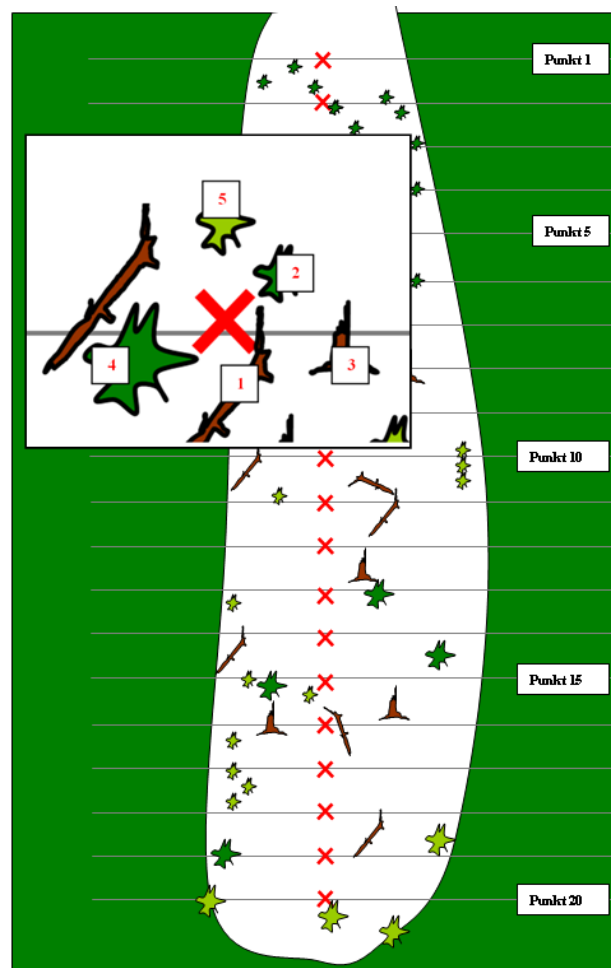


Abbildung 14: Auswahl der 5 untersuchten Bäume pro Punkt

Dargestellt ist ein Lawinenzug mit den 20 Punkten für die Felddatenentnahmen und in der Vergrößerung die Auswahl der untersuchten 5 Bäume pro Punkt. In diesem Beispiel wurde an den Bäumen 1 und 2 je zwei Bohrkern entnommen. An den Bäumen 3 (gebrochen) und 4, 5 (stehend) wurden nur Messungen vorgenommen.

Aufnahmen

Während der Feldaufnahmen wurden die Exposition des Lawinenzugs und die Höhe über Meer des höchsten und tiefsten Baumes im Lawinenzug aufgenommen. Für jeden untersuchten Baum wurden 11 Parameter aufgenommen (Tabelle 1). Der Stammdurchmesser wurde jeweils auf einer Höhe von 0.2-0.8 m gemessen, damit die Durchmesser von unter 1 m gebrochenen Bäumen in die Analysen mit einbezogen werden konnten. An jeweils einem stehenden und einem nicht stehenden Baum pro Aufnahmepunkt wurden 2 Bohrkerne mit einem Zuwachsbohrer (Suunto, Finnland) zwischen 0.2 und 0.8 m Stammhöhe entnommen. Der erste Bohrkern (a) wurde hangparallel entnommen, der zweite Bohrkern (b) in Hangrichtung, wenn möglich von der hangabwärtsgerichteten Stammseite. In vielen Fällen war das Beprobieren von unten wegen dem steilen Gelände oder wegen der vielen Äste auf der Stammunterseite nicht möglich. Jedem untersuchten Baum wurde ein Code zugewiesen. Im Code enthalten sind der Lawinenzug, der Punkt im Lawinenzug in dessen Nähe der Baum steht und die Information, ob der Baum beprobt wurde oder nicht. Im Code-Beispiel **Sp32a+b** steht **Sp** für Splügen, **3** für den drittobersten Punkt im Lawinenzug, **2** für den nächsten nicht stehenden Baum am Punkt 3 und **a+b** liefert die Information, dass zwei Bohrkerne entnommen wurden. Ob der zweite Bohrkern (b) auf der hangaufwärtsgerichteten oder hangabwärtsgerichteten Stammseite entnommen wurde, erkennt man im Code an einem zusätzlichen **o** für obere Stammseite. In einigen Lawinenzügen wurden wenige Bäume entwurzelt und mitgerissen, so dass bei der Feldarbeit nur noch einige Wurzelreste im Boden sichtbar waren. Diese Wurzelkrater wurden auch als ein einzelner Baum gezählt und codiert.

Tabelle 1: Im Feld aufgenommene Parameter pro Baum

| Parameter | Beschreibung | Methode |
|-------------------|---|--------------------------------|
| Baumart | Baumart des untersuchten Baumes | - |
| Baumzustand | Baum stehend, gebrochen oder entwurzelt | Begutachtung im Feld |
| Koordinaten | Koordinaten des Baumstandortes | GPS |
| Höhe über Meer | Höhe des Baumstandortes | Höhenmesser (Victorinox) |
| Topographie | Kleinräumige Topografie des Baumstandortes (Kuppe, Mulde, Mitte oder Rand des Lawinenzugs) | Begutachtung im Feld |
| Baumhöhe | Geschätzte Baumhöhe in Meter | Schätzung im Feld |
| Kronenlänge | Geschätzte Kronenlänge in Meter | Schätzung im Feld |
| Stammdurchmesser | Gemessener Stammdurchmesser auf 0.2 bis 0.8 m Stammhöhe | Brusthöhendurchmesser-Messband |
| Nachbarbäume | Anzahl Bäume im Umkreis von 5 Metern | Begutachtung im Feld |
| Baum hangaufwärts | Geschätzte Entfernung zum nächsten Baum hangaufwärts in Meter und Angaben zum BHD, zur Baumart und zum Baumzustand des entsprechenden Baumes. | Schätzung im Feld |
| Besonderes | Auffälligkeiten des Baumes oder Standorts | Begutachtung im Feld |

3.2 Aufbereitung und Analyse der Bohrproben

Präparieren der Bohrkerne

Die Bohrkerne wurden auf Bohrkernträger mit vorgefertigter Kerbe aufgeklebt und beschriftet. Dabei war darauf zu achten, dass die Holzfaserrichtung vertikal ausgerichtet wurde, damit die Jahrringe später gut erkennbar sind. Bei den gebrochenen Bohrkernen war darauf zu achten, dass die richtige Jahrringreihenfolge eingehalten wurde. Die geklebten Bohrkerne mit einem Durchmesser von circa 5 mm wurden auf einer Bandschleifmaschine bearbeitet (Schleifpapier mit Korngrösse 180, 320, 400), bis die einzelnen Holzzellen mit einer Lupe genau zu erkennen waren.

Messen und Datieren

Bei allen Bohrkernen wurden die Jahrringbreiten gemessen und das Baumalter gezählt. Für das Messen der Jahrringbreiten wurde die Jahrringmessanlage „LINTAB 5“ der Marke RINNTECH, eine Stereolupe mit maximal 40-facher Vergrößerung „MZ6“ von LEICA und eine Kaltlichtleuchte „CLS 150X“ von LEICA verwendet. Mit der Jahrringmessanlage wurde die Probe auf dem Messtisch mit einer Kurbel von Jahrringgrenze zu Jahrringgrenze verschoben und mit der Software TSAPWin 0.55 vom Computer aufgezeichnet. So entstand für jeden Bohrkern eine Messreihe mit einer Genauigkeit von 0.01 mm. Die Messungen erfolgten im rechten Winkel zur Jahrringgrenze von der Borke zum Mark. Bei den lebenden Bäumen wurde der letzte Jahrring in der Wachstumsperiode 2008 gebildet. Teilweise waren schon einige Frühholzzellen des Jahres 2009 sichtbar. Bei den toten Bäumen wurde der letzte Jahrring in den meisten Fällen in der Wachstumsperiode vor dem Lawinenereignis gebildet. Es wurde notiert, ob bei den Bohrkernen makroskopische Spuren von Fäulnis sichtbar waren und in welchen Jahren die Bäume traumatische Harzkanäle aufwiesen.

Mit dem Programm COFECHA (Holmes 1983, Grissino-Mayer 2001) wurden die Messreihen eines Lawinenzugs untereinander verglichen und die segmentweisen Korrelationen berechnet. Es wurden nur die hangparallel entnommenen Bohrkerne verwendet. Das Programm unterteilte jede Messreihe in 32-jährige Segmente, die 16 Jahre mit dem folgenden Segment überlappen. Anhand einer provisorischen Referenzkurve aller Bohrkerne eines Lawinenzugs wurden die bestmöglichen Positionen für die Segmente und die entsprechende Korrelation angegeben. Beim Vergleich aller Segmente einer Messreihe liess sich erkennen, ob Jahrringe fehlen oder nicht gezählt wurden. Aufgrund der schwachen Korrelationen zwischen den meisten Bohrkernen war es schwierig, Korrekturen vorzunehmen. Deshalb konnten nicht alle Bohrkerne exakt datiert werden. Für die Arbeit war vor allem das Wachstumsverhalten der Bäume vor dem Lawinenereignis von Interesse und die genaue Datierung der Bohrkerne spielte eine zweitrangige Rolle.

Datenanalyse

Die Jahrringdaten wurden verwendet, um das Wachstum der Bäume in den letzten 20 Jahren vor dem Lawinenereignis zu analysieren.

Wachstumstrend: Bei jedem dendrochronologisch untersuchten Baum wurden die durchschnittlichen Jahrringbreiten der Jahre 11 bis 20 vor dem Lawinenereignis durch die durchschnittlichen Jahrringbreiten der Jahre 1 bis 10 vor dem Lawinenereignis geteilt (Formel 1). Damit erhält man die Werte, welche in dieser Arbeit als **Wachstumstrend** bezeichnet werden. Die Wachstumstrend-Werte zeigen, wie stark sich die durchschnittlichen

Jahrringbreiten der vorletzten 10 Jahre von den durchschnittlichen Jahrringbreiten der letzten 10 Jahre unterscheiden. Bei gleichen durchschnittlichen Jahrringbreiten hat der Wachstumstrend den Wert 1. Je grösser der Wachstumstrend ist, desto kleiner sind die durchschnittlichen Jahrringbreiten der letzten 10 Jahre im Vergleich zu den vorletzten 10 Jahren, das heisst, wenn der Wachstumstrend grösser als 1 ist, hat das Jahrringbreitenwachstum abgenommen. Umgekehrt verhält es sich beim Wachstumstrend kleiner als 1. In diesem Fall hat das Jahrringbreitenwachstum zugenommen. Das Jahrringbreitenwachstum weist einen natürlichen Wachstumstrend auf, der sich bei älteren Bäumen in der Abnahme der Jahrringbreite mit dem Alter äussert. Eine Studie von Bigler und Bugmann (2003) hat gezeigt, dass die letzte Lebensphase eines Baumes durch abnehmendes Wachstum gekennzeichnet ist, welches mehrere Jahre bis Jahrzehnte dauern kann. Dieser Wachstumstrend kann eine leicht positive Zunahme der Wachstumstrend Werte bewirken.

$$\text{Wachstumstrend} = \frac{\text{Durchschnittliche Jahrringbreite der vorletzten 10 Jahre vor dem Lawinenereignis}}{\text{Durchschnittliche Jahrringbreite der letzten 10 Jahre vor dem Lawinenereignis}}$$

[1]

Abrupte Wachstumsänderungen

Es wurde untersucht, wie viele positive und negative abrupte Wachstumsänderungen die beprobten Bäume in den letzten 20 Jahren vor dem Lawinenereignis erfahren haben. Mit der STAND DYN Software (Bleicher 2007) wurde das Jahrringwachstum der untersuchten Bäume auf abrupte Wachstumsänderungen untersucht. Dabei wurden folgende Grenzwerte für abrupte Wachstumsänderungen verwendet. Die Jahrringbreite einer positiven abrupten Wachstumsänderung muss > 140% der Durchschnittsjahrringbreite der letzten sieben Jahre sein, gefolgt von 3 Jahren mit einer Jahrringbreite >135% der verwendeten sieben Jahre Durchschnittsjahrringbreite.

Bei einer negativen abrupten Wachstumsänderung muss die Jahrringbreite <61% und die folgenden drei Jahrringbreiten < 66% der durchschnittlichen Jahrringbreite der sieben Jahre vor der abrupten Wachstumsänderung sein. In der Analyse werden vier aufeinanderfolgende Jahrringe mit Extremwerten verlangt, damit einjährige, durch Wetter verursachte Wachstumsschwankungen nicht berücksichtigt werden.

3.3 Lawinensimulation mit RAMMS

3.3.1 Benötigte Daten

Die sechs Lawinen wurden mit dem numerischen Modell RAMMS (Rapid Mass Movements) simuliert (Christen et al., 2005; Christen et al., 2007; Gruber and Bartelt, 2007; Casteller et al., 2008). Als Grundlage für die Simulationen dienten ein Geländemodell, eine Karte und ein Orthophoto des jeweiligen Lawinenzugs.

Es wurde das digitale Terrainmodell (DTM-AV GRID 2 m) der amtlichen Vermessung (copywrite: DTM-AV @ 2009 swisstopo(DV033492.2)) aus dem Jahr 2004 verwendet. Beim DTM-AV (roh) handelt es sich um ein direkt erfasstes digitales Terrainmodell (anstehender Boden ohne Bewuchs und Hochbauten) mit Einzelpunkten über das gesamte Gebiet. Als Erfassungsmethoden diente ein flugzeuggestütztes Laserscanning. Die Höhengenaugigkeit (einfache Standardabweichung) des Terrainmodells an einer beliebigen Stelle ist

besser als ± 0.5 m. Die Punktdichte ist ca. 1 Punkt pro 2 m^2 im offenen Gebiet. Die Auflösung beträgt 2 m unterhalb 2000 m.ü.M und 25 m oberhalb 2000 m.ü.M. Die Karte hat eine Auflösung von 1: 25 000 und stammt aus dem Jahr 2005 (copywrite: Swiss Map 25 @ 2009 swisstopo(DV033492.2)). Das Orthophoto von SWISSIMAGE hat eine Auflösung von 25 / 50 cm und stammt aus dem Jahr 2001(copywrite: SWISSIMAGE @ 2009 swisstopo(DV033492.2)). Für eine möglichst genaue Simulation der sechs untersuchten Lawinen mit dem RAMMS Programm wurden folgende Daten über die Lawine benötigt: Grobe Volumenklassifizierung der Lawine (tiny: $< 5000 \text{ m}^3$, small: $5\,000 - 25\,000 \text{ m}^3$, medium: $25\,001-60\,000 \text{ m}^3$, large $> 60\,001 \text{ m}^3$), Wiederkehrdauer der Lawine, die Lage und Fläche des Anrissgebietes, die Anrisshöhe und die Erosionshöhe der Lawine sowie die Schneedichte. Die Reibungsparameter wurden nicht manuell verändert. Um möglichst genaue Daten über die Druckkräfte, Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten zu erhalten, die bei jedem Baum während dem Lawinenniedergang herrschten, wurde versucht, die Lawinen so realitätsnah wie möglich zu simulieren. Die Schwierigkeit bestand darin, dass viele Eingabegrößen geschätzt werden mussten. Da das Datum der Lawinenniedergänge bekannt ist, konnten bei der Schätzung der Anriss- und Erosionshöhe jeweils die Lawinenbulletins und die Neuschneedaten des SLF als Grundlage benutzt werden. Das Anrissgebiet wurde aufgrund der bekannten Lawinenlaufbahn und der topographischen Gegebenheiten ausgewählt. Das ungefähre Auslaufgebiet und das Datum des Ereignisses waren immer bekannt. Für Trockenschneelawinen wurde eine Schneedichte von 200 kg/m^3 und für Nassschneelawinen eine Schneedichte von 400 kg/m^3 verwendet. Die Wahl der Dichte hat bei der Simulation einen Einfluss auf die Druckkraft, jedoch nicht auf das Fliessverhalten.

3.3.2 Simulation

Der Wald wurde im Simulationsprogramm manuell definiert, um den bewaldeten Anteil des Lawinenzugs möglichst genau in der Simulation zu berücksichtigen. Die von Bartelt und Stöckli (2001) identifizierten Waldparameter erhöhen die Reibung und beeinflussen das Fliessverhalten der Lawine im Wald. Deshalb werden für bewaldete Flächen andere Reibungsparameter benutzt als für offene Flächen. Um die sechs Lawinenabgänge möglichst genau zu simulieren wurden die Berechnungen mit dem Programm mehrere Male mit leicht variierenden Eingabedaten ausgeführt bis eine möglichst ähnliche Lawine simuliert werden konnte. Die Wahl der Wiederkehrdauer und Volumenkategorie wirkt sich auf die verwendeten Reibungsparameter aus, was einen zusätzlichen Spielraum für die Simulation offenlässt. Je grösser die Wiederkehrdauer und Volumenkategorie gewählt wird, desto kleinere Reibungswerte werden bei der Berechnung benutzt. Bei den Nassschneelawinen wurde teilweise absichtlich mit zu kleinen Volumenkategorien gerechnet, um genügend hohe Reibungswerte zu erhalten, da die Schneedichte bei den Berechnungen nicht im Fliessverhalten mit einbezogen wird.

Tabelle 2: Lawinendaten die für die Simulation mit RAMMS verwendet wurden

| | Wiederkehrdauer (Jahre) | Volumenkategorie (m^3) | Anrisshöhe (m) | Erosionshöhe (m) | Schneedichte (kg/m^3) |
|----------|-------------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|----------------------------------|
| Cresta | 30 | klein | 1 | 0.8 | 200 |
| Dischma | 10 | sehr klein | 0.5 | 0.35 | 400 |
| Klosters | 100 | mittel | 1 | 0.6 | 200 |
| Lareit | 100 | klein | 0.8 | 0.4 | 200 |
| La Rösa | 100 | mittel | 0.5 | 0.3 | 400 |
| Splügen | 30 | sehr klein | 0.3 | 0.2 | 400 |

3.4 Statistische Analyse

3.4.1 Deskriptive Statistik

Für die deskriptive Statistik wurden folgende Darstellungsarten benutzt: Histogramme, Spine Plots, Boxplots, Streudiagramme, Linienplots. Die Boxplots wurden verwendet, um die drei Baumzustände entwurzelt, gebrochen und stehend mit den Einflussfaktoren zu vergleichen. Die folgenden Einflussfaktoren wurden für die Analysen verwendet: Standort, Baumart, Baumzustand, Durchmesser, Topografie, Anzahl Nachbarbäume, Gesundheit (faul oder nicht faul), Anzahl Harzkanäle, Baumalter, Wachstumstrend, Anzahl abrupter Wachstumsschwankungen, Druckkraft, Fliessgeschwindigkeit und Fliesshöhe der Lawine (Tabelle 3). Die Grafiken wurden alle mit dem Statistikprogramm R (R Development Core Team 2008) gemacht.

3.4.2 Schliessende Statistik

Ziel der statistischen Analyse war es, die wichtigsten Einflussfaktoren für den Baumzustand zu finden. Dazu wurden Klassifikationsbäume, Signifikanztests und logistische Regressionsmodelle verwendet. Als Zielvariable wurde der Baumzustand (entwurzelt, gebrochen, stehend) benutzt und als erklärende Variablen die Einflussfaktoren (Tabelle 3).

Klassifikationsbaum:

Der Klassifikationsbaum ist ein nicht-parametrisches Verfahren zur rekursiven Partitionierung von Daten. Sie erklären die Streuung einer Zielvariablen (kategorial) mit erklärenden Variablen (kategorial oder metrisch) (Breiman et al. 1984). Die Klassifikationsbäume wurden benutzt, um zu veranschaulichen, welche der Einflussfaktoren die Bäume am besten in die Baumzustände entwurzelt, gebrochen und stehend unterteilen. Dabei wurde auch der Grenzwert des jeweiligen Einflussfaktors angegeben. Die Klassifikationsbäume wurden mit der Funktion *rpart* im Programm R erstellt.

Statistische Tests

Wilcoxon-Paardifferenztest: Der Test wurde verwendet, um den Unterschied eines Einflussfaktors zwischen den Baumzuständen entwurzelt, gebrochen und stehend zu testen. Da die Daten nicht normal verteilt sind, wurde der Wilcoxon-Paardifferenztest verwendet, welcher prüft, ob die Differenzen paarig angeordneter Beobachtungen symmetrisch mit dem Median gleich Null verteilt sind (Sachs & Heddrich, 2006). Damit es für R möglich ist, den exakten p-Wert des Tests zu berechnen, auch falls Bindungen zwischen den Werten auftreten, wurde die Funktion *wilcox.exact()* aus dem Paket *exactRankTest* verwendet.

Spearman-Rang-Korrelationstest: Dieser Test setzt wird bei nicht-normalverteilten Daten eingesetzt (Siegel und Castellan 1988) und wurde verwendet, um die Spearman-Rang-Korrelation zwischen der Bruchhöhe der Bäume und der Druckkraft und der Bruchhöhe der Bäume und dem Baumdurchmesser zu berechnen. Der Test wurde mit der Funktion *cor.test(..., method="spearman")* mit R berechnet.

Logistische Regressionsmodelle

Mit dem logistischen Regressionsmodell wurde die Überlebenswahrscheinlichkeit der Bäume in den Lawinenzügen modelliert. Die Voraussage einer binären Zielvariable (Baumzustand) wie dem Status „stehend“ oder „nicht stehend“ eines Baumes aufgrund verschiedener unabhängiger Variablen (Einflussfaktoren) impliziert die Anpassung eines logistischen Regressionsmodells (Hosmer und Lemeshow 1989). Der allgemeine Ausdruck einer logistischen Regression sieht folgendermassen aus:

$$P(Y=1 | X) = \frac{e^{X\beta}}{1+e^{X\beta}} \quad [2]$$

Y entspricht der Zielvariablen Baumzustand (Y=0: nicht stehender Baum, Y=1: stehender Baum). $P(Y=1 | X)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum nach dem Lawineneignis noch steht und somit eine Funktion der Matrix X, welche die Informationen über die erklärenden Variablen enthält. β repräsentiert den Vektor der Regressionskoeffizienten.

Mit dem Programm R wurde die Regression ausgehend vom vollen Modell manuell rückwärts mit der Funktion „drop1“ gerechnet. Als volles Modell wird das Anfangsmodell bezeichnet, das alle Variablen enthält, deren Einfluss getestet werden sollen. „Drop1“ vergleicht basierend auf F-Tests das aktuelle Modell mit jedem Modell, das entstehen würde, wenn eine Variable weggelassen würde. Die p-Werte aus diesen Tests dienen als Entscheidungsgrundlage, welche Variable im jeweils nächsten Schritt aus dem Modell entfernt wurde. Das Modell galt als angepasst, wenn der Befehl „drop1“ auf dem 0.05 Signifikanzniveau nur noch signifikante Variablen ausgab.

Als erklärende Variablen wurden folgende Einflussfaktoren verwendet: Durchmesser, Anzahl Nachbarbäume, Anzahl abrupter positiver (releases) und negativer (decreases) Wachstumsschwankungen, Baumalter und Druckkraft. Das untenstehende Modell wurde als volles Modell verwendet.

$$\log \left(\frac{P(Y=1 | X)}{P(Y=0 | X)} \right) \sim \beta_1 + \beta_2 \times \text{Durchmesser} + \beta_3 \times \text{Anz. Nachbarb.} + \beta_4 \times \text{Anz. Releases} + \beta_5 \times \text{Anz. Decreases} + \beta_6 \times \text{Wachstumsschw.} + \beta_7 \times \text{Baumalter} + \beta_8 \times \text{Druckkraft}$$

[3]

Das angepasste logistische Modell kann nicht zur Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit auf Populationsniveau der Lawinenzüge verwendet werden, da von den untersuchten 5 Bäumen pro Aufnahmepunkt immer mindestens ein stehender und ein nicht stehender Baum für die Bohrkernentnahme ausgesucht wurde. Es ist jedoch eine Grundlage zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum nach dem Lawinenabgang noch steht unter der Berücksichtigung der erklärenden Variablen (Woodward 1999).

Mit der Funktion *predict.glm* konnten mit R Voraussagen über die Wahrscheinlichkeit für die Bäume, ein Lawineneignis stehend zu überleben für die ganze Durchmesserbandbreite gemacht und grafisch dargestellt werden.

Tabelle 3: Einflussfaktoren

| Einflussfaktor | Beschreibung | Methode |
|-------------------------------|---|---|
| Standort | Unterscheidung zwischen den sechs Lawinen | - |
| Baumart | Unterscheidung der Baumarten | - |
| Baumzustand | Zuordnung des Baumzustands (entwurzelt, gebrochen, stehend) | - |
| Durchmesser | Stammdurchmesser auf 0.2 bis 0.8 m Stammhöhe | Messband |
| Topografie | Kleinräumige Topografie des Baumstandortes (Kuppe, Mulde, Mitte, Rand des Lawinenzugs) | Begutachtung im Feld |
| Anzahl Nachbarbäume | Anzahl Bäume im Umkreis von 5 Metern (Radius = 5 m). | Begutachtung im Feld |
| Gesundheit | Makroskopisch sichtbare Fäule bei Bohrkernen sichtbar oder nicht | Visuelle Analyse |
| Anzahl Jahre mit Harzkanälen | Anzahl Jahre, in denen ein Baum traumatische Harzkanäle gebildet hat. | Dendrochronologische Analyse |
| Baumalter | Anzahl Jahrringe eines Bohrkerns | Dendrochronologische Analyse |
| Wachstumstrend | Durchschnittlichen Jahrringbreiten der Jahre 11 bis 20 vor dem Lawinenereignis geteilt durch die durchschnittlichen Jahrringbreiten der Jahre 1 bis 10 vor dem Lawinenereignis. | Dendrochronologische Analyse und Formel 1 |
| Abrupte Wachstumsschwankungen | Anzahl positiver und negativer abrupter Wachstumsänderungen der letzten 20 Jahre vor dem Lawinenereignis pro Baum | Dendrochronologische Analyse und STAND DYN Software (Bleicher 2007) |
| Druckkraft | Maximale Druckkraft (kPa) der Lawine auf jeden untersuchten Baum. | Lawinensimulationsprogramm RAMMS |
| Fliessgeschwindigkeit | Maximale Fliessgeschwindigkeit (m/s) der Lawine bei jedem untersuchten Baum. | Lawinensimulationsprogramm RAMMS |
| Fliesshöhe | Maximale Fliesshöhe (m) der Lawine bei jedem untersuchten Baum. | Lawinensimulationsprogramm RAMMS |

4 Resultate

4.1 Deskriptive Statistik

Insgesamt wurden 617 Bäume untersucht. Alle daraus gewonnenen Variablen verteilen sich auf sechs verschiedene Lawinenzüge mit den entsprechenden Baumarten (Abbildung 15). In jedem Lawinenzug wurden etwa 100 Bäume untersucht (Cresta: n=100, Dischma: n=108, Klosters: n=107, La Rösa: n=102, Lareit: n=100, Splügen: n=100). Baumartenspezifische Analysen konnten anhand des Stichprobenumfangs nur für Fichten und Lärchen gemacht werden.

4.1.1 Baumart

Es wurden Daten von sechs verschiedenen Baumarten für die Analysen benutzt. Die wichtigsten Baumarten sind Fichte (n= 296) und Lärche (n= 268). Die Baumartenzusammensetzung unterscheidet sich bezüglich der vorkommenden Baumarten in einigen und bezüglich Baumartenanteil in jedem Lawinenzug ausser bei den beiden Lawinenzügen im Puschlav (Lareit und La Rösa), welche vollständig aus Lärchen bestehen (Abbildung 15). Die Lawinenzüge bei Cresta, Klosters und Splügen weisen einen ähnlich grossen Anteil an Fichten und einen ähnlich kleinen Anteil an Lärchen auf. Der Lawinenzug Dischma weist die heterogenste Baumartenzusammensetzung auf, mit einem relativ grossen Anteil an Grünerlen.

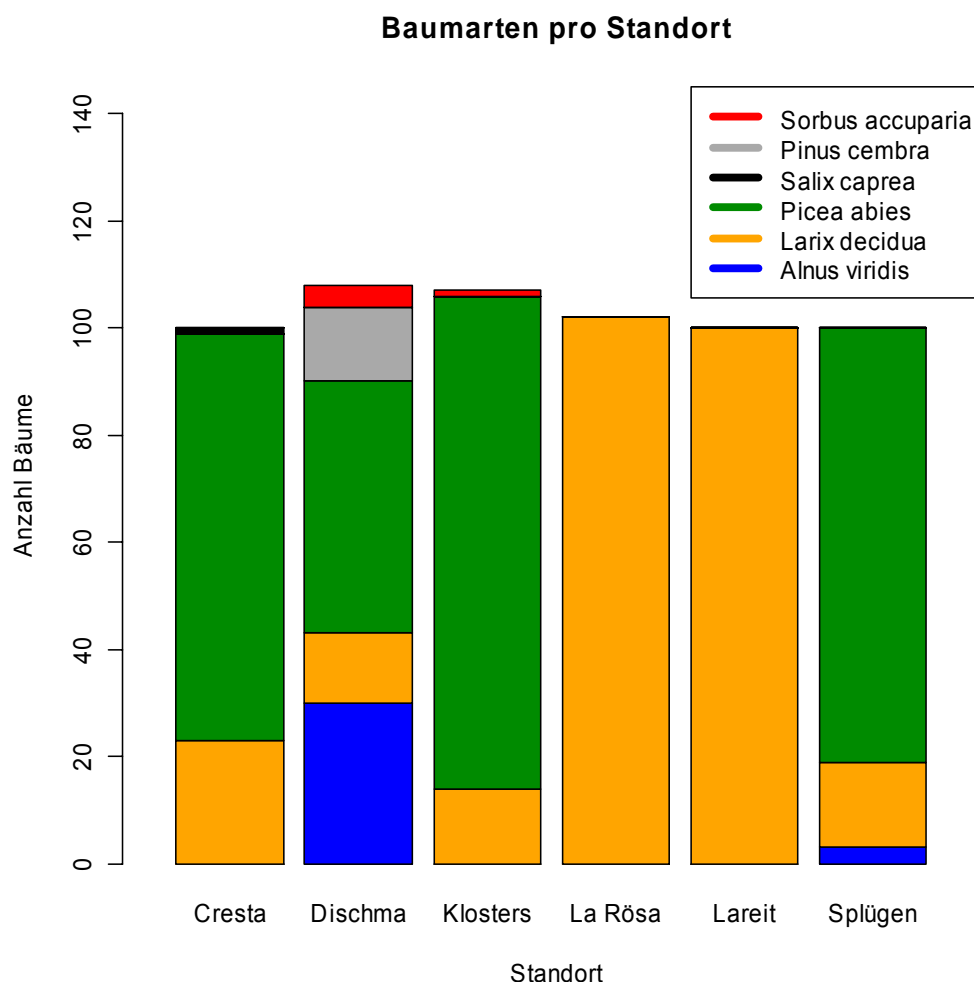


Abbildung 15: Baumartenzusammensetzung pro Standort

(Totale Anzahl untersuchter Bäume (n=617), davon Alnus viridis (n=33), Larix decidua (n=268), Picea abies (n=296), Pinus cembra (n=14), Salix caprea (n=1) und Sorbus accuparia (n=5))

4.1.2 Durchmesser

Die Durchmesserverteilungen unterscheiden sich zwischen den Lawinenzügen. Auch innerhalb der Lawinenzüge gibt es Unterschiede, unter anderem, weil die Feldaufnahmen entlang eines Höhengradienten gemacht wurden. Allgemein haben die höher gelegenen Bäume, welche im Bereich der Waldgrenze stehen, meist einen kleineren Durchmesser als die tiefer gelegenen Bäume im Durchlauf und Auslaufgebiet der Lawine. Die meisten Bäume gibt es in der Durchmesserklasse 11-20 cm (Abbildung 16). Von den Baumarten Arve, Grünerle, Sal Weide und Vogelbeere gibt es zu wenige Stichproben für eine Auswertung der Durchmesserverteilung.

Fichten und Lärchen weisen eine ähnliche Durchmesserverteilung auf. Die Standorte mit den durchschnittlich kleinsten Durchmessern sind Lareit und Cresta, wo mehr als 90% der Bäume kleinere Durchmesser als 40 cm haben. Am meisten grosse Durchmesser wurden in La Rösa gemessen, wo 50% der Durchmesser grösser als 31 cm sind (Tabelle 4).

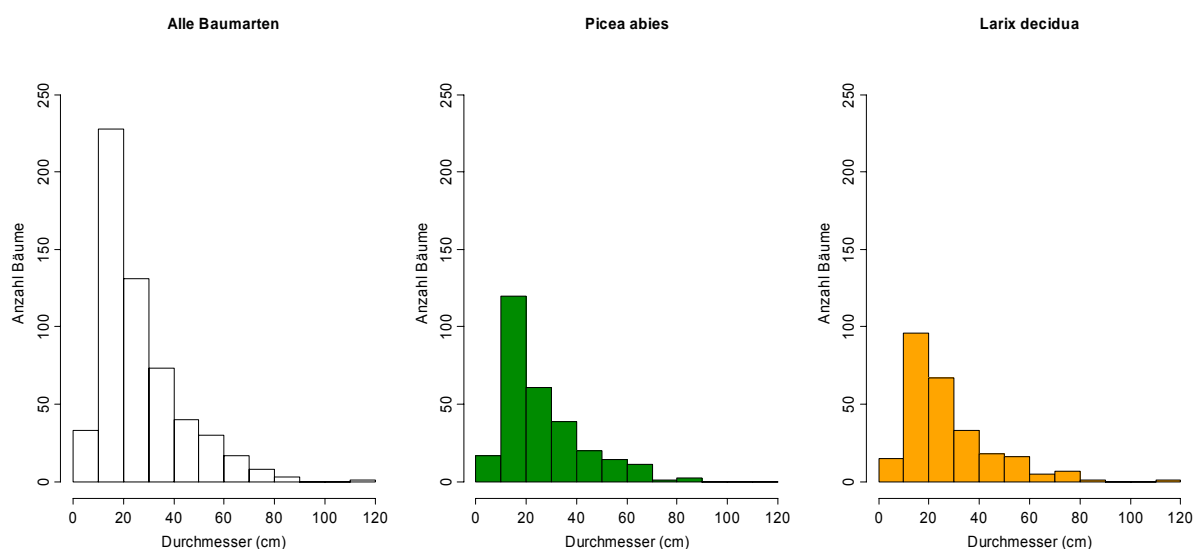


Abbildung 16: Durchmesserverteilung

Es wurden nur Bäume mit einem Durchmesser von mindestens 10 cm untersucht. In der Klasse 0-10 cm befinden sich die Bäume mit 10 cm Durchmesser.

Tabelle 4: Quantilen der Durchmesserverteilung aufgeteilt nach Standort und Baumart
(Prozentualer Anteil der Bäume unter einem bestimmten Durchmesser)

| Standort: | 0% | 10% | 50% | 90% | 100% |
|------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| Cresta | 10 cm | 11 cm | 17 cm | 39 cm | 114 cm |
| Dischma | 10 cm | 12 cm | 25 cm | 45 cm | 76 cm |
| Klosters | 10 cm | 10 cm | 20 cm | 52 cm | 81 cm |
| La Rösa | 12 cm | 18 cm | 31 cm | 59 cm | 85 cm |
| Lareit | 10 cm | 11 cm | 19 cm | 36 cm | 63 cm |
| Splügen | 10 cm | 12 cm | 26 cm | 60 cm | 90 cm |
| Baumart: | | | | | |
| Fichte | 10 cm | 11 cm | 21 cm | 50 cm | 90 cm |
| Lärche | 10 cm | 12 cm | 23 cm | 53 cm | 114 cm |

4.1.3 Baumalter

Beim Lawinenzug in Klosters war es nicht möglich, 20 gebrochene Bäume zu beproben, weil viele gebrochene Fichten bereits faul waren. Von den insgesamt 222 Bäumen sind 50% jünger als 38 Jahre (Abbildung 17). Im Lawinenzug Lareit sind sogar 50% der Bäume jünger als 26 Jahre. Die ältesten Bäume stehen in La Rösa und Klosters, wo 50% älter als 49 Jahre beziehungsweise 57 Jahre sind und der älteste Baum 223 Jahre beziehungsweise 171 Jahre alt ist.

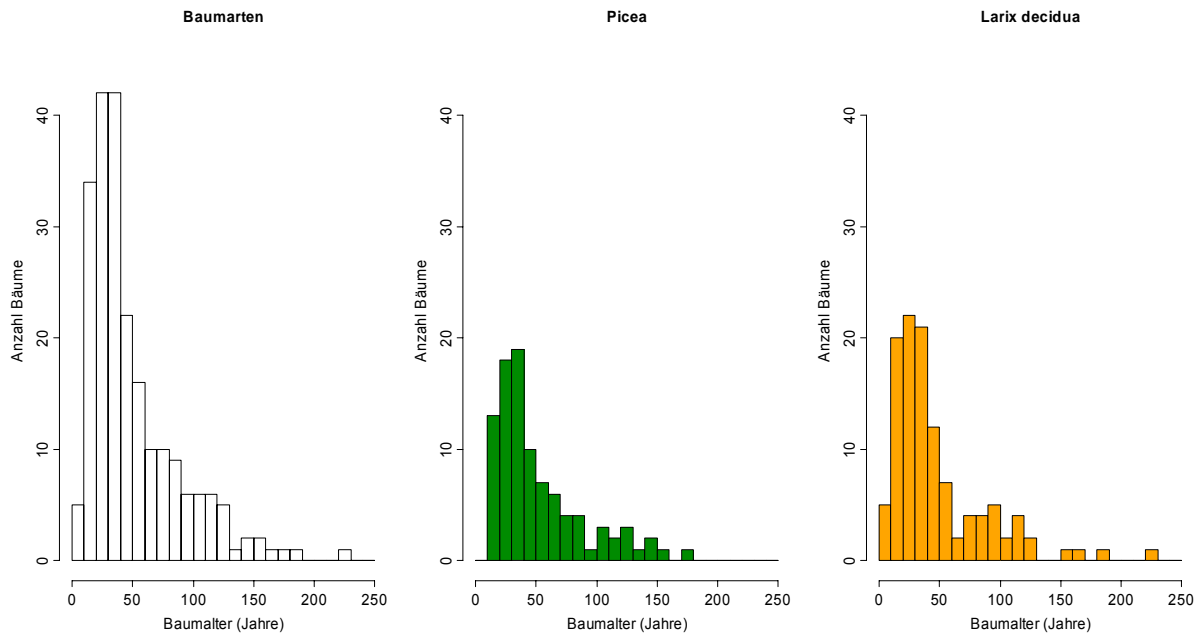
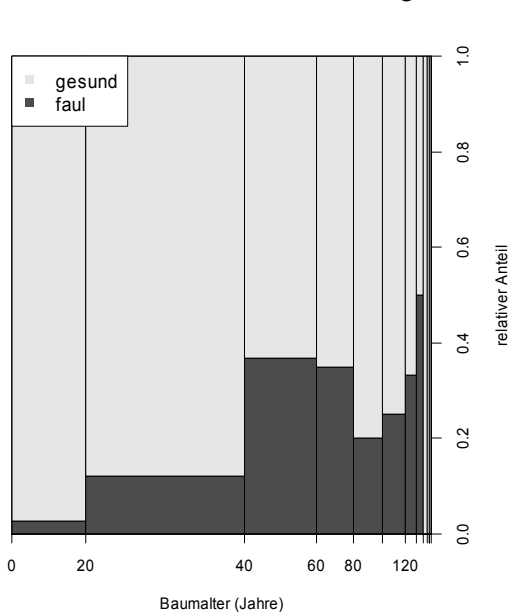


Abbildung 17: Altersverteilung

Anzahl der Bäume in zehnjährigen Altersklassen. Es wurde das Alter von 222 Bäumen bestimmt (Fichten: n = 95, Lärchen: n = 114, Arven: n = 7, Grünerlen: n = 5, Vogelbeeren: n = 1).

Während der Jahrringanalyse wurde notiert, welche Bohrkern makroskopisch sichtbare Zeichen von Fäulnis aufwiesen. Vergleicht man die faulen Bohrkern mit dem Baumalter,



fällt auf, dass der Anteil fauler Bohrkern in den höheren Baumaltersklassen zunimmt (Abbildung 18). Zusätzlich wurden die Anzahl Jahre mit traumatischen Harzkanälen für jeden Bohrkern festgehalten. Insgesamt gibt es 151 Bäume mit traumatischen Harzkanälen. Mit der Anzahl der Harzkanäle pro Bohrkern konnte kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen Baumzustand und Lawinenabgang gezogen werden.

Abbildung 18: Altersverteilung der gesunden Bäume und faulen Bäume.

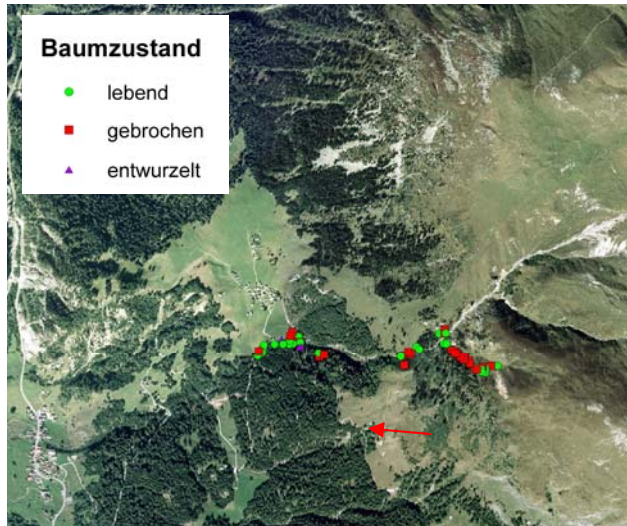
Von den 224 auf Fäule untersuchten Bäume waren 182 gesund und 42 faul.

4.2 Lawinensimulation mit RAMMS

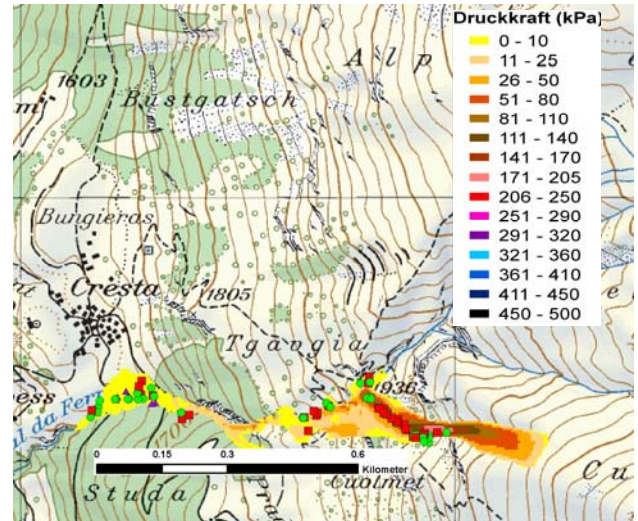
Mit dem Modellierungssystem RAMMS wurden die maximal erreichten Druckkräfte, Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten berechnet. Die Resultate sind in den Abbildungen 19 bis 24 grafisch dargestellt. Die Daten für jeden einzelnen Baum wurden für die Auswertungen im Kapitel 4.3 verwendet.

Cresta

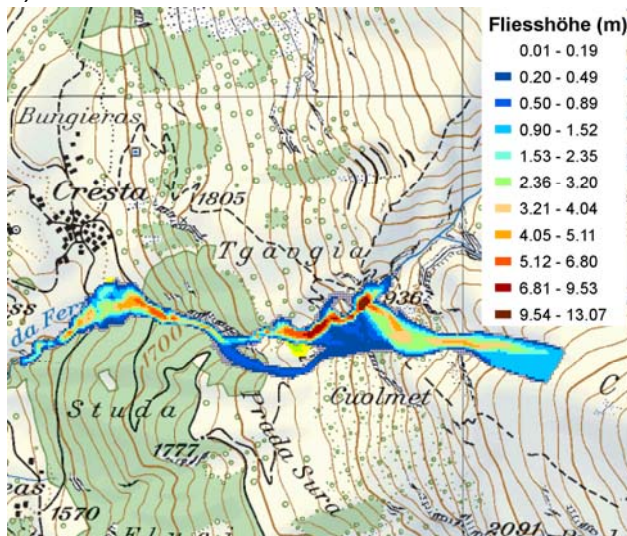
a)



b)



c)



d)

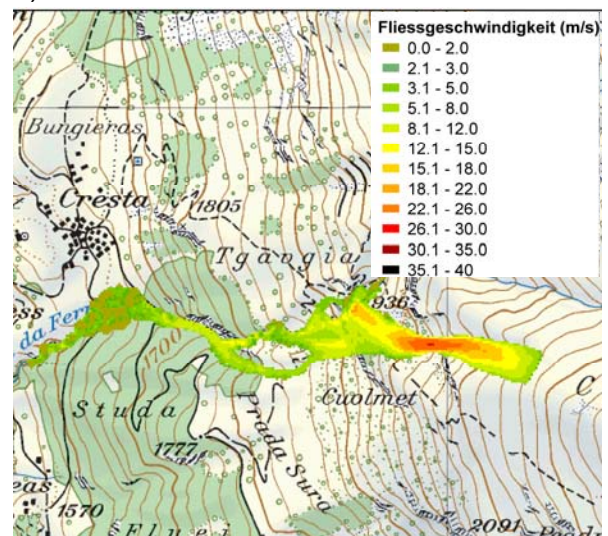


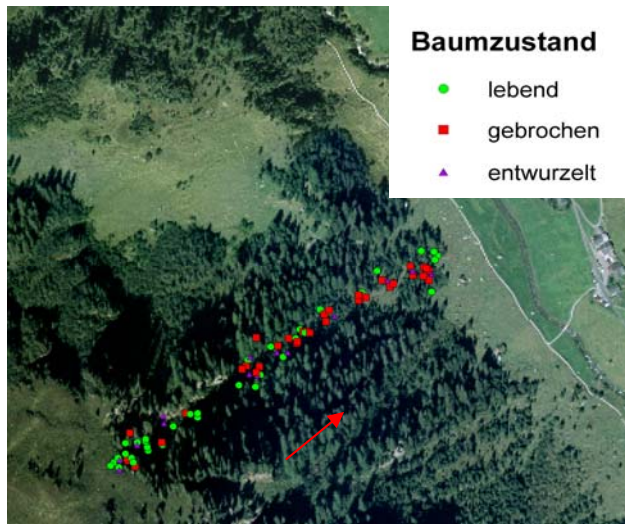
Abbildung 19: Resultate der Lawinensimulation bei Cresta

a) Orthophoto der Lawine mit dem Baumzustand. Der rote Pfeil gibt die Fliessrichtung an, b) Druckkraft der Lawine, c) Fliesshöhe der Lawine, d) Fliessgeschwindigkeit der Lawine

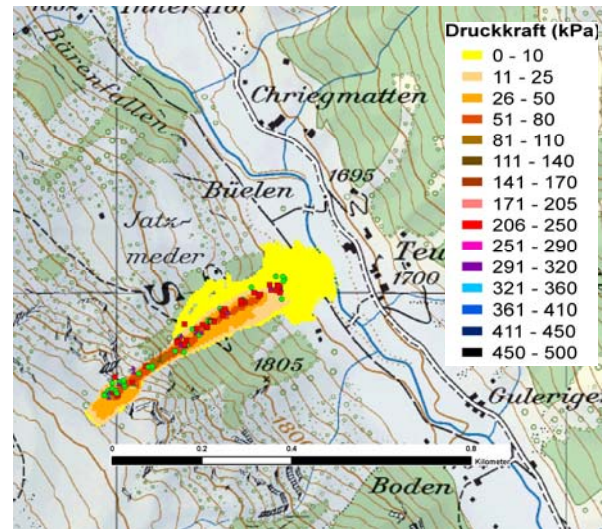
Die Lawine floss ab dem Punkt 1936 in der Karte einem Bachbett entlang, welches teilweise recht schmal ist und das Fliessverhalten stark beeinflusst. Wo die Lawine das schmale, fast waagrecht zur Lawinenfliessrichtung verlaufende Bachbett erreicht, wurden Fliesshöhen von bis zu 13 Metern berechnet. Die reale Lawine breitete sich auf der Höhe von Cresta weniger stark nach Norden aus (Abbildung 19). Die Bäume sind vor allem im oberen Teil des Lawinenzuges gebrochen. Im mittleren Teil floss die Lawine überwiegend im Bachbett.

Dischma

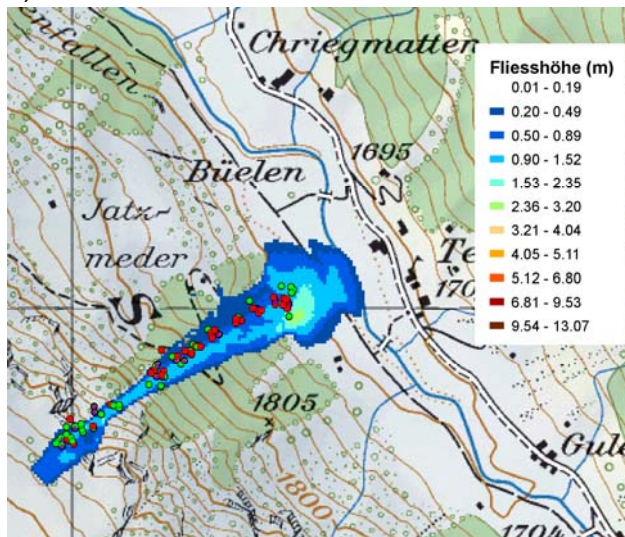
a)



b)



c)



d)

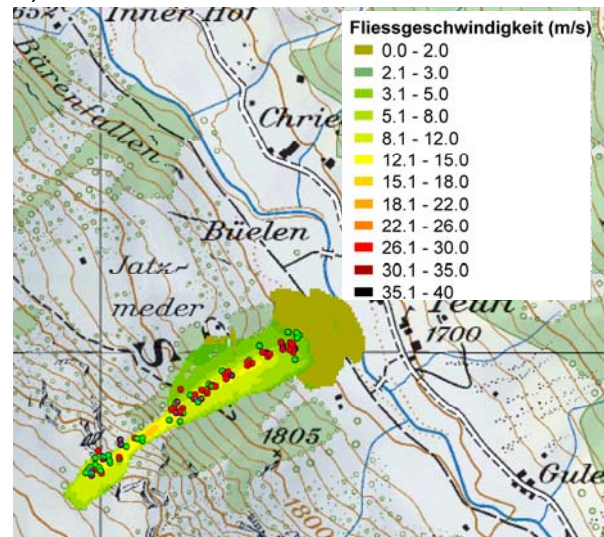


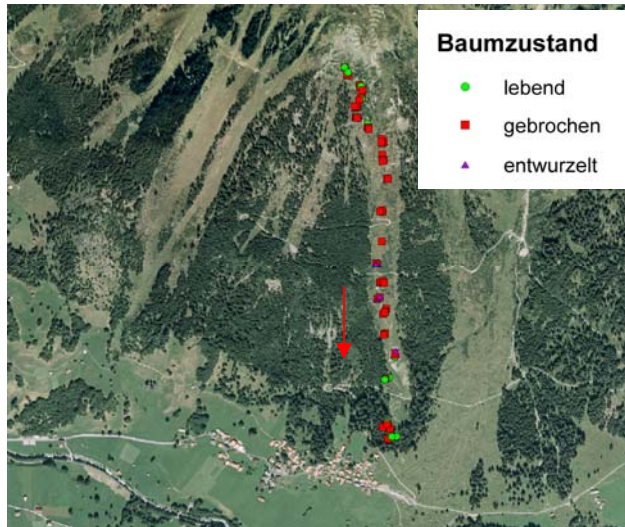
Abbildung 20: Resultate der Lawinensimulation im Dischmatal

a) Orthophoto der Lawine mit dem Baumzustand. Der rote Pfeil gibt die Fließrichtung an, b) Druckkraft der Lawine, c) Fließhöhe der Lawine, d) Fließgeschwindigkeit der Lawine

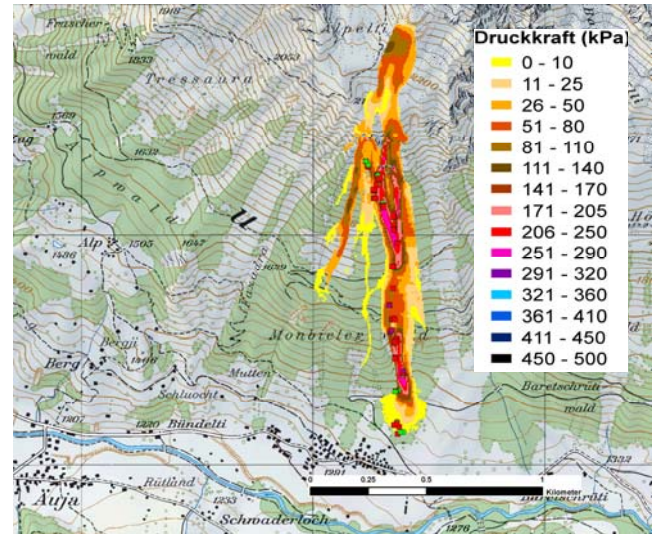
Die Nassschneelawine löste sich im Bereich der Baumgrenze und kam etwa bei den untersten drei stehenden Bäumen (Abbildung 20, grüne Punkte am weitesten rechts) zum Stillstand. Das berechnete Auslaufgebiet ist grösser als bei der realen Lawine. Die stehenden und die nicht stehenden Bäume sind über den ganzen Lawinenzug verteilt. Im Bereich der Waldgrenze sind viele Bäume (überwiegend Arven) stehengeblieben.

Klosters

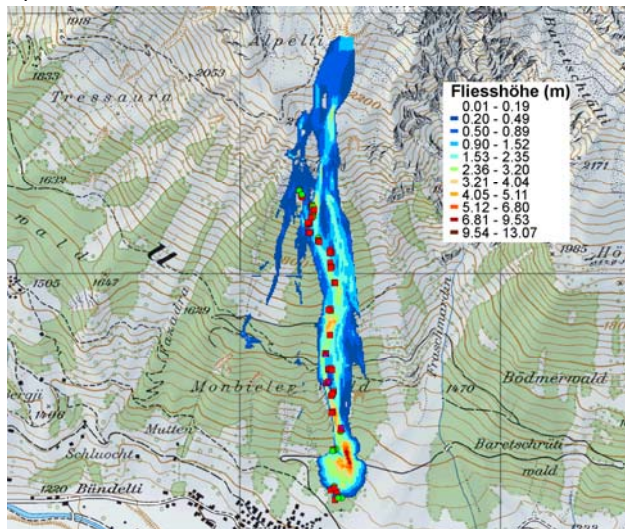
a)



b)



c)



d)

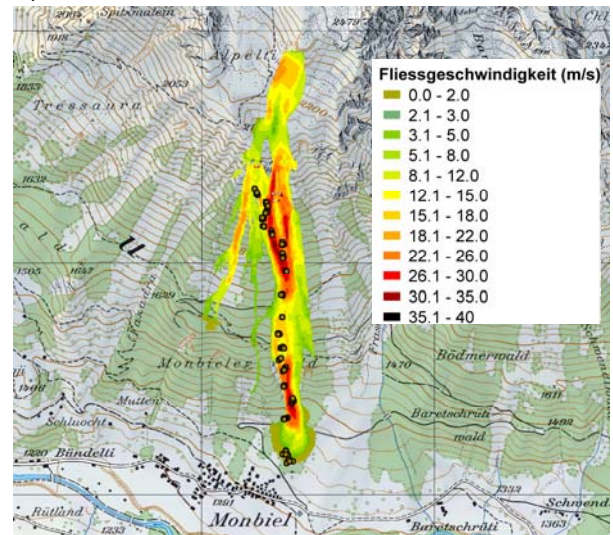


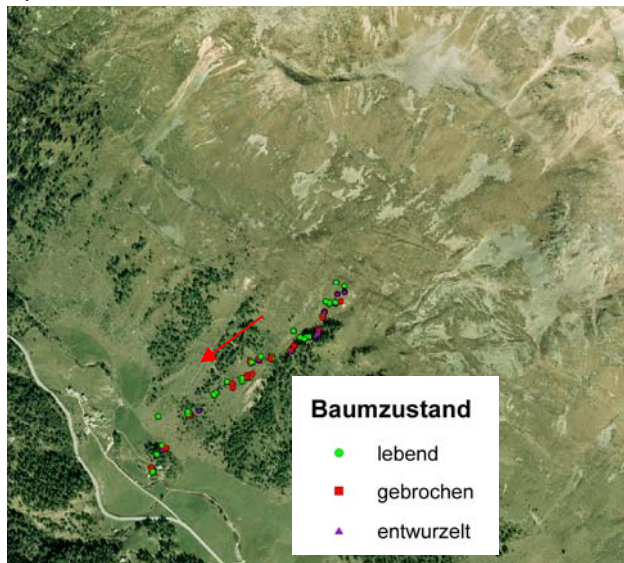
Abbildung 21: Resultate der Lawinensimulation bei Klosters

a) Orthophoto der Lawine mit dem Baumzustand. Der rote Pfeil gibt die Fließrichtung an, b) Druckkraft der Lawine, c) Fließhöhe der Lawine, d) Fließgeschwindigkeit der Lawine

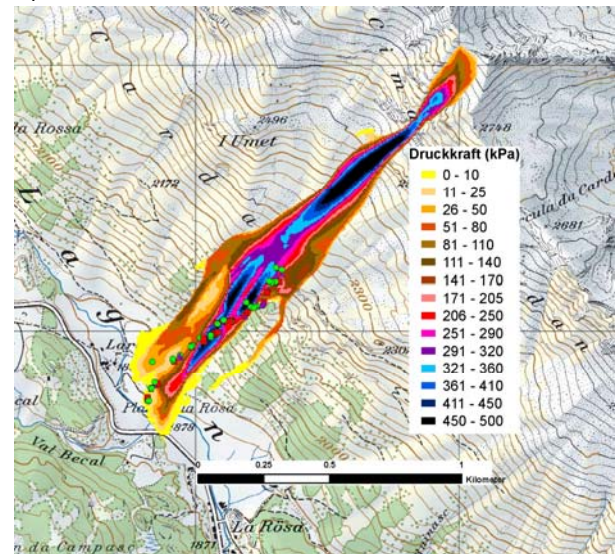
In den Abbildungen 21 a) bis d) wurde eine zweite, weiter östlich simulierte Lawine nicht dargestellt. Das Auslaufgebiet der simulierten Lawine stimmt etwa mit dem Auslauf der realen Lawine überein. Im Lawinenzug sind die meisten Bäume gebrochen. Im Bereich der Waldgrenze und im Auslaufgebiet hat es auch stehende Bäume.

Lareit

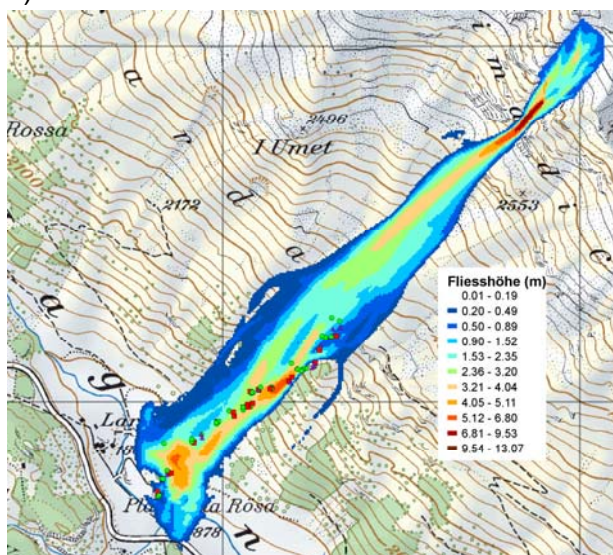
a)



b)



c)



d)

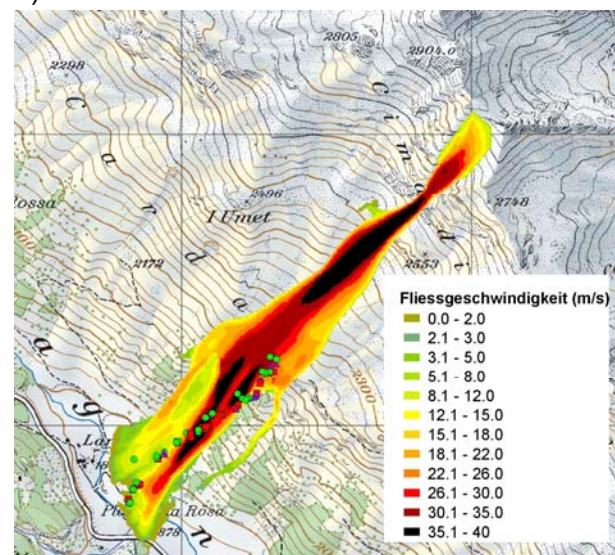


Abbildung 22: Resultate der Lawensimulation bei Lareit

a) Orthophoto der Lawine mit dem Baumzustand. Der rote Pfeil gibt die Fließrichtung an, b) Druckkraft der Lawine, c) Fließhöhe der Lawine, d) Fließgeschwindigkeit der Lawine

Für die Lawine bei Lareit wurden die höchsten Druckkräfte (459 kPa) und Fließgeschwindigkeiten (39.1 m/s) berechnet (Abbildung 22). Das Auslaufgebiet entspricht etwa dem der realen Lawine und liegt in der Talsohle. Die stehenden und nicht stehenden Bäume sind über den ganzen Lawenzug verteilt.

La Rösa

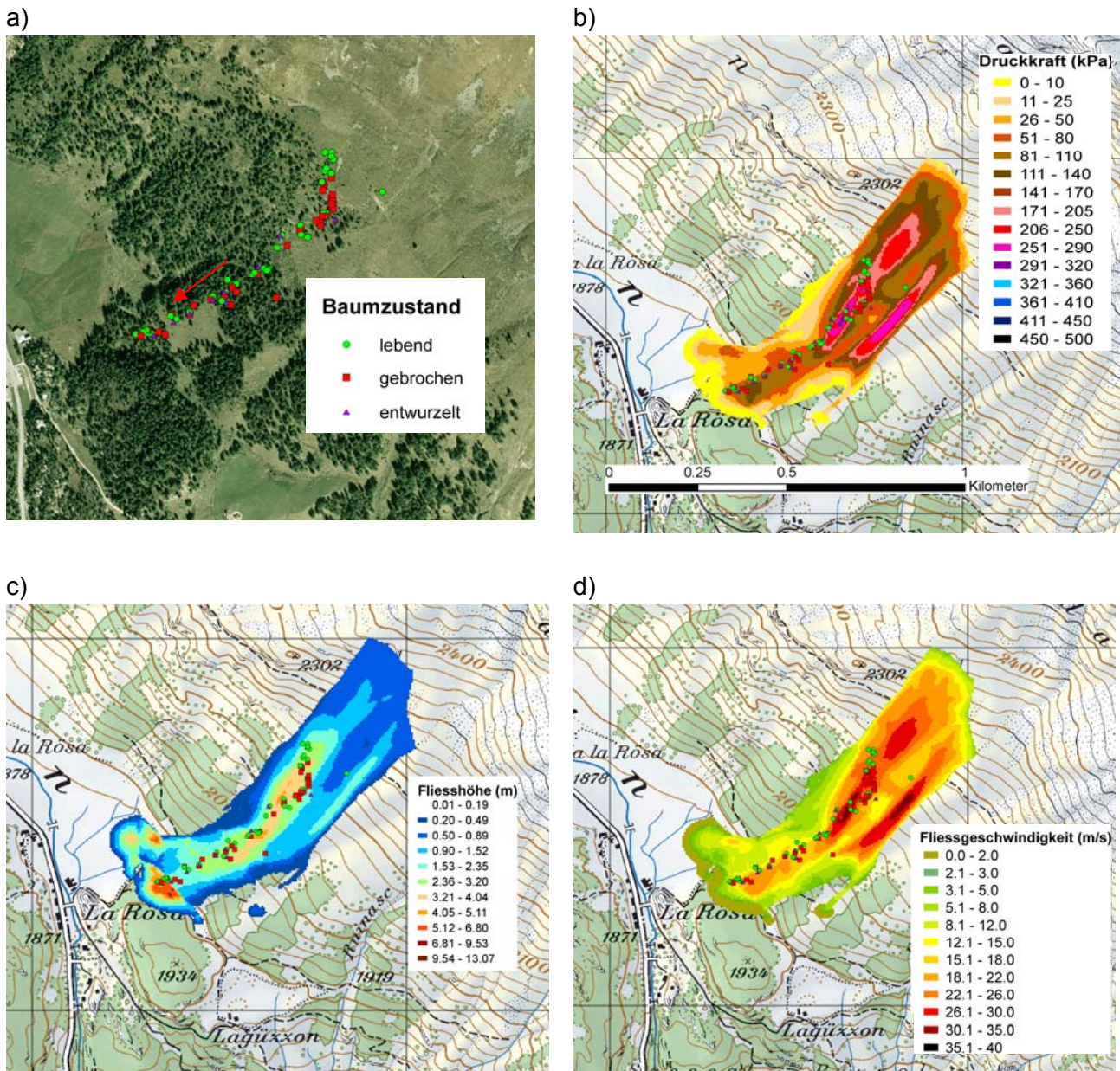


Abbildung 23: Resultate der Lawensimulation bei La Rösa

a) Orthophoto der Lawine mit dem Baumzustand. Der rote Pfeil gibt die Fließrichtung an, b) Druckkraft der Lawine, c) Fließhöhe der Lawine, d) Fließgeschwindigkeit der Lawine

Für die Simulation wurde ein relativ breites Anrissgebiet gewählt. In der Realität war die Lawinenausdehnung nordwestlich der untersuchten Bäume weniger ausgeprägt als in der Simulation (Abbildung 23). Die stehenden und nicht stehenden Bäume sind gleichmässig über den Lawinenzug verteilt. Es wurden ungewöhnlich viele, oft grosse Lärchen entwurzelt, da die Lawine in der unteren Hälfte des Lawinenzuges durch einen recht alten Lärchenwald floss.

Splügen

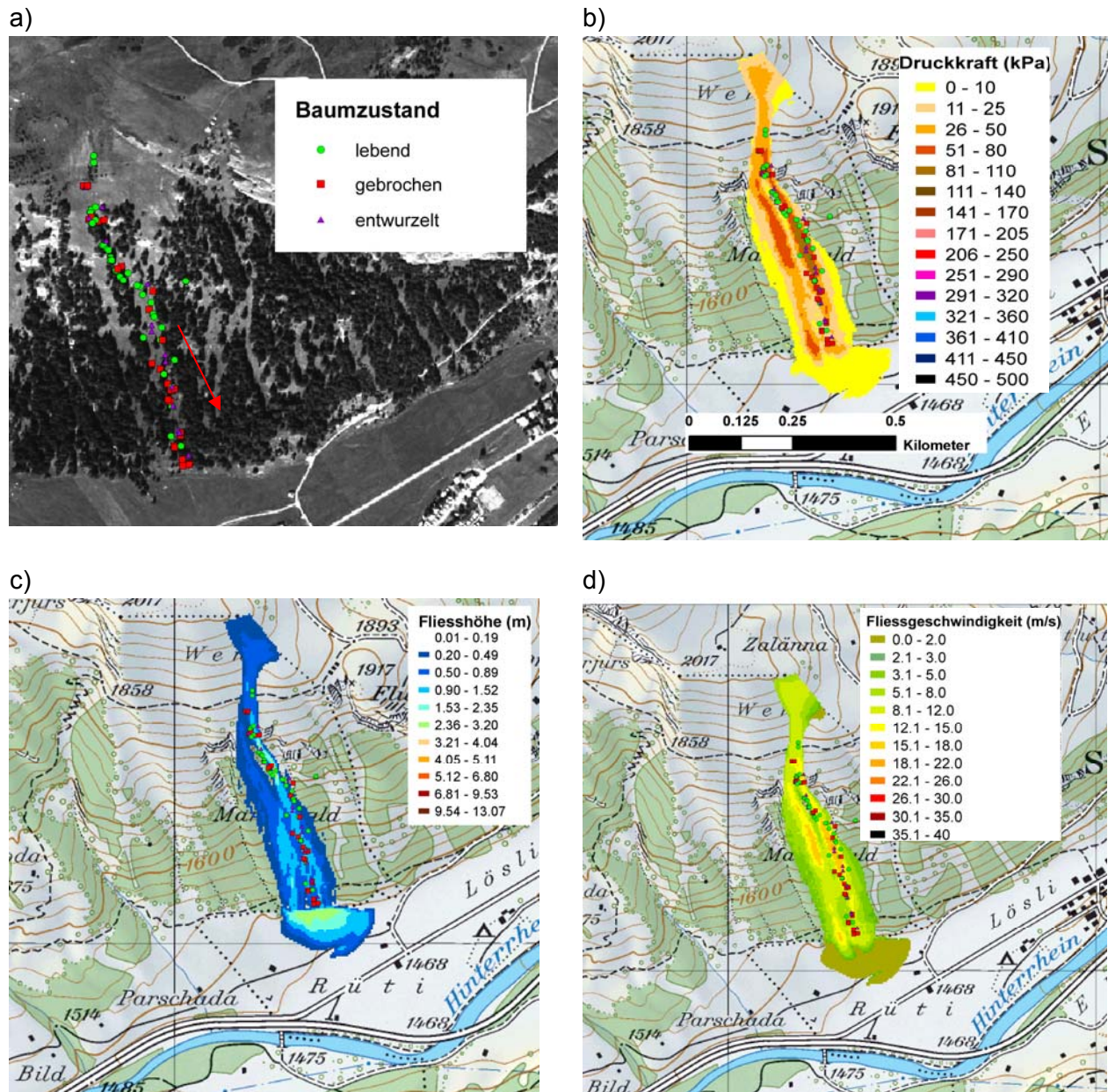


Abbildung 24: Resultate der Lawensimulation bei Splügen

a) Orthophoto der Lawine mit dem Baumzustand. Der rote Pfeil gibt die Fließrichtung an, b) Druckkraft der Lawine, c) Fliesshöhe der Lawine, d) Fliessgeschwindigkeit der Lawine

Die Nassschneelawine kam im flacheren Gelände am Hangfuss schneller zum Stillstand als es mit der Lawensimulation mit RAMMS berechnet wurde (Abbildung 24). Im oberen Teil des Lawinenzugs hat es mehr stehende Bäume als im unteren Teil. Im oberen und mittleren Teil des Lawinenzugs floss die Lawine durch einen offenen Wald. Im unteren Teil stehen die Bäume dichter beisammen.

4.3 Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren und dem Baumzustand nach dem Lawineneignis

Die Einflussfaktoren sind die Variablen, die im Feld aufgenommen (z.B. Durchmesser), bei der Laborarbeit gemessen (z.B. Jahringbreite) oder mit einem Modell (RAMMS, StandDyna) berechnet (z.B. Druckkraft) wurden (Tabelle 3). Bei der Beschreibung des Baumzustandes wird unterschieden, ob ein Baum nach dem Lawineneignis noch steht (stehend), ob der Stamm gebrochen wurde (gebrochen) oder ob der Baum mitsamt Wurzeln von der Lawine umgeworfen wurde (entwurzelt).

Da die Resultate meistens vom Standort und der Baumart abhängen, wurden bei der Analyse der Einflussfaktoren und des Baumzustandes in der Regel zuerst die Bäume aller Baumarten und Standorte untersucht und danach die gleichen Analysen mit den Bäumen der einzelnen Baumarten oder Standorte durchgeführt. Für eine separate Analyse nach Baumart haben nur Fichten und Lärchen eine ausreichende Anzahl Bäume.

4.3.1 Baumart

Der Anteil entwurzelter, gebrochener und stehender Bäume unterscheidet sich je nach Baumart (Abbildung 25). Die Fichte reagiert am häufigsten auf das Lawineneignis. Nur 34% der untersuchten Fichten waren stehend. Der Anteil entwurzelter Bäume ist bei den Lärchen und Fichten (16%) ähnlich gross. Den höchsten Anteil an gebrochenen Bäumen haben die Fichten mit 50% gefolgt von den Lärchen mit 35%. Den grössten Anteil stehender Bäume findet man bei den Grünerlen (91%) gefolgt von den Arven, Lärchen und zuletzt Fichten. Der Stichprobenumfang der Arven und Grünerlen ist klein und die Ergebnisse sind deshalb vorsichtig zu interpretieren.

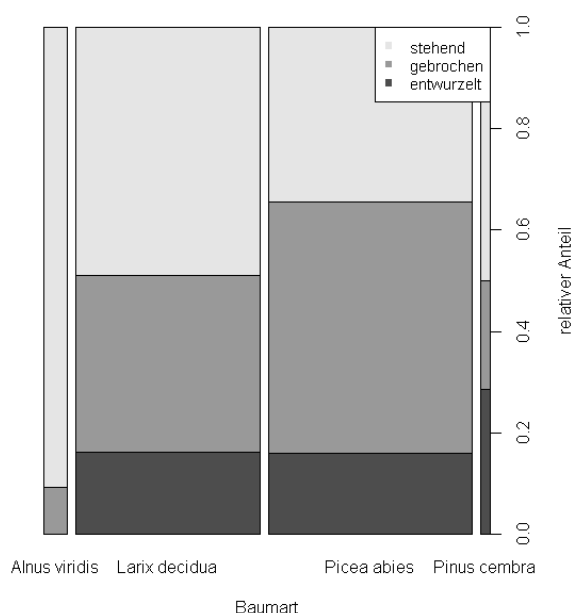


Abbildung 25: Anteil der entwurzelter, gebrochenen und stehenden Bäume pro Baumart

Die vier Balken stellen je eine Baumart dar, die Balkenbreite entspricht der Anzahl Bäume pro Baumart (Alnus viridis: n=33, Larix decidua: n=268, Picea abies: n=296, Pinus cembra: n=14). Salix caprea (n=1) und Sorbus aucuparia (n=5) wurden aufgrund der kleinen Stichprobengrösse in der Grafik nicht berücksichtigt. Die vertikale Gliederung der Balken widerspiegelt den Baumzustand der Baumarten. Die Balkenhöhe wird proportional zum Anteil entwurzelter, gebrochener und stehender Bäume aufgeteilt.

Der Anteil entwurzelter, gebrochener und stehender Bäume unterscheidet sich zwischen den Lawinenzügen (Abbildung 26). Im Lawinenzug bei Klosters wurde im Vergleich mit den anderen Lawinenzügen der grösste Anteil der Bäume gebrochen (70%). Den grössten Anteil entwurzelter Bäume gab es bei der Lawine bei Lareit (22%) und den grössten Anteil überlebender Bäume gab es im Lawinenzug Splügen (50%). In drei von vier Lawinenzügen, wo die Fichte vorkommt, hat sie den kleinsten Anteil stehender Bäume und war die Baumart, die am meisten gebrochen wurde. Eine Ausnahme ist der Standort Splügen, wo die Lärchen den kleinsten Anteil stehender und den grössten Anteil gebrochener Bäume aufweisen. Bei den fichtendominierten Standorten sind die Stichprobengrössen der Lärche klein und deshalb vorsichtig zu beurteilen. Bei den zwei Lawinenzügen im Puschlav wurden nur Lärchen untersucht. Der Anteil stehender Lärchen ist in beiden Lawinenzügen ähnlich hoch. Beim Lawinenzug Lareit wurden mehr Lärchen entwurzelt und beim Lawinenzug La Rōsa wurden mehr Lärchen gebrochen.

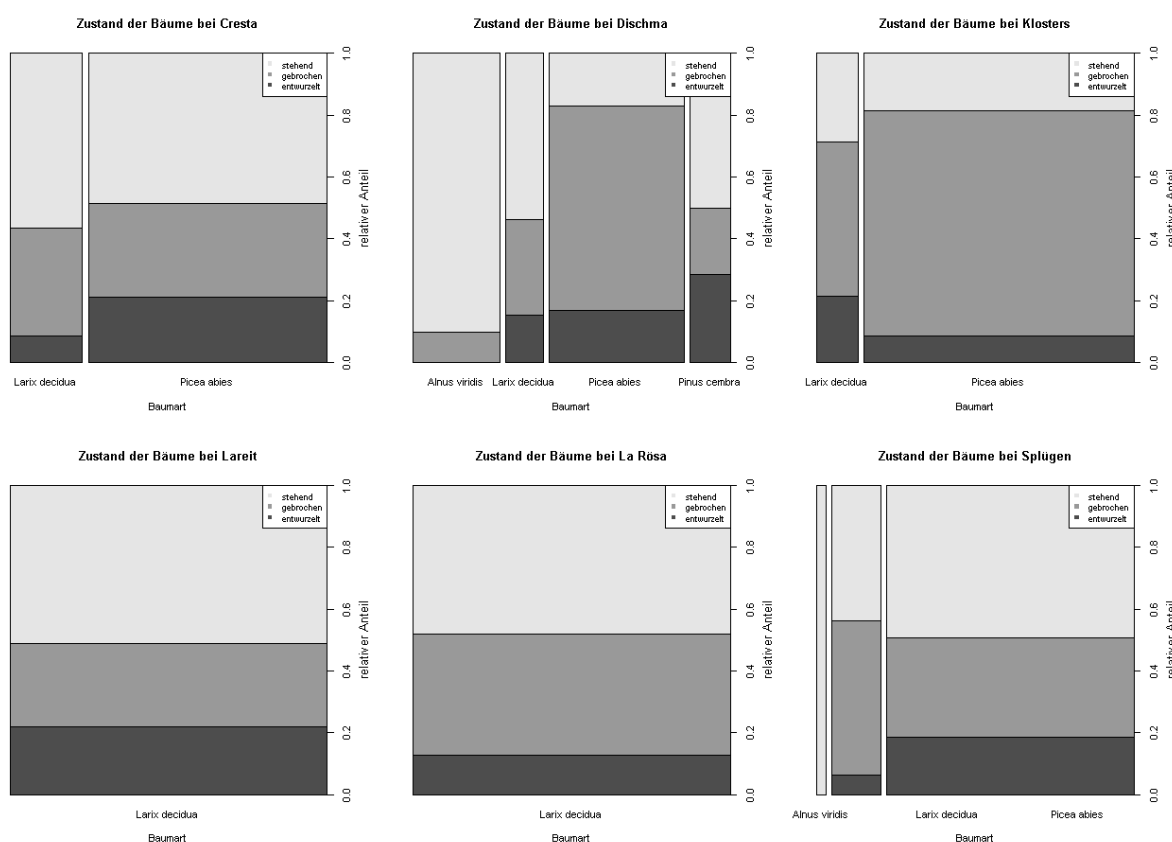


Abbildung 26: Anteil der entwurzelten, gebrochenen und stehenden Bäume pro Standort

4.3.2 Stammdurchmesser

Der Stammdurchmesser erwies sich als wichtigster Einflussfaktor für den Baumzustand nach dem Lawinenereignis. Die Durchmesser der stehenden Bäume sind signifikant grösser als die der gebrochenen ($p\text{-Wert} = 4.85 \times 10^{-4}$) und entwurzelten ($p\text{-Wert} = 5.51 \times 10^{-4}$) Bäume (Abbildung 27 a). Je grösser die Durchmesser der untersuchten Bäume in den Lawinenzügen sind, desto weniger wahrscheinlich ist es, dass sie von der Lawine gebrochen oder entwurzelt wurden (Abbildung 27 b).

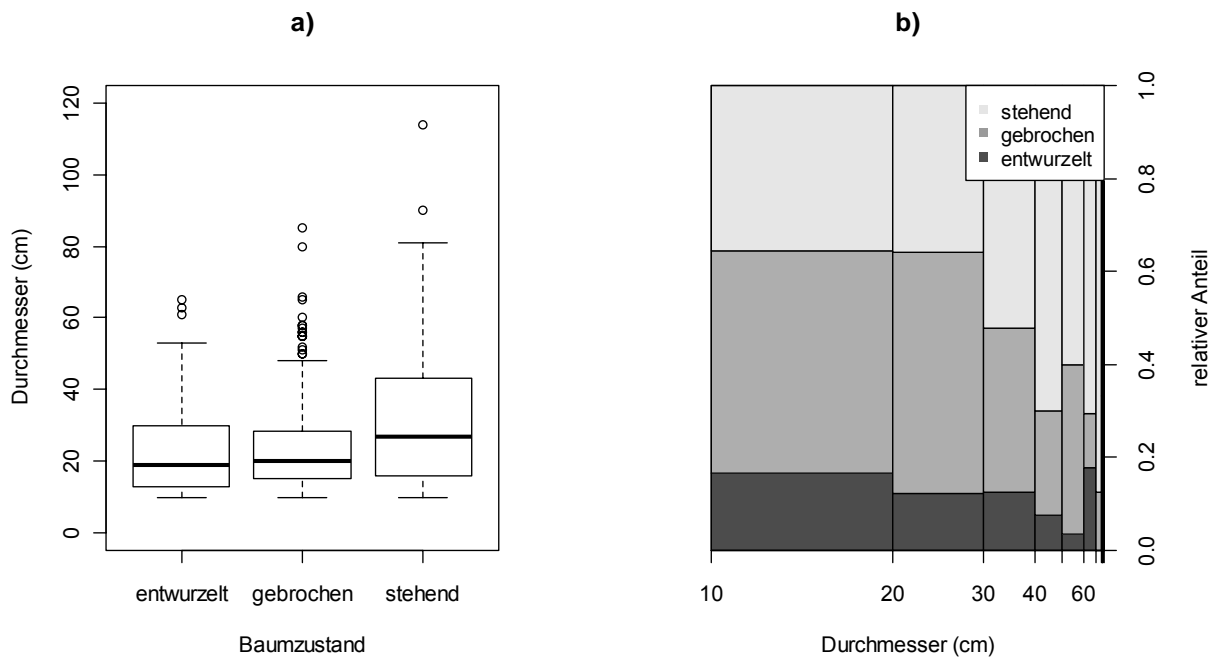


Abbildung 27: Baumzustand und Durchmesser aller Bäume.

Die Untersuchung der Stammdurchmesser der zwei wichtigsten Baumarten Fichte und Lärche zeigte, dass bei beiden Baumarten die stehenden Bäume tendenziell die grössten Stammdurchmesser aufweisen (Abbildung 28 a und b). Bei der Fichte ist der Unterschied im Stammdurchmesser zwischen den stehenden und gebrochenen Bäumen ($p\text{-Wert} = 6.66 \times 10^{-8}$) deutlicher als bei den Lärchen ($p\text{-Wert} = 0.2156$). Im Gegensatz zur Fichte ($p\text{-Wert} > 0.1$) zeigt die Lärche jedoch einen deutlichen Unterschied zwischen den Durchmessern der entwurzelten zu den grösseren Durchmessern der gebrochenen ($p\text{-Wert} = 165.4 \times 10^{-4}$) und stehenden ($p\text{-Wert} = 29.8 \times 10^{-4}$) Lärchen.

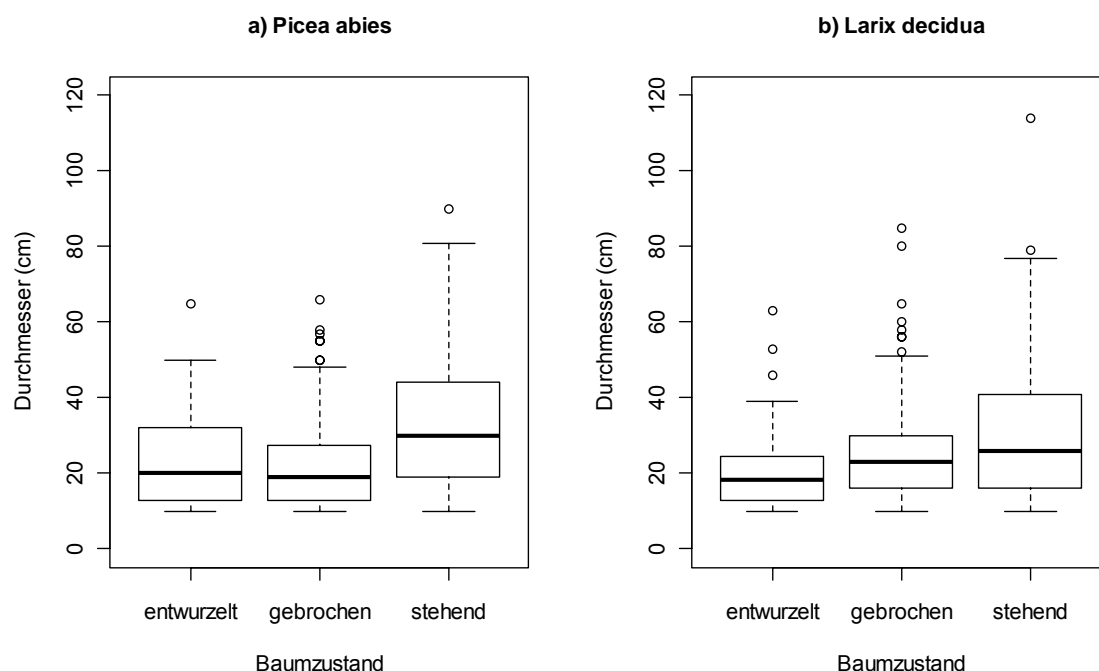


Abbildung 28: Baumzustand und Durchmesser aller Fichten und Lärchen

4.3.3 Baumalter

Die älteren Bäume sind resistenter gegen ein Lawinenereignis als jüngere Bäume (Abbildung 29). Dabei spielt die positive Korrelation zwischen Baumalter und Stammdurchmesser sicher eine wichtige Rolle. Bei der Fichte ist der Altersunterschied zwischen den stehenden und den gebrochenen Bäumen signifikant (p -Wert = 0.01715) im Gegensatz zu den Lärchen und den anderen Baumzuständen (p -Wert > 0.1).

Mit dem Baumalter nimmt der Anteil der Bäume zu, die makroskopische Anzeichen von Fäulnis aufweisen (Abbildung 18). Bei den Fichten hatten 23% der beprobten Bäume Anzeichen für Fäulnis, bei den Lärchen nur 15%. Die Stabilität von faulen Bäumen ist gegenüber gesunden Bäumen mit gleichem Durchmesser geschwächt. Bei den gesunden Bäumen ($n=182$) waren 54% stehend und 33% gebrochen, bei den faulen Bäumen ($n=42$) waren 36% stehend und 55% gebrochen.

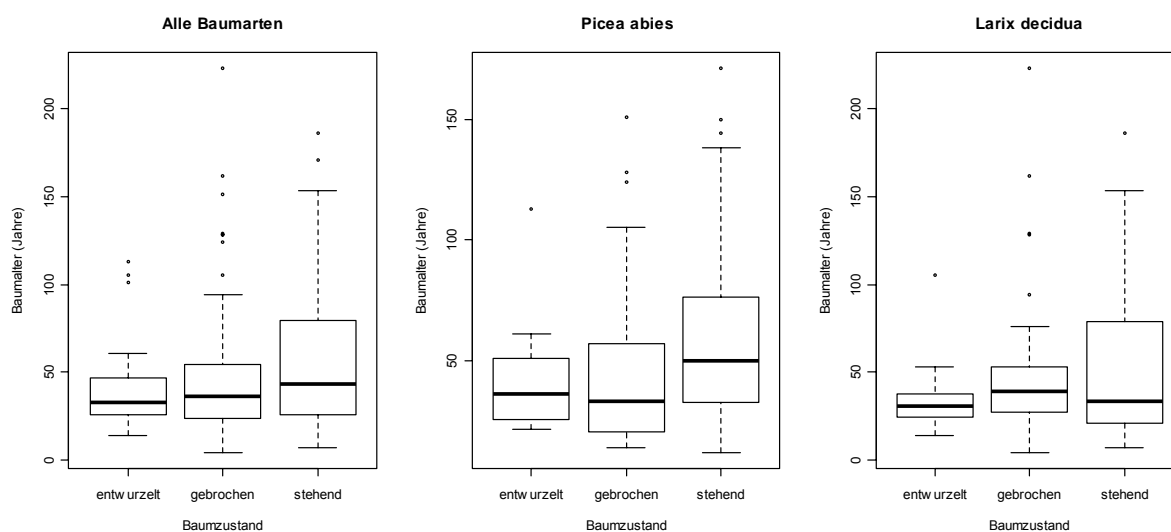


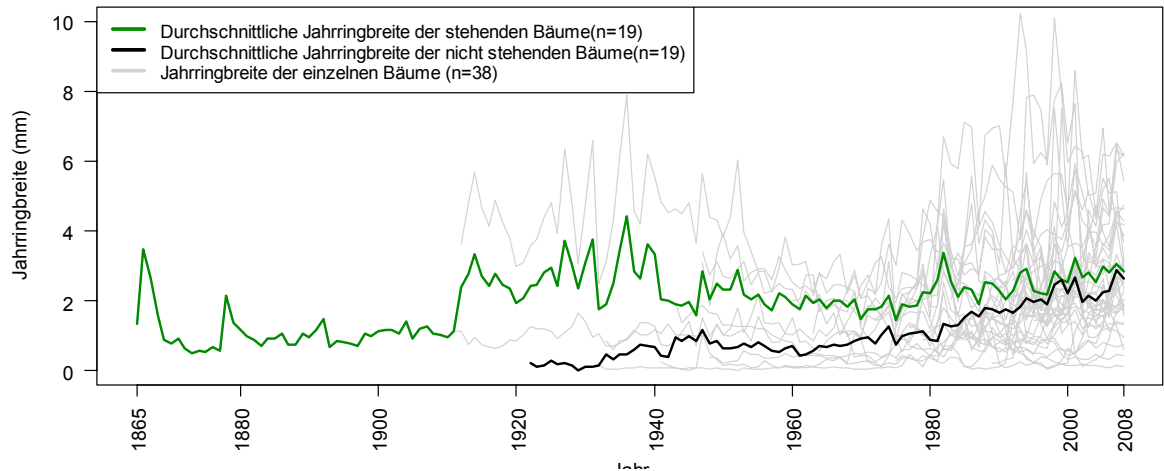
Abbildung 29: Baumzustand und Baumalter

4.3.4 Wachstumstrends vor dem Lawineneignis

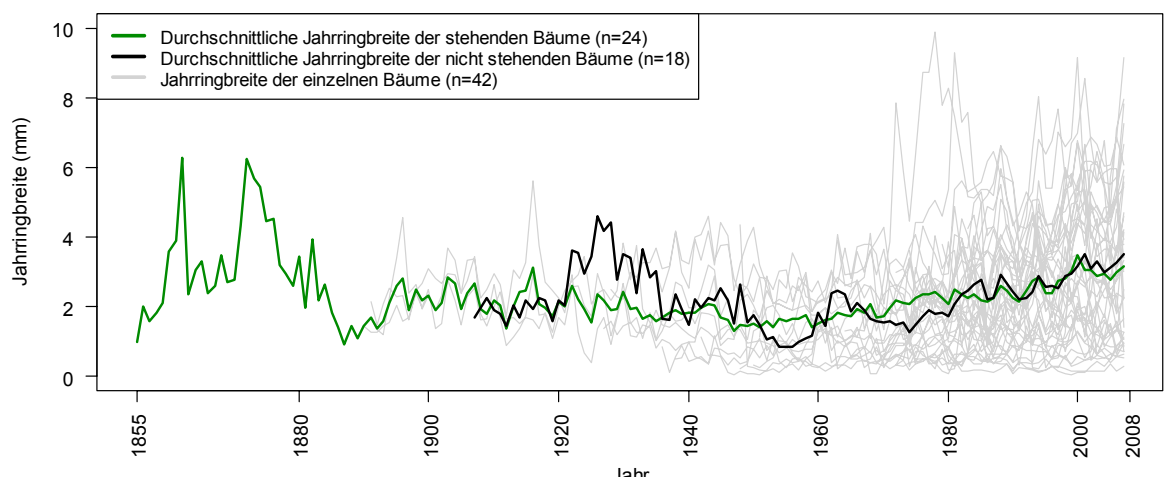
Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume

Die durchschnittlichen jährlichen Jahrringbreiten der stehenden Bäume sind bei den Lawinenzügen Cresta, Klosters und Splügen grösser als die durchschnittlichen Jahrringbreiten pro Jahr der nicht stehenden Bäume. Bei den Lawinenzügen Dischma, Lareit und La Rösa sind keine deutlichen Unterschiede sichtbar (Abbildung 30).

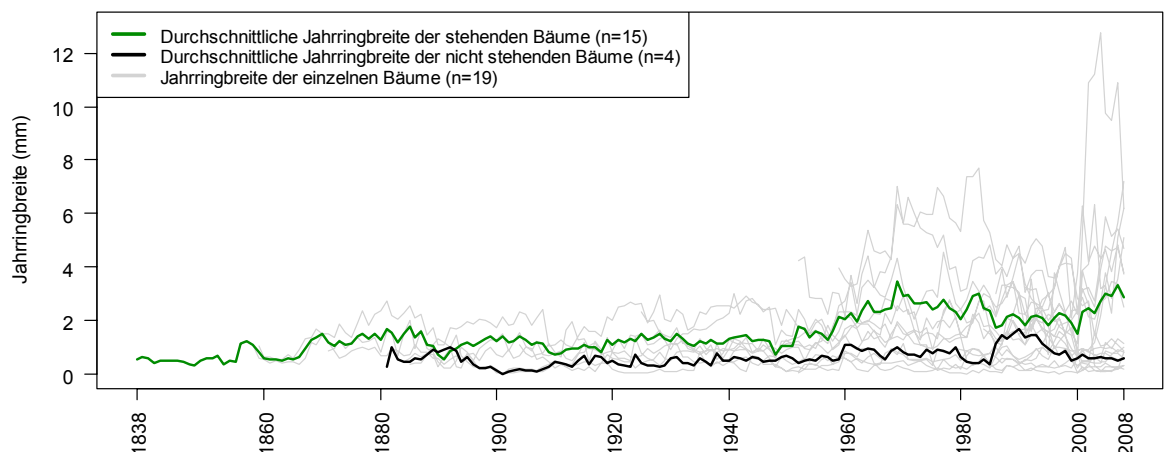
a) Cresta



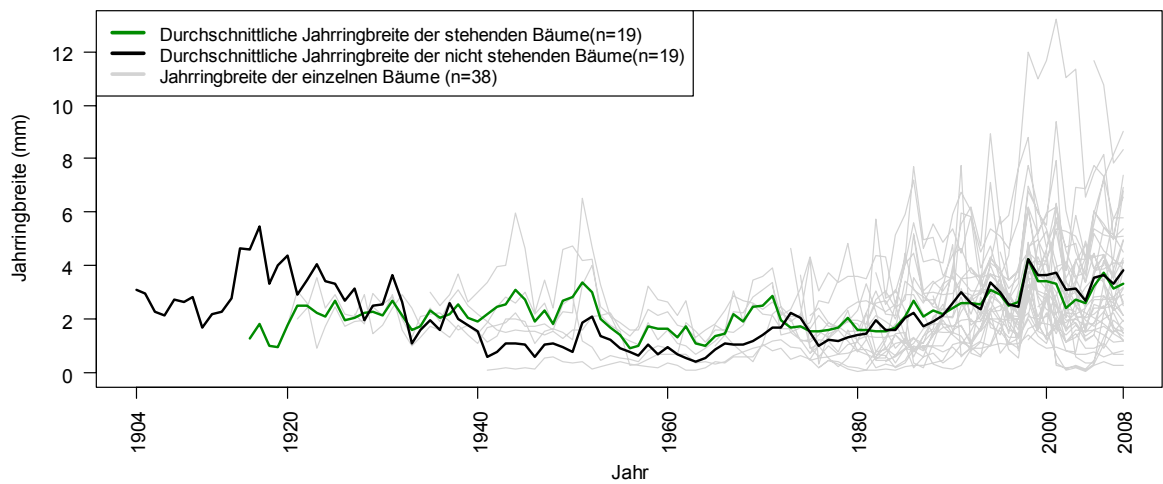
b) Dischma



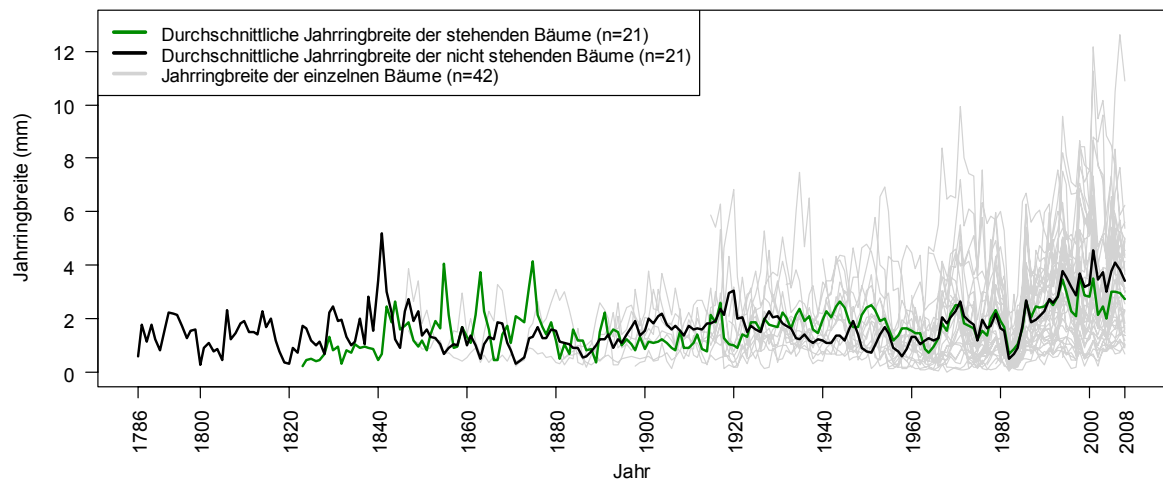
c) Klosters



d) Lareit



e) La Rösa



f) Splügen

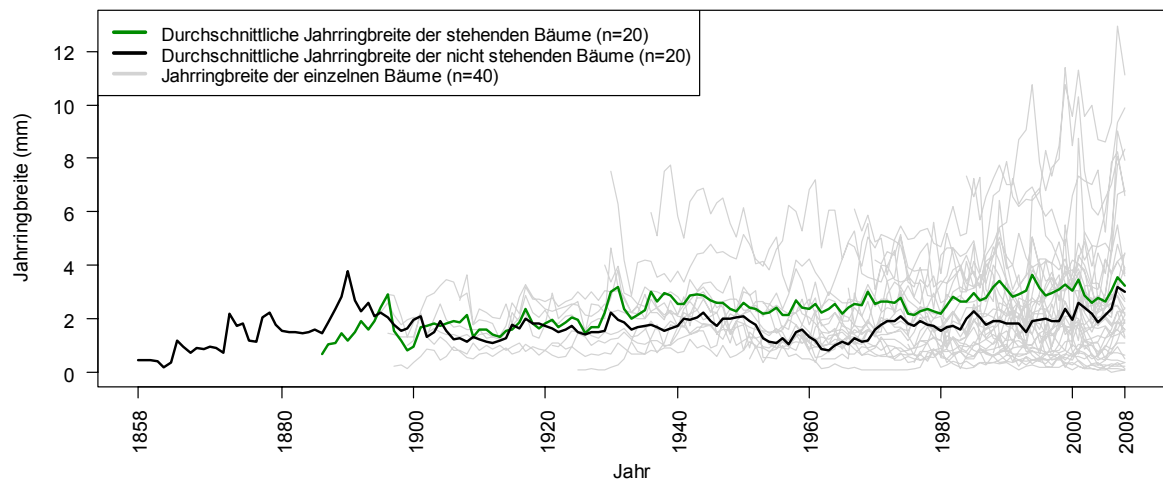


Abbildung 30: Jahringbreitenkurven der Fichten und Lärchen der jeweiligen Lawenzüge
 Die Jahringkurven stammen von 95 Fichten und 114 Lärchen

Wachstumstrend der letzten 20 Jahre vor dem Lawinenereignis

Wenn die Wachstumstrend Werte (Quotient aus den durchschnittlichen Jahrringbreiten der vorletzten und der letzten 10 Jahre) aller Bäume betrachtet werden (Abbildung 31) fällt auf, dass die entwurzelten Bäume die höchsten Werte und die gebrochenen Bäume die tiefsten Werte aufweisen, was eine Zunahme beziehungsweise Abnahme der durchschnittlichen Jahrringbreite in den letzten 10 Jahren bedeutet. Der Unterschied der Werte der gebrochenen Bäume zu den grösseren Werten der stehenden Bäume (p -Wert = 0.002609) und der entwurzelten Bäume (p -Wert = 0.003235) ist in beiden Fällen signifikant. Die gebrochenen Bäume hatten durchschnittlich in den letzten 10 Jahren grössere Jahrringbreiten als in den vorletzten 10 Jahren. Im Durchschnitt hat das Jahrringbreitenwachstum bei den gebrochenen Bäumen also zugenommen und bei den entwurzelten Bäumen abgenommen. Die Werte der stehenden Bäume liegen dazwischen. Betrachtet man nur die Wachstumstrend Werte der Fichten, sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Baumzuständen erkennbar, aber auch hier haben die stehenden Bäume tendenziell einen höheren Wachstumstrend als die gebrochenen. Bei den Lärchen haben die entwurzelten Bäume wieder den höchsten Wachstumstrend Wert, die gebrochenen Bäume den tiefsten und die stehenden Bäume einen Wert dazwischen. Die Wachstumstrend Werte dieser drei Baumzustandsklassen unterscheiden sich alle signifikant (p -Wert stehend/gebrochen = 0.005252, p -Wert stehend/entwurzelt = 0.0477, p -Wert entwurzelt/gebrochen = 0.0002141). Allgemein weisen die gebrochenen Bäume eine Jahrringbreitenzunahme, die stehenden Bäume tendenziell etwa gleich bleibende Jahrringbreiten und die entwurzelten Bäume tendenziell eine Jahrringbreitenabnahme auf. Als Ausnahme zeigen die Fichten bei entwurzelten Bäumen eher eine Jahrringbreitenabnahme.

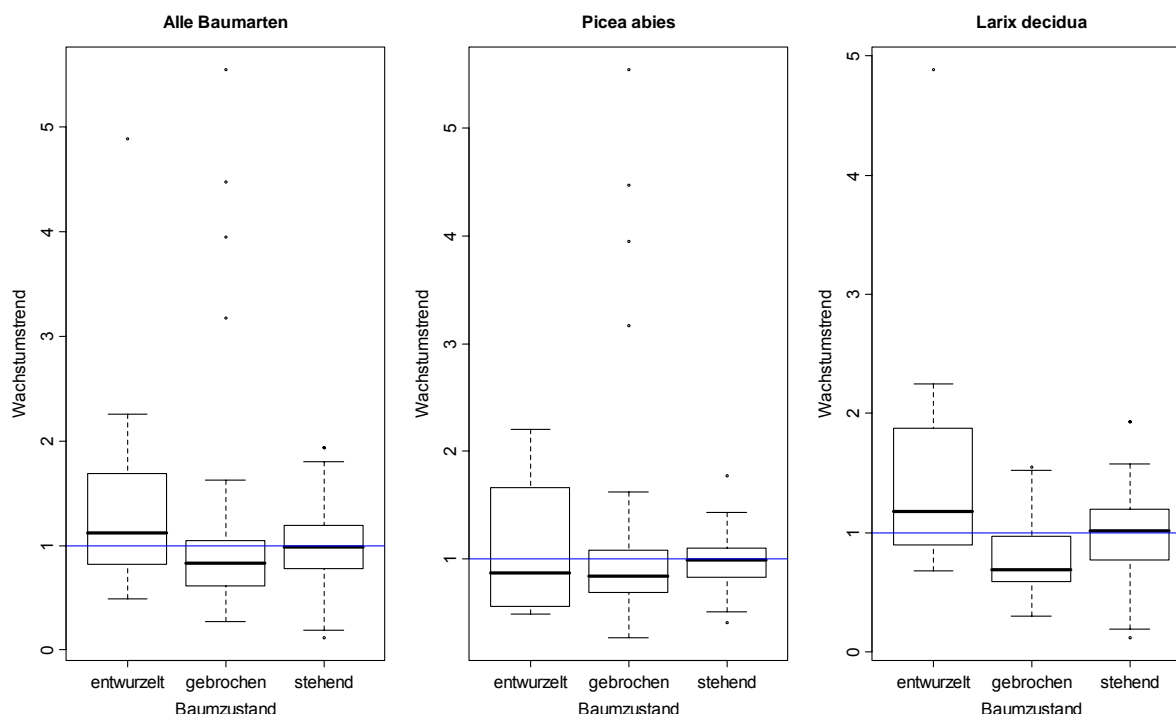


Abbildung 31: Wachstumstrend

Baumzustand und Wachstumstrend (Quotient aus den durchschnittlichen Jahrringbreiten der vorletzten und der letzten 10 Jahre). Anzahl beprobter Bäume: $n=222$, davon Fichte : $n=95$, Lärche: $n=114$

4.3.5 Abrupte Wachstumsänderungen

Für die Unterscheidung der abrupten negativen und positiven Wachstumsänderungen wurden folgende Begriffe verwendet: „release“ steht für eine positive, abrupte Wachstumsveränderung und „decrease“ für eine negative abrupte Wachstumsveränderung (genaue Definition im Kapitel 3.2). Es wurden nur die letzten 20 Jahre vor dem Lawinenereignis betrachtet.

Betrachtet man die Anzahl releases oder decreases pro Baum (Abbildung 32), erkennt man einen Zusammenhang mit dem Baumzustand. Die Anzahl an releases der gebrochenen Bäume ist signifikant höher als die Anzahl der releases der stehenden (p-Wert = 0.04499) und entwurzelten Bäume (p-Wert = 0.01308). Bei der Anzahl decreases verhält es sich genau umgekehrt. Hier ist die Anzahl der decreases der gebrochenen Bäume signifikant kleiner als bei den entwurzelten Bäumen (p-Wert = 0.01157). Allgemein weisen die gebrochenen Bäume (alle beprobten Bäume) am meisten releases und am wenigsten decreases im Vergleich zu den stehenden und entwurzelten Bäumen auf.

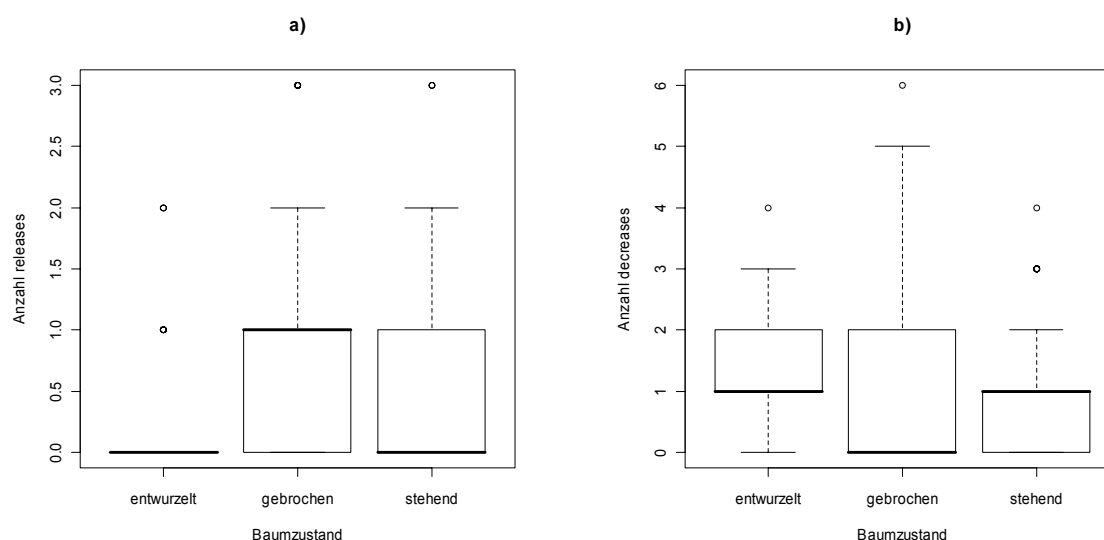


Abbildung 32: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Bäume

Bei den Fichten (Abbildung 33) zeigt sich kein grosser Unterschied in der Anzahl releases zwischen den drei Baumzustandsklassen. Betrachtet man die Anzahl decreases, fällt auf, dass die stehenden Fichten signifikant weniger abrupte Wachstumseinbussen aufweisen als die entwurzelten Fichten (p-Wert=0.09678). Die gebrochenen Fichten haben Werte dazwischen.

Die gebrochenen Lärchen (Abbildung 34) weisen am meisten releases und am wenigsten decreases auf. Die stehenden und entwurzelten Lärchen haben signifikant weniger releases als die gebrochenen Lärchen (p-Wert $_{\text{stehend/gebrochen}} = 0.005842$, p- Wert $_{\text{entwurzelt/gebrochen}} = 0.0009908$) und signifikant mehr decreases als die gebrochenen Lärchen (p-Wert $_{\text{stehend/gebrochen}} = 0.0467$, p- Wert $_{\text{entwurzelt/gebrochen}} = 0.002174$).

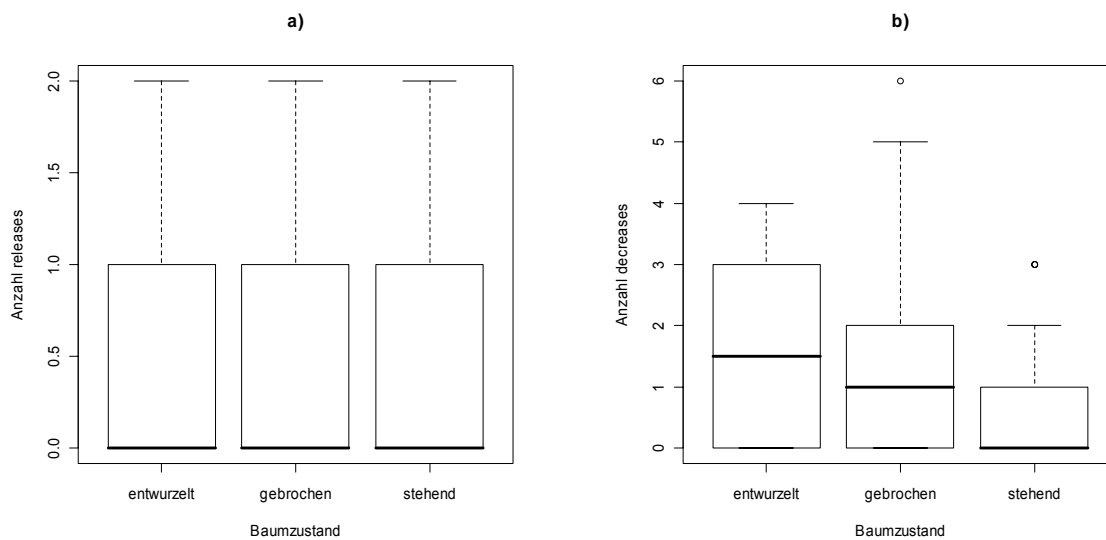


Abbildung 33: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Fichten

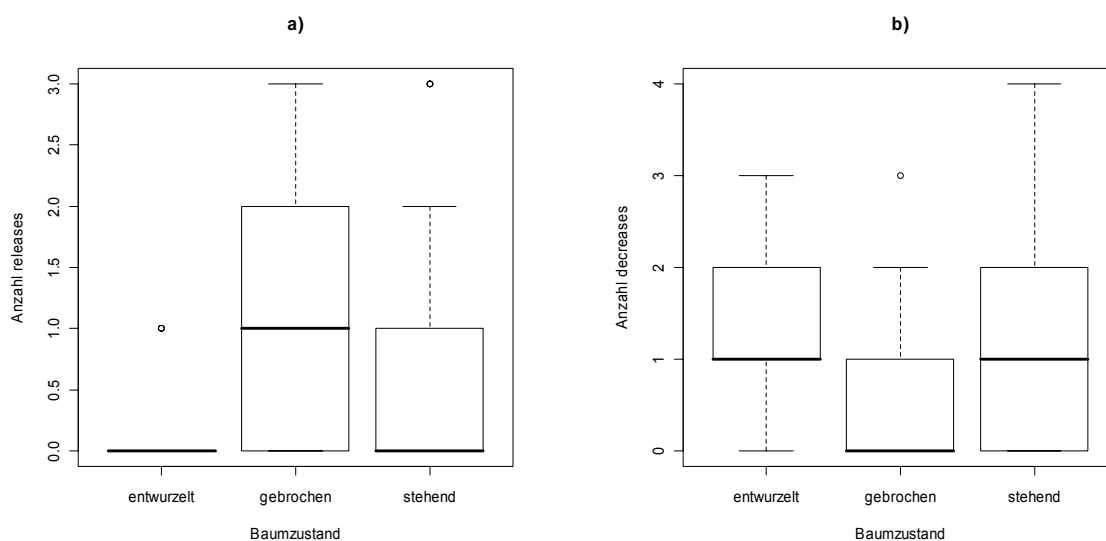


Abbildung 34: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Lärchen

4.3.6 Druckkraft

Allgemein erkennt man, dass sowohl die stehenden wie auch die gebrochenen und entwurzelten Bäume Druckkräften zwischen fast 0 und etwas mehr als 400 kPa ausgesetzt waren. Bei der Betrachtung der Durchmesser und der Druckkraft, die auf den entsprechenden Baum wirkte (Abbildung 35), erkennt man, dass die stehenden Bäume eher grössere Durchmesser und tiefere Druckkräfte aufweisen als die gebrochenen Bäume. Bei den Fichten ist der Unterschied besser erkennbar als bei den Lärchen. Dementsprechend nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum nach einem Lawinenereignis steht mit der Zunahme der Druckkraft ab (Abbildung 36).

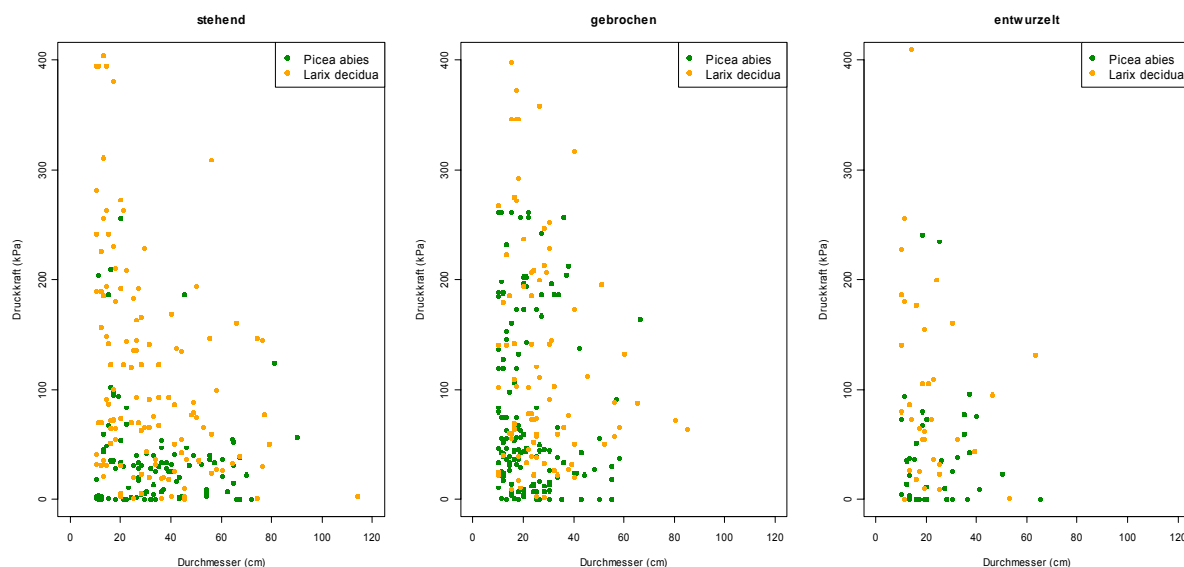


Abbildung 35: Baumzustand, Durchmesser und maximale Druckkraft der Lawinen

Dargestellt sind der Durchmesser und die maximale berechnete Druckkraft für jede einzelne Fichte und Lärche.

Anzahl Larix decidua: n = 268, davon stehend: n= 131, gebrochen: n= 94, entwurzelt: n= 43

Anzahl Picea abies: n=296, davon stehend: n=102, gebrochen: n=147, entwurzelt n=47

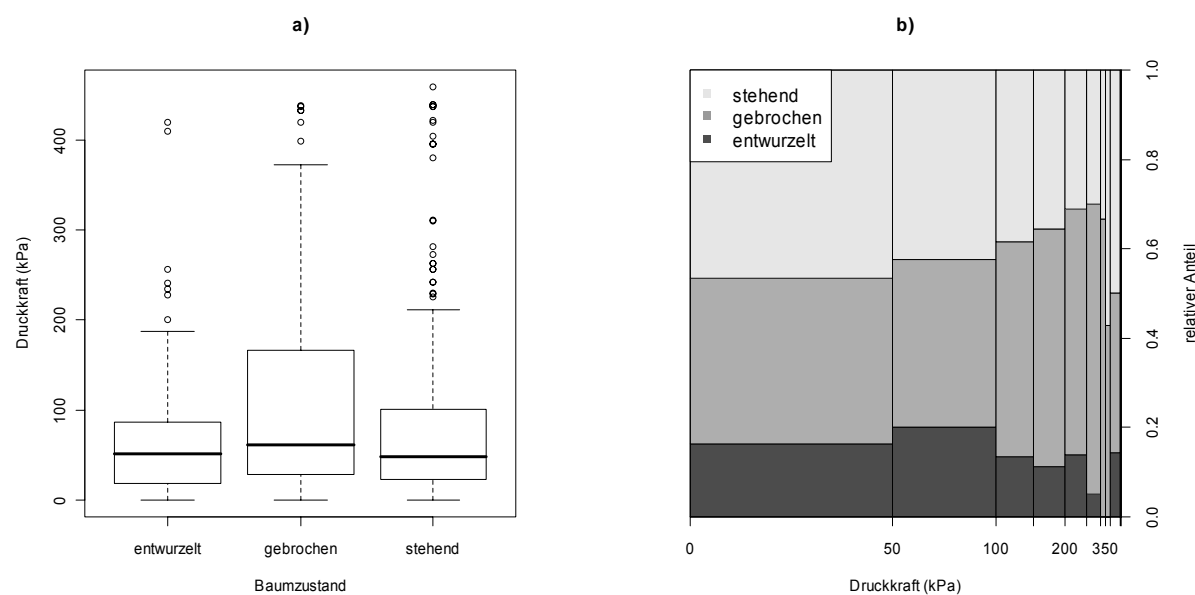


Abbildung 36: Maximale Druckkraft und Baumzustand

In der Abbildung a) sind die berechneten Druckkräfte nach den Baumzustandsklassen aufgeteilt.

In der Abbildung b) ist der Anteil an stehenden, gebrochenen oder entwurzelten Bäumen für Druckkraftklassen von je 50 kPa dargestellt.

Für die gebrochenen Bäume wurde eine signifikant grössere Druckkraft berechnet als für die stehenden Bäume (p -Wert = 0.01212). Die Werte der entwurzelten Bäume liegen dazwischen (Abbildung 36). Die Druckkraft auf die gebrochenen Fichten ist signifikant grösser als auf die stehenden (p -Wert = 2.7×10^{-4}) und entwurzelten (p -Wert = 0.01238) Fichten. Bei den Lärchen sind die Unterschiede nicht signifikant ($p > 0.1$) (Abbildung 37).

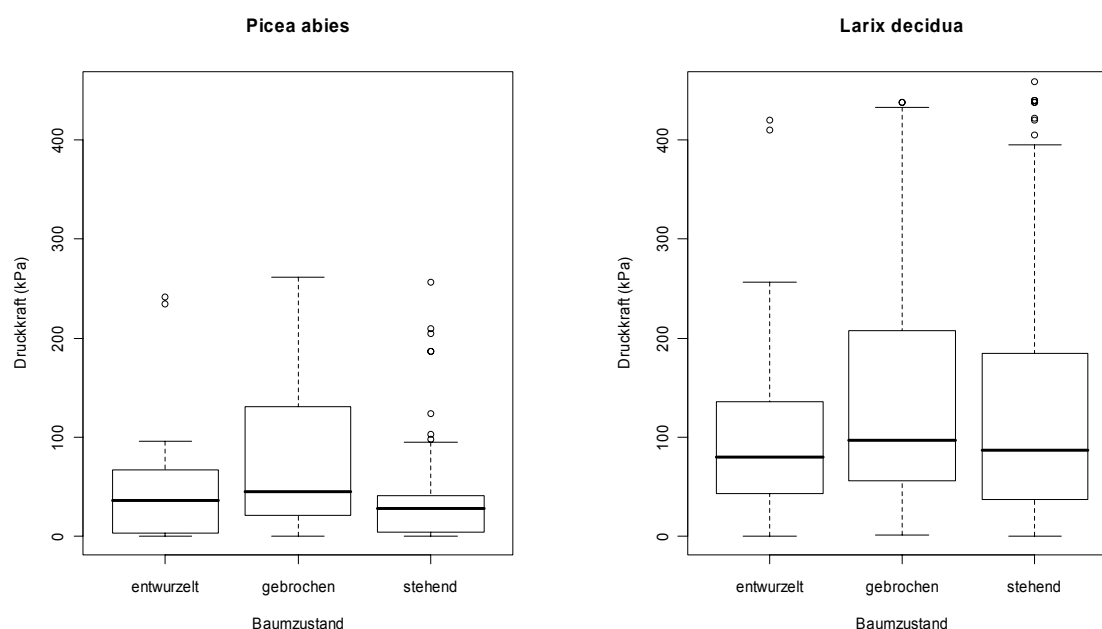


Abbildung 37: Maximale Druckkraft und Baumzustand bei Fichte und Lärche

4.3.7 Nachbarbäume

Die Anzahl der Nachbarbäume der untersuchten Bäume korrelieren nicht deutlich mit den Baumzuständen der untersuchten Bäume (Anhang Abb. A2.2a). Bei 7-8 Nachbarbäumen nimmt der Anteil der stehenden Bäume tendenziell zu.

4.3.8 Topografie

Zusätzlich zu der Anzahl Nachbarbäume wurde untersucht, ob kleinräumige topographische Merkmale mit den Baumzuständen korrelieren (Anhang 2) Die meisten Bäume stehen in einer Fläche oder auf einer Kuppe. Zwischen diesen zwei Klassen unterscheiden sich die Anteile an entwurzelt, gebrochenen und stehenden Bäumen kaum. Bei den anderen Klassen sind die Anzahl der Stichproben zu klein, um eine Aussage zu machen

4.3.9 Bruchhöhe

Die Bruchhöhen der Bäume weisen einen Zusammenhang mit dem Durchmesser, der Baumart und dem Standort auf (Abbildung 38). Die Bruchhöhen der untersuchten gebrochenen Bäume korrelieren signifikant mit den Durchmessern ($p\text{-Wert}_{\text{spearman}} = 0.0001$). Die Bruchhöhe nimmt mit dem Durchmesser zu. Die Druckkraft hat keinen signifikanten Einfluss ($p\text{-Wert} > 0.1$) auf die Bruchhöhe. Zusätzlich unterscheiden sich die Bruchhöhen der einzelnen Lawinenzüge. Die Bruchhöhen in den Lawinenzügen Dischma, Klosters und Splügen sind deutlich tiefer als bei Cresta, La Rösa und Lareit. Auch wenn nur die Fichten oder nur die Lärchen betrachtet werden, fällt eine ähnliche Bruchhöhenverteilung bei den Standorten auf, mit Ausnahme der Lärchen bei Klosters (Abbildung 39).

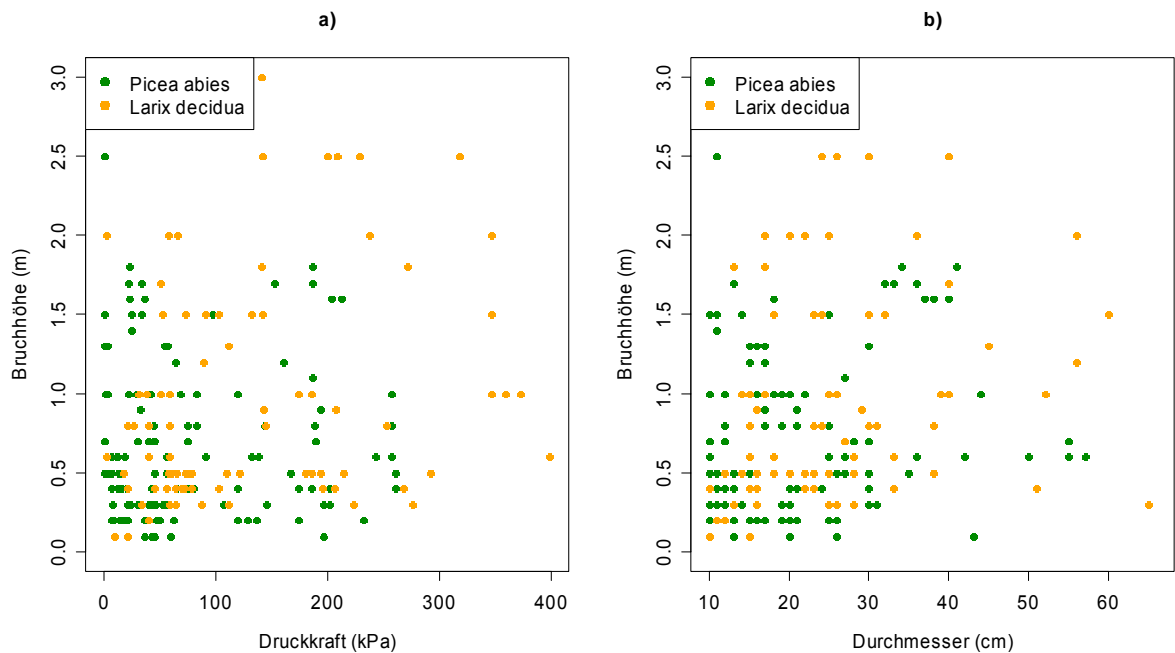


Abbildung 38: Vergleich der Bruchhöhe mit der Druckkraft a) und dem Durchmesser b) der Bäume

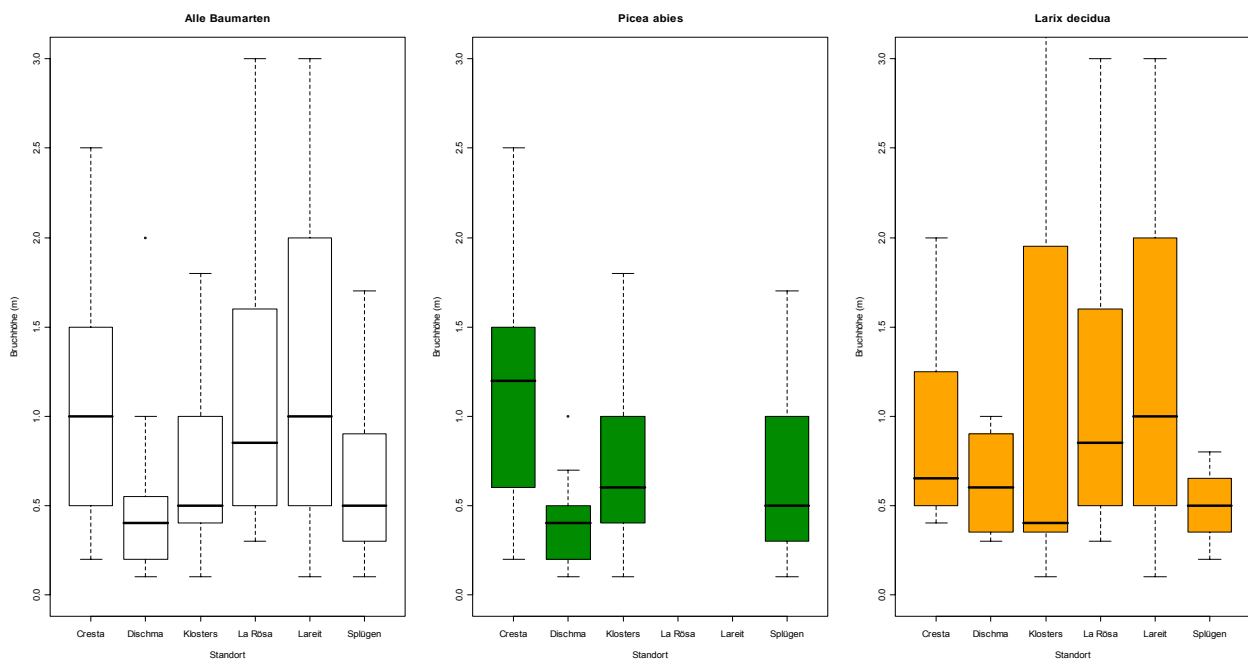


Abbildung 39: Bruchhöhen aufgeteilt nach Standorten

4.4 Klassifikationsbäume zum Baumzustand

Die Klassifikationsbäume veranschaulichen, welche der Einflussfaktoren die Bäume am besten in die Baumzustände entwurzelt, gebrochen und stehend unterteilt. Dabei wird auch der Grenzwert des jeweiligen Einflussfaktors angegeben. Bei einem Klassifikationsbaum mit allen Bäumen ist der Durchmesser der Bäume der wichtigste Einflussfaktor (Abbildung 40). Die Einteilungsgrenzen für stehende Bäume sind der Reihe nach 1) ein grösserer Durchmesser als 33.5 cm, 2) die Baumart Grünerle, Salweide oder Vogelbeere, 3) die Baumart Lärche oder Arve, 4) keine Anzeichne von Fäulnis und 5) einen kleineren Durchmesser als 21.5 cm.

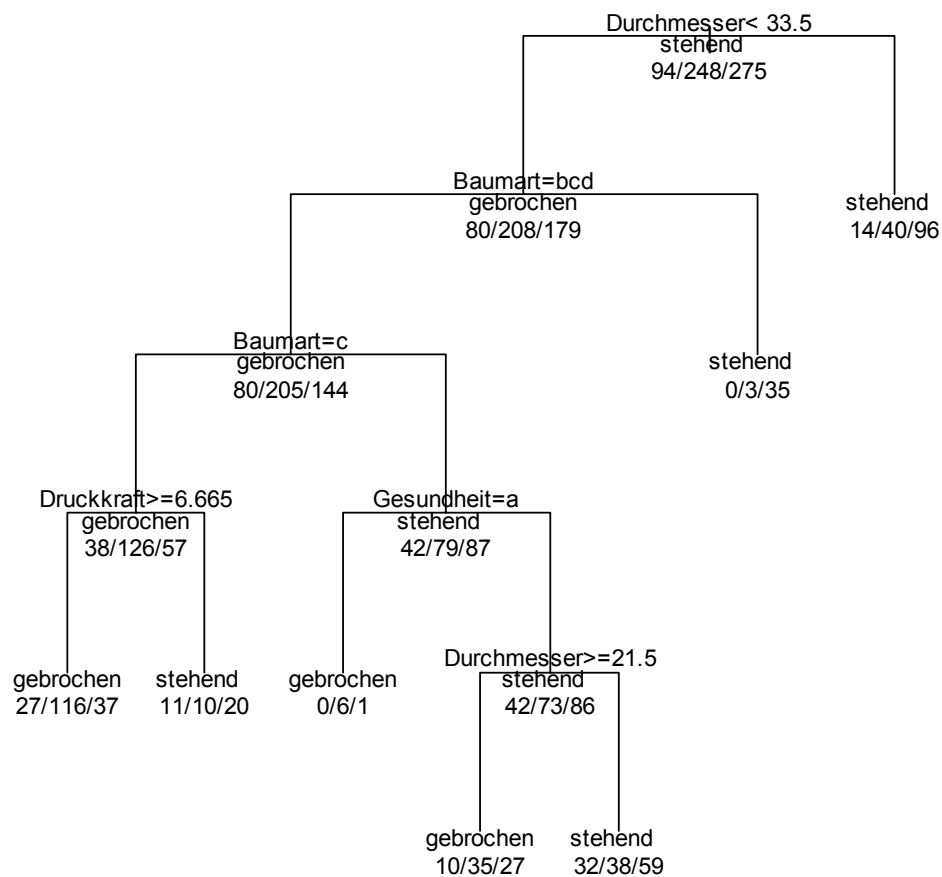


Abbildung 40: Klassifikationsbaum für alle Baumarten

An jedem Knoten steht die Variable mit dem Grenzwert, nach welchem die Bäume am besten in die Klassen entwurzelt/gebrochen/stehend aufgeteilt werden. Bäume, welche die Bedingung erfüllen, gehen in den linken Ast, Bäume, welche die Bedingung nicht erfüllen, in den rechten Ast. Die drei Werte unterhalb des Baumzustandes geben an, wie viele Bäume entwurzelt, gebrochen und stehend sind.

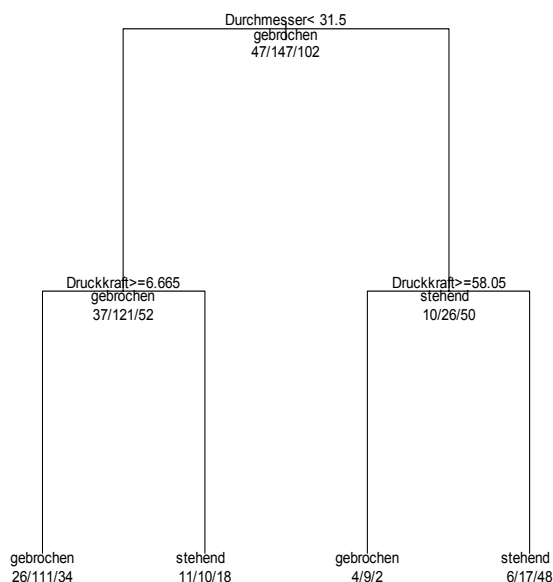
Baumarten: a) *Alnus viridis*, b) *Larix decidua*, c) *Picea abies*, d) *Pinus cembra*, e) *Salix caprea*, f) *Sorbus accuparia*

Bei den Klassifikationsbäumen für Fichten und Lärchen sind andere Einflussfaktoren und Einteilungsgrenzen massgebend als beim Klassifikationsbaum für alle Bäume.

Beim Klassifikationsbaum für die Fichte (Abbildung 41 a) ist der Durchmesser der wichtigste Einflussfaktor gefolgt von der Druckkraft. Die Einteilungsgrenzen für stehende Bäume sind der Reihe nach 1) ein Durchmesser grösser als 31.5 cm und 2) eine Druckkraft kleiner als 58.05 kPa respektive eine Druckkraft kleiner als 6.67 kPa für Fichten mit ein Durchmesser kleiner als 31.5cm.

Bei den Lärchen (Abbildung 41 b) ist der Durchmesser am wichtigsten, gefolgt vom Pilzbefall und dem Durchmesser. Die Einteilungsgrenzen für stehende Bäume sind der Reihe nach 1) ein Durchmesser grösser als 33.5 cm, 2) kein Pilzbefall und 3) einen Durchmesser kleiner als 21.5 cm.

a)



b)

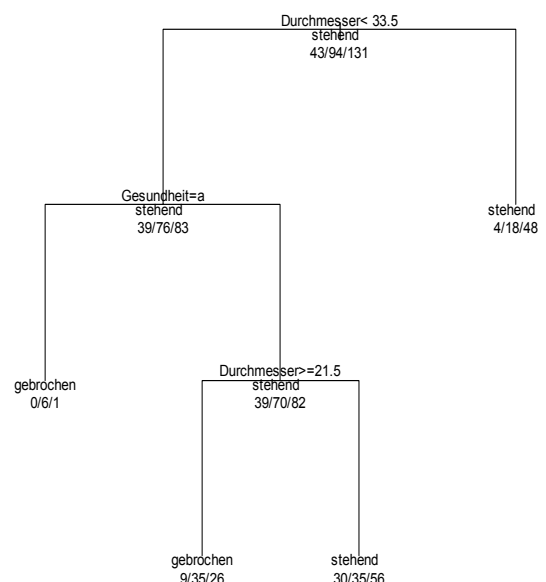
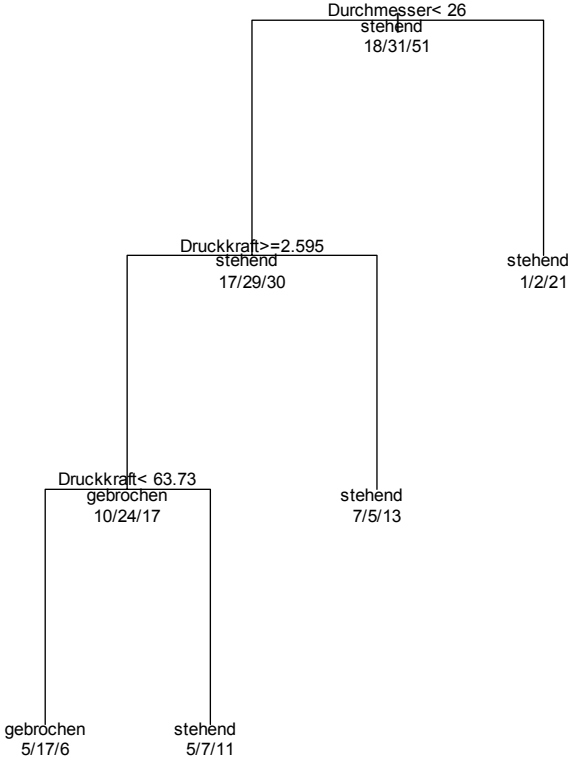


Abbildung 41: Klassifikationsbaum für Fichte a) und Lärche b)

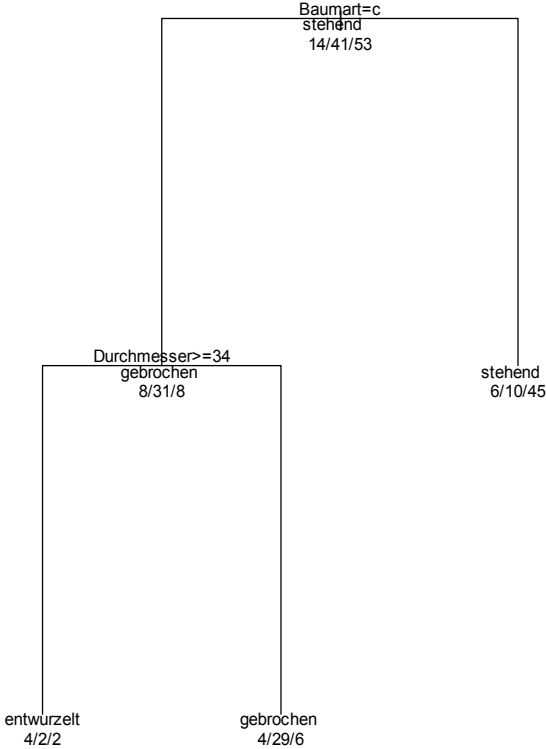
a)

Cresta



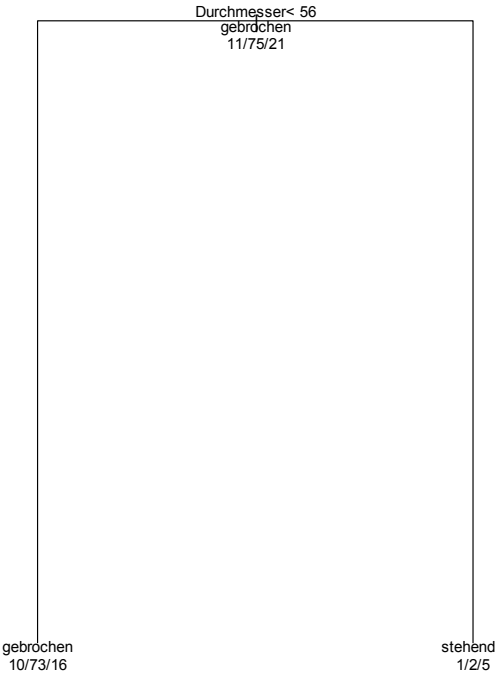
b)

Dischma



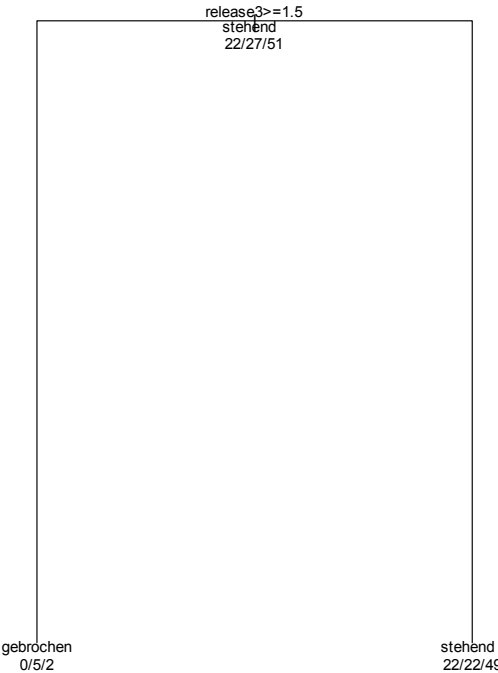
c)

Klosters



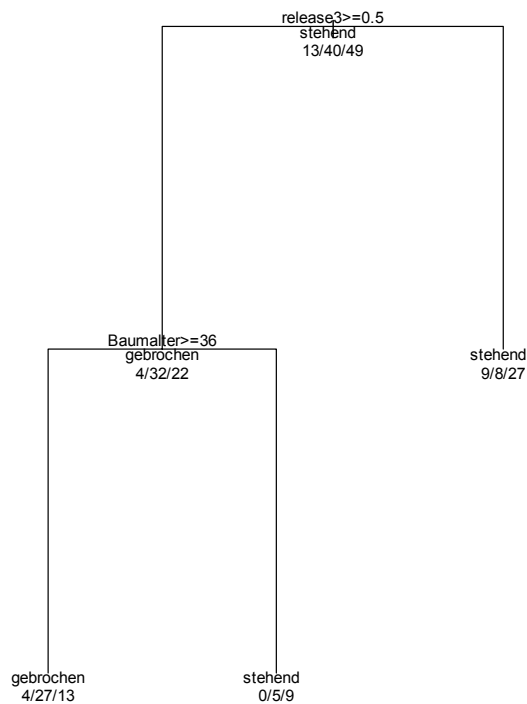
d)

Lareit



e)

La Rösa



f)

Splügen

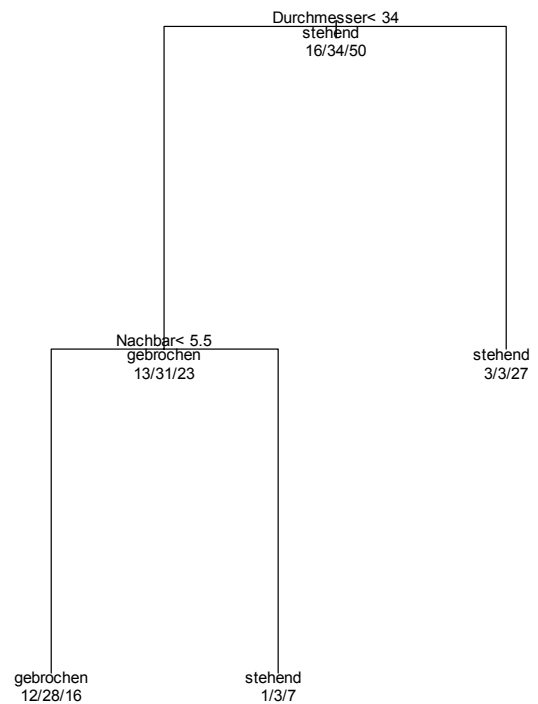


Abbildung 42: Klassifikationsbäume für die Bäume der einzelnen Standorte

Bei den Klassifikationsbäumen für die einzelnen Standorte sind verschiedene Einflussfaktoren und Einteilungsgrenzen massgebend (Abbildung 42). Die wichtigsten Einteilungsgrenzen für stehende Bäume sind beim Lawinenzug Cresta ein Durchmesser grösser als 26 cm, bei Dischma eine andere Baumart als Fichten, bei Klosters ein Durchmesser grösser als 56 cm, bei Lareit weniger als 1.5 positive abrupte Wachstumsschwankungen, bei La Rösa weniger als 0.5 positive abrupte Wachstumsschwankungen und bei Splügen ein Durchmesser grösser als 34 cm.

4.5 Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit

Mit einem logistischen Regressionsmodell wurde geprüft, welche Einflussfaktoren am stärksten mit der Zielvariablen „Zustand 2“ (Baum stehend, Baum nicht stehend (gebrochen oder entwurzelt)) korrelieren.

Betrachtet man alle Bäume, hat von den Einflussfaktoren Durchmesser, Anzahl der Nachbarbäume, Anzahl Releases, Anzahl decreases, Baumalter und Druckkraft nur die Druckkraft eine signifikante Korrelation mit der Zielvariablen. Bei den Fichten hat der Durchmesser, die Anzahl decreases, die Anzahl releases und das Baumalter eine signifikante Korrelation mit der Zielvariablen (Tabelle 4). Mit zunehmendem Durchmesser nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass ein Baum nach dem Lawinenereignis noch steht. Diese signifikante Korrelation besteht beim Modell für alle Bäume, beim Modell für die Fichten und beim Modell für die Lärchen. Wenn nur die Fichten betrachtet werden, weisen auch die Anzahl decreases, das Baumalter und die Druckkraft signifikante Korrelationen mit der Zielvariablen auf. Demnach nimmt die Chance für Fichten, eine Lawine stehend zu überleben mit dem Baumalter und mit der Anzahl releases ab und mit der Anzahl decreases zu. Bei den Modellen mit allen Bäumen und mit den Lärchen korrelieren die Anzahl releases, das Baumalter und die Druckkraft nicht signifikant mit dem Zustand 2.

Tabelle 5: Logistische Regressionsmodelle mit der Zielvariable „Zustand 2“ (Baum stehend, Baum nicht stehend) und den Einflussfaktoren

Dargestellt sind die Regressionskoeffizienten mit den Standardabweichungen und dem p-Wert in Klammern (Signifikanzniveaus: *** p<0.001, ** p<0.01, *p<0.05, . p<0.1, ns = nicht signifikant).

| Modell | Intercept | Durchmesser | Anz.Nach barbäume | Anz. Releases | Anz. Decreases | Baumalter | Druckkraft |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------|-------------------|-------------|------------|
| Alle Bäume | -1.119±0.178 | 0.032±0.006 | ns | ns | ns | ns | ns |
| p-Wert | (3.22×10 ^{-4***}) | (3.77×10 ^{-8***}) | | | | | |
| Picea abies | -1.966 ±0.283 | 0.050±0.009 | ns | -0.401±0.199 | 0.013±0.006 | -0.010±.003 | ns |
| p-Wert | (3.79×10 ^{-12***}) | (4.05×10 ^{-6***}) | | (0.044 *) | (0.033 *) | (0.0002***) | |
| Larix decidua | -0.588±0.251 | 0.021±0.008 | ns | ns | ns | ns | ns |
| p-Wert | (0.019*) | (0.007**) | | | | | |

Mit den logistischen Regressionsmodellen kann berechnet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Baum nach dem Lawinenereignis steht, abhängig vom Wert des Einflussfaktors (aufgrund des Sampling Designs handelt es sich hier nicht um absolute Wahrscheinlichkeiten). In der Abbildung 43 ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum nach dem Lawinenereignis steht in Abhängigkeit vom Durchmesser dargestellt. Bei den Fichten mit einem Durchmesser von 10 cm ist die Überlebenswahrscheinlichkeit 19%. Eine Lärche mit gleichem Durchmesser ist weniger anfällig auf eine Lawine und überlebt mit 41%

Wahrscheinlichkeit. Je grösser die Durchmesser der Bäume sind, desto eher blieben sie beim Lawineneignis stehen. Dabei nimmt die Wahrscheinlichkeit zu stehen bei den Fichten mit dem Durchmesser stärker zu als bei den Lärchen. Bei einem Durchmesser von 49 cm haben die Fichten und Lärchen die gleiche Überlebenswahrscheinlichkeit. Grössere Fichten bleiben sogar eher stehen als Lärchen des gleichen Durchmessers. Bei einem Durchmesser von 90 cm bleibt eine Fichte mit 92%-iger und eine Lärche mit 79%-iger prozentiger Wahrscheinlichkeit stehen.

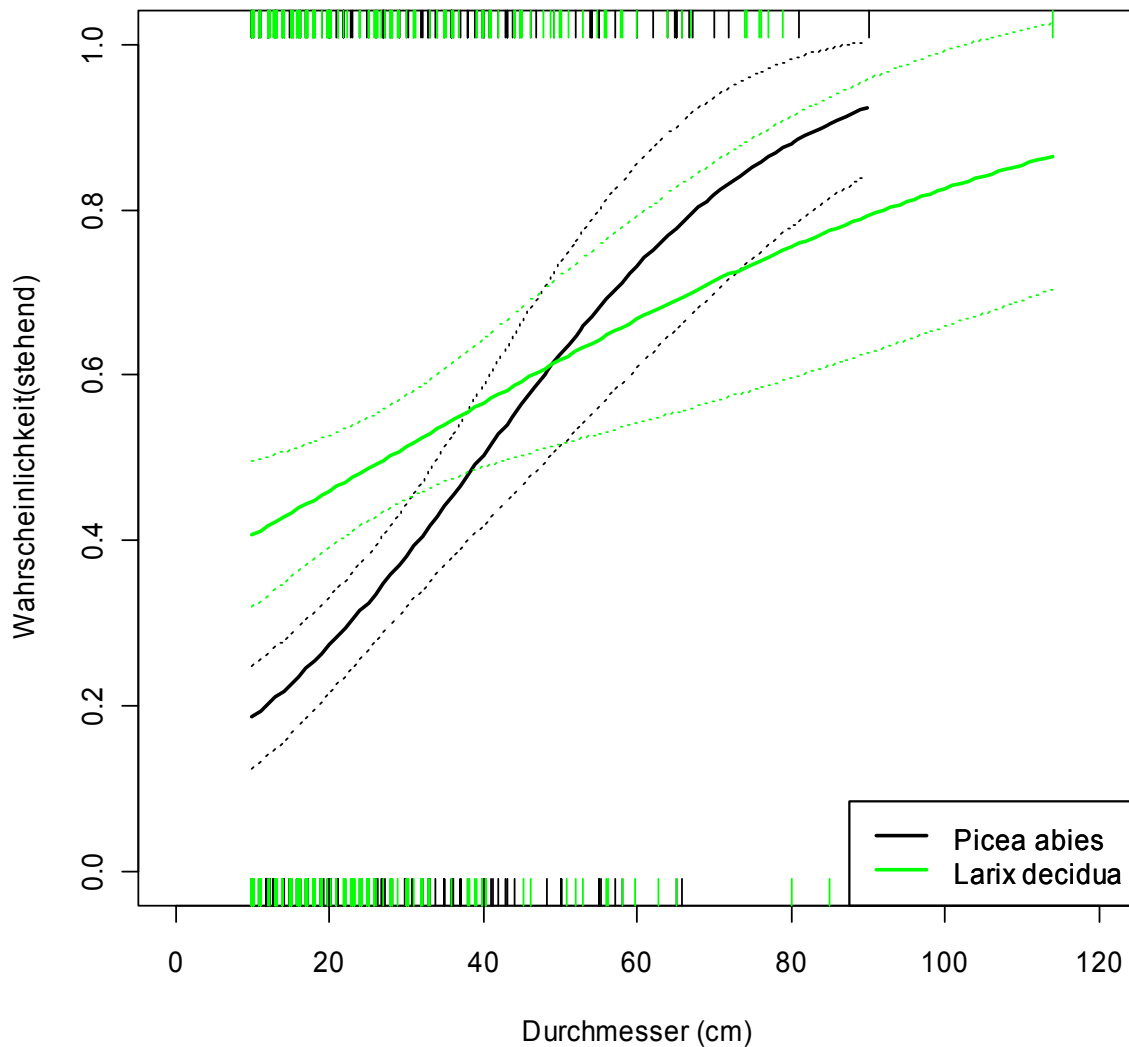


Abbildung 43: Modellerte Überlebenswahrscheinlichkeit für Fichte und Lärche abhängig vom Durchmesser

Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit für die Fichten und Lärchen, nach dem Lawineneignis noch zu stehen, in Abhängigkeit vom Durchmesser, sowie die 95% -Konfidenzintervalle

Die Wahrscheinlichkeit für einen Baum, nach dem Lawinenereignis noch zu stehen, hängt stark vom Standort ab (Abbildung 44). Die Fichten im Lawinenzug Klosters hatten in der ganzen Durchmesserbandbreite die kleinste Wahrscheinlichkeit, nach dem Lawinenereignis noch zu stehen. Beim Lawinenzug Cresta war die Wahrscheinlichkeit nicht gebrochen oder entwurzelt zu werden am grössten. Auch die Lärchen hatten im Lawinenzug Cresta die beste Chance, stehen zu bleiben. Der Standort, an welchem die Lärchen am ehesten entwurzelt oder gebrochen wurden, variiert mit dem Durchmesser. Die Wahrscheinlichkeitskurve für die Lärchen vom Standort Dischma und Splügen verlaufen fast gleich.

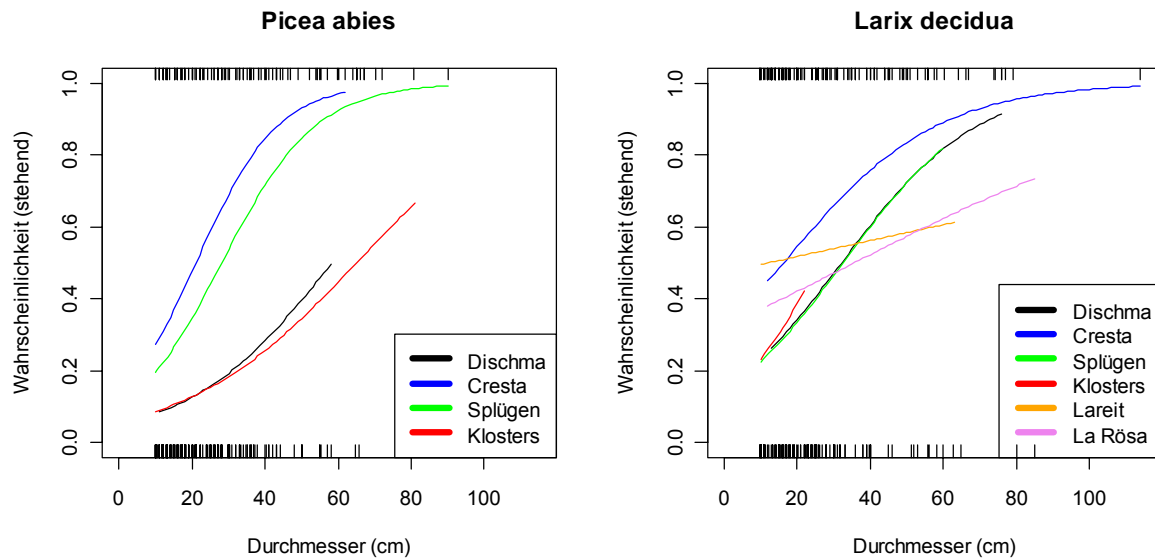


Abbildung 44: Modellierte Überlebenswahrscheinlichkeit für die Bäume in den verschiedenen Lawinenzügen

Die Höhe der Druckkraft, welche auf einen Baum wirkt, hat bei den Fichten einen grösseren Einfluss darauf, ob ein Baum steht, als bei den Lärchen. Bei Lärchen nimmt die Wahrscheinlichkeit, ein Lawinenereignis stehend zu überleben, nur schwach mit zunehmender Druckstärke ab. Im Gegensatz dazu nimmt die Wahrscheinlichkeit, nach dem Lawinenereignis zu stehen, bei den Fichten stark mit der Zunahme der Druckkraft ab (Abbildung 45). Betrachtet man die Fichten und Lärchen der einzelnen Standorte (Anhang 3, Abb. A3.1), zeigen alle ähnliche Tendenzen wie in Abbildung 32. Bei den Lärchen im Lawinenzug Dischma nimmt die Wahrscheinlichkeit, ein Lawinenereignis stehend zu überleben, viel stärker mit der Druckkraftzunahme ab, als bei den anderen Standorten. Beim Lawinenzug in Splügen haben die Fichten bei kleinen Druckkräften bis 49 kPa sogar bessere Chancen, ein Lawinenereignis stehend zu überstehen als Lärchen.

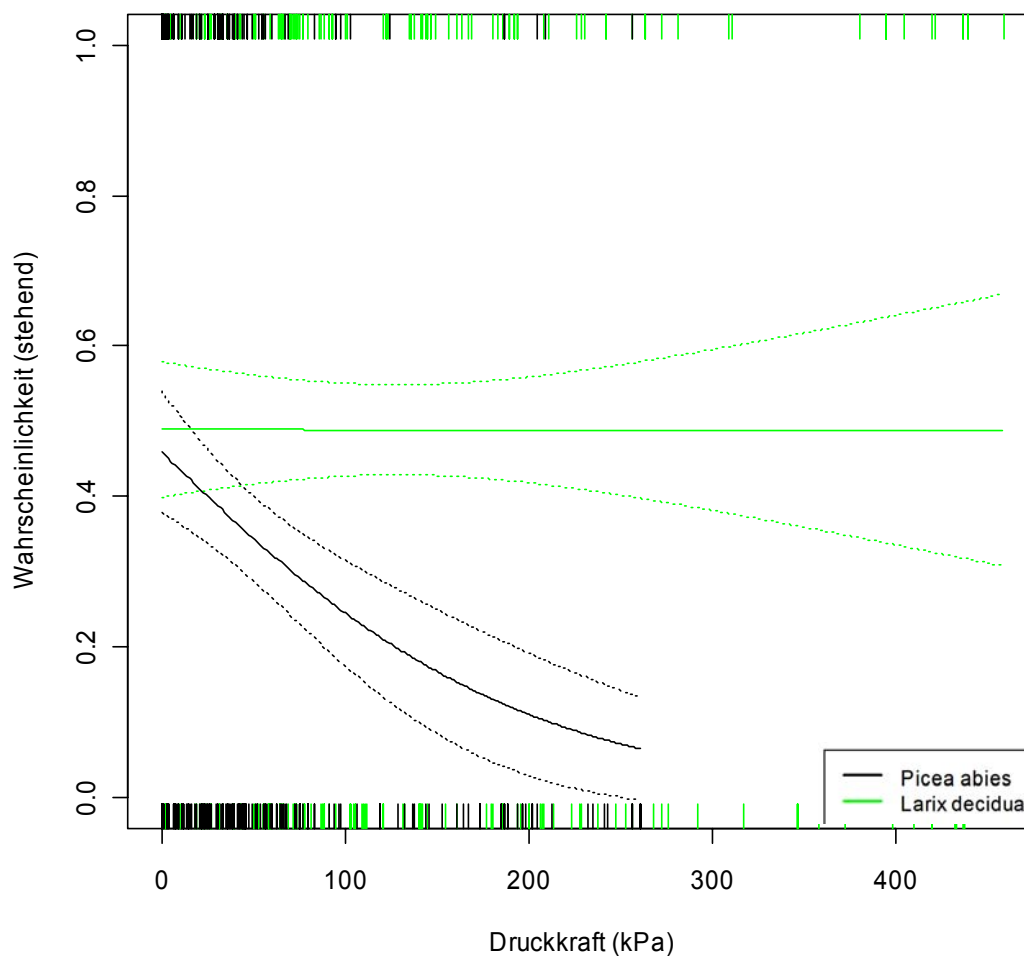


Abbildung 45: Modellierter Überlebenswahrscheinlichkeit für Fichte und Lärche abhängig von der Druckkraft

Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit für die Fichten und Lärchen, nach dem Lawinenereignis noch zu stehen, in Abhängigkeit von der Druckkraft, sowie die 95% -Konfidenzintervalle. Es ist zu beachten, dass die Korrelation zwischen Druckkraft und der Zielvariablen stehend / nicht stehend im logistischen Regressionsmodell nicht signifikant ist (Tabelle 5).

5 Diskussion

Mit dieser Arbeit wurde analysiert, welche Faktoren die Anfälligkeit von Bäumen in Lawinenzügen auf die Wirkung von Lawinen beeinflussten. Damit konnte die erste Forschungsfrage beantwortet werden.

Die Hypothese 1.1 wurde bestätigt: Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum bei einem Lawineneignis bricht, nimmt mit zunehmendem Durchmesser ab. Die Hypothese 1.2 wurde teilweise bestätigt: Fichten bei gleichem Durchmesser brachen eher als Lärchen. Dies gilt bei den untersuchten Bäumen jedoch nur bis zu einem Durchmesser von 49 cm. Bei grösseren Durchmessern werden die Fichten weniger gebrochen als die Lärchen. Die Hypothese 1.3 wurde widerlegt: Auf Kuppen gewachsene Bäume sind nicht signifikant weniger gebrochen als Bäume gleichen Durchmessers auf nicht erhöhten Standorten.

Die zweite Forschungsfrage konnte nicht eindeutig beantwortet werden, da zu viele Unsicherheiten bezüglich des Anrissgebietes und des Lawinenvolumens bestanden. Die wichtigsten Erkenntnisse bei den Lawinensimulationen waren, dass die berechneten Druckkräfte, Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten der Lawinen im Allgemeinen gut mit den beobachteten Baumzuständen übereinstimmten, aber dass die Auslaufgebiete von Nassschneelawinen in den Simulationen grösser waren als in der Realität. Um mit RAMMS eine Analyse der Bremswirkung des Waldes durchführen zu können, müssten alle für RAMMS benötigten Eingabeparameter zu einer Lawine bekannt sein.

5.1 Untersuchte Einflussfaktoren

Um Zusammenhänge zwischen den untersuchten Einflussfaktoren und den Baumzuständen zu ermitteln, wurden Daten von Bäumen aus sechs verschiedenen Lawinenzügen analysiert. Es stellte sich heraus, dass der Anteil an entwurzelten, gebrochenen und stehenden Bäumen in jedem Lawinenzug unterschiedlich war (Abbildung 26). Gründe dafür sind die unterschiedlichen Baumartenzusammensetzungen und Durchmesserverteilungen, sowie die Unterschiede in der Topographie. Zudem gibt es Lawinenzüge, in denen sich schon seit einigen Jahrzehnten kein Lawinenabgang ereignete und andere, bei denen die Bäume deutliche Spuren früherer Ereignisse aufweisen. Die Lawinen unterscheiden sich bei jedem Standort in ihrer Mächtigkeit und sind bei verschiedenen Temperaturen und Schneebedingungen niedergegangen.

5.1.1 Baumart

Von den untersuchten Baumarten wurden die Fichten bei den Lawinenniedergängen am häufigsten gebrochen (Abbildung 25). Die Grünerlen, die oft in Lawinenzügen vorkommen und durch ihre Flexibilität wenig anfällig auf Lawinen sind, weisen den grössten relativen Anteil an stehenden Bäumen auf. Von den Arven, Weiden und Vogelbeeren gibt es zu wenige Stichproben, um einen Trend festzustellen. Vergleicht man die am besten vertretenen Baumarten Fichten und Lärchen, wird ersichtlich, dass bei den Fichten 50% gebrochen sind, bei den Lärchen nur 35%. Da beide den gleichen Anteil entwurzelter Bäume (16%) haben (Abbildung 25), ist entsprechend auch der Anteil stehender Fichten kleiner als der Anteil stehender Lärchen.

Ein Grund, dass der Anteil stehender Bäume bei den Fichten kleiner ist als bei den Lärchen, liegt in der Durchmesserverteilung der untersuchten Bäume. Bei den untersuchten Lärchen

sind die Durchmesser etwas grösser als bei den beprobten Fichten. Die Fichten sind jedoch auch bei gleichem Durchmesser wie die Lärchen weniger robust gegenüber einem Lawinenabgang (gilt nur bei Durchmessern bis ca. 49 cm). Die Tatsache, dass Fichten mehr von Fäulepilzen befallen werden als Lärchen (Bazzigher 1973), hat sicher einen Einfluss darauf. Von den untersuchten Fichten wiesen 23% Anzeichen von Fäulnis auf, bei den Lärchen hingegen nur 15%. Bäume, die von einem Fäulnispilz befallen sind, sind weniger stabil als gesunde Bäume (Ammann 2006) und somit anfälliger auf die Druckkräfte einer Lawine. Zusätzlich verlieren die Lärchen im Winter ihre Nadeln, wodurch eine Lärche einer Lawine weniger Widerstand bietet als eine Fichte gleichen Durchmessers. Junge Lärchen bis zu einem Durchmesser von 10 cm sind zudem flexibler als vergleichbare Fichten (Schönenberger 1978).

Die untersuchten Lärchen hatten in der Durchmesserklasse 10-20 cm einen höheren Anteil stehender Bäume als in der Klasse 21-30 cm, was auf die Abnahme der Flexibilität zurückzuführen ist. Zudem stammen die meisten Lärchen von den zwei Lawinenzügen Lareit und La Rösa im Puschlav und die Fichten von den anderen Lawinenzügen, was beim Vergleich berücksichtigt werden muss. Bei den Lawinenzügen mit mehreren Baumarten spielt die Baumart eine entscheidende Rolle, ob ein Baum der Belastung eines Lawinenabganges standhält oder nicht.

5.1.2 Stammdurchmesser

Der Stammdurchmesser erwies sich als wichtigster Einflussfaktor auf den Baumzustand nach dem Lawinenereignis. Je grösser die Durchmesser der untersuchten Bäume in den Lawinenzügen waren, desto weniger wahrscheinlich war es, dass sie von der Lawine gebrochen oder entwurzelt wurden. Werden nur die Bäume der einzelnen Baumarten betrachtet, dann ist zu erkennen, dass Fichten und Lärchen bei unterschiedlichen Durchmessern brechen (Abbildung 43). In den untersuchten Lawinenzügen hatten Fichten mit einem Durchmesser < 49 cm eine kleinere Chance, das Lawinenereignis zu überstehen als die Lärchen. Bei einem Durchmesser von 49 cm war die Überlebenswahrscheinlichkeit für beide Baumarten gleich gross und > 49 cm hatten die Fichten sogar grössere Chancen, die Lawine stehend zu überleben. In der Abbildung 44 ist zu erkennen, dass die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Lärchen und Fichten von Lawinenzug zu Lawinenzug variieren. In den zwei Lawinenzügen Lareit und La Rösa, wo die meisten Lärchen untersucht wurden, sind Lärchen mit relativ grossen Durchmessern gebrochen und entwurzelt worden. Dies hat die Wahrscheinlichkeitskurve für das Überleben der Lawine stark beeinflusst. In Lareit erreichte die Lawine die höchsten berechneten Druckkräfte, was erklärt, dass auch Lärchen mit grossen Durchmessern gebrochen und entwurzelt werden konnten. In La Rösa floss die Lawine durch einen lichten Lärchenwald, der zu 50% aus Lärchen mit einem Durchmesser > 30 cm bestand. Kein anderer Standort weist insgesamt so viele Bäume mit einem Durchmesser > 30 cm auf. Die berechneten Druckkräfte auf die Lärchen waren nicht höher als bei andern Standorten, da es sich jedoch um eine Nassschneelawine handelte und für die Berechnung viele Annahmen getroffen werden mussten, können die realen Druckkräfte recht stark von den berechneten abweichen. Der Grund, dass an beiden Standorten viele Lärchen entwurzelt wurden, ist auf den nicht gefrorenen Boden zurückzuführen. Die ergiebigen Schneefälle im Herbst 2008 verhinderten das Gefrieren des Bodens während des ganzen Winters (mündliche Mitteilung von Gianni Zanoli, Revierförster Poschiavo). Dadurch waren die Wurzeln weniger stark im Boden verankert als gewöhnlich. Eine andere Besonderheit der untersuchten Lärchen gegenüber den anderen Baumarten ist,

dass die entwurzelten Lärchen im Durchschnitt kleinere Durchmesser hatten als die gebrochenen und stehenden Lärchen. Die meisten entwurzelten Lärchen stammen vom Lawinenzug Lareit, wo relativ grosse Druckkräfte auf die Bäume gewirkt hatten. Eine mögliche Erklärung, dass viele Lärchen mit kleinen Durchmessern entwurzelt wurden, könnte das Wurzelwerk sein. Da Bäume mit einem kleinen Durchmesser häufig auch ein kleineres Wurzelsystem und somit eine schlechtere Verankerung als grössere Bäume haben (Köstler 1968), werden sie eher von der Lawine entwurzelt und erst ab einem gewissen Widerstand der Wurzeln werden sie gebrochen.

Im Gegensatz weisen die entwurzelten Fichten grössere Durchmesser auf als die gebrochenen Fichten. Weil die Stämme der Fichten schon bei kleinen Durchmessern weniger flexibel sind als bei den Lärchen (Schönenberger 1978) brechen sie bei kleineren Druckkräften als die Lärchen, was bedeutet, dass die Fichten teilweise brechen, bevor genügend Druckkraft auf sie wirken kann, damit sie entwurzelt werden könnten. Da das Wurzelsystem der Fichten nicht tief in den Boden eindringt, können Fichten mit grossen Durchmessern leichter entwurzelt werden als entsprechenden Lärchen (Meyer 2008).

Ein weiterer Unterschied zwischen Fichten und Lärchen besteht im Anteil der faulen Bäume. Je älter die Bäume sind, desto eher werden sie von Fäulepilzen befallen (Bazzigher 1973). Die von Fäule geschwächten Bäume wurden eher von einer Lawine gebrochen als ähnliche gesunde Bäume. Da mehr Fichten (23%) als Lärchen (15%) von Fäule betroffen sind und von den faulen Bäumen 55% gebrochen sind im Gegensatz zu den gesunden Bäumen, wo nur 33% gebrochen sind, beeinflussen das Baumalter und die Fäulepilze den Baumzustand der Fichten stärker als jenen der Lärchen.

Ob ein Baum beim Lawinenereignis stehen bleibt, bricht oder entwurzelt wird hängt nicht nur von der Baumart, dem Durchmesser und der auf ihn wirkenden Druckkraft, sondern auch vom Widerstand des Wurzelsystems und vom Pilzbefall ab.

5.1.3 Jahrringe

Die Jahrringanalyse der letzten 20 Jahre vor dem Lawinenereignis zeigt Zusammenhänge zwischen den Baumzuständen und dem Jahrringwachstum auf. Es wird vermutet, dass nicht die Wachstumsschwankungen selbst einen Einfluss darauf haben, ob ein Baum entwurzelt wird, bricht oder stehen bleibt, sondern dass das Jahrringmuster durch Faktoren verursacht wurde, die vom Standort des Baumes abhängen und auch einen Einfluss auf den Baumzustand haben.

Betrachtet man die Jahrringkurven (Abbildung 30), fällt auf, dass bei den Bäumen der Lawinenzüge Cresta, Klosters und Splügen die durchschnittlichen Jahrringbreiten pro Jahr der nicht stehenden Bäume kleiner sind als jene der stehenden Bäume. Bei den Lawinenzügen Dischma, Lareit und La Rösa sind keine grossen Unterschiede zwischen den Jahrringbreiten der stehenden und nicht stehenden Bäume sichtbar. Diese Unterschiede zwischen den Standorten können unterschiedliche Ursachen haben. Einerseits nimmt das Jahrringbreitenwachstum mit zunehmender Höhe über Meer ab, andererseits spielt auch die Konkurrenz durch Nachbarbäume um Licht, Wasser und Nährstoffe eine wichtige Rolle. Auch frühere Ereignisse wie Lawinen, Steinschlag, Schneebewegungen aber auch biotische Faktoren wie Wildverbiss oder Insektenbefall beeinflussen das Jahrringbreitenwachstum (Schweingruber 1996). Einen grossen Einfluss auf das Jahrringbreitenwachstum hat auch das Baumalter und der damit verbundene altersbedingte Wachstumstrend.

Beim Lawinenzug Cresta standen die meisten gebrochenen Bäume im oberen Teil des Lawinenzuges, oberhalb von 1900 m.ü.M. Weiter unten floss die Lawine teilweise im Bachbett und verlor zunehmend an Druckkraft. Teilweise haben die Bäume im oberen Bereich der Lawine Spuren früherer Lawinenereignisse aufgewiesen, was sich vermutlich negativ auf das Wachstum der beschädigten Bäume ausgewirkt hat, aber für die unverletzten Bäume teilweise verbesserte Wachstumsbedingungen zur Folge hatte, was mit einer Zunahme des Jahrringbreitenwachstums verbunden sein kann. Es könnte sein, dass Bäume, die bei einem früheren Ereignis verletzt oder schräg gestellt wurden und als Folge davon einen Rückgang im Jahrringwachstum aufwiesen, wurden beim Lawineniedergang 2008 eher gebrochen oder entwurzelt als Bäume, die ein früheres Ereignis unbeschadet überstanden haben. Das kann eine mögliche Erklärung für die kleineren durchschnittlichen Jahrringbreiten der nicht stehenden Bäume sein.

Im Lawinenzug bei Klosters sind die nicht stehenden Bäume über den ganzen Lawinenzug verteilt. Stehende Bäume befinden sich nur zuoberst und im Auslaufbereich. Die Bäume im oberen Teil des Lawinenzuges weisen Spuren früherer Lawinenereignisse auf. Da das Lawinenereignis bereits 10 Jahre zurückliegt, waren viele der gebrochenen Bäume faul und so konnten nur 4 gebrochene Bäume beprobt und für die Jahrringanalyse benutzt werden. Von diesen vier Bäumen stammen drei aus dem oberen Teil des Lawinenzuges oberhalb von 1900 m.ü.M und einer aus dem mittleren Teil des Lawinenzuges auf etwa 1615 m.ü.M. Die Jahrringdaten der gebrochenen Bäume stammen nur aus dem oberen Teil des Lawinenzuges, die der stehenden Bäume aus dem oberen und unteren Teil, was die breiteren, durchschnittlichen Jahrringe für die stehenden Bäume erklärt.

Im Lawinenzug bei Splügen ist die Verteilung der stehenden und gebrochenen Bäume, welche für die Jahrringanalyse verwendet wurden, relativ gleichmässig über den Lawinenzug verteilt. Der mittlere Teil des Lawinenzuges ist nur schwach bewaldet. Hier befinden sich die stehenden, robusten Bäume meist in der freien Fläche und die gebrochenen, eher dünneren Bäume am stärker bewaldeten Rand. Das könnte eine Erklärung dafür sein, dass die nicht stehenden Bäume im Durchschnitt ein schwächeres Jahrringwachstum aufwiesen als die

stehenden Bäume. Eine weitere mögliche Erklärung könnte sein, dass Bäume mit einem unterdurchschnittlichen Jahrringwachstum auch weniger ausgeprägte Wurzelwerke aufweisen (Meyer 2008) und somit eher entwurzelt werden.

Bei den Lawinenzügen Dischma, Lareit und La Rösa sind keine deutlichen Unterschiede sichtbar. Beim Standort La Rösa zeigt sich im Jahr 1982 bei fast allen Bäumen ein starker Wachstumseinbruch. Das könnte durch extreme Klimabedingungen, Insektenbefall oder durch eine Störung verursacht worden sein. Die Tatsache, dass der nur 700 m nordwestlich gelegenen Lawinenzug Lareit diesen Wachstumseinbruch nicht zeigt, ist ein Hinweis, dass der Einbruch nicht durch das Klima verursacht wurde.

Das Jahrringwachstum während der letzten 20 Jahre vor dem Lawinenereignis unterscheidet sich zwischen den entwurzelten, gebrochenen und stehenden Bäumen. Betrachtet man das Jahrringwachstum eines Baumes während der vorletzten 10 Jahren mit den letzten 10 Jahren, fällt auf, dass die gebrochenen Bäume einen positiven und die entwurzelten Bäume eher einen negativen Wachstumstrend aufweisen (Abbildung 31). Bei den stehenden Bäumen sind wenige Änderungen während der letzten 20 Jahre vor dem Lawinenereignis sichtbar.

Ähnlich verhält es sich mit den abrupten Wachstumsschwankungen. Die stehenden Bäume weisen am wenigsten abrupte Wachstumsschwankungen auf. Die gebrochenen Bäume weisen am meisten positive Wachstumsschwankungen (releases) und die entwurzelten Bäume am meisten negative Wachstumsschwankungen (decreases) auf (Abbildungen 32-34).

Eine mögliche Erklärung, warum gebrochene Bäume eher einen positiven Wachstumstrend und am meisten releases aufweisen, könnte sein, dass sie an einem exponierten Ort im Lawinenzug standen und bei einem früheren Lawinenereignis ein konkurrierender Baum entfernt wurde, wodurch der Baum freigestellt wurde und das Jahrringbreitenwachstum zunahm. Durch die exponierte Stellung war die Wahrscheinlichkeit gross, dass der Baum bei einem nächsten Lawinenniedergang gebrochen wurde. Es kann auch sein, dass der betroffene Baum bei einem früheren Lawinenereignis noch flexibel genug war, um die Lawine unbeschadet zu überstehen und nur die grösseren Konkurrenten gebrochen wurden und dass der gleiche Baum bis zum untersuchten Lawinenereignis seine Flexibilität verloren hatte und selbst gebrochen wurde. Eine andere Erklärung könnte die Holzdichte sein. Positive abrupte Wachstumsschwankungen bedeuten höhere Wachstumsraten und damit eine verringerte Holzdichte, was zu einer geringeren Festigkeit des Stammes führt.

Warum entwurzelte Bäume negative Wachstumstrends und am meisten decreases aufweisen, ist nicht ganz geklärt. Auch hier könnte die Wirkung von früheren Ereignissen auf die Bäume eine Rolle spielen. Möglicherweise waren Bäume, die einem früheren Lawinenereignis ausgesetzt waren und nicht gebrochen wurden, entweder sehr stark verankert und weisen einen genügend grossen Durchmesser auf, oder flexibel genug, um der Druckkraft standzuhalten. Schlecht verankerte Bäume wurden wahrscheinlich eher entwurzelt oder schräg gestellt. Die Schrägstellung der Bäume bewirkte wahrscheinlich einen negativen Wachstumstrend im Jahrringbild oder sogar eine abrupte negative Wachstumsveränderung. Solche schräg gestellten Bäume waren dann beim Abgang der untersuchten Lawine bereits schlecht verankert und wurden zum grössten Teil ganz entwurzelt.

Die stehenden Bäume weisen am wenigsten Unregelmäßigkeiten im Jahrringwachstum auf. Sie wurden möglicherweise am wenigsten durch frühere Ereignisse beeinflusst, weil sie an relativ geschützten Standorten gewachsen sind, oder weil sie bereits genug grosse Durchmesser und stabile Verankerungen besaßen, um die Ereignisse unbeschadet zu überstehen. Die stehenden Bäume waren bei den untersuchten Lawinen kleineren Druckkräften ausgesetzt als die nicht stehenden Bäume (Abbildung 36), was vermuten lässt, dass sie bei früheren Ereignissen ebenfalls weniger Druckkräfte erfahren haben, je nach Fliessverhalten der Lawine. Die kleinräumigen topographischen Merkmale spielen dabei keine entscheidende Rolle (Anhang 2). Die Grünerlen stellen einen Spezialfall dar, weil sie durch ihre Flexibilität ein Lawinenereignis meist unbeschadet überstehen (Frey 1977)

5.1.4 Umgebung der untersuchten Bäume

Kleinräumige topographische Unterschiede hatten in den 6 untersuchten Lawinenzügen keinen Einfluss auf den Baumzustand nach einem Lawinenereignis. Der Anteil an entwurzelten, gebrochenen oder stehenden Bäumen unterscheidet sich nicht signifikant zwischen Bäumen, die auf Kuppen oder Flächen gewachsen sind (Anhang 2). Die Anzahl der Bäume, welche im Auslaufbereich, in Mulden oder am Rand gewachsen sind, ist zu klein für eine Analyse. Die kleinräumigen topographischen Unterschiede hatten wahrscheinlich keinen bedeutenden Einfluss auf das Fliessverhalten der Lawinen und für den Baumzustand war es entscheidender, ob ein Baum in der Mitte oder am Rand der Lawine stand, als ob er auf einer leichten Kuppe oder in einer leichten Mulde stand. Ob ein Baum auf einer Kuppe, Fläche oder Mulde gewachsen ist, wurde bei den Feldaufnahmen abgeschätzt, indem das Gelände, wo der Baum steht, mit dem umliegenden Gelände verglichen wurde. Da für die topographischen Begriffe keine eindeutigen Definitionen existieren, die bei der Feldarbeit angewendet werden konnten, sind diese Daten eher dafür geeignet, um auf mögliche Trends hinzuweisen und weniger, um exakte Analysen zu machen.

Neben der kleinräumigen Topografie wurde während der Feldarbeit auch notiert, wie viele Bäume im Umkreis von 5 m des untersuchten Baumes stehen (Anhang 2). Dabei war ab sieben Nachbarbäumen ein schwacher positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl Bäume und dem Anteil an stehenden Bäumen ersichtlich. Es gibt nur wenige Bäume, die mehr als 5 Nachbarbäume haben und somit sind die Resultate nicht sehr aussagekräftig. Unterscheidet man zwischen der Anzahl gebrochener Bäume und der Anzahl stehender Bäume im Umkreis von 5 m Radius des untersuchten Baumes, sind Korrelationen mit den Baumzuständen ersichtlich. Je mehr gebrochene Bäume in der Umgebung eines untersuchten Baumes stehen, desto eher ist der Baum auch gebrochen und je mehr stehende Bäume sich in der Umgebung befinden, desto wahrscheinlicher ist der untersuchte Baum auch stehend.

Es wurde auch untersucht, wie weit hangaufwärts sich der nächste Baum vom untersuchten Baum befindet. Es war nicht möglich, neben dem Abstand zum untersuchten Baum, den Durchmesser und den Baumzustand des hangaufwärts stehenden und des untersuchten Baumes in einer Analyse zu berücksichtigen und somit waren die Resultate der Analyse nicht aussagekräftig, da zum Beispiel eine entwurzelte Fichte mit 10 cm Durchmesser 4 Meter oberhalb des untersuchten Baumes eine andere Schutzwirkung für den untersuchten Baum hat, als eine stehende Lärche mit 50 cm Durchmesser 8 m oberhalb des untersuchten Baumes.

5.2 Vergleich der realen Lawinenwirkung auf die Bäume mit den Daten der Lawinensimulation mit RAMMS

Die untersuchten Lawinen wurden mit dem Modellierungssystem RAMMS simuliert, um die Druckkräfte, Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten der Lawinen bei jedem untersuchten Baum zu berechnen. Es wurde versucht, die Lawinen so real wie möglich zu simulieren. Die für die Simulation benötigten Daten über die Anrisshöhe, die Fläche des Anrissgebietes, die Höhe der erodierten Schneeschicht entlang des Lawinenzugs, die Schneedichte und die Grössenklasse und Wiederkehrdauer der Lawine wurden abgeschätzt. Diese Schätzwerte wurden teilweise leicht angepasst, damit die Lawinen möglichst genau simuliert werden konnten und mit den Auslaufgebieten der realen Lawinen, welche ungefähr bekannt waren, übereinstimmten.

Wenn eine Lawine durch bewaldetes Gebiet fliesst, werden in der Simulation für dieses Teilstück leicht höhere Reibungsparameter für die Berechnungen verwendet. Diese Reibungsparameter sind bei allen Lawinenzügen gleich verwendet worden, obwohl die durchflossenen Wälder verschiedene Bestandesstrukturen aufgewiesen haben. Bis jetzt gibt es keine an die Bestandesstruktur angepassten Reibungswerte. Weil viele geschätzte Daten für die Simulationen benutzt werden mussten, konnten keine Anpassungen der Reibungsparameter für den Wald vorgenommen werden, da nicht klar war, wie gross der Fehler bei der Abschätzung der lawinenspezifischen Eingabedaten für das Simulationsprogramm RAMMS ist.

Um eine Anpassung der Reibungsparameter für den Wald vorzunehmen, müssten alle anderen Daten zum Lawinniedergang bekannt sein. Es müsste kurz nach dem Lawinniedergang das genaue Anrissgebiet, die Anrisshöhe, die erodierte Schneedecke, die Schneedichte und das genaue Auslaufgebiet aufgenommen werden.

Dass die simulierten Lawinen teilweise auf Abschätzungen von Eingangsdaten beruhen und die zum Teil kleinen Lawinen sehr schwierig zu simulieren sind, darf beim Analysieren der Ergebnisse zur Druckkraft, Fliesshöhe und Fliessgeschwindigkeit nicht vergessen werden. Dargestellt und in den Analysen berücksichtigt wurden immer nur die Maximalwerte. Die Wirkung einer Lawine auf einen Baum hält jedoch über eine gewisse Zeit an, mit variierenden Druckkräften, Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten.

5.2.1 Druckkraft

Die berechnete Druckkraft erwies sich wie vermutet als ein wichtiger Einflussfaktor für den Baumzustand. Die gebrochenen Bäume waren im Durchschnitt einer höheren Druckkraft ausgesetzt als die stehenden und die entwurzelten Bäume (Abbildung 36). Der Baumzustand der Fichten ist stärker abhängig von der Höhe der Druckkraft als der Baumzustand der Lärchen (Abbildungen 37 und 45). Das heisst, die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fichte ein Lawinenereignis übersteht, nimmt stärker mit der Zunahme der Druckkraft ab, als bei der Lärche. Bei diesen Resultaten muss daran gedacht werden, dass die Lärchen vor allem aus den Lawinenzügen La Rösa und Lareit stammen. In Lareit haben viele Lärchen mit kleinen Durchmessern sehr hohe Druckkräfte überlebt und in La Rösa wurden teilweise Bäume bei relativ tiefen Druckkräften entwurzelt. In Abbildung 43 hat sich gezeigt, dass Lärchen bis zu einem Durchmesser von 48 cm flexibler sind und bei gleichem Durchmesser weniger schnell brechen als Fichten (Abbildung 43). Betrachtet man die Druckkräfte für gebrochene und entwurzelte Bäume, muss berücksichtigt werden, dass diese Bäume oft schon bei tieferen Druckkräften als bei der maximal auftretenden Druckkraft am

Standort eines Baumes brechen oder entwurzelt werden. Man erkennt keinen Unterschied, ob die Druckkraft gerade hoch genug war, um einen Baum zu brechen oder zu entwurzeln, oder ob auch eine weniger hohe Druckkraft genügt hätte. In der Literatur werden kritische Druckkräfte, damit ein Baum bricht, bei Fliesslawinen mit 10 und 50 kPa und bei Staublawinen mit 3-5 kPa angegeben (Margreth, 2008). Bei den untersuchten Bäumen wurden maximale Druckkräfte von 459 kPa gemessen. Die drei Bäume, die den höchsten Druckkräften ausgesetzt waren, haben Durchmesser zwischen 16 und 20 cm und stehen. Die berechneten Druckkräfte können von der Realität abweichen.

Die Höhe der Druckkraft steht nicht in einem Zusammenhang mit der Bruchhöhe der gebrochenen Bäume (Abbildung 38). Auf die Bruchhöhe hat aber der Durchmesser einen Einfluss, da mit zunehmendem Durchmesser auch die Bruchhöhe ansteigt. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Bäume während den Lawinnenniedergängen in verschiedenen tiefen Schneedecken standen, was auch einen Einfluss auf die Bruchhöhen haben könnte. Auffällig sind die Unterschiede der Bruchhöhen aufgeteilt nach Standorten (Abbildung 39), was auf die verschiedene Baumartenzusammensetzung, Durchmesser- und Lawinengrösse, Druckkraft, Schneehöhe und Schneebeschaffenheit zurückzuführen ist.

Bei den Analysen, wo die Druckkräfte involviert sind, darf nicht vergessen werden, dass es sich um berechnete Daten mit einer ungewissen Genauigkeit handelt.

5.2.2 Fliesshöhe, Fliessgeschwindigkeit und Auslaufgebiet

Bei den Simulationen der Lawinen wurden neben der Druckkraft auch die Fliessgeschwindigkeit und die Fliesshöhe der Lawine berechnet. Damit werden das Fliessverhalten und die Ablagerungen der verschiedenen Lawinen ersichtlich. Die Fliesshöhe und Fliessgeschwindigkeit wurden vor allem dafür verwendet, um das Auslaufgebiet der simulierten Lawinen zu veranschaulichen.

In den Abbildungen 13 bis 24 stimmen die Auslaufgebiete der simulierten Lawinen zum grössten Teil mit den realen Auslaufgebieten überein. Bei den Lawinen Dischma, La Rösa und Splügen hatte die realen Lawine Auslaufgebiete, die nicht mit vernünftigen Abschätzungen der Eingabegrössen zu simulieren waren. In den Simulationen waren die Auslaufgebiete zu gross. In der Realität stoppten diese drei Lawinen sehr schnell, sobald sie in flacheres Gelände flossen. Der Grund für das spezielle Fliessverhalten ist wahrscheinlich die besondere Schneebeschaffenheit, da es sich um drei Nassschneelawinen handelt.

Die Eingabe der Schneedichte im Simulationsprogramm RAMMS wirkt sich nicht auf das simulierte Fliessverhalten der Lawine aus, sondern nur auf die Druckkraft, weshalb Nassschneelawinen schwierig zu simulieren sind.

6 Schlussfolgerungen

In Bezug auf die Forschungsfragen können vier Schlussfolgerungen gezogen werden:

- **Der Stammdurchmesser und die Baumart sind die wichtigsten Einflussfaktoren für den Baumzustand stehend, gebrochen oder entwurzelt nach dem Lawinenereignis. Bei Fichten und Lärchen steigt die Wahrscheinlichkeit, eine Lawine stehend zu überleben mit zunehmendem Durchmesser.**
- **Gebrochene Bäume waren während des Lawinenniedergangs einer grösseren Druckkraft ausgesetzt als stehende und entwurzelte Bäume.**
- **Weiter hat sich herausgestellt, dass entwurzelte, gebrochene und stehende Bäume unterschiedliches Wachstumsverhalten aufweisen und dass die Bruchhöhen der Bäume mit zunehmendem Durchmesser ansteigen.**
- **Die Anzahl der Nachbarbäume und der kleinräumige, topographische Standort korrelieren nicht eindeutig mit den Baumzuständen der untersuchten Bäume.**
- **Die sechs Lawinenzüge konnten mit RAMMS plausibel modelliert werden, aber die Analyse der Bremswirkung des Waldes auf die Lawinen konnte wegen fehlenden Daten der realen Lawinenniedergänge nicht gemacht werden.**

Die Arbeit hat deutlich aufgezeigt, dass die Wirkung von Lawinen auf den Baumzustand nicht verallgemeinert werden kann und vom Lawinenzug und der Baumart abhängt. Um die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf Bäume in anderen potentiellen und realen Lawinenzügen anwenden zu können, müssen mehr Bäume in möglichst unterschiedlichen Lawinenzügen untersucht werden, um die Gültigkeit der Ergebnisse für andere Standorte zu überprüfen. Somit wird sich zeigen, wie stark die unterschiedlichen Reaktionen von Fichten und Lärchen auf die Lawinen durch die ungleichmässige Baumartenverteilung in den verschiedenen Lawinenzügen beeinflusst wurde.

7 Dank

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinem Referenten Dr. Christof Bigler und bei meinem Korreferenten Dr. Peter Bebi für die fachliche Unterstützung und die Geduld bedanken.

Ich möchte mich auch noch bei den Mitarbeitern am SLF für die Unterstützung bedanken, Frank Krumm und Michaela Teich für die wertvollen Tipps und die Korrekturen sowie an Marc Christen und Perry Bartelt für die kompetente Hilfe bei der Simulation der Lawinenmodelle mit RAMMS. Für die Hilfe bei den Feldaufnahmen bin ich Maxim Pattaroni, Antoine Vullioud und Thomas sehr dankbar.

Zudem danke ich den Revierförstern der jeweiligen Regionen für die Auskunft über die Lawinen und die Feldbegehungen.

Ein grosser Dank geht natürlich auch noch an meine Familie und Freunde, die mich aktiv oder passiv während meiner Arbeit unterstützt haben.

8 Literaturverzeichnis

- Ammann, M. 2006. Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 228 S.
- Bartelt, P. und Stöckli, V. 2001. The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology*, 32: 209-216.
- Bazzigher G. 1973. Wundfäule in Fichtenwäldern mit alten Schälschäden. *Journal of Forest Pathology* 3: 71-82.
- Bebi, P., A. Casteller, A. C. Mayer and V. Stöckli. 2004. Jahrringe als Indikatoren für extreme Standortbedingungen im Gebirge: Schnee, Lawinen und Permafrost. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 155: 208-212.
- Bigler, C. und H. Bugmann. 2003. Growth-dependent tree mortality models based on tree rings. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 210-221.
- Bleicher N. 2007. Altes Holz in neuem Licht. Archäologische und dendrochronologische Untersuchungen an spätneolithischen Feuchtbodensiedlungen Oberschwabens. Diss. Universität Mainz, 66 S.
- Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. J. Stone. 1984. *Classification and regression trees*. Wadsworth International Group.
- Casteller, A., Christen, M., Villalba, R., Martinez, H., Stöckli, V., Leiva, J.C., und Bartelt, P. 2008. Validating numerical simulation of snow avalanches using dendrochronology: the Cerre Ventana event in Northern Patagonia, Argentina, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8: 433-443.
- Christen, M., Bartelt, P., und Gruber, U. 2005. Numerical calculation of snow avalanche run-out distances, edited by Soibelman, L. and Pena-Mora, F., *Proc. Of the 2005 Computing in Civil Engineering International Conference*, Cancun, Mexico, 11 S.
- Christen, M., Bartelt, P., und Gruber, U. 2007. Modelling avalanches, *GEOconnexion International Magazine*, 6(4): 38-39.
- de Quervain, M., 1978. Wald und Lawinen. In: *Proceeding of the IUFRO Seminar Mountain Forests and Avalanches*, Davos, Switzerland: 219-231.
- Frey, W. (1977). Wechselseitige Beziehung zwischen Schnee und Pflanze - eine Zusammenstellung anhand von Literatur. *Mitt. Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF* 34: 223 S.
- Grissino-Mayer, H. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: 205 – 221.

- Gruber, U. und Bartelt, P. 2007. Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS Environ. Modell. Softw. 22: 1472-1481.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin 43:69-78.
- Hosmer, D. W. und S. Lemeshow. 1989. Applied logistic regression. Wiley Interscience, New York.
- Köstler, J. N., E. Brückner, und H. Bibelriether 1968. Die Wurzeln der Waldbäume. Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Margreth, S. 2004. Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. Forum für Wissen 2004: 21-26.
- Margreth, S. 2008. Protect: Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren . Arbeitsanleitung Lawinen. WSL Institute for Snow and Avalanche Research, SLF Davos.
- Meyer, F.D., Paulsen, J. und. Korner, C. 2008. Windthrow damage in *Picea abies* is associated with physical and chemical stem wood properties. Trees-Structure and Function, 22: 463–473.
- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Rohner, B. 2008. Trockenheitseffekte auf Wachstum und Mortalität der Waldföhren im Pfywald, Wallis. Masterarbeit an der Professur für Waldökologie im Departement Umweltwissenschaften an der ETH Zürich.
- Sachs, L. und J. Hedderich. 2006. Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 12. Vollständig neu bearbeitete Auflage. Springer, Berlin, Deutschland
- Schönenberger, W. 1978. Ökologie der natürlichen Verjüngung von Fichte und Bergföhre in Lawinenzügen der nördlichen Voralpen, Eidgenöss. Anst. forstl. Vers.wes., Mitt. 54 (3): 215-361.
- Schneebeili, M. und Bebi, P. 2004: Hydology: Forest and Snow and Avalanche Control: pp 397 – 402 In: Burley, J., J. Evans und J. A. Youngquist (Eds.) Encyclopedia of Forest Science. Elsevier, London.
- Schweingruber, F. 1996. Tree rings and environment dendroecology. Bern, Haupt
- Siegel S. und Castellan N.J. 1988. Nonparametric statistics for the behavioral sciences. Zweite Auflage. McGraw-Hill, New York.
- Woodward, M. 1999. Epidemiology: study design and data analysis. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton.

9 Anhang

Anhang 1: Wachstumskurven

Cresta:

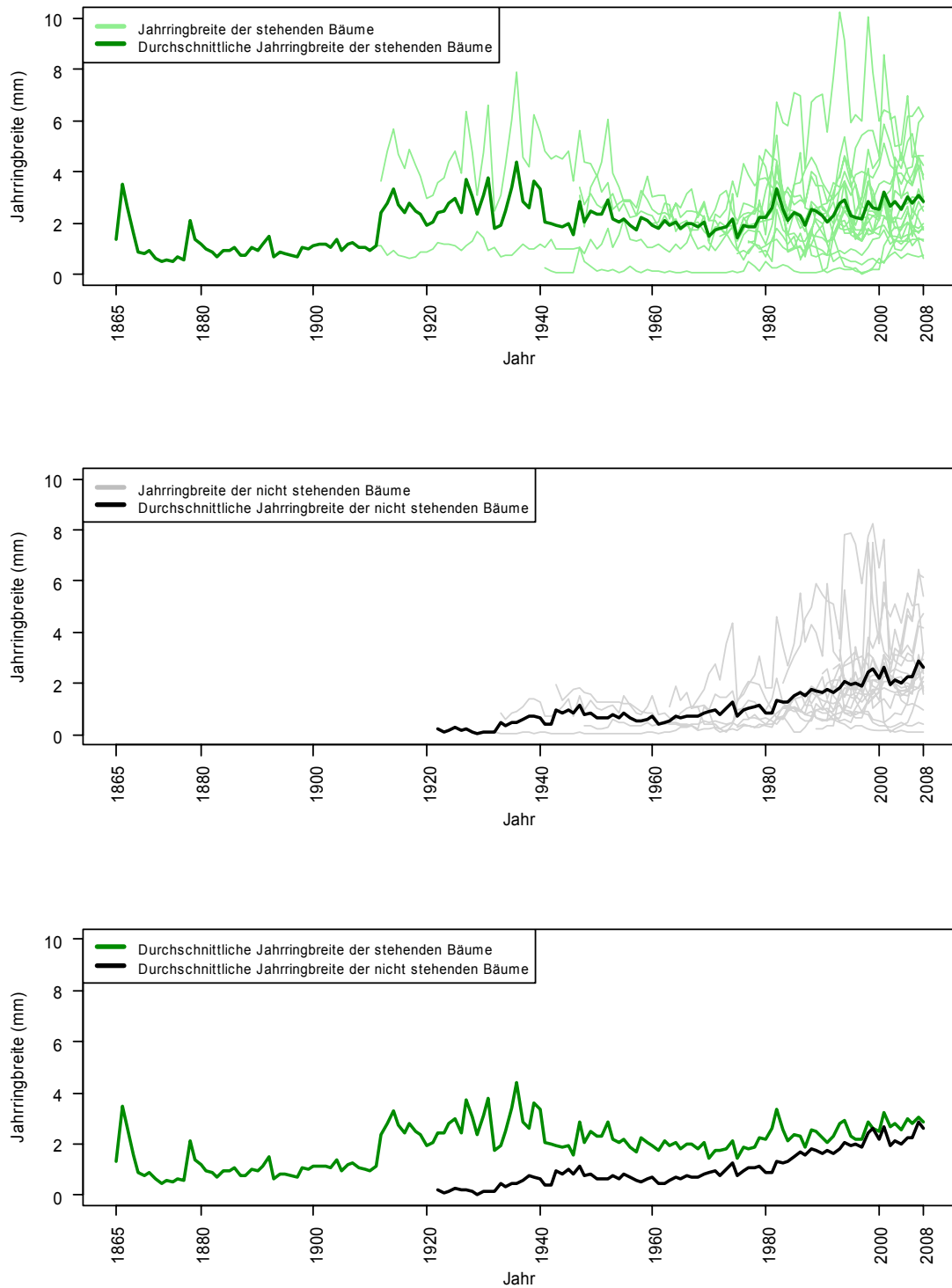


Abbildung A1.1: Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume im Lawinezug Cresta

Dischma

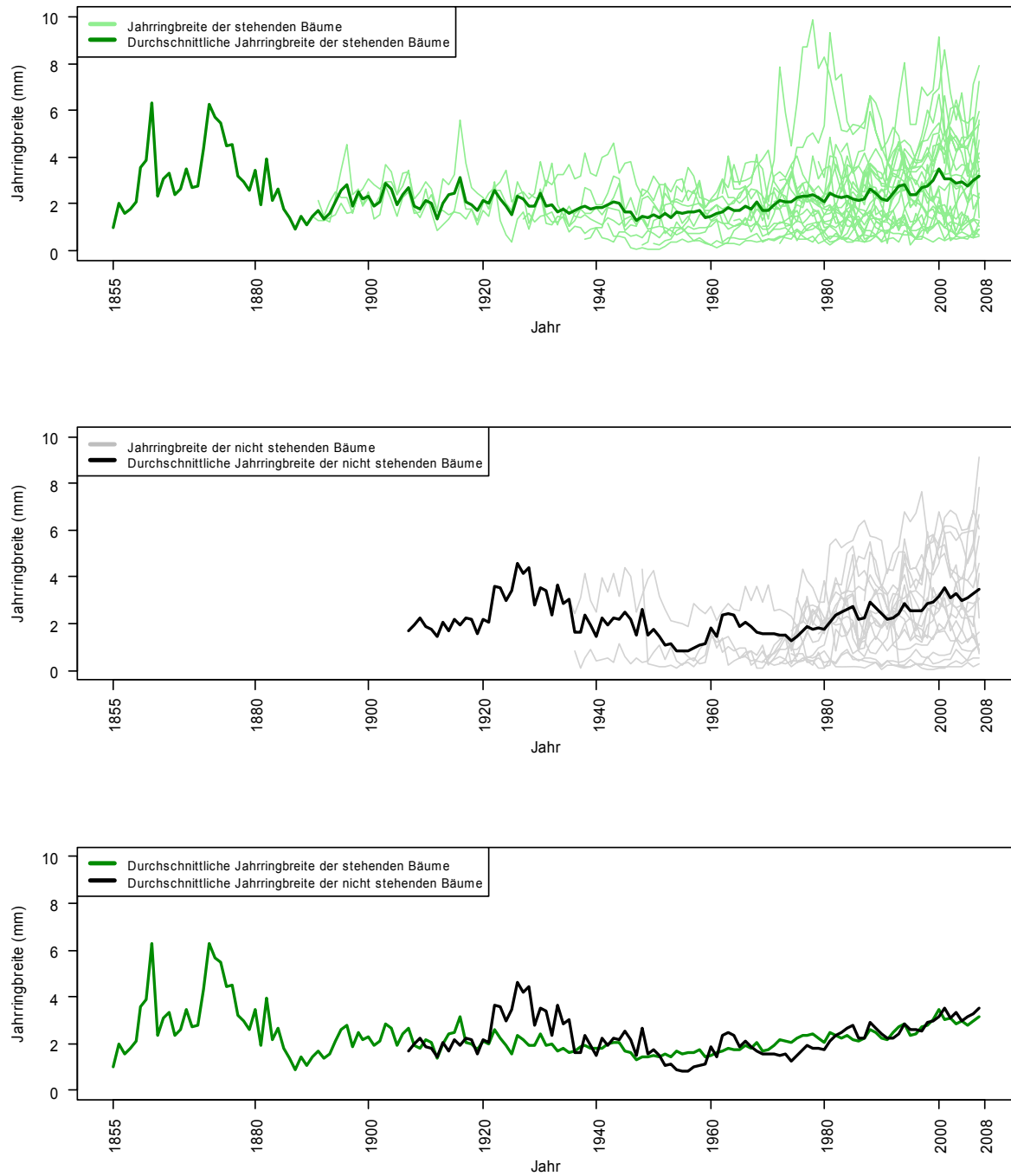


Abbildung A1.2: Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume im Lawinezug Dischma

Klosters

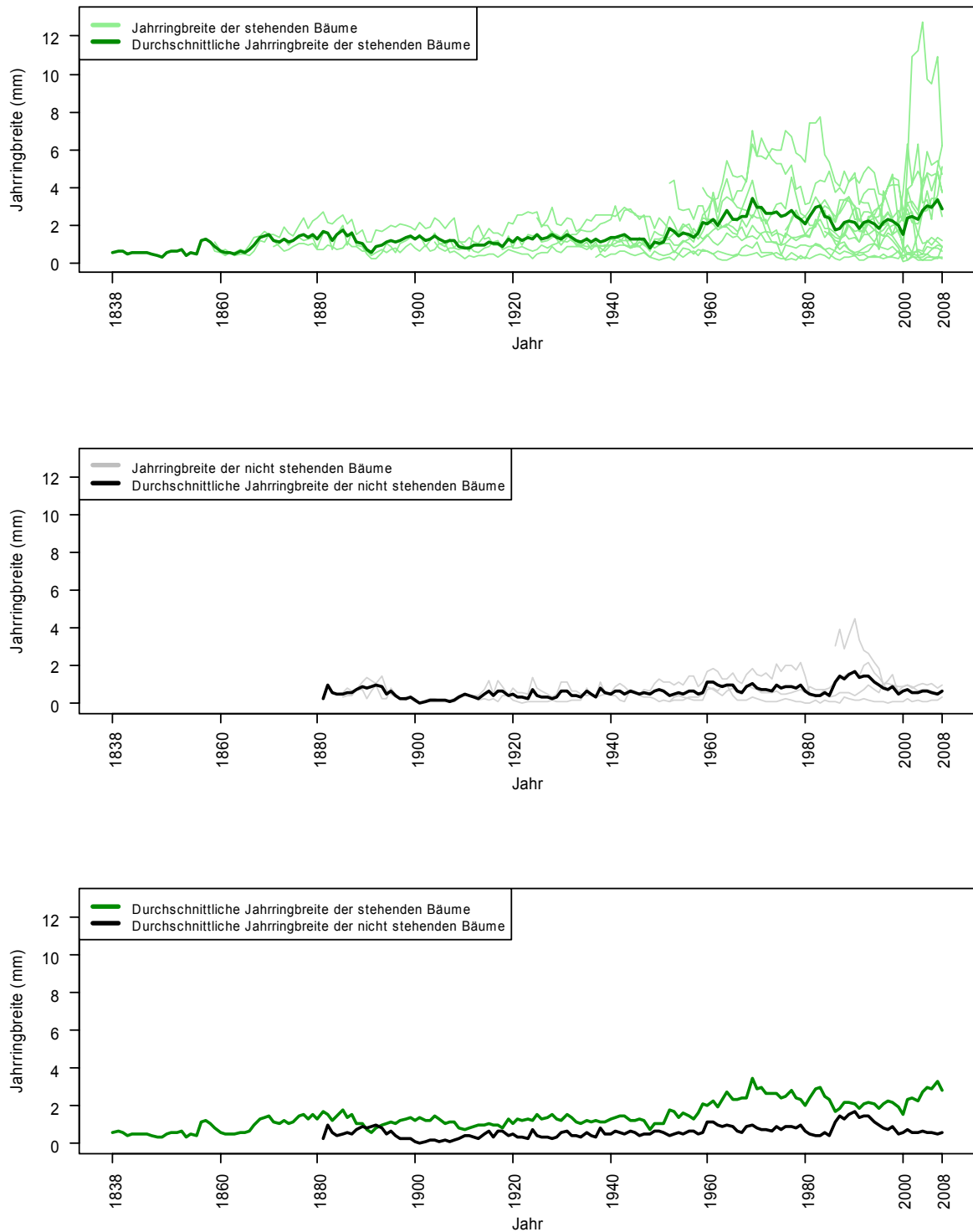


Abbildung A1.3: Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume im Lawinenzug Klosters

Lareit

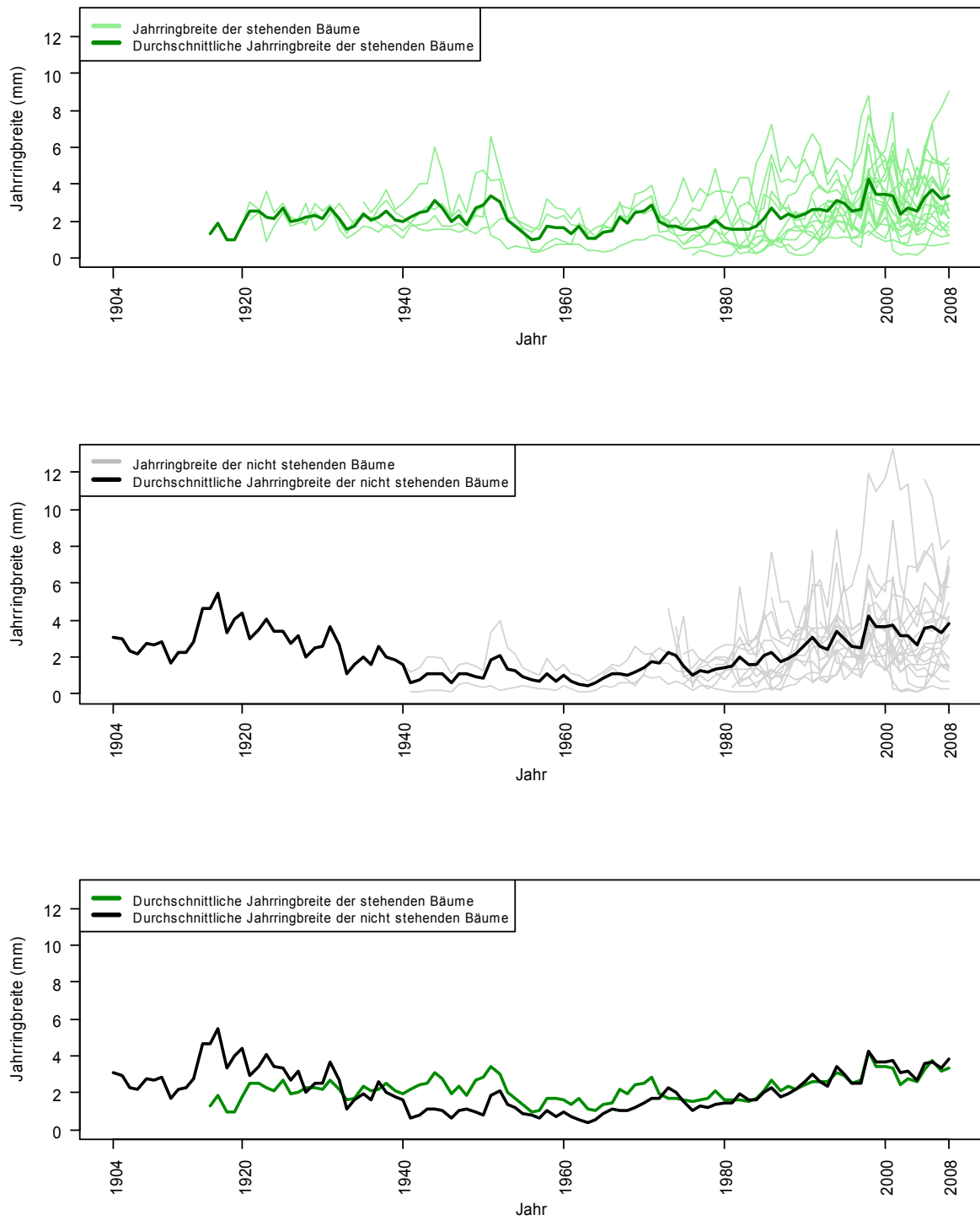


Abbildung A1.4: Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume im Lawinenzug Lareit

La R6sa

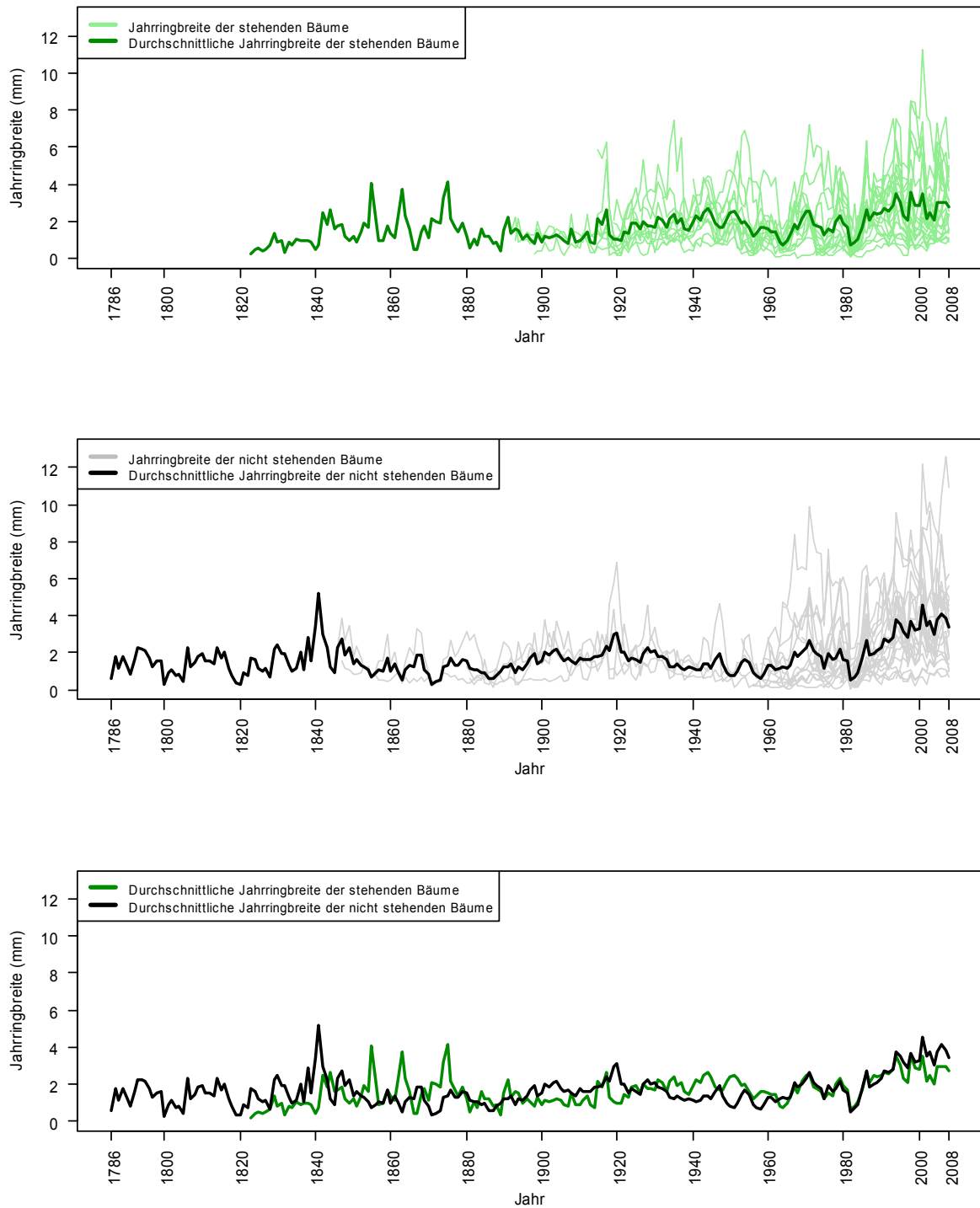


Abbildung A1.5: Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume im Lawinezug La R6sa

Splügen

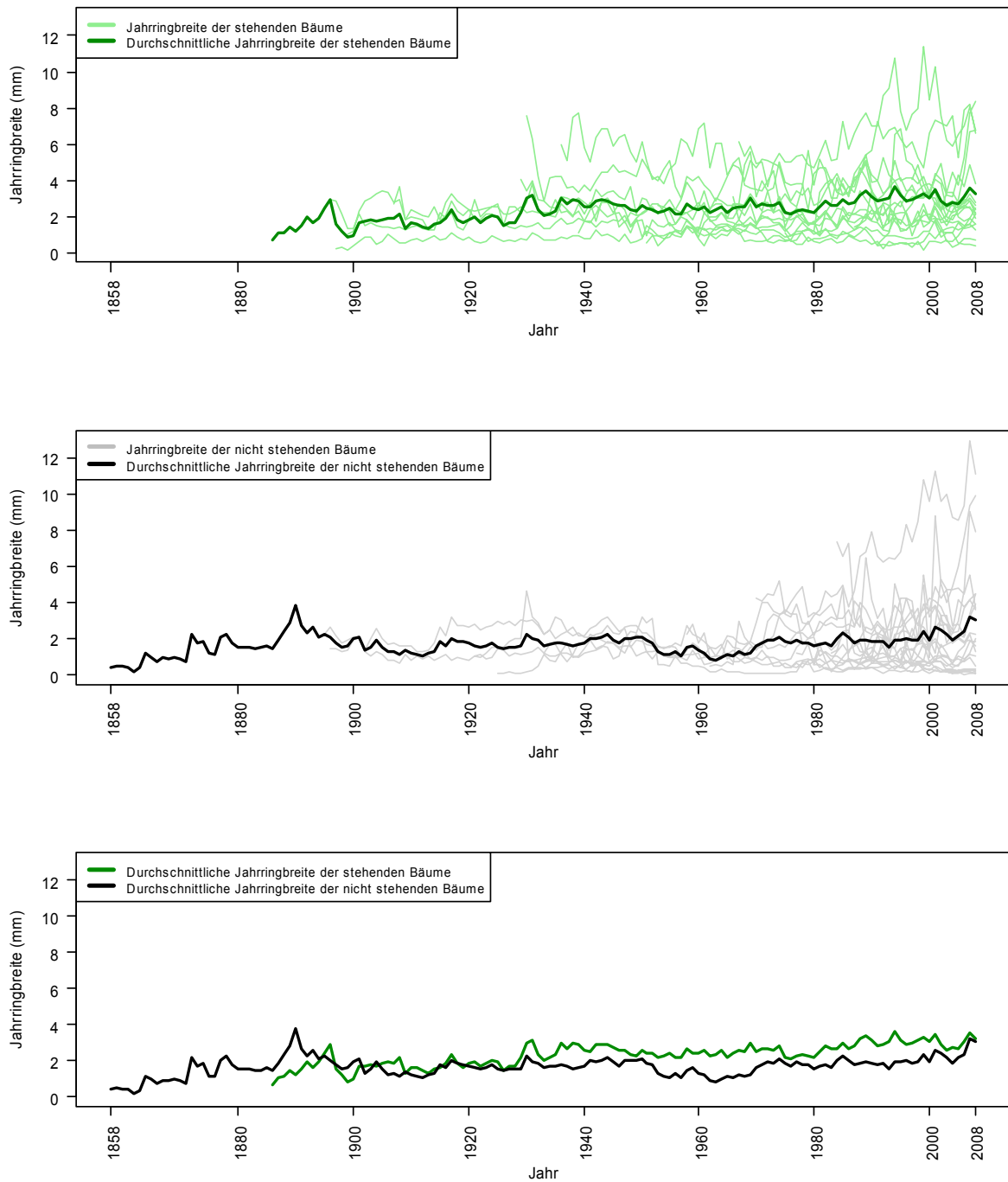


Abbildung A1.6: Wachstumskurven der stehenden und nicht stehenden Bäume im Lawinenzug Splügen

Anhang 2: Einflussfaktoren und Baumzustand

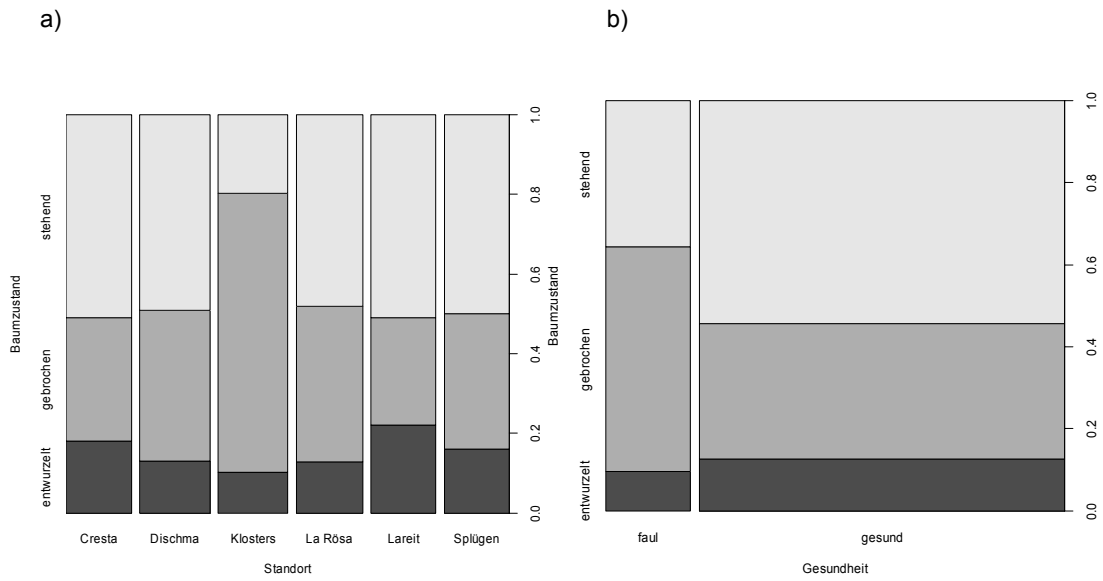


Abbildung A2-1: Baumzustand aufgeteilt nach Standort a) und Gesundheit b)

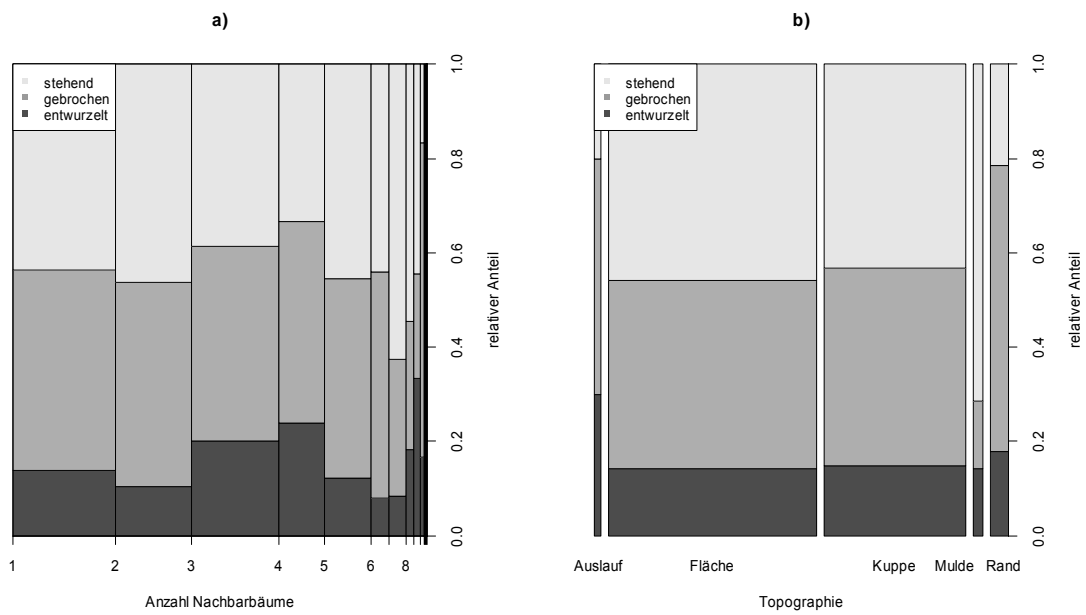


Abbildung A2.2: Anzahl Nachbarbäume a) und Topografie b)

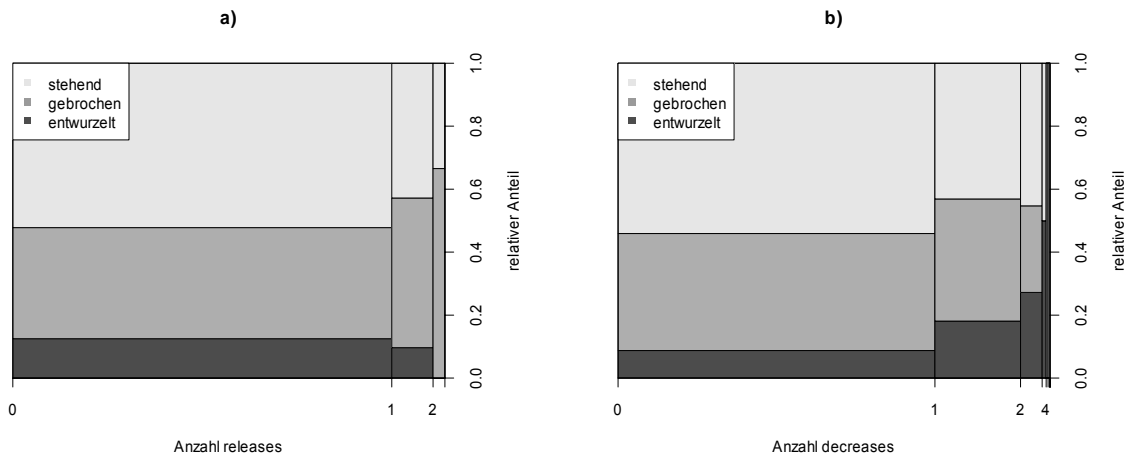


Abbildung A2.3: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Bäume

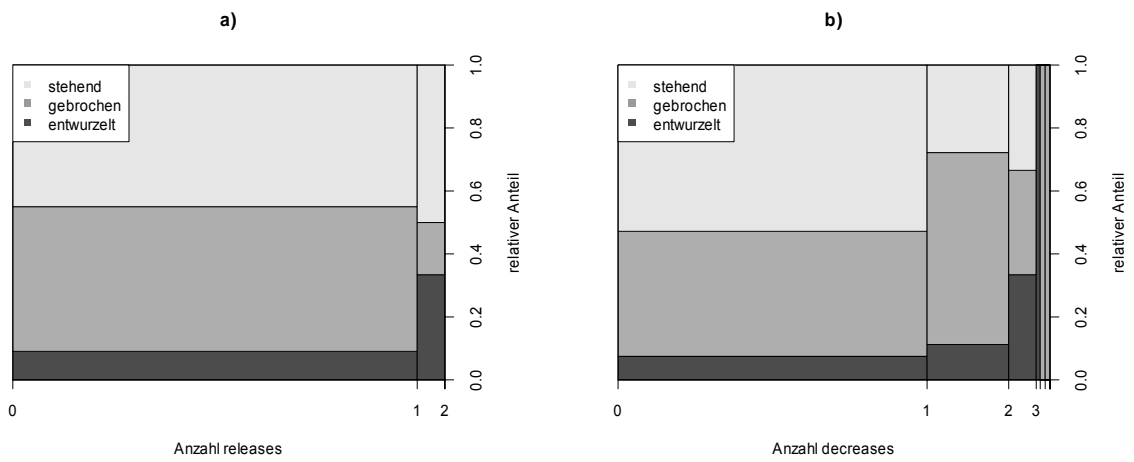


Abbildung A2.4: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Fichten

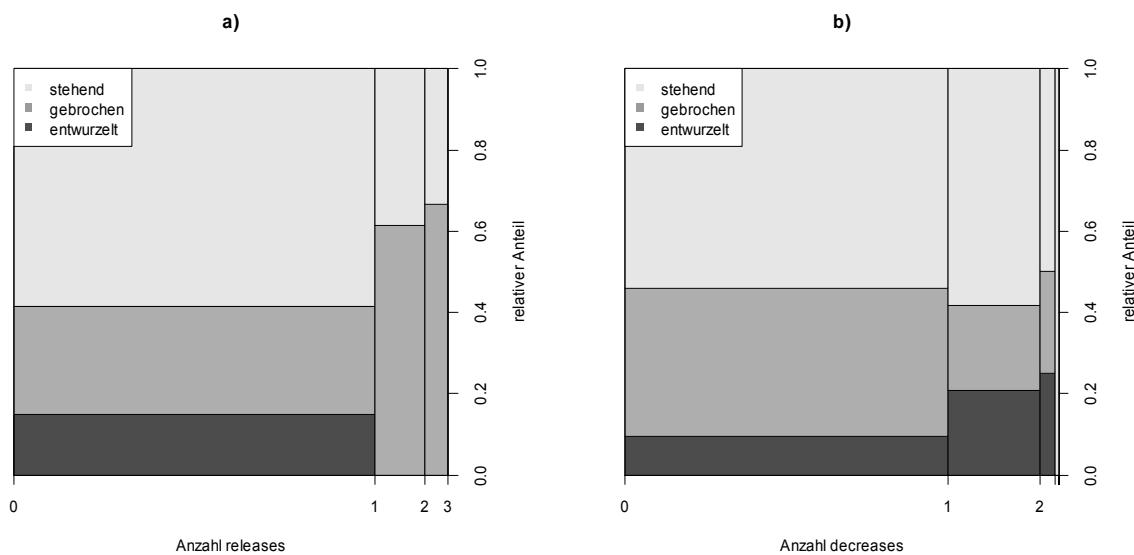


Abbildung A2.5: Abrupte positive a) und negative b) Wachstumsänderungen aller Lärchen

Anhang 3: Logistische Regressionsmodelle

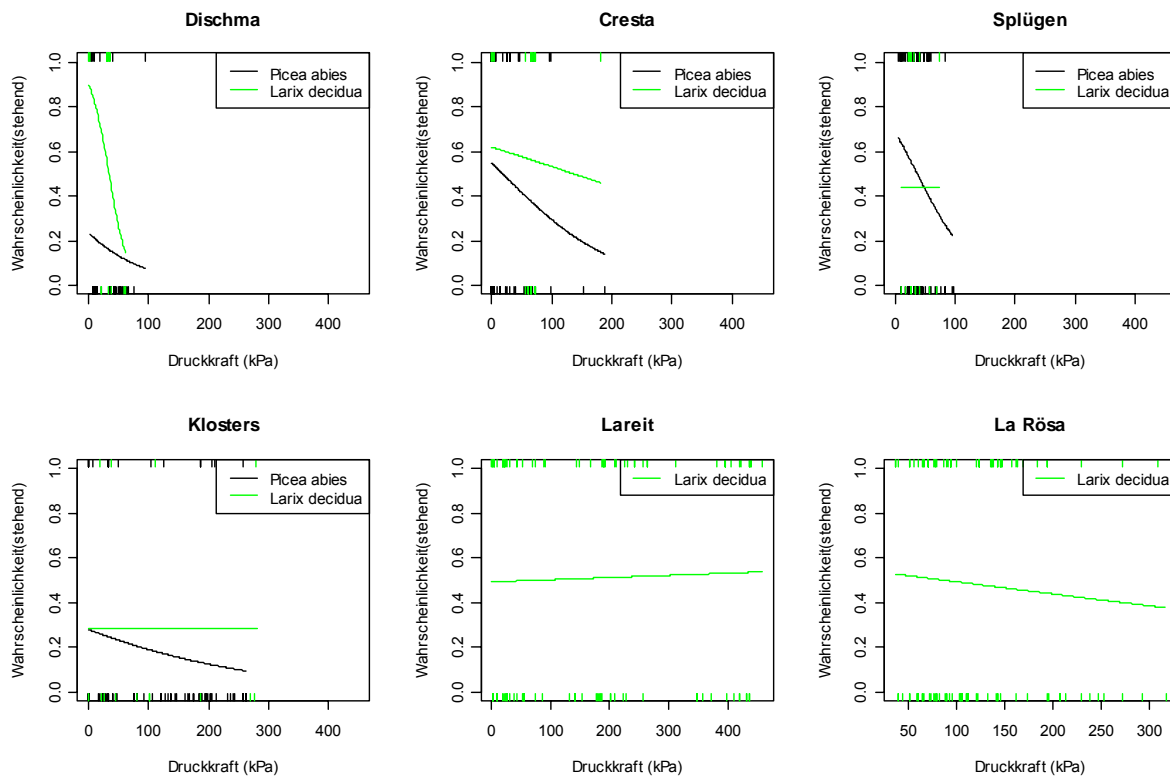


Abbildung A3.1: Modellerte Überlebenswahrscheinlichkeit für Fichte und Lärche abhängig von der Druckkraft für die sechs Lawinenzüge