



WSL-Institut für Schnee-  
und Lawinenforschung SLF



Berner  
Fachhochschule

► Hochschule für Agrar-, Forst- und  
Lebensmittelwissenschaften HAFL

# Lawinensimulation mit RAMMS - Fallbeispiel Wilerhorn



Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL  
Bachelor Studiengang Forstwissenschaften  
Gebirgswald und Naturgefahren

**Bachelor-Thesis**

**Adrian Zaugg**

Referent: Prof. Jean-Jacques Thormann, Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften (HAFL)  
Korreferent: Dr. Peter Bebi, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF)

Zollikofen, 12. August 2016

## **Selbstständigkeitserklärung**

Durch meine Unterschrift erkläre ich, dass

- ich den „Verhaltenskodex HAFL zur Verwendung von Informationsquellen“ kenne und mir die Konsequenzen bei dessen Nichtbeachtung bekannt sind,
- ich diese Arbeit in Übereinstimmung mit diesen Grundsätzen erstellt habe,
- ich diese Arbeit persönlich und selbständig erstellt habe,
- ich mich einverstanden erkläre, dass meine Arbeit mit einer Plagiat-Erkennungssoftware getestet und in die BFH-Datenbank der Software aufgenommen wird.

Ort, Datum .....

Unterschrift .....



**Berner Fachhochschule**  
Hochschule für Agrar-, Forst- und  
Lebensmittelwissenschaften HAFL

## **Mitteilung über die Verwendung von Semesterarbeiten, Bachelor-Theses und Minorarbeiten der Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften HAFL**

Alle Rechte an Semesterarbeiten, Bachelor-Theses und Minorarbeiten der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL sind im Besitze des/der Verfasser/in der Arbeit. Die HAFL genießt jedoch ein kostenloses, unbefristetes, nicht-exklusives Nutzungsrecht an den Arbeiten ihrer Studierenden.

Semesterarbeiten, Bachelor-Theses und Minorarbeiten sind Bestandteile des Ausbildungsprogramms und werden von den Studierenden selbständig verfasst. Die HAFL übernimmt keine Verantwortung für eventuelle Fehler in diesen Arbeiten und haftet nicht für möglicherweise daraus entstehende Schäden

Zollikofen, Mai 2011

Der Direktor

## Dank

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit durfte ich viele Höhen und Tiefen erleben. Zahlreiche Personen haben mich bei diesem lehrreichen Prozess unterstützt.

Gerne möchte ich mich bei meinem Betreuer Jean-Jacques Thormann bedanken, der mich durch seine positive und motivierende Einstellung auch in schwierigen Zeiten unterstützt hat. Durch seine Flexibilität und Offenheit konnte ich meinen persönlichen Weg bei der Ideenfindung gehen.

Ein herzliches Dankeschön richtet sich auch an meinen Korreferent und Betreuer Dr. Peter Bebi. Aufgrund seines grossen Fachwissens und Erfahrungsschatzes leistete er einen massgebenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Er nahm sich stets Zeit für meine Anliegen und Fragen, las meine Arbeit durch und half mir mit konstruktiven Vorschlägen weiter.

Ein grosser Dank gebührt Ueli Ryter. Er hat mir viele hilfreiche Informationen für meine Arbeit zur Verfügung gestellt. Zudem unterstützte er mich zu jederzeit mit seinem grossen Fachwissen und zeigte stets grosses Interesse an meiner Arbeit, was mich in schwierigen Momenten motivierte.

Bei Marc Christen möchte ich mich herzlich für die Unterstützung bei den Arbeiten mit RAMMS bedanken. Er hat mich geduldig in das Programm eingeführt und sich stets für meine Fragen Zeit genommen.

Zum Schluss möchte ich mich herzlich bei meiner Partnerin, Seraina Hächler, bedanken, die mich bei den Feldaufnahmen unterstützt hat. Sie ermutigte mich in schwierigen Momenten und leistete damit einen grossen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

---

# Inhaltsverzeichnis

## Dank

**Tabellenverzeichnis ..... - 6 -**

**Abbildungsverzeichnis ..... - 7 -**

**Zusammenfassung..... - 10 -**

**1 Einleitung.....11**

1.1 Ausgangslage ..... 11

1.2 Zielsetzung ..... 13

**2 Grundlagen.....14**

2.1 Lawinen und Schutzwirkung des Waldes ..... 14

2.2 Schutzwirksamkeit von Totholz gegenüber Lawinen ..... 17

2.3 Hochlagenaufforstungen im Berner Oberland ..... 18

2.4 Lawinenmodellierung..... 20

**3 Material und Methoden .....23**

3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes ..... 23

3.2 Historische Entwicklung der Lawinenverbauung Wilerhorn ..... 31

3.3 Feldaufnahmen..... 33

3.4 Lawinensimulation mit RAMMS..... 36

3.4.1 Szenariobildung für die Lawinensimulation ..... 36

3.4.2 Lawinensimulation mit RAMMS::AVALANCHE Extended ..... 41

3.4.3 Nachberechnung Lawinenereignis am Wilerhorn..... 47

**4 Resultate.....50**

4.1 Feldaufnahmen..... 50

4.2 Lawinensimulation mit RAMMS..... 53

<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>66</b>
5.1	Feldaufnahmen.....	66
5.1.1	Aktuelle Schutzwirkung .....	66
5.1.2	Entwicklung der Schutzwirkung.....	70
5.1.3	Synthese Schutzwirkung .....	72
5.2	Lawinensimulation .....	74
5.2.1	Methode.....	74
5.2.2	Resultate der Lawinensimulation.....	77
5.2.3	Synthese.....	87
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>- 90 -</b>
	<b>Anhangsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Bodenvegetation in der Untersuchungsfläche.....	27
<b>Tabelle 2:</b> Auszug aus dem Anzeichnungsprotokol des Holzschlages Hennefildla-Wald 2010 (Quelle: nach Trauffer 2016, eigene Darstellung).....	30
<b>Tabelle 3:</b> Die Einteilung der fünf verschiedenen Zersetzungsgrade der Renvallmethode (Quelle: nach Putallaz 2010, eigene Übersetzung).....	34
<b>Tabelle 4:</b> Anrissmächtigkeit, Anrissfläche, Anrissvolumen und Grössenordnung der Lawine für jedes Szenario und Wiederkehrdauer.....	39
<b>Tabelle 5:</b> Neuschneemenge und totale Schneehöhe in cm der Periode 12. - 19. Februar 1963 gemessen bei der SLF-Station Hasliberg 1830 m ü.M (Quelle: nach EISLF 1964, eigene Darstellung).....	47
<b>Tabelle 6:</b> Gesamtübersicht aller untersuchten Parameter der Szenarien 2007, 2016, 2020, 2016 ohne Wald, 2020 ohne Wald mit Wiederkehrsdauer von 30, 100 und 300 Jahren (V=Geschwindigkeit, P=Druck, H=Höhe, D=Schneeablagerungshöhe, Waldzerstörung, Lawinenlänge).....	65
<b>Tabelle 7:</b> Höhenunterschied der Lawinenlaufbahn, berechnete Obergrenze der max. Geschwindigkeit, effektive Geschwindigkeit der Szenarien 2007, 2016, 2020 mit Wiederkehrsdauer 30-, 100- und 300-Jahre. ....	78
<b>Tabelle 8:</b> Maximale Geschwindigkeit, maximaler Druck und Dichte der Szenarien 2007, 2016 und 2020 mit Wiederkehrsdauer 30-, 100- und 300 Jahre. ....	80

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Morphologische Lawinenklassifikation: dabei erfolgt die Einteilung von Lawinen nach Art des Anrisses, der Art der Bewegung, der Form der Sturzbahn und der Art und Form der Ablagerung (Quelle: Nairz et al. 2011, 22).	14
<b>Abbildung 2:</b> Definition Waldlawine: Lawinen, welche im Wald oder auf Blößen anrissen, werden als Waldlawinen bezeichnet (links). Keine Waldlawinen sind Lawinenanrisse oberhalb der Waldgrenze, in unbestockbaren Erosions- oder Lawinenrinnen oder auf Waldwiese (rechts). (Quelle: Meyer-Grass und Imbeck 1985).	15
<b>Abbildung 3:</b> Wachstum der untersuchten Fichtenaufforstungen im Berner Oberland, aufgeteilt nach verschiedenen Höhenlagen (Quelle: Ryter 2014).	19
<b>Abbildung 4:</b> Alter, ab welchem die Aufforstungen im Berner Oberland die Lawinenschutzfunktion übernehmen, dargestellt nach Höhenstufe mit Mittelwert und Streubereich (Quelle: Ryter 2014).	20
<b>Abbildung 5:</b> Situationskarte des untersuchten Perimeters (Quelle: swisstopo, eigene Darstellung).	23
<b>Abbildung 6:</b> Geologie am Wilerhorn (Quelle: Staeger 1942).	24
<b>Abbildung 7:</b> Klimadiagramm Meiringen 589 m ü.M. (Quelle: MeteoSchweiz ohne Datum).	25
<b>Abbildung 8:</b> Diagramm bezüglich der mittleren Jahrestemperatur aus den CRUTEM4 Daten für die Koordinaten 2°651'475 1°179'775 (Quelle: Jones et al. 2012; Osborne und Jones 2014).	25
<b>Abbildung 9:</b> Die östliche Ausdehnung der Lawinenereignisse wird durch den Hennefildla-Wald begrenzt.	26
<b>Abbildung 10:</b> Vegetationsaspekte auf der Holzschlagfläche: <i>Calamagrostis villosa</i> (links), <i>Rubus idaeus</i> (rechts).	28
<b>Abbildung 11:</b> Orthofotos der Holzschlagfläche (rotes Viereck); links: der Bestand im Jahr 2007 vor dem Eingriff; rechts: der Bestand im Jahr 2013 nach dem Eingriff, mit westlicher und östlicher Freifläche.	29
<b>Abbildung 12:</b> Situation nach dem Holzschlag: Luftperspektive auf die Holzschlagfläche 2011 (links), Zustand auf der Holzschlagfläche 2011 (rechts) (Quelle: KAWA 2016).	30
<b>Abbildung 13:</b> Lawinenverbauprojekt Wilerhorn-Alpogli: Anrissverbauung (rot gestrichelt), Lawinenzüge (römische Zahlen), Betonwand auf Krete zwischen Lawinenzug drei und vier (roter Strich), Bremshöcker (rote Punkte), Auffangdamm unterhalb Bremshöcker (roter Strich), Waldschäden der Lawinnengängen von 1908, 1945 und 1954 (Quelle: KAWA, 2016).	32
<b>Abbildung 14:</b> Verteilung und Lage der Aufnahmeflächen.	33
<b>Abbildung 15:</b> Aufgrund der Hangneigung mögliche Lawinenanrissgebiete bei den Szenarien 2007 (Situation vor dem Holzschlag), 2016 (Situation nach dem Holzschlag) und 2020 (Situation nach dem Holzschlag und zusätzlichen Kalamitäten) v.l.n.r.	37
<b>Abbildung 16:</b> Lawinenanrissflächen für Wiederkehrsdauer 30 (gelb), 100 (orange), 300 (rot) für die Szenarien 2007, 2010 und 2020 v.l.n.r.	38
<b>Abbildung 17:</b> Eingabefenster "General" des Programm RAMMS Extended.	43
<b>Abbildung 18:</b> Eingabefenster "Params" des Programm RAMMS Extended.	43
<b>Abbildung 19:</b> Eingabefenster "Mu/Xi" des Programm RAMMS Extended.	44
<b>Abbildung 20:</b> Eingabefenster "Release" des Programms RAMMS Extended.	44
<b>Abbildung 21:</b> Eingabefenster "Forest" des Programms RAMMS Extended.	45
<b>Abbildung 22:</b> Eingabefenster "Erosion" des Programms RAMMS Extended.	45
<b>Abbildung 23:</b> Eingabefenster "Powder/Wet" des Programms RAMMS Extended.	46
<b>Abbildung 24:</b> Eingabefenster "Stop" des Programms RAMMS Extended.	46

<b>Abbildung 25:</b> Definierte Anrissfläche (rot) des Lawinenereignisses von 1963, die schwarz-gestrichelte Fläche zeigt die Ausdehnung der Anrissverbauung im Jahr 1963. ....	49
<b>Abbildung 26:</b> Verteilung der Höhen in cm der Baumstöcke. ....	50
<b>Abbildung 27:</b> Verteilung der Durchmesser in cm der Baumstöcke.....	50
<b>Abbildung 28:</b> Verteilung der Renvall-Werte pro Baumstock nach Exposition.....	50
<b>Abbildung 29:</b> Verteilung der Anzahl Verjüngungsindividuen nach Kategorie: verbissen, Bruch, Zwiesel, Übrige gesund.....	51
<b>Abbildung 30:</b> Verteilung der Anzahl Verjüngungsindividuen pro Baumstock. ....	51
<b>Abbildung 31:</b> Verteilung der Höhen in cm von den Verjüngungsindividuen, nach Gruppe geschädigt und gesund.....	52
<b>Abbildung 32:</b> Verteilung der Höhen der Verjüngungsindividuen.....	52
<b>Abbildung 33:</b> Zusammenhang zwischen Verjüngungshöhe und Zuwachs der Verjüngung im Jahr 2015. ....	52
<b>Abbildung 34:</b> Verteilung des Zuwachses in cm der Verjüngungsindividuen im Jahr 2015. ....	52
<b>Abbildung 35:</b> Lawinensimulation für das Lawinenereignis aus dem Jahr 1963. Dargestellt sind dabei die maximale Geschwindigkeit (links), der maximale Druck (mitte) und die maximale Höhe der Lawine (rechts). ....	53
<b>Abbildung 36:</b> Lawinensimulationen für das Szenario 2007 (Situation vor dem Holzschlag) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile) und die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile). ....	55
<b>Abbildung 37:</b> Lawinensimulationen für das Szenario 2016 (Situation nach dem Holzschlag) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile) und die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile).....	57
<b>Abbildung 38:</b> Lawinensimulationen für das Szenario 2020 (Situation nach dem Holzschlag mit zusätzlichen Kalamitäten) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile), die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile) und die Fläche der Waldzerstörung (fünfte Zeile).....	60
<b>Abbildung 39:</b> Lawinensimulationen für das Szenario 2016 ohne Wald (Situation nach dem Holzschlag, ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile) und die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile).....	62
<b>Abbildung 40:</b> Lawinensimulationen für das Szenario 2020 ohne Wald (Situation nach dem Holzschlag mit zusätzlichen Kalamitäten, ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), den maximalen Druck (zweite Zeile) und die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile). ....	63
<b>Abbildung 41:</b> Entscheidungsbaum für die Beurteilung der Schutzwirkung des Restbestandes nach Windwurd (Quelle: BAFU 2008) .....	68
<b>Abbildung 42:</b> Flugaufnahme 11.02.2012: Holzschlagfläche (links), Osthang Wilerhorn (rechts) (Quelle: KAWA 2016). ....	69

---

<b>Abbildung 43:</b> Verlauf der Schutzwirkung nach einer Störung, die Schutzwirkung der Verjüngung verläuft nicht synchron mit der abnehmenden Schutzwirkung des Totholzes, es kommt zu einem Schutzdefizit (Quelle: Kupferschmid Albisetti 2003).....	72
<b>Abbildung 44:</b> Flugaufnahme vom 11.02.2012 der Holzschlagfläche (Quelle: KAWA 2016).....	76
<b>Abbildung 45:</b> Vergleich der maximalen Geschwindigkeit der Szenarien 2007, 2016 und 2020, dargestellt in einem 30-jährigen(1. Zeile), 100-jährigen (2. Zeile) und 300-jährigen Ereignis (3. Zeile). ....	79
<b>Abbildung 46:</b> Vergleich des maximalen Druck der Szenarien 2007, 2016 und 2020, dargestellt in einem 30-jährigen (1. Zeile), 100-jährigen (2. Zeile) und 300-jährigen Ereignis (3. Zeile). ....	81
<b>Abbildung 47:</b> Vergleich der maximalen Höhe der Szenarien 2007, 2016 und 2020, dargestellt in einem 30-jährigen (1. Zeile), 100-jährigen (2. Zeile) und 300-jährigen Ereignis (3. Zeile). ....	83
<b>Abbildung 48:</b> Vergleich der maximalen Geschwindigkeiten zwischen den Szenarien 2016 und 2016 ohne Wald (1. Zeile) sowie Szenario 2020 und 2020 ohne Wald (2. Zeile) mit einem 30-jährigen Ereignis (1+2 Spalte), 100-jährigen Ereignis (3+4 Spalte) und 300-jährigen Ereignis (5+6 Spalte). ....	86
<b>Abbildung 49:</b> Auszug aus der Schutzwaldhinweiskarte des Kantons Bern, Blau dargestellt Objektschutzwald für Lawinenprozesse.....	II
<b>Abbildung 50:</b> Auszug aus dem Lawinschutzkataster des Kantons Bern, gelb dargestellt: Umhüllung aller Lawinenereignisse am Wilerhorn.....	III
<b>Abbildung 51:</b> Auszug aus der Bestandeskarte des Kantons Bern.....	IV
<b>Abbildung 52:</b> Entscheidungshilfe für die Bestimmung des K-values. ....	V
<b>Abbildung 53:</b> Für das Szenario 2007 definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.. ....	VVI
<b>Abbildung 54:</b> Für das Szenario 2016 definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis. ....	VVII
<b>Abbildung 55:</b> Für das Szenario 2020 definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis. ....	VVIII
<b>Abbildung 56:</b> Für das Szenario 2016 ohne Wald definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.....	IX
<b>Abbildung 57:</b> Für das Szenario 2016 ohne Wald definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.....	X
<b>Abbildung 58:</b> Gumbel Diagramm der SLF-Beobachterstation Hasliberg 1825 m, mit Extremwerten aus der Messreihe 1960-2015.....	XI

## Zusammenfassung

Zaugg Adrian. Lawinensimulation mit RAMMS – Fallbeispiel Wilerhorn

Die wichtige, aber sich ständig ändernde Lawinenschutzfunktion von Gebirgswäldern wurde bisher in Lawinensimulationsmodellen und Gefahrenbeurteilungen nur bedingt berücksichtigt. Diese Arbeit hatte zum Ziel, mit Hilfe einer neu entwickelten Version der Lawinensimulationssoftware RAMMS und Felduntersuchungen im Lawinenschutzwald Wilerhorn, den Lawinenschutz bei verschiedenen Waldszenarien zu beurteilen.

Durch die Berücksichtigung verschiedener Waldzustände im Anrissgebiet sowie Situationen mit und ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn wurden die Waldwirkungen anhand charakteristischer Werte der Lawinenbewegung aufgezeigt. Mittels Feldaufnahmen wurde zudem die aktuelle Schutzwirkung einer Holzschlagfläche aus dem Jahr 2010 gegenüber Lawinen beurteilt und eine künftige Entwicklung abgeschätzt.

Bezüglich der aktuellen Schutzwirkung hat sich gezeigt, dass die erhöhte Bodenrauigkeit sowie die Stützwirkung der Baumstämme auf die Schneedecke wirkungsvoll vor Bodenlawinen schützen. Die Schutzfunktion bezüglich Oberlawinen ist durch die Wirkhöhe der Querbäume von 0.6 m und der Baumstämme von 1.4 m begrenzt. Aufgrund des Standorts mit mittlerer Holzersetzungsrate wird die Schutzwirkung des Totholzes für die nächsten 20 Jahre erwartet. Die gepflanzten Fichten, welche eine mittlere Höhe von 58 cm aufweisen, können unter Berücksichtigung von Wachstumsmodellen für Hochlagenaufforstungen die Schutzfunktion in 22 Jahren übernehmen. Aufgrund der Mortalität muss angenommen werden, dass die minimal benötigte Stammzahl/ha von 360 mit BHD >8 cm in 22 Jahren nicht erreicht wird. Bedingt durch das langsame Wachstum, erreicht die Naturverjüngung erst ca. 10 Jahre später die doppelte Höhe der maximalen Schneehöhe eines 100-jährigen Ereignisses.

Die Modellierung von Extremereignissen verschiedener Waldszenarien zeigt, dass die Resultate massgebend durch den Zustand des Lawinenschutzwaldes bestimmt werden. Mit abnehmender Waldfläche steigt das Anrissvolumen und führt zu höheren Werten der charakteristischen Grössen der Lawinenbewegung. Bei den Modellierungen von Situationen mit und ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn ergeben sich bei Situationen mit Wald kürzere Auslaufstrecken. Fließt die Lawine durch eine Waldfläche, wird hinter den Bäumen Schnee abgelagert. Diese Reduktion der Schneemasse verkürzt die Auslaufstrecke der Lawine.

Die in vorliegender Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass mit der Extended-Version die Lawinengefahr im bewaldeten Gebiet und die Lawinenschutzfunktion des Waldes mit plausiblen Resultaten modelliert werden können.

**Schlagwörter:** Avalanche, Forest, Protection, Numerical Simulation

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Seit der Besiedlung der Alpen sind die Menschen in den Alpentälern dem Risiko eines Lawinnenniederganges ausgesetzt. Infolge des veränderten Siedlungsverhaltens und der intensivierte Nutzung der Infrastrukturen, angetrieben durch die Industrialisierung und den Tourismus, ist das Schadenpotential stark angestiegen (Hanausek und Hopf 2000, 114). Nach den Lawinenkatastrophen in den Schweizer Alpen von 1951 und 1954 wurde die Notwendigkeit für eine Entscheidungshilfe, welche eine Einteilung des Gemeindegebietes in „sicher“ oder „unsicher“ zulässt, erkannt. Mit der Veröffentlichung des ersten Lawinenmodells der Schweiz (Voellmy-Modell) im Jahr 1955 konnten erstmals mögliche Schäden von Lawinen abgeschätzt werden. Die Weiterentwicklung zum Voellmy-Salm-Modell ermöglichte es Geschwindigkeit, Druck und Höhe sowie die Auslaufstrecke von Lawinen zu berechnen. Dieses Modell wurde weltweit bis zur Entwicklung von numerischen Lawinenberechnungsmodellen für die Bestimmung von Auslaufstrecken und Lawindrücken verwendet (Sauer Moser et al. 2011b, 76). Seit 2010 wird das vom WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) entwickelte, zweidimensionale Fließlawinenberechnungsmodell RAMMS kommerziell genutzt. Dieses Modell ermöglicht Modellierungen der Dynamik von Naturgefahren im dreidimensionalen Gelände (Bartelt et al. 2013). Dessen Anwendung ist einerseits für raumplanerische Massnahmen (Gefahrenzonenplanung) und andererseits für die technische Massnahmenplanung (Dimensionierung von Schutzbauten) bedeutsam. Das Modul RAMMS::AVALANCHE liefert zuverlässige Resultate für extreme, schnell fließende und trockene Lawinen. Sollen jedoch kleinere Lawinenereignisse oder die Wirkung des Waldes bei einer Lawine modelliert werden, sind die Ergebnisse ungenügend. Die Bedeutsamkeit der Waldwirkung bei der Gefahrenbeurteilung von Lawinen wird von Wasser und Perren (2014) hervorgehoben. In der Schweiz leistet der Gebirgswald heute flächenmässig den wichtigsten Beitrag zum Lawinenschutz (Margreth 2004). Dabei beruht die Schutzfunktion des Gebirgswaldes in erster Linie darauf, dass er das Anbrechen von Lawinen verhindert (ebd.). Bei kleineren Lawinen wird zudem eine Bremswirkung des Waldes und somit eine Verkürzung der Auslaufstrecke der Lawine angenommen. Zum aktuellen Zeitpunkt ist diese Wechselwirkung jedoch noch zu wenig untersucht, um eine Quantifizierung zuzulassen (Bebi et al. 2009). In einer neu entwickelten Extended-Version von RAMMS::AVALANCHE soll unter anderem diese Waldwirkung bei der Lawinenmodellierung besser berücksichtigt werden. Somit wird eine Grundlage geschaffen, um die Waldwirkung auf die Lawindynamik zukünftig besser zu quantifizieren. Damit die Extended-Version in der Praxis angewendet werden kann, sind jedoch weitere Auswertungen von Testanwendungen notwendig.

Die Schutzfunktion des Gebirgswaldes wird neben topographischen und klimatischen Bedingung massgebend durch die Waldstruktur bestimmt (Teich und Bebi 2009). Die Struktur ist abhängig von der Bestandsentwicklung, welche durch Aufbau- und Abbauprozesse geprägt ist (Brang et al. 2004). Mittels Pflegeeingriffen soll die Walddynamik auf diejenigen Phasen eingeschränkt werden, welche die nötige Schutzwirkung mit sich bringen und die Bestände störungsresistenter sowie störungselastischer machen (ebd.). Wird den Verhältnissen entsprechend zu stark eingegriffen oder treten natürliche Störungsfaktoren (z.B. Stürme, Insektenbefall, Feuer etc.) auf, kann die Schutzfunktion des Waldes über längere Zeit vermindert sein. Der grösste Teil der Schutzwälder in der Schweiz sind resilient, d.h. sie kehren nach einer Störung wieder in den Ausgangszustand zurück (Brang et al. 2004). Die entscheidende Frage betreffend Gebirgswälder mit Schutzfunktion ist, wie lange es dauert bis die Schutzwirkung wiederhergestellt ist. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen bezüglich der Entwicklungsdynamik von Sturm- und Borkenkäferflächen in Gebirgswäldern tragen zum aktuellen Zeitpunkt dazu bei, dass die Schutzwirkung nach einer Störung besser beurteilt und deren Entwicklung besser abgeschätzt werden kann.

## 1.2 Zielsetzung

Diese Bachelor-Thesis modelliert mit Extended-Version von RAMMS::AVALANCHE, anhand eines Lawinenschutzwaldes am Wilerhorn, Lawinen in drei verschiedenen Waldszenarien. Durch einen Holzschlag im Objektschutzwald entstanden grössere Bestandeslücken, welche neue potentielle Lawinenanrissgebiete darstellen. In einem ersten Teil wird mithilfe von Feldaufnahmen die aktuelle Schutzwirksamkeit der Holzschlagfläche gegenüber Lawinen beurteilt. Ausgehend von Untersuchungsergebnissen bezüglich Hochlagenaufforstungen wird versucht, eine mögliche Entwicklung der Schutzwirksamkeit vorauszusagen

In einem zweiten Teil wird anhand der Modellierungen von verschiedenen Waldzuständen im Anrissgebiet, die Wirkung des Waldes auf charakteristische Werte der Lawinenbewegung beschrieben. Damit die Input-Parameter für die Lawinensimulation kalibriert werden können, wird ein Lawinenereignis am Wilerhorn aus dem Jahr 1963 nachberechnet.

In einem dritten Teil zeigt die vorgelegte Arbeit mithilfe der Lawinenmodellierung den Einfluss des Waldes entlang der Lawinenlaufbahn auf die Auslaufstrecke der Lawine. Dazu werden Situationen mit Wald und Situationen ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn miteinander verglichen.

Aufgrund der erläuterten Zielsetzung ergeben sich die folgenden drei Fragestellungen:

**Fragestellung 1:** Wie ist die aktuelle Schutzwirkung der Holzschlagfläche gegenüber Lawinen zu beurteilen und welche mögliche Entwicklung ist zu erwarten?

**Fragestellung 2:** Welche Auswirkungen hat der Zustand des Lawinenschutzwaldes am Wilerhorn auf die Resultate der Lawinenmodellierung?

**Fragestellung 3:** Lässt sich ein Unterschied bezüglich der Auslaufstrecken von Lawinen in einer Situation mit Wald und ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn erkennen?

## 2 Grundlagen

### 2.1 Lawinen und Schutzwirkung des Waldes

Die Grundlagen betreffend Lawinen, Waldlawinen und der Schutzwirkung des Waldes wurden bereits in einer vorgängigen Arbeit behandelt (Zaugg 2016). Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt nur auf die wesentlichsten Punkte betreffend Lawinen und die Schutzwirkung des Waldes eingegangen.

#### Lawinen

Lawinen sind Massenbewegungen, die Schneemassen von einem Anrissgebiet über eine Sturzbahn in ein Ablagerungsgebiet transportieren (Salm 1982, 71). Die Literatur klassifiziert auf verschiedene Arten, wobei die Einteilung meist aufgrund genetischer oder morphologischer Kriterien erfolgt (vgl. Abb. 1) (Nairz et al. 2011, 23). Für die Analyse und Bewertung von verschiedenen Lawinenwirkungen spielt die Gliederung nach Lawinenarten eine wichtige Rolle (ebd.).

Zone	Kriterium	Alternative Merkmale, Bezeichnung	
Anbruchgebiet	Form des Anrisses	Von einem Punkt ausgehend: <i>Lockerschneelawine</i>	Von einer Linie anreißend: <i>Schneebrettlawine</i> (Bild 3-1a)
	Lage der Gleitfläche	Innerhalb der Schneedecke: <i>Oberlawine</i>	Auf der Bodenoberfläche: <i>Bodenlawine</i>
	Flüssiges Wasser im Lawinenschnee	Trocken: <i>Trockenschneelawine</i>	Nass: <i>Nassschneelawine</i>
Sturzbahn	Form der Sturzbahn	Flächig: <i>Flächenlawine</i>	Runsenförmig: <i>Runsenlawine</i> (kanalisierte Lawine)
	Form der Bewegung	Stiebend, als Schneewolke durch die Luft: <i>Staublawine</i> (Bild 3-1b)	Fließend, dem Boden folgend: <i>Fließlawine</i>
		Gemischte Bewegungsform <i>Mischlawine</i>	
Ablagerungsgebiet	Oberflächenrauigkeit der Ablagerung	Grob (über 0,3 m): Grobe Ablagerung	Fein (unter 0,3 m): Feine Ablagerung
	Flüssiges Wasser in der Ablagerung	Trocken: Trockene Ablagerung	Nass: Nasse Ablagerung
	Fremdmaterial in der Ablagerung	Fehlend: Reine Ablagerung	Vorhanden (Steine, Erde, Äste, Bäume): Gemischte Ablagerung

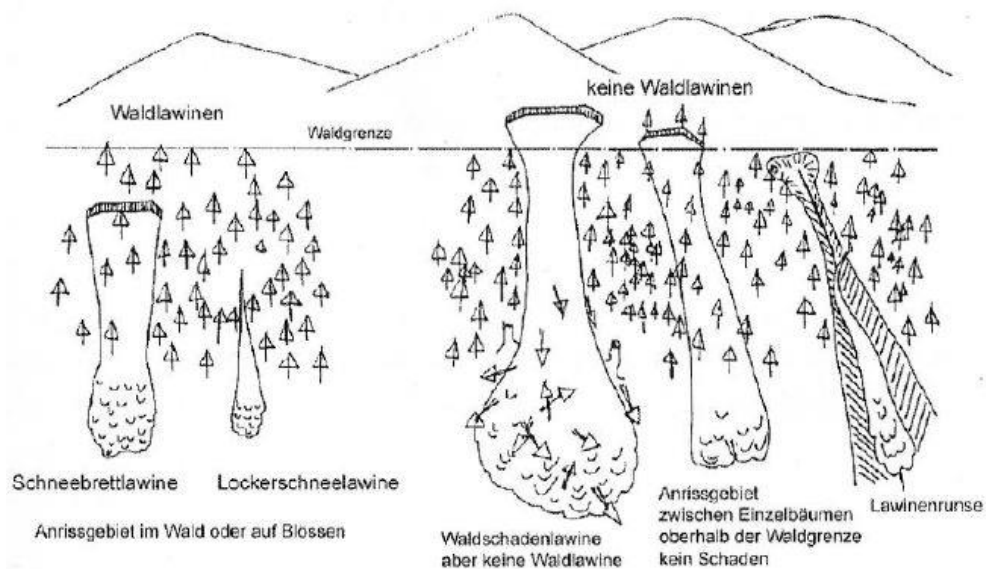
**Abbildung 1: Morphologische Lawinenklassifikation: dabei erfolgt die Einteilung von Lawinen nach Art des Anrisses, der Art der Bewegung, der Form der Sturzbahn und der Art und Form der Ablagerung (Quelle: Nairz et al. 2011, 22).**

Damit Lawinen räumlich auftreten, braucht es eine genügend grosse Hangneigung. Hänge mit einer Neigung grösser als 30° werden allgemein als Anbruchgebiet eingestuft (Hanausek 2000, 85). Lawinenanbrüche unterhalb von 30° sind selten, von Margreth (2007) nennt je-

doch  $28^\circ$  als Untergrenze der Hangneigung. Schneebrettlawinen entstehen am häufigsten bei Hangneigungen von  $30^\circ$  bis  $50^\circ$ , für Lockerschneelawinen braucht es steilere Hänge mit Hangneigungen zwischen  $40^\circ$  und  $60^\circ$  (Salm et al. 1987, Hanausek 2000, 91). Ab einer Hangneigung von  $60^\circ$  sind Lawinen selten, es sind nur kleinere Schneerutsche zu erwarten (McClung und Schaerer 2006, 112). Neben der Hangneigung haben zudem die Schneemächtigkeit, die Bodenrauhigkeit sowie die Schneebeschaffenheit eine zentrale Bedeutung bei der Lawinenbildung (Margreth 2007). Sie haben einen wesentlichen Einfluss auf die minimal nötige Hangneigung, damit eine Lawine entsteht.

### Waldlawinen

Als Waldlawinen werden Lawinen bezeichnet, deren Anrisszonen sich im Bereich des Waldes befinden (Meyer-Grass und Schneebeili 1992). Wie in Abbildung 2 dargestellt, ist der Ort des Anrisses und nicht allfällige Waldschäden ausschlaggebend. Für Lawinen, die auf unbestockbaren Flächen wie Erosions- oder Lawinenrinnen, auf einer grossen Blockschuttfläche oder einer steilen Felspartie mit einer Neigung über  $60^\circ$  oder auf einer bestockbaren, permanenten Waldwiese liegen, wird der Begriff Waldlawine verwendet (Meyer-Grass und Schneebeili 1992).



**Abbildung 2: Definition Waldlawine: Lawinen, welche im Wald oder auf Blößen anreissen, werden als Waldlawinen bezeichnet (links). Keine Waldlawinen sind Lawinenanrisse oberhalb der Waldgrenze, in unbestockbaren Erosions- oder Lawinenrinnen oder auf Waldwiese (rechts). (Quelle: Meyer-Grass und Imbeck 1985).**

Der Begriff des Waldes wird durch das Bundesgesetz über den Wald und die kantonalen Waldgesetze und -verordnungen definiert. Aufgrund der diesbezüglich delegierten Kompetenzen an die Kantone ergeben sich so zum Teil Unterschiede zwischen den Kantonen. Eine vom Gesetz unabhängige und in der Forschung häufig verwendete Walddefinition wurde als

Grundlage für die Aufnahmen des Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) geschaffen. Diese Definition besagt, dass eine Fläche dann als Wald eingestuft wird, wenn ein minimaler Deckungsgrad von 20 % vorliegt, die Bäume eine minimale Oberhöhe von 3m erreichen und die Breite der bestockten Fläche mindestens 25m beträgt (Keller 2013). Davon ausgenommen sind Aufforstungen, Verjüngungen, Schlag-, Sturm- und Schadenflächen sowie Gebüschwald aus Legföhren und Alpenerlen (ebd.).

Die durchschnittlichen Neigungen der Anrissflächen im Wald belaufen sich auf 42.6° (Ulrich 2008). Dieser Wert liegt deutlich höher als bei Freilandlawinen, deren mittlere Hangneigung der Anrissfläche 37.7° beträgt (ebd.). Liegt die mittlere Hangneigung unter 35°, so sind kaum Waldlawinen zu erwarten, unabhängig von der Bestandesdichte (Meyer-Grass und Schneebebi 1992). Die Lawinenanrisse im Wald werden durch ein komplexes System von Faktoren beeinflusst (SLF 2000, 491). Zu den wichtigsten Faktoren gehören: (1) Die Waldstruktur, dazu zählen die Kronenprojektion, die Stammzahl/ha, die Lückengrößen, sowie die Bodenrauigkeit; (2) das Gelände, dabei insbesondere die Hangneigung, die Exposition und die Höhenstufe; (3) die Witterung, dabei von Bedeutung sind die Niederschlags- und Neuschneesummen, die Lufttemperatur sowie die Strahlungsverhältnisse; und (4) die Schneedecke, wobei insbesondere eine geringe basale Scherfestigkeit und eine vorhandene Überlast von Bedeutung sind (Zaugg 2016).

### **Schutzwirkung des Waldes**

Der Wald hat im Allgemeinen eine stabilisierende Wirkung auf den Schneedeckenaufbau und beeinflusst die Lawinenbildung (Frehner et al. 2005). Der Schneedeckenaufbau im Wald eine höhere Komplexität auf als im Freiland. Dafür verantwortlich sind die folgenden Prozesse (Schneebebi und Bebi 2004):

- **Schneeinterzeption:** Durch die Ablagerung des fallenden Schnees in den Baumkronen und das nachträgliche Herabfallen in Form von Schneeklumpen oder Schmelzwasser weist die Schneedecke im Wald keine durchgehende Schichtung auf. Zudem wird die Schneedecke im Wald weniger mächtig als im Freiland.
- **Strahlungsverhältnisse:** Das Mikroklima ist im Wald ausgeglichener als im Freiland. Die Abstrahlung ist geringer, durch den Tag wird die Schneedecke weniger stark erwärmt und in der Nacht weniger ausgekühlt. Durch dies sind destabilisierende Schneewandlungen im Wald reduziert.
- **Windeinwirkung:** Durch die im Wald geringere Windeinwirkung auf die Schneedecke kommt es weniger zu problematischen Schneeverfrachtungen. In Waldlichtungen

sind jedoch grössere Ablagerungen von Schneemengen als im Freiland möglich .

- **Bodenrauhigkeit:** Im Wald ist die Bodenrauhigkeit im Vergleich zum Freiland erhöht. Dafür verantwortlich sind die stehenden Bäume, Baumstöcke sowie liegendes Totholz.
- **Stützwirkung:** Aufrechte Stämme und Stöcke stützen die Schneedecke und stabilisieren sie. Dazu müssen sie jedoch die Schneedecke um mindestens das Doppelte überragen. Die nötige Stammzahl/ha ist abhängig von der Hangneigung.

Laut Margreth (2004) ist die Bremswirkung des Waldes gegenüber Lawinen, die hoch über der Waldgrenze anbrechen, beschränkt. Ab einer Lauflänge der Lawine von 150 m hat der Wald kaum noch einen Einfluss (Schneebeli und Bebi 2004, Bebi et al. 2009). Jedoch können kleinere Lawinen vom Wald abgebremst und gestoppt werden. Eine mögliche Zerstörung des Waldes wird massgeblich durch die Geschwindigkeit und die Fliesshöhe der Lawine bestimmt (Margreth 2004).

## 2.2 Schutzwirksamkeit von Totholz gegenüber Lawinen

Mit Totholz werden abgestorbene Bäume (liegend oder stehend) oder Teile davon bezeichnet, deren Zersetzung bereits begonnen hat (Oehmichen 2007, zitiert in Gwerder 2011). Entsteht Totholz durch eine Störung (z.B. Sturm, Borkenkäfer), geht dessen Schutzwirkung vorerst nicht verloren (Noak et al. 2004). Laut Frehner et al (2005) schützen liegendes Holz und hohe Baumstöcke vor Schneebewegungen (Schneegleiten, Schneekriechen). Im Weiteren wird die Oberflächenrauhigkeit erhöht, dadurch kann die Wahrscheinlichkeit von Lawinenanrissen reduziert werden (ebd.). Margreth (2004) bestätigt die erhöhte Bodenrauhigkeit durch liegendes Totholz und beschreibt im Weiteren eine Abstützung der Schneedecke. Frey und Thee (2002) beschreiben die Schutzwirkung des liegenden Totholzes in dreifacher Hinsicht: (1) Erhöhung der Bodenrauhigkeit; (2) Verhinderung eines gleichmässigen Aufbaus der Schneedecke; und (3) Abstützung der Schneedecke. Die Schutzwirkung des Totholzes steht jedoch in Abhängigkeit der Wirkhöhe, der Schneemächtigkeit, dem Abstand zwischen den Rauigkeitselementen sowie der Hangneigung. Als Wirkhöhe wird der lotrechte Abstand zwischen Boden und oberster Stammlage oder Baumstockhöhe bezeichnet (BAFU 2008). Das entspricht dem Bereich, in welchem das Totholz für die Schneedecke stabilisierend wirkt. Voraussetzung dafür ist, dass bei Hangneigungen von über 30° eine gute Verteilung der Elemente sowie keine grösseren Lücken als 20 m in Hangfalllinie zwischen den Rauig-

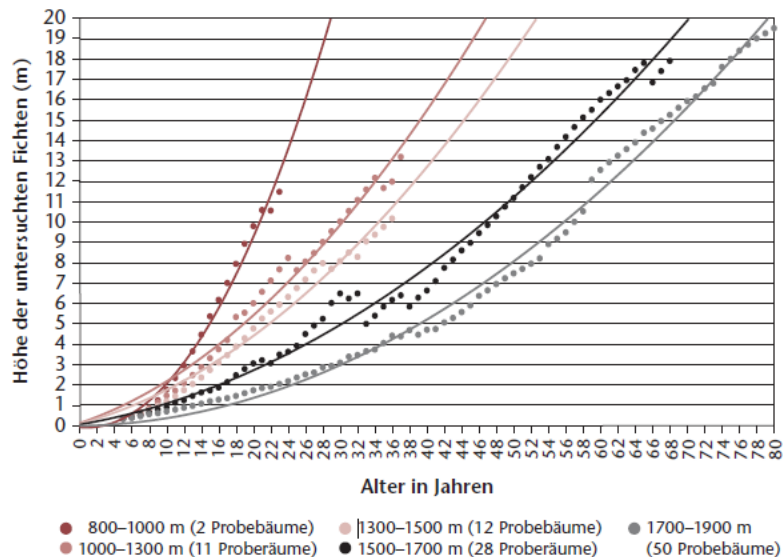
keitselementen vorhanden sind (ebd.). Frey und Thee (2002) besagen, dass selbst wenn die Schneemächtigkeit grösser als die Wirkhöhe des Totholzes, ist sich Unterbrechungen und Spalten der unteren Lagen vielfach bis in die obersten Schneeschichten hindurchziehen. Dabei ist anzunehmen, dass eine allfällige Gleitfläche immer über der Wirkhöhe liegt und somit Oberlawinen denkbar sind (BAFU 2008). Bei über 45° steilen Flächen besteht die Möglichkeit, dass auch Schneeschichten, die von Totholz durchsetzt sind in Bewegung geraten können (Margreth 2004). Ist die Hangneigung noch steiler (>45°), liegt die Holzaufgabe selbst so instabil, dass sie auch ohne zusätzliche Schneebelastung abrutschen kann (BAFU 2008).

Im Weiteren muss bei der Schutzwirkung des Totholzes die Zersetzung des Holzes berücksichtigt werden. Frehner et al. (2005) erwähnen, dass das liegende Holz von Fichte und Tanne sich etwa während 30 Jahren positiv auswirkt. Liegt das Holz direkt auf dem Boden und wird zudem beschattet, ist die Dauer verkürzt. Hat das Holz jedoch keinen Bodenkontakt und wird es stark besonnt, ist die Schutzwirkung von längerer Dauer (ebd.). Laut Albrecht (1991) ist der Holzabbau je nach Besonnung, Bodenkontakt, Niederschlagsverhältnissen, etc. sehr unterschiedlich. Auch Ammann (2006) differenziert die Schutzwirksamkeit von abgestorbenen Bäumen anhand derer Standorte, d.h. hohe Zersetzungsrate bei NW – NE-Exposition und niedrige Zersetzungsrate bei SW – SE-Exposition. Nach Frey und Thee (2002) wird das Holz auf Windwurfflächen im ersten Jahrzehnt nach dem Ereignis nur so wenig beeinträchtigt, dass es noch einer Schneelast einer 30-jährigen, extremen Schneehöhe ( $H_{\text{ext}} = 2.4 \text{ m}$ ) standhalten kann. Im Zeitraum zwischen 10 und 30 Jahren nach dem Sturm nimmt die Schutzwirkung ab (ebd.). Auch die Untersuchungen von Kupferschmid Albisetti (2003) von Gebirgsfichtenwäldern mit Buchdruckerbefall haben ergeben, dass die Schutzwirkung von abgestorbenen Bäumen in einer ersten Phase zunimmt, jedoch anschliessend im Verlauf der Zeit abnimmt.

### **2.3 Hochlagenaufforstungen im Berner Oberland**

Im Kanton Bern ist eine grosse Anzahl von Lawinenverbauungen vorhanden, welche Siedlungen und Verkehrswege vor Lawinen schützen (Ryter 2014). Aufgrund ihrer beschränkten Lebensdauer wurden die Verbauungen bis zur natürlichen Waldgrenze aufgeforstet. So sollen die Aufforstungen mittel- bis langfristig die Schutzfunktion der Stützwerke übernehmen und Lawinenanrisse nachhaltig verhindern (ebd.). Die Abteilung Naturgefahren des Kantons Bern hat langjährige Untersuchungen über die Entwicklung von Hochlagenaufforstungen durchgeführt. An dieser Stelle werden die wichtigsten Resultate bezüglich der Zusammenhänge zwischen Höhenlage, Baumwachstum und Lawinenschutzwirksamkeit aufgeführt. Bezüglich des Wachstums der Aufforstungen haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Entwicklung der Pflanzen mit zunehmender Höhe über Meer stark verlangsamt ist (ebd.). In tie-

feren Höhenlagen zwischen 800 und 1000 m hatten die in genannter Studie untersuchten Fichten nach 20 Jahren bereits eine Höhe von 10 m, jedoch bei Höhenlagen zwischen 1700 und 1900 m waren die gemessenen Höhen unter 2 m (siehe Abb. 3).



**Abbildung 3: Wachstum der untersuchten Fichtenaufforstungen im Berner Oberland, aufgeteilt nach verschiedenen Höhenlagen (Quelle: Ryter 2014).**

Für die Beurteilung der Lawenschutzwirksamkeit wurde die Höhe der Aufforstungen berücksichtigt. Aus der Literatur können verschiedene Grenzwerte abgeleitet werden, ab welcher Höhe, ein Baum zuverlässig gegenüber Lawinen schützt. Dabei liegen die angegebenen Werte für die Baumhöhe meist zwischen der 1.5-fachen und 2-fachen Schneehöhe (Bebi et al., 2009, Ryter 2014, Frehner et al. 2015). Mithilfe der technischen Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet (Margreth 2007) wurden für verschiedenen Höhenlagen im Berner Oberland die maximalen Schneehöhen für eine Wiederkehrsdauer von 100 Jahren berechnet (Ryter 2014). Für die minimale notwendige Pflanzengröße wurde der so ermittelte Wert mit dem Faktor 1.5 multipliziert. Dies ergab folgende minimale erforderliche Pflanzengrößen: 4 m (1000-1300 m ü.M.), 5 m (1300-1500 m ü.M.), 6 m (1500-1700 m ü.M.), 7 m (1700-1900 m ü.M.) (ebd.). Unter Berücksichtigung der Wachstumskurven wurde die Dauer, welche die Aufforstung benötigt, um die minimal erforderlichen Höhen zu erreichen, berechnet. Die Resultate zeigen, dass sich die Dauer mit der Höhe über Meer exponentiell verhält. In Höhenlagen von 1000 bis 1300 m dauert es zwischen 14 und 19 Jahren bis die minimale geforderte Höhe erreicht wird, bei Höhenlagen von 1700 bis 1900 m ist die Dauer mit 43 bis 52 Jahren deutlich höher (vgl. Abb. 4).

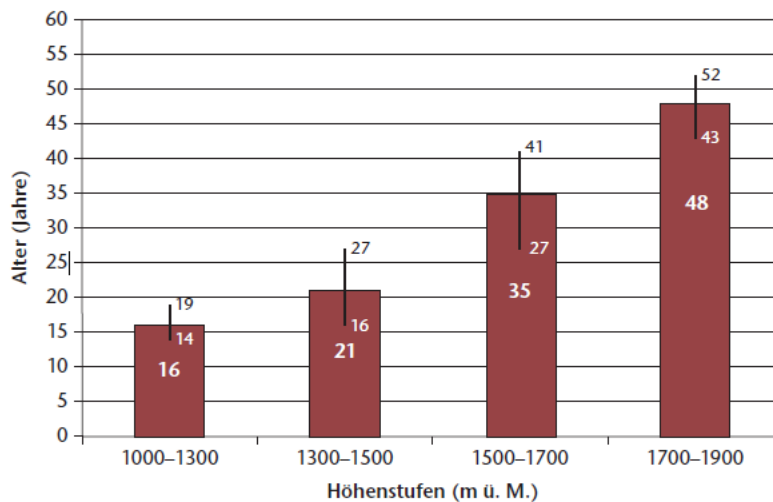


Abbildung 4: Alter, ab welchem die Aufforstungen im Berner Oberland die Lawenschutzfunktion übernehmen, dargestellt nach Höhenstufe mit Mittelwert und Streubereich (Quelle: Ryter 2014).

## 2.4 Lawinenmodellierung

Bei der Bewegung von Lawinen handelt es sich um hochkomplexe Verlagerungsprozesse, die nur mit vereinfachten physikalisch-mathematischen Modellen annäherungsweise dargestellt werden können (Sauermoser et al. 2011, 72). Die Lawinensimulationsmodelle sind objektive Instrumente, um charakteristische Grössen der Lawinenbewegung (Geschwindigkeit, Fliesshöhen, Auslauflängen und Aufpralldrücke) zu bestimmen (ebd.). Die Modellierung von Lawinen ist ein wichtiger Bestandteil der Wirkungsanalyse, welche ein Bestandteil der Gefahrenanalyse des Risikokonzepts für Naturgefahren ist (Bründl et al. 2009). Bei der Wirkungsanalyse werden Art, Ausdehnung und Intensität der Gefährdung durch festgelegte Szenarien bestimmt (ebd.). Daraus resultieren die Intensitätskarten, die die Grundlagen für raumplanerische Massnahmen (Gefahrenzonenplanung) und die technische Massnahmenplanung schaffen. Bei der Modellierung eines Lawinenszenarios mit bestimmter Jährlichkeit müssen insbesondere die Grösse der Lawinenanbruchgebiete und die potentielle Anrissmächtigkeit bestimmt werden (Sauermoser et al. 2011b, 73). Für die Anrissmächtigkeit wird der Schneedeckenzuwachs der letzten drei Tage für eine bestimmte Jährlichkeit verwendet (Salm et al. 1990). Dieser Ausgangswert wird mit der jeweiligen Höhenlage und der Hangneigung im Anrissgebiet korrigiert (ebd.).

Auf Basis der Berechnungsoberfläche können die Lawinenmodelle in statistisch-topographische und physikalisch-dynamische Modelle gruppiert werden (Sauermoser et al. 2011b, 73). Da die gebräuchlichen Modelle in der Schweiz und das in dieser Arbeit angewendete Modell der Gruppe der physikalisch-dynamischen Modelle angehören, wird an dieser Stelle nur diese Art weiter erläutert. Ein grosser Teil der physikalisch-dynamischen Mo-

delle basieren auf dem Voellmy-Fluid-Stoffgesetz, welchem eine Kombination des Chezy-Reibungsterm mit der trockenen Reibung von Coulomb zugrunde liegt (ebd.). In der Schweiz wurde in den frühen 70er-Jahren das Voellmy-Modell zum Voelly-Salm-Modell weiterentwickelt. Bei letztgenanntem Modell wurden zusätzlich die innere Reibung und ein aktiver und passiver Fliesszustand berücksichtigt (Sauermoser et al. 2011b, 76). Dabei handelt es sich um ein deterministisch-dynamisches Modell, welches die Lawinenmasse als Massenschwerpunkt vereinfacht und die Reibungsparameter der trockenen Reibung<sup>1</sup> ( $\mu$ ) und der turbulenten Reibung<sup>2</sup> ( $\xi$ ) berücksichtigt (ebd.). Das Voellmy-Salm-Modell wurde bis zur Entwicklung des Lawinenberechnungsmodelles AVAL-1D auf der ganzen Welt für die Bestimmung von Auslaufstrecken und Lawindrücken verwendet (ebd.).

Das AVAL-1D Modell wurde vom SLF entwickelt und ab 1999 in die Praxis umgesetzt. Dabei handelt es sich um die numerische<sup>3</sup> Version des Voellmy-Salm-Modells. Bei diesem Modell fließt die Lawinenmasse in die Berechnung mit ein und die Modellierung geschieht entlang der realistischen Topographie (Sauermoser et al. 2011, 79). Es beinhaltet ein Berechnungsmodul für Fließlawinen (FL-1D) und für Staublawinen (SL-1D). Da für diese Arbeit nur Fließlawinen berücksichtigt werden, wird nicht weiter auf das Staublawinen-Modul eingegangen. Beim FL-1D wird der Lawinenschnee als „Flüssigkeit“ mit einer konstanten Schneedichte betrachtet (ebd.). Dabei ist die Fließgeschwindigkeit über die Höhe und die Fließhöhe konstant. Entlang der Sturzbahn wird keine Schneeaufnahme berücksichtigt, die Masse bleibt also konstant. Der Fließwiderstand wird aufgrund der trockenen Reibung ( $\mu$ ), der turbulenten Reibung ( $\xi$ ) und des inneren Verformungswiderstandes des Schnees ( $\lambda$ ) beschrieben. Als Output erfolgen Informationen über die Fließhöhe, die Geschwindigkeit und den Druck entlang der Lawinenlaufbahn. Zudem werden die Auslaufdistanz und die Massenverteilung berechnet. Da die Lawinenmasse bei der Modellierung berücksichtigt wird, kann der Einfluss von Stützverbauungen simuliert werden (ebd.).

Seit 2005 wurde am SLF das eindimensionale numerische Modell AVAL-1D zum zweidimensionalen Fließlawinenberechnungsmodell RAMMS weiterentwickelt, welches seit 2010 kommerziell genutzt wird (Sauermoser et al. 2011, 82). Neben dem Lawinenmodul, gibt es auch noch ein Modul für Steinschlag und Murgang (Bartelt et al. 2013). Beim Fließlawinenberechnungsmodell wird der Geschwindigkeitsvektor im dreidimensionalen Gelände in zwei Richtungen mittels eines Finite-Volumen-Verfahrens<sup>4</sup> erster und zweiter Ordnung berechnet,

---

<sup>1</sup> Trockene Reibung: Abhängig vom Druck senkrecht auf den Boden und den Schneeeigenschaften.

<sup>2</sup> Turbulente Reibung: Ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit und ist abhängig von der Rauigkeit der Lawinenbahn.

<sup>3</sup> Numerische Mathematik: Berechnungen erfolgen durch Starten eines Lösungsprogrammes, welches die Berechnungen durchführt und die Ergebnisse speichert. Dabei werden iterative Lösungsverfahren verwendet, um eine Näherungslösung zu finden.

<sup>4</sup> Finite-Volumen-Verfahren: Numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen, denen ein Erhaltungssatz zugrunde liegt.

wobei das Modell daraus die Fliessrichtung und Fliessbreite eruiert (Christen et al. 2012). Die Berechnungen basieren auf einem digitalen Geländemodell (DTM), dessen Qualität einen wesentlichen Einfluss auf die Resultate der Berechnungen hat. Für die Lawinensimulation ist eine Auflösung von 5 m genügend, da die Schneedecke glättet und kleinere Unebenheiten im Gelände überwindet (ebd.). Dem Modell liegt die Annahme zugrunde, dass es im Lawinenkörper zu keinen internen Deformationen kommt, ebenfalls bleibt die Fliessdichte konstant. Die Parameter der trockenen- und turbulenten Reibung sind stark von der Dauer der Wiederkehr und des Lawinenvolumen abhängig (Bartelt et al. 2013). Sie können über das gesamte Gebiet konstant gewählt werden oder räumlich variieren und so den topographischen Bedingungen, der Rauigkeit sowie der Vegetation angepasst werden (Christen et al. 2012). Da die Modell-Kalibrierungen auf Grosslawinenereignissen basieren, sind die Berechnungsergebnisse vor allem für extreme, schnell fliessende und trockene Lawinen gültig. Aus diesem Grund wird das RAMMS::AVALANCHE-Modul vom SLF ständig weiterentwickelt, damit verschiedene Lawinengrößen, Initialbedingungen und Fliessregime besser berücksichtigt werden können. In dieser Arbeit wurde für die Modellierungen eine neu entwickelte Extended-Version verwendet, in welcher neue wissenschaftliche Erkenntnisse implementiert sind (siehe Kapitel 3.4.2).

### 3 Material und Methoden

Die vorliegende Arbeit basiert auf eigenen Feldaufnahmen und Lawinenmodellierungen. Als Fallstudie diente ein Waldperimeter, auf welchem im Jahr 2010 ein Holzschlag durchgeführt wurde. Bei diesem Holzschlag und den Primärschäden im Folgejahr entstanden mehrere grössere Freiflächen auf dem Perimeter. Das Datenblatt der Feldaufnahmen, das R-Skript der Berechnungen, die Geodatenbank der ArcGIS-Analysen sowie die Input- und Outputfiles der Modellierungen sind dem elektronischen Anhang zu entnehmen.

#### 3.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Im folgenden Abschnitt wird der Perimeter bezüglich der Lage und Topographie, der vorzufindenden Geologie und den Klimaverhältnissen beschrieben. Im Weiteren wird ein Überblick über die Schutzfunktion des Wald-Perimeters, die Standortverhältnisse sowie Informationen bezüglich des durchgeführten Holzschlages gegeben.

##### Lage und Topographie

Die beschriebene Fläche liegt im östlichen Berner Oberland oberhalb des Dorfes Brienzwiler am südlichen Fusse des Wilerhorns (vgl. Abb. 5).

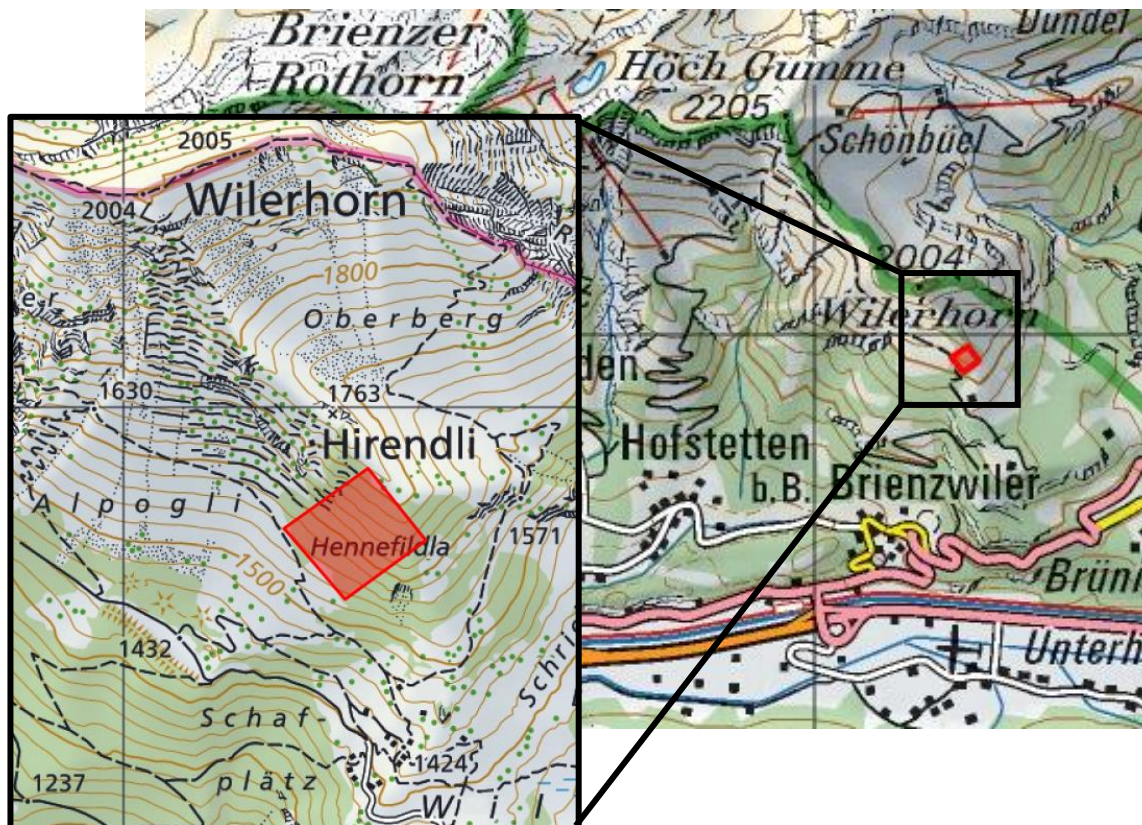


Abbildung 5: Situationskarte des untersuchten Perimeters (Quelle: swisstopo ohne Datum, eigene Darstellung).

Die Fläche ist Teil des Hennefildla-Waldes. Der untersuchte Perimeter erstreckt sich von 1540 m ü.M. bis zur Geländekante auf 1700 m ü.M, welche über das Hirendli zum Vorgipfel (P. 2004) des Wilerhorns führt. Die Exposition ist Süd-West und die durchschnittliche Hangneigung beträgt 38°. Im Allgemeinen geht der südliche Steilhang des Wilerhorns im Alpogli bei ca. 1500 m ü.M. in eine kurze, flache Geländestufe mit einer Absackung und einem Geländeriegel über. Anschliessend fällt das Gelände wieder steil in Richtung Brienzwiler ab. Im östlichen Teil - unterhalb des Hennefildla Waldes - wird die Topographie durch den Geländeeinschnitt geprägt, durch welchen der Dorfbach fliesst.

### Tektonik und Geologie

Das Wilerhorn befindet sich im westlichen Helvetikum, genauer auf der Wildhorndecke (Gnägi und Labhart 2015, 79). Die helvetischen Decken liegen tektonisch gesehen vor und über den Zentralmassiven. Sie wurden über dem kristallinen Grundgebirge abgeschert und bestehen entsprechend aus Sedimenten aus der Ära des Mesozoikums. Diese Abscherung erfolgte erst gegen Ende der alpinen Gebirgsbildung (ebd.). Wie aus der Abbildung 6 ersichtlich ist, besteht das Wilerhorn in den obersten Schichten aus dem „Hauterivienkieselkalk“ (Staeger 1942). Er gehört zu dem helvetischen Kieselkalk und stammt aus der frühen Epoche der Kreide (Bärtschi 2011). Die geologische Unterlage wird jedoch meist durch Gehängeschuttauflagen überdeckt.

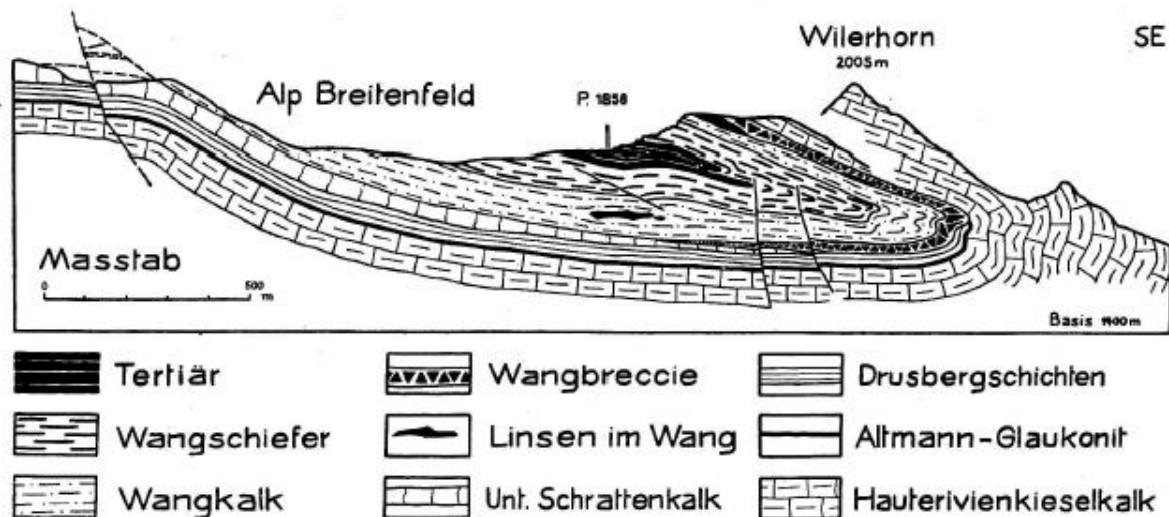


Abbildung 6: Geologie am Wilerhorn (Quelle: Staeger 1942).

Bei den Kieselkalcken handelt es sich meist um grau- bis mittelgraue Gesteine, mit scharfkantigem Bruch und muscheligen Bruchoberflächen (Bärtschi 2011). Hauptbestandteile des Gesteins bilden die Mineralien Kalzit und Quarz (ebd.).

## Klima und Hydrologie

Das Klimadiagramm wird von der nächstgelegenen Klimastation verwendet (vgl. Abb. 7). Diese wird in Meiringen betrieben, was ca. 8 km süd-östlich von Brienzwiler entfernt liegt.

Da die Klimastation auf einer Höhe von 589 m ü.M. liegt, müssen die Temperaturwerte für die untersuchte Fläche mit einem Korrekturfaktor berechnet werden. Dabei wird mit einer Temperaturdifferenz von 0.6 °C pro 100 Meter gerechnet (SAC 2001, 116). Die durchschnittliche Höhenlage der Fläche beträgt 1620 m ü.M., so ergibt sich ein Korrekturfaktor von -6 °C. Die korrigierte mittlere Jahrestemperatur beträgt somit 2.2 °C. Dies bestätigen mitunter die modellierten CRUTEM4<sup>5</sup>-Daten für den Perimeter (vgl. Abb. 8). Sie geben eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 2.1 °C für das Jahr 2011 an. Die mittlere Niederschlagssumme beträgt für die tieferen Lagen ca. 1300 mm und in den Hochlagen bis über 2000 mm (KAWA 2003). Neben den relativ hohen Niederschlägen wird das Klima der Region zudem durch den Südföhn bestimmt (KAWA 2003). Diese Föhnströmung bringt trockene und warme Luft mit sich und tritt vor allem im Frühling, seltener im Herbst und Winter auf.

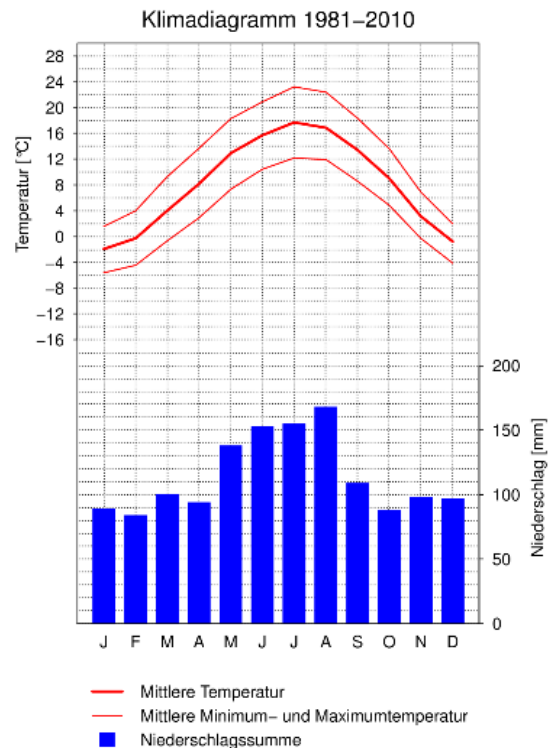


Abbildung 7: Klimadiagramm Meiringen 589 m ü.M. (Quelle: MeteoSchweiz ohne Datum).

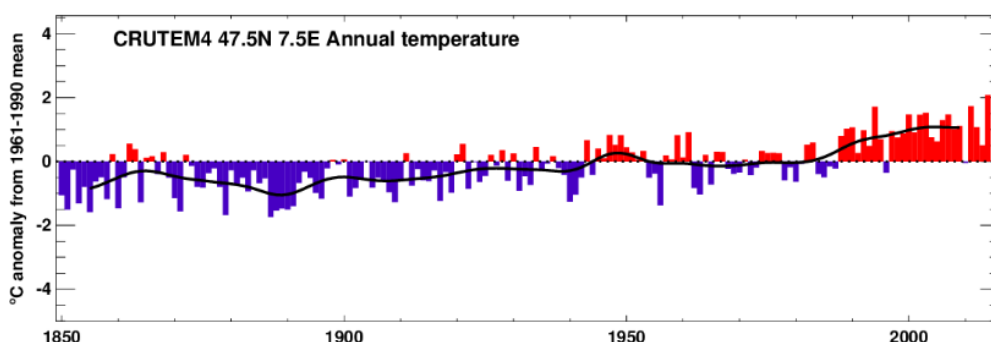
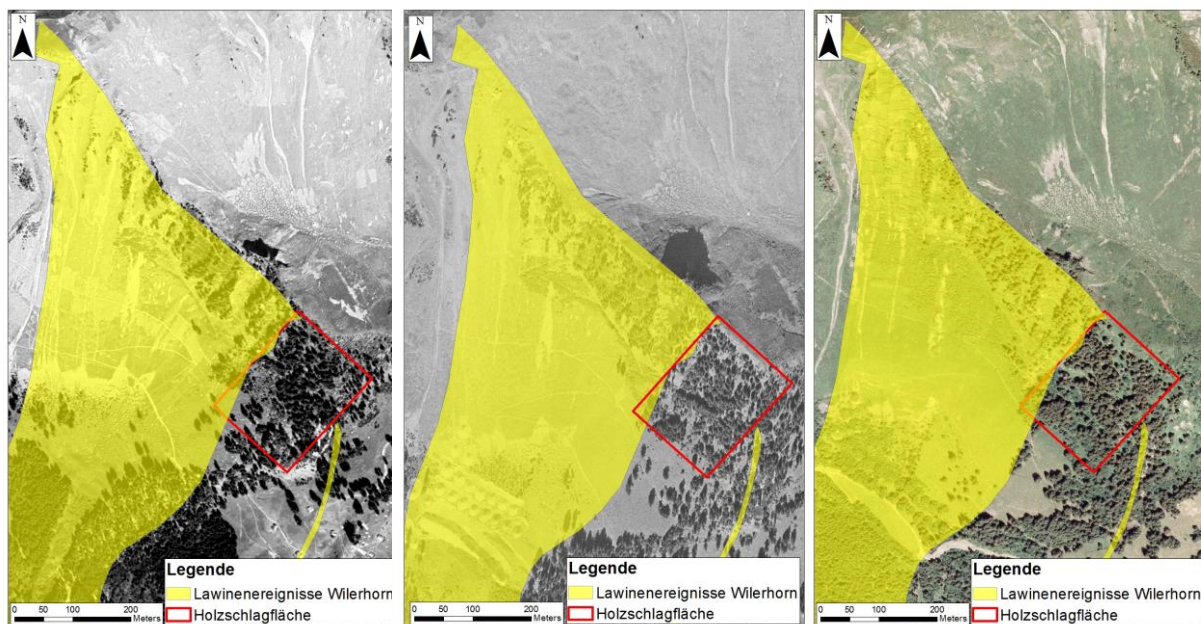


Abbildung 8: Diagramm bezüglich der mittleren Jahrestemperatur aus den CRUTEM4 Daten für die Koordinaten 2°51'47.5" N 7°51'17.5" E (Quelle: Jones et al. 2012; Osborne und Jones 2014).

<sup>5</sup> CRUTEM4: Datensatz von bodennahen Lufttemperaturen, abgeleitet aus den Messungen von Wetterstationen auf der ganzen Welt.

## Hennefieldla-Wald

Der Hennefieldla-Wald befindet sich in der Gemeinde von Brienzwiler und gehört der gemischten Gemeinde Brienzwiler (Bürgergut). Laut der Schutzwaldhinweiskarte des Kantons Bern schützt der westliche Teil des Hennefieldla-Waldes vor die Gemeinde vor Lawinengefahren, wobei er als Objektschutzwald eingestuft wird (siehe Anhang 1.1). Wird der Lawinenkataster des Wilerhorns betrachtet, wird die Wichtigkeit bezüglich der Schutzfunktion deutlich (siehe Anhang 1.2). Zahlreiche Lawinen sind bereits westlich des Hennefieldla-Waldes losgebrochen und bis an den Dorfrand von Brienzwiler vorgedrungen (siehe Kapitel 3.2). Die Orthophotos des Hennefieldla-Waldes aus den Jahren 1940, 1960 und 2007 zeigen, dass weitere Lawinenanrisse in östlicher Richtung mit grosser Wahrscheinlichkeit durch den bestehenden Hennefieldla-Wald verhindert wurden (vgl. Abb. 9). Das grösste Schadenpotential für Lawinenereignisse bildet das Dorf Brienzwiler mit seinen 478 Einwohnern. Zwischen dem potentiellen Lawinenanrissgebiet (1500 – 2000 m ü.M.) und dem Dorf Brienzwiler (700 m ü.M.) liegen noch vereinzelt Alphütten, die jedoch nur während des Sommerhalbjahres bewohnt sind. Unterhalb des Dorfes Brienzwiler verläuft die Kantonsstrasse, welche über den Brünigpass nach Sarnen im Kanton Obwalden führt. Im Weiteren liegt im Talboden auf 580 m ü.M. die Autostrasse 8 und die Bahnstrecke der Zentralbahn, die Interlaken und Luzern verbindet.



**Abbildung 9:** Die östliche Ausdehnung der Lawineneignisse wird durch den Hennefieldla-Wald begrenzt.

## Standortansprache

Im Kanton Bern gibt es noch keine offizielle Standortbeschreibung, weshalb hier die Methode der Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS) angewendet wird. Als Entscheidungshilfen werden zudem der standortkundige Kartierungsschlüssel für die Wälder der Kantone Bern und Freiburg und der vereinfachte Standortsschlüssel für die Wälder des Kantons Bern genutzt.

Der Hennefildla-Wald liegt in der Standortsregion 1, den nördlichen Randalpen. Mit einer mittleren Höhe von 1620 m ü.M. befindet sich der Perimeter an der Grenze zwischen Hochmontan und Subalpin. Der vereinfachte Standortsschlüssel definiert die Obergrenze der hochmontanen Stufe in der Region Berner Oberland Ost bei 1550 m ü.M. (KAWA 2002). Dies gilt für west-süd-ost Expositionen und südexponierte Steilhänge. Aufgrund der südwestlichen Exposition der Fläche wird die subalpine Höhenstufe gewählt. Im Folgenden wird die Vegetation beschrieben, die auf der Fläche anzutreffen ist.

**Tabelle 1: Bodenvegetation in der Untersuchungsfläche.**

Pflanze	Zeigerwert
<i>Polystichum lonchitis</i>	basisch + frisch
<i>Centaurea montana</i>	basisch + wechselfeucht
<i>Calamagrostis varia</i>	basisch + wechselfeucht / trocken
<i>Luzula luzuloides</i>	sauer + trocken
<i>Vaccinium myrtillus</i>	sauer
<i>Homogyna alpina</i>	sauer
<i>Rubus idaeus</i>	nährstoffreich
<i>Fragaria vesca</i>	mittel + frisch
<i>Prenanthes purpurea</i>	mittel + frisch
<i>Viola reichenbachiana</i>	mittel + frisch
<i>Lamium galeobdolon</i>	mittel + frisch
<i>Phyteuma spicatum</i>	mittel + frisch
<i>Epilobium angustifolium</i>	Mittel + frisch
<i>Veronica urticifolia</i>	mittel + luftfeucht
<i>Athyrium filix-femina</i>	mittel + luftfeucht
<i>Adenostyles alliarae</i>	feucht
<i>Cicerbita alpina</i>	feucht

Die in der Tabelle gelisteten Pflanzen sind nicht überall gleichverteilt auf der Fläche anzutreffen. *Vaccinium myrtillus*, *Homogyna alpina* und *Luzula luzuloides* finden sich vor allem auf Kuppen unter Fichten. Auch *Fragaria vesca*, *Lamium galeobdolon* und *Viola reichenbachiana* sind, an Stellen ohne Hochstaudenvegetation, bei dichteren Fichtengruppe anzutreffen. In

den offenen Holzschlagflächen dominieren unter anderem Hochstauden (*Cicerbita alpina*, *Adenostyles alliariae*), Farn (*Athyrium filix-femina*), *Prenanthes purpurea* und *Rubus idaeus* (vgl. Abb. 10) wobei *Cicerbita alpina* mit zunehmender Höhe vermehrt anzutreffen ist. Dies liefert einen Hinweis auf die subalpine Höhenstufe. In gewissen Bereichen der Untersuchungsfläche bildet *Calamagrostis varia* zusammen mit weiteren Gräsern einen geschlossenen Vegetationsteppich (vgl. Abb. 10).



**Abbildung 10: Vegetationsaspekte auf der Holzschlagfläche: *Calamagrostis villosa* (links), *Rubus idaeus* (rechts).**

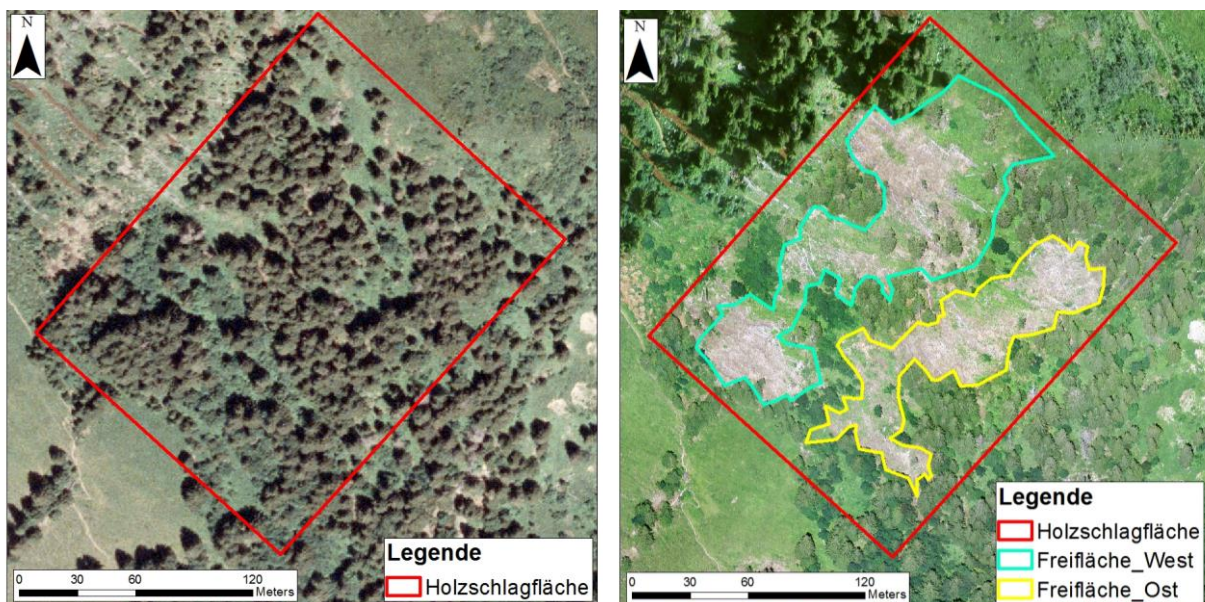
Die Baumschicht besteht nahezu zu 100% aus Fichten, wobei Bergahorn im Nebenbestand anzutreffen ist. Besonders im mittleren und unteren Bereich der Fläche ist er häufig in der Naturverjüngung vorzufinden. Neben dem Bergahorn ist die Vogelbeere auf der ganzen Fläche in der Naturverjüngung vorhanden. Im oberen Bereich des Perimeters finden sich auch Weide- und Grünerlen-Sträucher. Es sind vereinzelt Buchen in Buschform anzutreffen, die Höchste liegt auf 1660 m ü.M.

Die Bodenansprache erfolgte im östlichen Teil der Fläche auf der Höhe von 1640 m ü.M. mit einem Bohrstock, pH-Set sowie einem Salzsäure-Test. Die Humusform wird als mullartiger Moder eingestuft. Der Bohrstock konnte bis in eine Tiefe von 40 cm in den Boden gebohrt werden, was für eine mittlere Gründigkeit spricht. Der Boden wird als stark skeletthaltig bewertet. Mit der pH-Messung wurde in verschiedenen Tiefen ein Wert von 5 festgestellt. Der Salzsäure-Test war negativ. Aufgrund der Messresultate sowie unter Berücksichtigung des Ausgangsgesteins mit Anteilen von Karbonaten (Calcit) und Silikaten (Quarz), wird der Bodentyp als Pararendzina angesprochen.

Anhand der zur Verfügung stehenden Merkmale wurde die Fläche gemäss NaiS der Gesellschaft 60 „Typischer Hochstauden-Fichtenwald“ zugeordnet. Es handelt sich um eine verbreitete Gesellschaft der nördlichen Rand- und Zwischenalpen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass nicht alle Aspekte exakt mit dieser Waldgesellschaft übereinstimmen. Die Zuordnung soll einen ungefähren Anhaltspunkt auf dem Ökogramm geben. In den Bereichen mit *Callamagrostis varia* Bewuchs drängt sich eher die Gesellschaft 60\* „Buntreitgras-Fichtenwald“ auf.

### Holzschlag 2010

Vor dem Holzschlag im Jahr 2010 setzte sich der Baumbestand aus einzelnen Baumkollektiven sowie Einzelbäumen, welche einen mehr oder weniger geschlossenen Bestand bildeten, zusammensetzte (vgl. Abb. 11). Die Fichte dominierte die Baumschicht, während im unteren Teil vermehrt Bergahorn im Nebenbestand wuchs. Der Baumbestand wies einige Lücken auf, wobei die maximale Lückenlänge 20 m und die maximale Lückenbreite 30 m betrug.



**Abbildung 11:** Orthofotos der Holzschlagfläche (rotes Viereck); links: der Bestand im Jahr 2007 vor dem Eingriff; rechts: der Bestand im Jahr 2013 nach dem Eingriff, mit westlicher und östlicher Freifläche.

Während des im Jahr 2010 ausgeübten Holzschlages wurden rund 875 m<sup>3</sup> Holz auf einer Behandlungsfläche von knapp vier Hektaren genutzt. 29 Fichten wurden als Querbäume auf der Fläche belassen. Diese wurden entrinde, bei den Baumstößen wurden Rindenstreifen entfernt. Die nachfolgende Tabelle listet die wesentlichen Punkte des Anzeichnungsprotokoll.

**Tabelle 2: Auszug aus dem Anzeichnungsprotokoll des Holzschlages Hennefeldla-Wald 2010 (Quelle: nach Trauffer 2016, eigene Darstellung).**

Vewendung	Anzahl [Stk.]	Baumart	Total [m3]	Ø-Volumen [m3/Stk.]	Ø-BHD [cm]
Nutzholz	522	Fichte	827.1	1.58	46
Querbäume	29	Fichte	48.85	1.68	48

Im Folgejahr 2011 kam es noch zu Primärschäden, welche eine Zwangsnutzung von ca. 30 m<sup>3</sup> Holz verursachte. Wird diese Menge durch das mittlere Volumen des genutzten Holzes von 1.6 m<sup>3</sup>/Stk. geteilt, ergibt dies zusätzlich 19 Bäume, die gefällt werden mussten. Das Schadholz wurde entrindet und im Bestand liegen gelassen. Nach dem forstlichen Eingriff und der Zwangsnutzung entstanden im westlichen Teil Freiflächen von 0.99 ha und im östlichen Teil von ca. 0.56ha (vgl. Abb. 12). Im Sommer 2012 wurden 800 Fichten auf der Fläche um die Baustöcke herum gepflanzt, welche im Jahr 2015 zum ersten Mal ausgemäht wurden (Trauffer 2016, persönliche Mitteilung).



**Abbildung 12: Situation nach dem Holzschlag: Luftperspektive auf die Holzschlagfläche 2011 (links), Zustand auf der Holzschlagfläche 2011 (rechts) (Quelle: KAWA 2016).**

### 3.2 Historische Entwicklung der Lawinenverbauung Wilerhorn

Das Dorf Brienzwiler war bereits in früheren Jahrhunderten stark bedroht von Lawinenabgängen am Wilerhorn. Erste dokumentierte Lawinenniedergänge stammen aus dem 18. Jahrhundert (KAWA 1955). So sollen in den Jahren um 1750 mehrere Lawinen bis ins Dorf Brienzwiler vorgedrungen sein. Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren keine weiteren Schadensmeldungen aufgrund von Lawinenniedergängen zu verzeichnen, wobei 1908 eine Lawine eine 40-50 m breite Schneise in die Schutzwaldungen des Grienwaldes unterhalb Alpogli riss. Dieses Ereignis war schliesslich der Auslöser für das Aufforstungs- und Verbauungsprojekt Hirndli. Im Rahmen dieses Projekts wurden erste Steinmauern im Anrissgebiet gebaut. Im Jahr 1945 erweiterte eine am Wilerhorn losbrechende Lawine die bestehende Schneise gegen Westen, warf gegen 4000 m<sup>3</sup> Holz und drang bis ins Rüttholz gegen die Höhenkote von 800 m vor. Das Dorf Brienzwiler liegt kaum 100 m weiter unten auf einer Höhe von 702 m ü.M. und wurde somit nur knapp von dieser Lawine verfehlt. Eine weiterer Lawinenniedergang am Wilerhorn verbreiterte die Schneise nochmals gegen Westen, zerstörte 200m<sup>3</sup> Holz und sechs landwirtschaftliche Gebäude und richtete zudem an den Aufforstungen erheblichen Schaden an. Die Lawine blieb erst vor den obersten Häusern des Dorfes stehen. Lawinenniedergänge aus den Jahren 1946 und 1952 blieben ohne zusätzliche Schadenwirkungen. Alles in allem rissen die Lawinenniedergänge von 1908 bis 1954 eine Schneise von bis zu 200m Breite, welche bis auf 800 m ü. M. reicht, in die Schutzwälder. Auf dieser Weise entstand eine grosse Gefahr für das Dorf Brienzwiler bei erneuten Lawinenniedergängen.

Um dieser Gefahr zu begegnen fand in den Jahren 1955 und 1956 eine Reihe von Begehungen durch eidgenössische und kantonale Instanzen statt. Es wurden mögliche Studien zu Anrissverbauungen sowie zu Bremsverbauungen kontrovers diskutiert. Die schliessliche Umsetzung erfolgte mittels einer Anrissverbauung in den einzelnen Lawinenzügen unterhalb des Wilerhorns bis auf eine Höhenlinie von 1800 m ( $D_k = 3.5\text{--}5\text{m}$ ). Aufgrund hoher Baukosten und unerwartet langer Baudauer - sprich keiner sofortigen Schutzwirkung für das Dorf - wurde auf eine komplette Verbauung des Anrissgebietes verzichtet. Stattdessen wurde in der flacheren Zone bei Alpogli ein Bremsverbau mit 22 schachbrettartig angeordneten Bremshöckern von 5 m Höhe und einem Auffangdamm von 170 m Länge und 6 m Höhe errichtet. Dieser sollte den bestehenden natürlichen Querriegel erhöhen und verlängern. Die Vorteile dieser Methode waren geringere Baukosten sowie eine kürzere Baudauer (der Verbau konnte in einem Jahr abgeschlossen werden). Dafür musste auf eine Waldbegründung zwischen dem Brems- und Anrissverbau verzichtet werden. Zudem bot dieser Bremsverbauung keinen Schutz gegen Staublawinen. In den Wintern 1962/63 sowie 1966/67 kam es zu weiteren Lawinenereignissen am Wilerhorn. Zwei grosse Lawinen aus dem Jahr 1962 kamen

wieder gefährlich nahe ans Dorf heran - sie stoppten erst im obersten Teil des Haltenwaldes auf 900 m ü.M. Dabei wurden zwei Bergbauern verschüttet und die Wiederaufforstung in der Lawinenschneise beschädigt. Auch wenn die einte Staublawine über das ganze Bremsfeld hinweg fegte und die Fliess- und Schneemassen die Bremsverbauung im östlichen Teil überfließen konnte, war man sich einig, dass ohne die Anriss- und Bremsverbauung eine Lawinenkatastrophe für Brienzwiler wahrscheinlich gewesen wäre. Aufgrund der erneuten Lawinenniedergänge wurde die bestehende Anrissverbauung in östliche Richtung und bis auf die Höhenlinie von 1600 m ü.M. erweitert, auch der Auffangdamm wurde um 60 m verlängert. Zudem wurden im Gipfelbereich Tribschneewände aus Stahl eingebaut und im westlichen Teil zwischen dem Lauizug drei und vier die Krite mit einer 66 m langen armierten Betonwand um zwei bis vier Metern erhöht, damit das zukünftige Ausbrechen einer Lawine verhindert werden kann. Im Lawinenkataster sind nach dem Winter 1966/67 keine weiteren Lawinen eingetragen. Es ist davon auszugehen, dass die Lawinenverbauungen ihre gewünschten Wirkungen erzielten und bloss Lawinenniedergänge in geringem Ausmass vorkamen, welche keine grossen Schäden verursachten. Bis heute werden grosse Bemühungen unternommen, ein grosser Teil der verbauten Fläche aufzuforsten. Dies geschieht mithilfe von Holzschneerechen und Dreibeinböcken, welche die gepflanzten Fichten und Bergahorne vor den Kräften des Schneegleitens und -kriechens schützen.

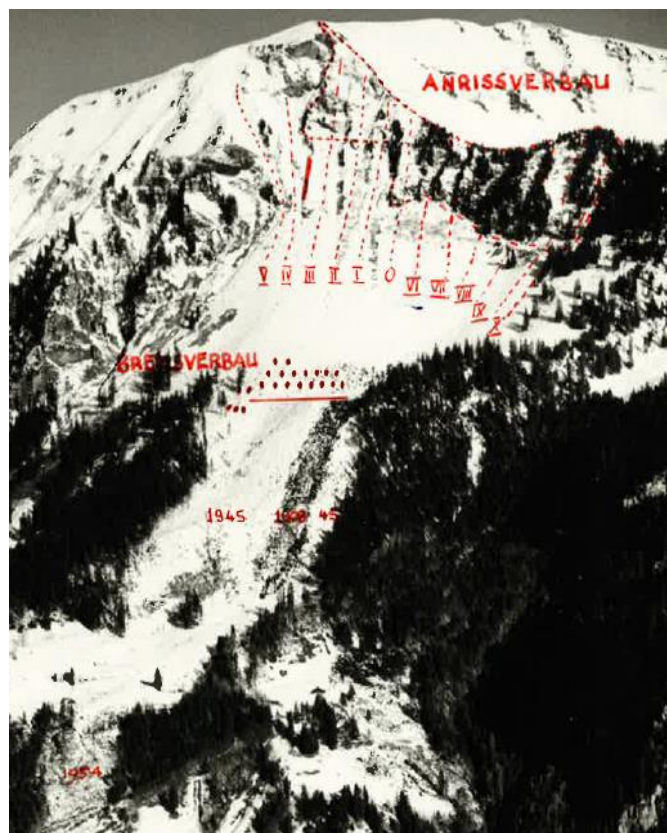


Abbildung 13: Lawinenverbauprojekt Wilerhorn-Alpogli: Anrissverbauung (rot gestrichelt), Lawinenzüge (römische Zahlen), Betonwand auf Krite zwischen Lawinenzug drei und vier (roter Strich), Bremshöcker (rote Punkte), Auffangdamm unterhalb Bremshöcker (roter Strich), Waldschäden der Lawinenniedergängen von 1908, 1945 und 1954 (Quelle: KAWA, 2016).

### 3.3 Feldaufnahmen

Das Ziel der Feldaufnahmen war, die Bodenrauhigkeit, den Zersetzungsgrad und die Höhe des Holzes, den Zuwachs sowie den Zustand der Verjüngung auf der Holzschlagfläche zu analysieren. Als Grundlage für die Bestimmung der Aufnahmeflächen dienten zwei Shapefiles von Ueli Rytter, stv. Abteilungsleiter Naturgefahren Kt. Bern, welche die Baumstöcke und die Querbäume des Holzschlages 2010 in georeferenzierter Form beinhalteten. Mit Hilfe der Software ArcGIS™ 10.2.2 der Firma ESRI wurde ein grafisches Netz über den Layer gelegt, so dass die Holzschlagfläche in 10x10 m Teilflächen aufgeteilt wurde. Anschliessend wurden 26 Teilflächen über den gesamten Perimeter bestimmt, auf welchen die Feldaufnahmen durchgeführt wurden (vgl. Abb. 14). Während der Vorbereitung wurde ein Aufnahmeblatt in Excel erarbeitet. Das vergrösserte Orthofoto sowie das 10x10 m Netz wurde diente zur die Orientierung auf der Fläche. Für die Messungen wurden ein Doppelmeter, ein Sackmesser, ein Forstmessband, ein Kompass und ein Farbspray verwendet.

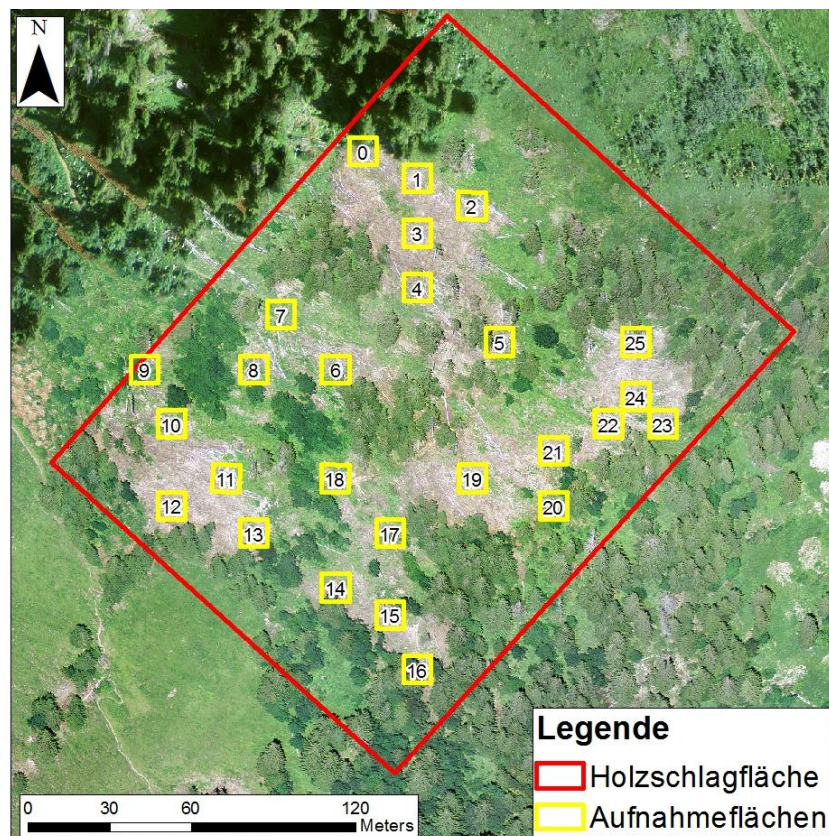


Abbildung 14: Verteilung und Lage der Aufnahmeflächen.

Für die Bodenrauhigkeit und den Zersetzungsgrad des Holzes sollten die Baumstöcke sowie die Querbäume berücksichtigt werden. Nach dem ersten Tag im Feld wurde jedoch entschieden, an den folgenden Aufnahmetagen nur noch die Baumstöcke für die Aufnahmen bezüglich des Zersetzungsgrades zu berücksichtigen. Jeder Baumstock, der sich auf einer Aufnahmefläche befand, wurde mit dem Farbspray beschriftet. Die Beschriftung erfolgte mit

Nummern, die mit denjenigen Nummern des Shapefiles von Ueli Ryter übereinstimmen. Die Überlegungen diesbezüglich waren, eine Möglichkeit zu schaffen, die Aufnahmeelemente zu einem späteren Zeitpunkt eindeutig wieder zu identifizieren.

### **Bodenrauigkeit**

Bei den Baumstöcken wurden jeweils deren Höhe und Durchmesser gemessen. Die Messung des Durchmessers erfolgte mit dem Doppelmeter auf der Schnittfläche. Es wurden zwei Messungen übers Kreuz durchgeführt und den daraus resultierenden Durchschnittswert verwendet. Da die Bäume in der untersuchten Fläche starken Kräften durch hangparallele Schneebewegungen ausgesetzt sind, bilden sie bergseitig grosse Wurzelanläufe. Damit die Messung ihrer Höhe nicht verfälscht wird, wurde die Höhe seitlich, in der Hälfte des Durchmessers, mit einem Doppelmeter gemessen. Diese Höhe sollte ca. der Wirkungshöhe der Baumstöcke gegenüber der Schneedecke entsprechen (Puttalaz, 2010). Die Aufnahme der Querbäume erfolgte nicht systematisch, es wurde nur sporadisch der lotrechte Abstand zwischen Boden und der Oberseite des Querbaumes mit dem Doppelmeter gemessen.

### **Zersetzungsgrad des Holzes**

Für die Bestimmung des Zersetzungsgrades des Holzes wurde die sogenannte Renvallmethode nach Sipolla und Renvall (1999) angewendet. Dabei wird die Festigkeit des Holzes mit der Eindringtiefe einer Klinge in das Holz bestimmt. Es kann zwischen fünf verschiedenen Zersetzungsgraden unterschieden werden (vgl. Tab 3).

**Tabelle 3: Die Einteilung der fünf verschiedenen Zersetzungsgrade der Renvallmethode (Quelle: nach Puttalaz 2010, eigene Übersetzung).**

<b>Zersetzungsgrad</b>	<b>Eindringtiefe der Klinge</b>	<b>Genereller Aspekt des Holzes</b>
<b>1</b>	wenige Millimeter	Holz ist hart und frisch, mit Rinde bedeckt
<b>2</b>	1 -2 Zentimeter	Holz ist hart, ein Grossteil mit Rinde bedeckt
<b>3</b>	3 - 5 Zentimeter	Holz ist halbhart, Grossteil der Rinde abgefallen
<b>4</b>	ganze Klinge	Holz ist weich, meist ohne Rinde
<b>5</b>	ganze Klinge	Holz ist sehr weich, zerfällt bei Berührung

Mit dem Kompass wurden die vier Expositionen Süd, West, Ost und Nord bestimmt. In jede Richtung erfolgte anschliessend die Messung des Zersetzungsgrades. Der Messpunkt lag jeweils 50 cm unterhalb der Schnittstelle, um eine Verfälschung der Resultate durch äussere Einflüsse an der Schnittstelle zu verhindern. Die Messung erfolgte mit einer 5 cm langen Messerklinge, mit welcher horizontal zu den Holzfasern ins Holz eingedrungen wurde.

## Verjüngung

Bei den Aufnahmen zur Verjüngung wurden nur die gepflanzten Fichten um die Baumstöcke berücksichtigt, wobei es sich meist um eine Fläche von 3x3m handelte. Einerseits wurden die Höhe und der Zuwachs der Verjüngung gemessen und andererseits den Zustand der Verjüngung beschrieben. Die Messung der Verjüngungshöhe erfolgte in einem ersten Schritt lotrecht mit dem Doppelmeter vom Verjüngungsansatz am Boden. Bei Verjüngung mit Säbelwuchs wurde mit einem zweiten Doppelmeter die horizontale Verbindung zwischen Verjüngungsspitze und lotrechtem Doppelmeter hergestellt. Bei der Messung des Zuwachses wurde der Zuwachs des Jahres 2015 mit dem Doppelmeter gemessen. Im Gegensatz zu den frischen Trieben war dieser Teil bereits verholzt, hatte aber eine hellere Farbe als der Zuwachs aus dem Jahr 2014. Als weitere Abgrenzung dienten die Astquirle. In einem zweiten Schritt wurde der Zustand der Verjüngung beschrieben, dabei wurden zwischen den zwei Kategorien „gesund“ und „geschädigt“ unterschieden. Bei der Kategorie „geschädigt“ wurden weitere Unterkategorien gebildet: (1) Verbissen, für die Einteilung in diese Kategorie musste eine klare Verbissstelle erkannt werden; (2) Zwiesel, die Verjüngung besass keinen Terminaltrieb mehr, es waren mehrere Gipfeltriebe vorhanden die Ursache ist jedoch unklar (3) gebrochen, die Verjüngung besass eine Bruchstelle; und (4) übrige, weitere Schadensbilder wie z.B. Fichtengallenlaus oder Frassschäden von Mäusen. Diese Unterkategorien wurden im Anschluss an die Aufnahmen gebildet, da im Vorfeld die möglichen Schadensbilder noch nicht bekannt waren. Verjüngungspflanzen, welche nicht einer dieser Unterkategorie zugeteilt werden konnten, galten als „gesund“.

## Auswertung der Daten

Die erhobenen Daten wurden in einem ersten Schritt in Excel Tabellen digitalisiert. Anschliessend wurden die importierten Daten mithilfe des Statistikprogramm R 3.3.1 ausgewertet. Dies erfolgte zum einen durch Box Plots und zum anderen durch Histogramme. Der Box Plot ist eine einfache grafische Darstellung, welche die wichtigsten Lageparameter zeigt und gleichzeitig Hinweise auf die Streuung und die Schiefe der Verteilung gibt (Huber-Eicher 2013). Er ermöglicht es, in kurzer Zeit einen aussagekräftigen Überblick über die Daten zu gewinnen. Beim Histogramm handelt es sich um eine grafische Darstellung der Häufigkeiten für kategoriale Daten (ebd.). Für die Überprüfung des Zusammenhanges zwischen den Daten der Verjüngungshöhe und des Zuwachses wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman (Spearman Rho) berechnet, welcher weder eine Normalverteilung noch eine lineare Beziehung der Datenvoraussetzt. Dazu wurden die Daten mit dem Shapiro-Wilk-Test auf eine Normalverteilung getestet.

### 3.4 Lawinensimulation mit RAMMS

Für die Simulationen mit RAMMS wurden Fließlawinen in Form von Oberlawinen beachtet. Dabei gleitet eine Schneedecke mit einer gewissen Anrissmächtigkeit auf einer darunter liegenden Schneeschicht ab. Für die Bestimmung der Anrissmächtigkeit sowie die Lage der theoretischen Gleitfläche wurden Daten aus der Gumbel Statistik<sup>6</sup> verwendet. Aufgrund der vorherrschenden Hangneigung auf der Untersuchungsfläche sind Schnee- und Lockerschneelawinen denkbar. Dies bestätigen auch frühere Lawineneignisse in diesem Gebiet.

#### 3.4.1 Szenariobildung für die Lawinensimulation

Für die Herleitung der Szenarien wurde einerseits der Lawinenkataster des Kantons Bern berücksichtigt, wobei andererseits Ueli Ryter beratend zur Seite stand. Die Anwendungen im GIS waren ein zusätzliches Hilfsmittel bei der Erarbeitung der Szenarien. Dabei dienten folgende digitale Datengrundlagen:

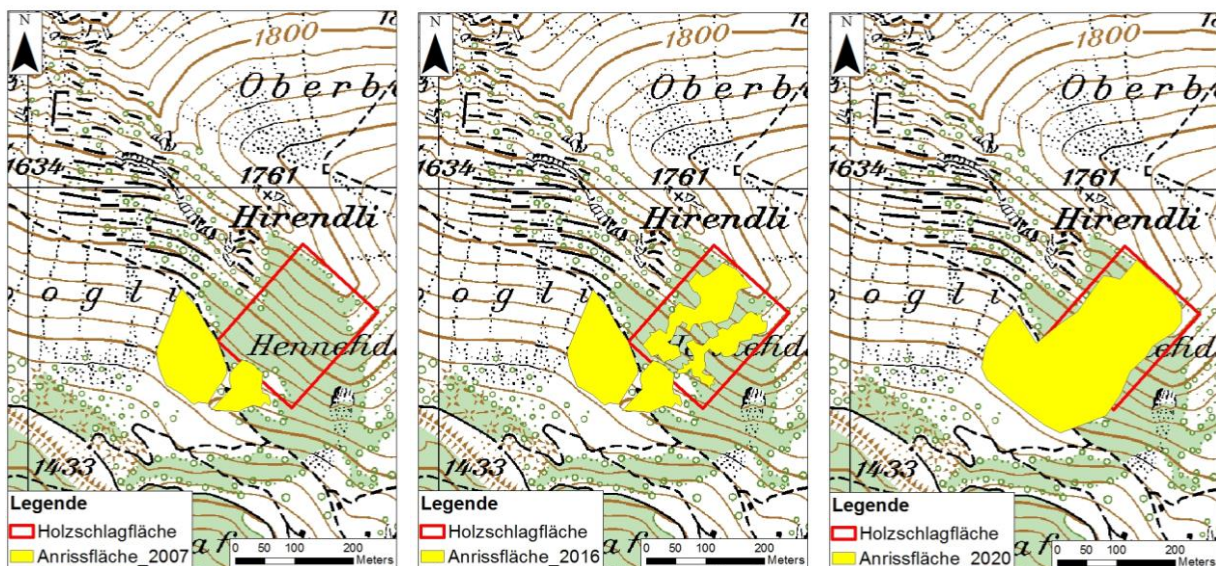
- **Digitales Terrainmodell (DTM-AV Grid 2 m):** Es wurde das digitale Terrainmodell der amtlichen Vermessung aus dem Jahr 2010 verwendet. Beim DTM-AV (roh) handelt es sich um ein direkt erfasstes digitales Terrainmodell (anstehender Boden ohne Bewuchs und Hochbauten) mit Einzelpunkten über das gesamte Gebiet. Die Höhen Genauigkeit (einfache Standardabweichung) des Terrainmodells an einer beliebigen Stelle ist mehr als  $\pm 0.5$  m. Die Punktdichte ist ca. 1 Punkt pro  $2 \text{ m}^2$  im offenen Gebiet. Die Auflösung beträgt 2m unterhalb von 2000 m ü.M. (Tiri, 2009).
- **Pixelkarte 1:25'000:** Es wurde der Kartenausschnitt 1209 Brienz verwendet. Die digitalen Daten aus der Landeskarte der Schweiz © Bundesamt für Landestopographie beinhalteten nützliche Hintergrundinformationen für Bildschirmapplikationen im GIS.
- **Digitales Orthophoto:** Es wurden zwei schwarz/weiss Orthofotos aus den Jahren 1940 (Bildnummer 19400430100414) und 1960 (Bildnummer 19601810018058) sowie zwei farbige Orthofotos aus den Jahren 2007 (Bildnummer 20077010401308) und das aktuelle aus dem Jahr 2013 verwendet.

#### Bestimmung der Lawinenanrissflächen

Als erstes wurde mit dem Spatial Analyst Tool „Slope“ die Neigung jeder einzelnen Rasterzelle des DTM identifiziert. Die Darstellung erfolgte in Grad. Die Werte wurden in vier Klassen gegliedert:  $< 28^\circ$ ,  $28^\circ\text{-}30^\circ$ ,  $30^\circ\text{-}60^\circ$ ,  $>60^\circ$ . Die „Slope“-Anwendung gab einen ersten Überblick über den Prozessraum, in welchem Lawinenanrisse möglich sind. Dieser Hangneigungs-Layer wurde über die Orthophotos vor und nach dem Holzschlag gelegt. So konnten

<sup>6</sup> Gumbel-Statistik: Typische Verteilungsfunktion für jährliche Serien, gehört zu den Extremwertverteilungen, d.h. Darstellung einer möglichen Verteilung von Extremwerten einer Stichprobe.

die gegebenen Hangneigungen für die vorhandenen Freiflächen identifiziert und daraus mögliche Lawinenanrissgebiete abgeleitet werden (vgl. Abb. 15). Bei der Bestimmung der Anrissflächen wurden drei verschiedene Waldszenarien, welche für die Lawinenbildung von Bedeutung sind, definiert: (1) Szenario 2007, entspricht der Waldsituation vor dem Holzschlag, ein Lawinenanriss ist nur unterhalb des Hennefeldla-Waldes möglich; (2) Szenario 2016 zeigt die aktuelle Situation nach dem Holzschlag, durch die Freiflächen im Bestand wird das potentielle Lawinenanrissgebiet erhöht; und (3) Szenario 2020, dabei wird eine negative Entwicklung bezüglich des Restbestandes auf der Holzschlagfläche angenommen. Das heisst, durch weitere Kalamitäten wie z.B. Windwurf, Borkenkäferbefall oder eine Kombination davon wird der Restbestand auf der Fläche zerstört. Bei dieser Annahme sind keine stehenden Bäume mehr auf der Fläche vorhanden, was bedeutet, dass die ganze Fläche zum potentiellen Lawinenanrissgebiet wird.



**Abbildung 15:** Aufgrund der Hangneigung mögliche Lawinenanrissgebiete bei den Szenarien 2007 (Situation vor dem Holzschlag), 2016 (Situation nach dem Holzschlag) und 2020 (Situation nach dem Holzschlag und zusätzlichen Kalamitäten) v.l.n.r.

Für den Vergleich der Ausläuflängen der Lawinen zwischen einer Situation mit Wald und ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn wurden zusätzlich die Szenarien 2016 und 2020 ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn gebildet. Die Eigenschaften des Anrissgebietes (Anrissmächtigkeit und Anrissfläche) wurden nicht verändert und sind identisch wie bei den Szenarien 2016, respektive 2020.

Für jedes einzelne Szenario wurde jeweils ein Ereignis mit einer Wiederkehrsdauer von 30, 100 und 300 Jahren gebildet. Wie in der Praxis üblich wird bei Lawinen mit unterschiedlicher Wiederkehrsdauer einerseits die Anrisshöhe der Lawine variiert und andererseits die Anrissfläche vergrössert, respektive verkleinert. Daraus resultieren unterschiedliche Anrissvolumen der Lawinen. Die definierten Anrissflächen umfassen aufgrund der Hangneigung nicht die

gesamte mögliche Prozessfläche. Infolge der vorherrschenden Topografie (Mulden, Kuppen) wurden Geländekammern abgegrenzt und daraus Teilanrissgebiete abgeleitet. Mit zunehmender Wiederkehrsdauer wurde die Anrissfläche vergrößert (vgl. Abb. 16).

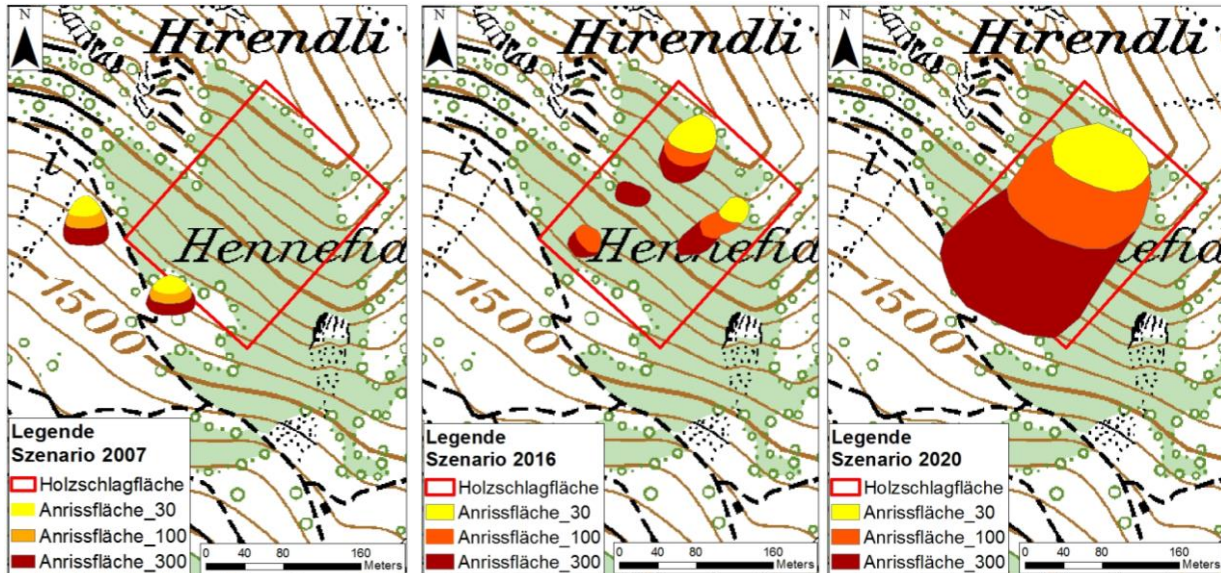


Abbildung 16: Lawinanrissflächen für Wiederkehrsdauer 30 (gelb), 100 (orange), 300 (rot) für die Szenarien 2007, 2010 und 2020 v.l.n.r.

### Bestimmung der Anrissmächtigkeit

Für die Bestimmung der Anrissmächtigkeit wurden die Schneedaten der SLF-Beobachterstation Hasliberg verwendet. Die Schneehöhe wird von einem Beobachter von November bis April einmal täglich gemessen. Die Station liegt auf 1830 m ü.M. und wird seit 1960 betrieben. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Niederschlags- und Schneeverhältnisse bei der Messstation Hasliberg vergleichbar mit der Untersuchungsfläche sind. Die Berechnungen erfolgten auf der Basis der Gumbel-Statistik. Für diese Statistik wird jeweils der Höchstwert aus den einzelnen Jahren verwendet und die Verteilung wird mithilfe eines Gumbel-Plots Graphisch dargestellt (siehe Anhang 2.3). Wie in der Praxis üblich wird die Annahme getroffen, dass Lawinen immer durch Neuschnee bedingt sind (Margreth 2015). So wurden aus dem Gumbel-Plot die Werte für den Schneedeckenzuwachs in 3-Tagen (HS\_Dif3D) für die Wiederkehrperioden 30, 100 und 300 Jahren bestimmt (vgl. Tab. 3).

Tabelle 3: Ausgangswert der Gumbel-Statistik für die Bestimmung der Anrissmächtigkeit der Wiederkehrperioden 30, 100, 300 Jahren (Quelle: nach SLF 2016, eigene Darstellung).

Wiederkehrperiode	30 Jahre	100 Jahre	300 Jahre
Schneedeckenzuwachs 3-Tage	120 cm	135 cm	150 cm

Die Werte aus dem Gumbel-Plot stellen einen Basiswert für 1830 m ü.M. und flaches Gelände dar. Weitere Berechnungsschritte waren nötig, damit die Anrissmächtigkeit für die Untersuchungsfläche bestimmt werden konnte. Im Folgenden werden, anhand des Basiswertes für die Wiederkehrperiode von 30 Jahren die rechnerischen Schritte aufgezeigt:

- 1. Korrektur des Basiswertes für abweichende Höhe des Anrissgebietes:** Dabei wird mit einem Gradient von 3 – 7 cm / 100 m je nach Klimaregion gerechnet (Margreth 2015). Für diese Arbeit wurde der Mittelwert von 5 cm pro 100 m Höhenunterschied verwendet. Für die Lage der Anrissflächen im Untersuchungsgebiet wurde mit einer Referenzhöhe von 1630 m ü.M. gerechnet.

$$\text{Für } 1630 \text{ m: } HS_{DIF3D_{1630m}} = 120 \text{ m} - (2 * 5\text{cm}) = 110\text{cm}$$

- 2. Bestimmen des Basiswertes  $d_0^*$  für Hangneigung von 28°:**

$$d_0^* = DHS_{DIF3D_{1630m}} * \cos 28^\circ = 110 \text{ cm} * \cos 28^\circ = 97 \text{ cm}$$

- 3. Korrektur der Hangneigung  $f(\psi)$ :** Für die Untersuchungsfläche wurde eine mittlere Hangneigung von 40° definiert.

$$f(40^\circ) = 0.291 \div (\sin 40^\circ - (0.202 * \cos 40^\circ)) \cong 0.6$$

- 4. Bestimmung der korrigierten Anrissmächtigkeit  $d_0$  für Untersuchungsfläche:**

$$d_0 = d_{0, 1630m}^* * f(\psi) = 97 \text{ cm} * 0.6 \cong 58 \text{ cm}$$

Die auf diese Weise ermittelten Anrissmächtigkeiten ergaben zusammen mit den korrigierten Anrissflächen die Volumen der Lawinen (vgl. Tab. 4). Die Einteilung der Lawinen nach der Grössenordnung erfolgte auf der Grundlage von Bartelt et al. (2013).

**Tabelle 4: Anrissmächtigkeit, Anrissfläche, Anrissvolumen und Grössenordnung der Lawine für jedes Szenario und Wiederkehrdauer**

Szenario	Wiederkehrperiode	Anrissmächtigkeit	Anrissfläche	Anrissvolumen	Grössenordnung
2007	30 Jahre	58 cm	1'232 m <sup>2</sup>	714 m <sup>3</sup>	tiny
	100 Jahre	66 cm	2'431 m <sup>2</sup>	1'604 m <sup>3</sup>	tiny
	300 Jahre	74 cm	4'176 m <sup>2</sup>	3'090 m <sup>3</sup>	tiny
2016	30 Jahre	58 cm	2'716 m <sup>2</sup>	1'575 m <sup>3</sup>	tiny
	100 Jahre	66 cm	5'158 m <sup>2</sup>	3'405 m <sup>3</sup>	tiny
	300 Jahre	74 cm	8'869 m <sup>2</sup>	6'563 m <sup>3</sup>	small
2020	30 Jahre	58 cm	6'651 m <sup>2</sup>	3'858 m <sup>3</sup>	tiny
	100 Jahre	66 cm	18'919 m <sup>2</sup>	12'487 m <sup>3</sup>	small
	300 Jahre	74 cm	39'689 m <sup>2</sup>	29'370 m <sup>3</sup>	small

Neben der Anrissmächtigkeit wurde die maximale Schneehöhe (HS) berechnet. unter Berücksichtigung der Bodenrauigkeit auf die Holzschlagfläche. Als erstes wurden wieder die Basiswerte der maximalen Schneehöhe aus dem Gumbel-Plot von der Beobachterstation Hasliberg für die Wiederkehrsdauer von 30, 100 und 300 Jahren abgelesen. Die Werte für die Untersuchungsflächen wurden, wie bei der Anrissmächtigkeit, mit den vier Rechenschritten hergeleitet (vgl. Tab. 5). Mithilfe der so bestimmten maximalen Schneehöhe und der Anrissmächtigkeit konnte die theoretische Gleitfläche der Lawine festgelegt werden. Dabei wurde von der maximalen Schneehöhe der einzelnen Wiederkehrsperiode die jeweilige Anrissmächtigkeit abgezogen. Dies ergab für die entsprechende Wiederkehrsdauer folgende Werte: 1.24 m (30 Jahre), 1.72 m (100 Jahre), 1.94 m (300 Jahre).

**Tabelle 5: Maximale Schneehöhe für die Wiederkehrsdauer von 30, 100 und 300 Jahren.**

<b>Wiederkehrsperiode</b>	<b>30 Jahre</b>	<b>100 Jahre</b>	<b>300 Jahre</b>
Basiswert (HS 1830m)	3.6 m	4.6 m	5.2 m
effektiver Wert (HS 1630m, 40°)	1.85 m	2.38 m	2.7 m

### 3.4.2 Lawinensimulation mit RAMMS::AVALANCHE Extended

Bei der momentanen Extended-Version von RAMMS::AVALANCHE handelt es sich um eine Forschungsversion, die jedoch baldmöglichst in eine Userversion integriert werden soll. In der Extended-Version wurde eine neue Beschreibung der Fluktuationsenergie<sup>7</sup> der Schneegränulate implementiert (Bartelt et al. 2012). Diese hat einen grossen Einfluss auf die Reibung, welche entscheidend für die Lawinengeschwindigkeit und die Übergänge zwischen verschiedenen Fließregimes ist (Christen et al. 2012). Voellmy versuchte die verminderte Wirkung der „Vibration“ der Schneekörner auf die Reibung mithilfe verschiedener Reibungsparameter zu berücksichtigen. Diese Vereinfachung lässt jedoch die Beschreibung anderer Lawineneigenschaften nicht zu. Darum wurde eine neue Energiebilanz aufgestellt, welche die Produktion und den Zerfall der Fluktuationsenergie explizit beinhaltet. Somit lassen sich Lawinen verschiedener Grössen berechnen (Bartelt et al. 2012). Dabei wurde festgestellt, dass die Fluktuationsenergie von der Bodenrauigkeit und den Schneeeigenschaften abhängig ist (ebd.). Da im Weiteren die Fluktuationsenergie massenabhängig ist, werden in der Extended-Version Entrainment-Prozesse<sup>8</sup> berücksichtigt (Christen et al. 2012). Terrainkrümmungen, Kohäsion des Schneegränulats, Temperatureffekte und variierende Dichte in der Lawine werden in der verwendeten Version neu auch miteinbezogen (Feistl 2015).

Waldflächen und deren Wechselwirkungen mit der Lawine wurden bis anhin in den Lawinenmodellierungen mit einem tieferen Wert ( $400 \text{ m/s}^2$ ) für den Reibungsparameter der turbulenten Reibung ( $\xi$ ) berücksichtigt (Feistl 2015). Unterschiedliche Bestandesdichten und Waldstrukturen fliessen nicht in die Berechnungen mit ein. Wenn die Wechselwirkung zwischen Wald und Lawine anhand dieses „friction-approach“ beschrieben wird, kann der Einfluss des Waldes auf die Auslaufstrecke der Lawine nicht aufgezeigt werden. Dies resultiert daraus, dass die Reibungsparameter - insbesondere für die turbulente Reibung - für Lawinen im offenen Gelände entwickelt wurden. Im Weiteren ist für die Anwendung des „friction-approach“ die Waldzerstörung eine notwendige Bedingung, was jedoch nicht mit der Realität übereinstimmt. Teich et al. (2012, 2014) haben aufgezeigt, dass der Wald, abhängig von seiner Struktur, einen wesentlichen Einfluss auf die Auslauflänge einer Lawine ausüben kann. Für dies wurde in der Extended-Version ein neuer „detrainment approach“ implementiert. Im Gegensatz zum „friction approach“, bei welchem der Lawine im Wald Fließenergie entzogen wird, liegt dem „detrainment approach“ der Masseentzug zugrunde (Feistl 2015). Fließt eine Lawine durch den Wald, wird hinter den Stämmen Schnee abgelagert (Detrainment). Die Menge wird massgebend durch den „K-value“ beeinflusst. Dieser Wert wird aufgrund des Waldtyps, des Kronendeckungsgrades und der Bodenrauigkeit bestimmt und

<sup>7</sup> Fluktuationsenergie: Beschreibt in der Physik die Vibration. In der Lawine entsteht Fluktuationsenergie, wenn ein Schneekorn eine von der Fallrichtung abweichende Bewegung macht.

<sup>8</sup> Entrainment-Prozesse: Beschreiben die Aufnahme von zusätzlichem Schnee entlang der Lawinenlaufbahn.

wird in Kilopascal angegeben (Teich et al. 2014). Der Wert entspricht der Bremswirkung pro Quadratmeter, welche der Wald auf Lawinenbewegung ausübt (ebd.). Ob eine Lawine im Wald zum Stillstand kommt, wird von der erhöhten turbulenten Reibung und der Ablagerung des Lawinenschnees massgebend bestimmt. Die Ablagerung von Schnee ist auf Waldflächen dominant, welche von der Lawine nicht zerstört werden. In der Extended-Version wird die Waldzerstörung mithilfe der Biegespannung berechnet. Dabei wird die Biegespannung, welche auf die Bäume ausgeübt wird, für jede Zelle aufgrund der Fließhöhe, Fließdichte, Fließgeschwindigkeit und Hangneigung berechnet. Die Biegefestigkeit der Bäume wird anhand der vorherrschenden Baumart auf der Waldfläche und des mittleren Brusthöhendurchmessers (BHD) beschrieben (ebd.). Der Ausgangswert für die Biegefestigkeit der verschiedenen Baumarten beträgt für die Fichte  $36 \text{ MN/m}^2$ , für die Föhre und die Lärche  $37 \text{ MN/m}^2$  und für die Birke  $41 \text{ MN/m}^2$ . Dabei handelt es sich um Durchschnittswerte, die von der Gesundheit der Bäume, der Lage im Wald sowie weiteren Standortcharakteristiken abhängig sind. Ist die Biegespannung, welche auf den Baum einwirkt, grösser als dessen Biegefestigkeit, wird der Baum von der Lawine zerstört. Kommt es zu einer Zerstörung des Waldes, wird die Lawine durch die erhöhte turbulente Reibung und das Mitreissen des Totholzes verlangsamt (Feistl 2015).

### Modell-Input

Für die Modellierungen dieser Arbeit wurde das DTM-AV mit einer Auflösung von  $2 \times 2 \text{ m}$  verwendet. Bei den Werten der einzelnen Parameter handelt sich oft um Erfahrungswerte, welche am SLF durch den Gebrauch des Modelles gemacht wurden (Feistl 2015, Bartelt et al. 2013). Damit diese Werte für das Untersuchungsgebiet kalibriert werden konnten, wurde in einem ersten Schritt versucht, ein Ereignis eines Lawinenniederganges am Wilerhorn nachzuberechnen (siehe Kapitel 3.4.3). Die berücksichtigten Anriss-, Wald- und Erosionsflächen sind dem Anhang 2.2 zu entnehmen. Am Beispiel des Szenarios 2016 mit 30-jähriger Wiederkehrsdauer werden folgend die einzelnen Eingabeschritte für die Lawinenmodellierung mit der Extended-Version kurz erläutert. Die Standardwerte werden dabei nicht weiter erklärt.

- 1. General:** Dieser Eingabeschritt beschreibt, welche Calculation Domain und Digital Elevation Model als Basis für die Modellierung dient. Durch die Bestimmung einer Calculation Domain wird die Berechnungszeit verkürzt, da nur die Zellen innerhalb der Calculation Domain berücksichtigt werden. Für eine übersichtliche Verwaltung der Daten wurde für den Output Filename immer das Szenario und die jeweilige Wiederkehrsdauer angegeben (vgl. Abb. 17).

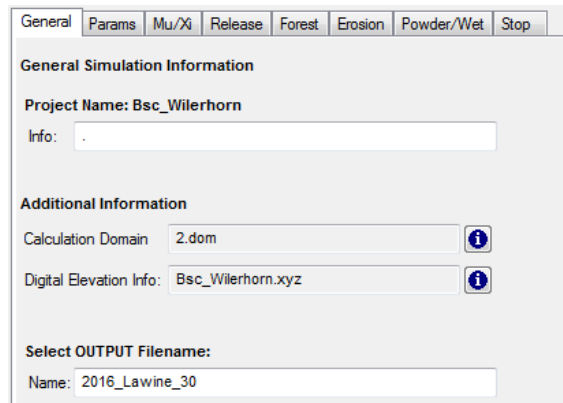


Abbildung 17: Eingabefenster "General" des Programm RAMMS Extended.

- Params:** Bei diesem zweiten Registerblatt handelt es sich um die Kalkulationsparameter des Programmes. Für die Berechnung kleiner Lawinen wurde eine Grid Resolution von 2m gewählt, während für grosse Lawinen eine von 5 m gewählt wurde. Die Schneedichte wurde mit  $400 \text{ kg/m}^3$  bestimmt, wobei dieser Wert nicht für den Schnee der Anrissfläche gilt (vgl. Abb. 18).

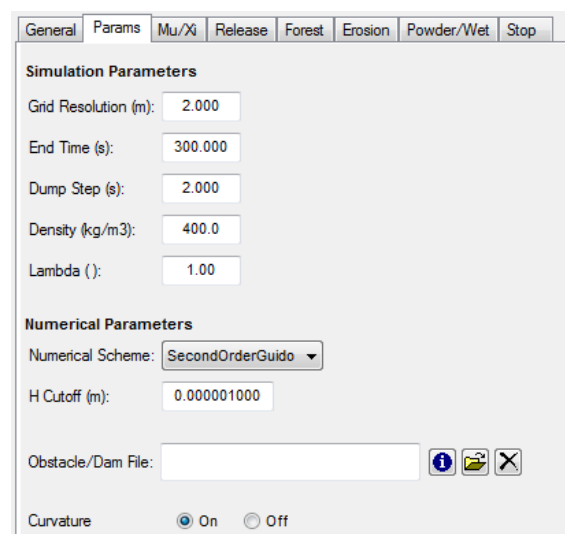
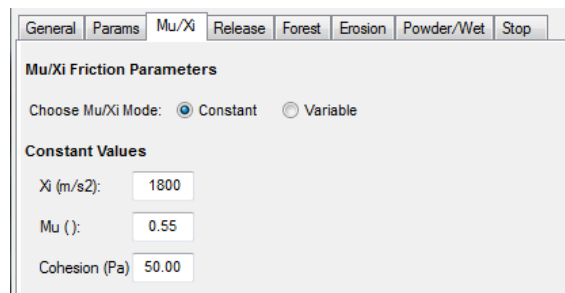


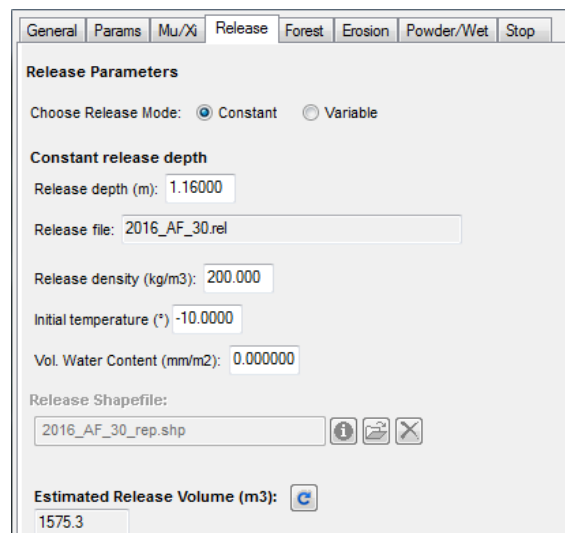
Abbildung 18: Eingabefenster "Params" des Programm RAMMS Extended.

- Mu/Xi:** Es wurden konstante Werte für die Reibungsparameter der trockenen Reibung ( $0.55$ ) und der turbulenten Reibung ( $1800 \text{ m/s}^2$ ) verwendet. Bei der Kohäsion wurde ein tiefer Wert von  $50 \text{ Pa}$  verwendet. Dies aufgrund der Tatsache, dass auf dieser Weise eher Extremereignisse modelliert werden (vgl. Abb. 19).



**Abbildung 19: Eingabefenster "Mu/Xi" des Programms RAMMS Extended.**

4. **Release:** Die Anrissflächen wurden wie bereits erwähnt im ArcGIS gezeichnet und konnten mit dem Convert-Tool ins RAMMS Extended importiert werden. Da für den Schnee der Anrissfläche eine Dichte von  $200 \text{ kg/m}^3$  gewählt, jedoch bei den Simulationsparametern ein Wert von  $400 \text{ kg/m}^3$  bestimmt wurde, musste die Anrissmächtigkeit jeweils mit dem Faktor zwei multipliziert werden. So bleibt die Schneemasse identisch. Bei der Schneetemperatur wurde ein Wert von  $-10 \text{ °C}$  gewählt (vgl. Abb. 20).



**Abbildung 20: Eingabefenster "Release" des Programms RAMMS Extended.**

5. **Forest:** Zum aktuellen Zeitpunkt bietet das Tool die Möglichkeit, drei unterschiedliche Waldperimeter in die Modellierung zu integrieren. Bei der Aufteilung der Waldperimeter wurden die „K-Value Specifications“ berücksichtigt (siehe Anhang 2.1). Die Waldinformationen wurden einerseits durch die Analyse der Orthophotos im ArcGIS, der Bestandskarte der Untersuchungsfläche (siehe Anhang 1.3) und durch Beobachtungen im Feld bestimmt. Die so definierten Waldflächen wurden im ArcGIS als Shapefiles gespeichert und ins RAMMS Extended geladen. Für jedes „Detrainment Shapefile“ kann eine Baumart und einen BHD festgelegt werden. Für alle Waldflächen wurde die Baumart Fichte ausgewählt. Die gewählten Durchmesser dieser Bäume betragen zwischen 20 und 50 cm (vgl. Abb. 21).

Abbildung 21: Eingabefenster "Forest" des Programms RAMMS Extended.

6. **Erosion:** Die Bestimmung der Erosionsflächen erfolgte mithilfe den Orthophotos im Tool ArcGIS. Durch den Input ins RAMMS kann die Schneeaufnahme entlang der Lawinenlaufbahn simuliert werden (Teich et al. 2014). Es besteht die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Erosionsflächen ins Programm zu implementieren. Für die Erosionshöhe wurde jeweils die Hälfte der Anrissmächtigkeit verwendet. Für die Dichte des Schnees und die Schneetemperatur wurden die gleichen Werte wie im Registerblatt Release verwendet (vgl. Abb. 22).

Abbildung 22: Eingabefenster "Erosion" des Programms RAMMS Extended.

7. **Powder/Wet:** Mit den Parameter Generate, Decay und Act. Energy werden die Eigenschaften der Lawine bezüglich der Fluktuationsenergie bestimmt (vgl. Abb. 23).

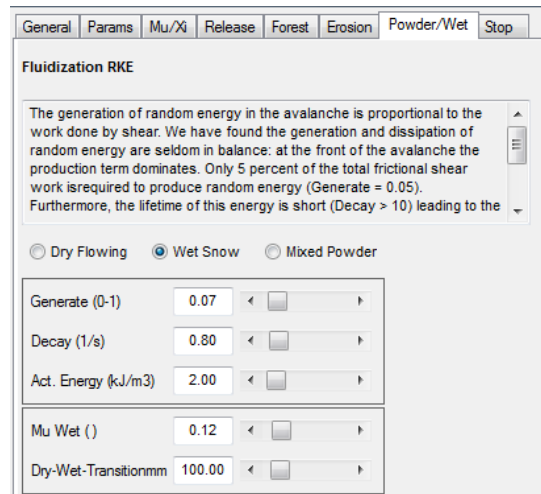


Abbildung 23: Eingabefenster "Powder/Wet" des Programms RAMMS Extended.

8. **Stop:** „Percentage of Total Momentum“ bildet das stoppende Kriterium der Berechnungen des Programmes. Das heisst, wenn die Summe des Momentums (Masse \* Volumen) aller Zellen um den im Voraus bestimmten Prozentwert kleiner ist als die maximale Summe des Momentums der Berechnung, wird die Simulation als beendet definiert. Für kleine Lawinen wurde hierfür ein Wert von 10% und für grosse Lawinen einen von 5% definiert (vgl. Abb. 24).

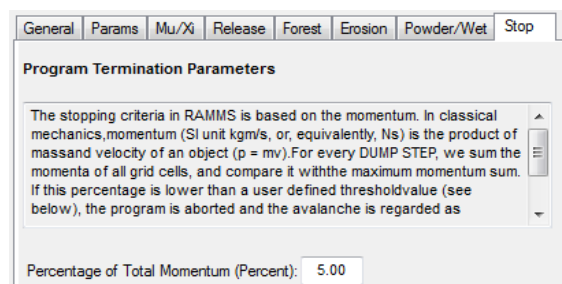


Abbildung 24: Eingabefenster "Stop" des Programms RAMMS Extended.

### 3.4.3 Nachberechnung Lawinenereignis am Wilerhorn

Damit die Input-Daten für die Lawinensimulationen mit RAMMS verifiziert werden konnten, wurde ein Lawinenereignis am Wilerhorn nachberechnet. Dazu wurde der Lawinenkataster des Kantons Bern nach Ereignissen am Wilerhorn durchsucht. Für eine möglichst realitätsnahe Nachberechnung mit waren Informationen zu der Anrissmächtigkeit, der Lage des Anrisses, den Schneeeigenschaften - insbesondere zur Schneetemperatur - und zu den Waldeigenschaften (Waldtyp, Kronendeckungsgrad und Bodenrauhigkeit) notwendig. Für den Vergleich der Simulation mit dem tatsächlichen Ereignis waren zudem Informationen über die Auslauflänge der Lawine nötig. Es stellte sich jedoch rasch heraus, dass bei keinem der eingetragenen Ereignisse im Kataster die Informationen komplett waren. So wurde die Suche auf Ereignisse mit klaren Auslauflängen und vorhandenen Wetterinformationen beschränkt. Die Wahl fiel schliesslich auf eine kleine Lawine aus dem Jahr 1963. Laut den Winterbeobachtungen in den Lawinenverbaugebieten des Berner Oberlandes aus den Jahren 1962/63, gab es am 19. Februar 1963 im Lawinenzug 1 einen Lawinenanriss von einer schmalen Lockerschneelawine (KAWA 1965). Diese vermochte zwischen den Bremshöckern sechs und sieben der ersten Reihe und 13, 14 der zweiten Reihe durchzufließen. Die Lawine kam im Becken hinter dem Auffangdamm zum Stillstand (ebd.). Die Schneedaten wurden dem Winterbericht 1962/63 des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung (EISLF 1964) für die Station Hasliberg entnommen (vgl. Tab. 5). Die Lufttemperaturen lagen in der Periode vom 12. bis 19. Februar 1963 auf 2500 m ü.M bei durchschnittlich -10 °C (ebd.).

**Tabelle 5: Neuschneemenge und totale Schneehöhe in cm der Periode 12. - 19. Februar 1963 gemessen bei der SLF-Station Hasliberg 1830 m ü.M (Quelle: nach EISLF 1964, eigene Darstellung).**

Tag im Februar 1963	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.
Neuschneemenge [cm]	7	12	5	0	0	6	12	22
totale Schneehöhe [cm]	148	159	162	160	154	155	163	185

Für die Berechnung der Anrissmächtigkeit wurde als Basiswert die Differenz der totalen Schneehöhe 17. zum 19. Februar verwendet. Dies entspricht einer Schneehöhe von 30cm. Da der Lawinenzug 1 in einer Runse liegt, wurde zusätzlich angenommen, dass durch Windwirkung zusätzlich Tribschnee abgelagert wird.

**1. Korrektur des Basiswertes für abweichende Höhe des Anrissgebietes:**

$$\text{Für } 1750 \text{ m: } HS_{DIF3D_{1750m}} = 30 \text{ cm} - 5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$$

**2. Bestimmen des Basiswertes  $d_0^*$  für Hangneigung von  $28^\circ$ :**

$$d_0^* = DHS_{DIF3D_{1750m}} * \cos 28^\circ = 25 \text{ cm} * \cos 28^\circ = 22 \text{ cm}$$

**3. Korrektur der Hangneigung  $f(\psi)$ :**

$$f(38^\circ) = 0.291 \div (\sin 38^\circ - (0.202 * \cos 38^\circ)) \cong 0.63$$

**4. Bestimmung der korrigierten Anrissmächtigkeit  $d_0$ :**

$$d_0 = d_{0, 1750m}^* * f(\psi) = 22 \text{ cm} * 0.63 \cong 14 \text{ cm}$$

**5. Tribschneezuschlag für Muldenlage (x):**

$$d_0 + x = 14 \text{ cm} + 26 \text{ cm} = 40 \text{ cm}$$

Mit den zu Verfügung stehenden Informationen wurde eine Anrissfläche im Lawinenzug 1 unterhalb der bestehenden Anrissverbauung definiert (vgl. Abb. 25). Die Anrissfläche weist eine maximale Breite von 32m und eine effektive Länge von 160m auf. Dies entspricht einer Fläche von  $3444\text{m}^2$ . Wird dieser Wert mit der Anrissmächtigkeit von 40cm (vgl. Berechnung oben) multipliziert, ergibt sich ein Anrissvolumen von  $1378\text{m}^3$ . Für die Schneetemperatur liegen keine Informationen vor. Aufgrund der variablen Lufttemperatur und den unterschiedlichen Strahlungsbedingungen, kann die Temperatur in den obersten Schichten der Schneedecke grosse Schwankungen aufweisen (Harvey et al. 2014, 56). Harvey et al. (2014, 55) stufen Schnee mit Temperaturen zwischen  $-5^\circ \text{ C}$  und  $0^\circ \text{ C}$  als „warmer“ Schnee ein. Da in dem Winterbeobachtungsbericht nicht von einer nassen Lockerschneelawine die Rede ist, werden kältere Verhältnisse angenommen es wurde ein Wert von  $-10^\circ \text{ C}$  für die Schneetemperatur gewählt.



**Abbildung 25: Definierte Anrissfläche (rot) des Lawineneignisses von 1963, die schwarzgestrichelte Fläche zeigt die Ausdehnung der Anrissverbauung im Jahr 1963.**

## 4 Resultate

### 4.1 Feldaufnahmen

Bei den Messungen bezüglich der Bodenrauhigkeit, dem Zersetzungsgrad des Holzes und der Verjüngung wurden zum einen 104 Baumstämme und zum anderen 168 Verjüngungsindividuen (Fichten) berücksichtigt.

#### Bodenrauhigkeit

Die Spannweite der Resultate bei den Höhen der Baumstämme liegt zwischen 80 cm und 200 cm. Dabei liegen 50% der gemessenen Höhen zwischen 120 cm und 160 cm. Der mittlere Wert (Median) beträgt 140 cm (vgl. Abb. 26). Beim gemessenen Durchmesser auf Schnitthöhe beträgt der kleinste Wert 25 cm und der grösste Wert 90 cm, während die Hälfte der Werte zwischen 42 cm und 59 cm liegen. Der Median ergibt einen Wert von 51 cm (vgl. Abb. 27).

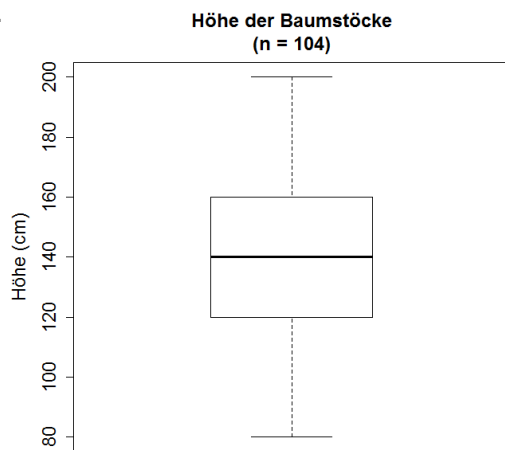


Abbildung 26: Verteilung der Höhen in cm der Baumstämme.

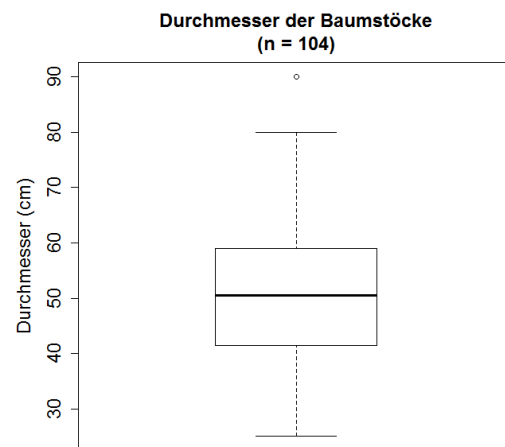


Abbildung 27: Verteilung der Durchmesser in cm der Baumstämme.

#### Zersetzungsgrad des Holzes

Die Messungen des Zersetzungsgrades ergaben, dass bei allen Expositionen der grösste Teil der Messungen in der Klasse 1 (vgl. Tab. 3) liegen. Die Ausnahme bilden sechs Messungen, welche in anderen Klassen eingeteilt wurden (vgl. Abb. 28).

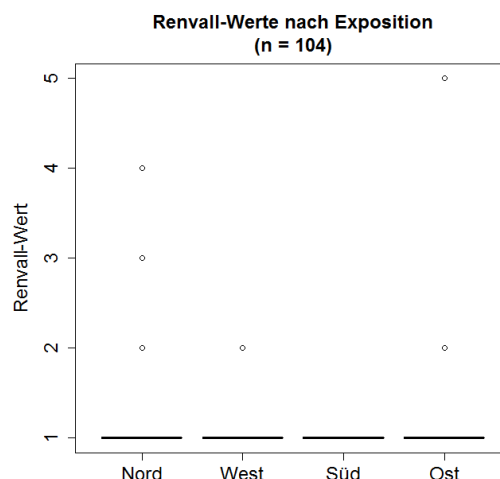
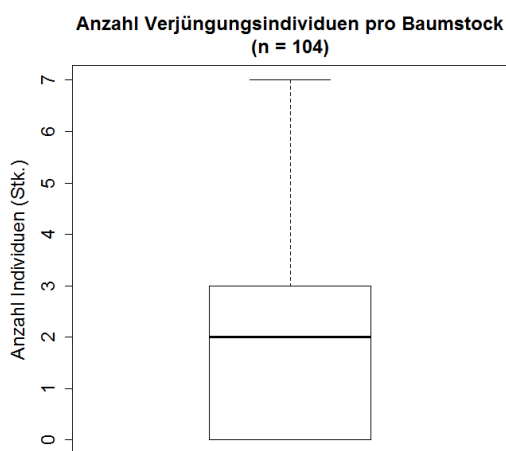


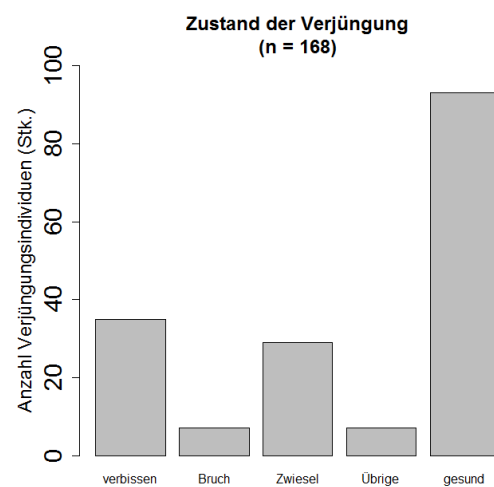
Abbildung 28: Verteilung der Renvall-Werte pro Baumstamm nach Exposition.

## Verjüngungssituation

Pro Baumstock wurden zwischen null und sieben Verjüngungsindividuen vorgefunden, wobei bei 50% der Stöcke null bis drei Verjüngungsindividuen vorhanden sind. Der Median liegt bei zwei Individuen (vgl. Abb. 30). Die Aufnahmen bezüglich des Gesundheitszustandes der Verjüngung ergaben, dass 93 Individuen in der Kategorie „gesund“ liegen. 35 Fichten sind verbissen, sieben weisen einen Bruch in der Stammachse auf und bei 29 Exemplaren war durch das Fehlen des Terminaltriebes eine Verzweiselung festzustellen. Die Kategorie „Übrige“ beinhaltet eine Fichte mit Fichtengallenlausbefall und sechs Fichten wiesen Mäuseschäden (vgl. Abb. 29).



**Abbildung 30: Verteilung der Anzahl Verjüngungsindividuen pro Baumstock.**



**Abbildung 29: Verteilung der Anzahl Verjüngungsindividuen nach Kategorie: verbissen, Bruch, Zwiesel, Übrige, gesund.**

Die Höhen der Verjüngungsindividuen liegen zwischen 16 cm und 110 cm, wobei der Median 58 cm beträgt (vgl. Abb. 32). Für die Betrachtung der Höhen nach Einteilung in die Kategorie „gesund“ und „geschädigt“, wurden alle Kategorien von „verbissen“ bis „Übrige“ in der Kategorie „geschädigt“ zusammengefasst. Bei der Kategorie „geschädigt“ liegt der Median bei 55 cm, bei der Kategorie „gesund“ hingegen bei 64 cm. Die Streuung der Werte in der Kategorie „gesund“ ist mit 16 cm bis 110 cm leicht stärker als bei den Werten der Kategorie „geschädigt“, welche zwischen 20 cm und 100cm liegen (vgl. Abb. 31).

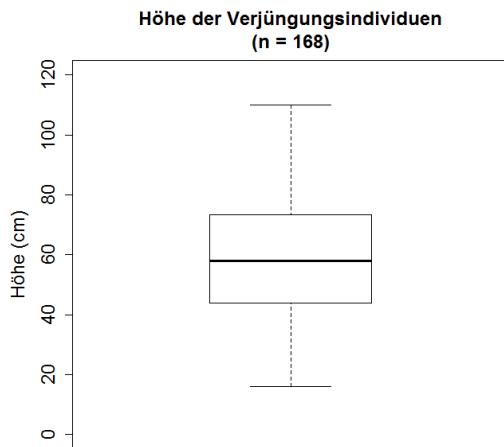


Abbildung 32: Verteilung der Höhen der Verjüngungsindividuen.

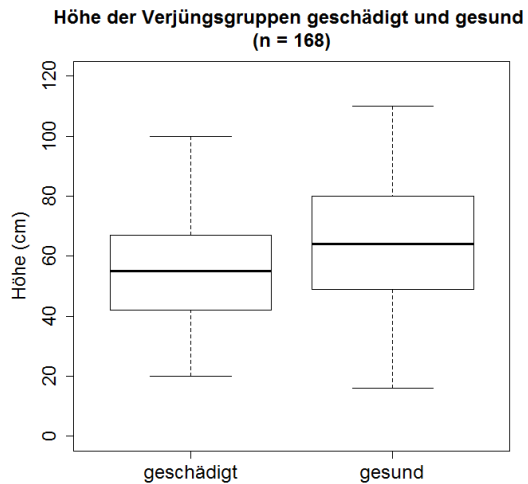


Abbildung 31: Verteilung der Höhen in cm von den Verjüngungsindividuen, nach Gruppe geschädigt und gesund.

Der Zuwachs der Verjüngung im Jahr 2015 weist eine Streuung von 0 cm bis 40 cm auf. 50% der Werte liegt zwischen 10 bis 20 cm. Der mittlere Wert beträgt 14 cm (vgl. Abb. 34). Die Daten der Verjüngungshöhe und des Zuwachs wurden mithilfe des Shapiro-Wilk-Test auf eine Normalverteilung überprüft. Der Test ergibt für den Zuwachs einen p-Wert von 0.0004 und für die Höhe ein p-Wert von 0.21. Da einzig der p-Wert der Höhe über dem Signifikanzniveau von 0.05 liegt, kann nur bei den Daten der Höhe eine Normalverteilung festgestellt werden. Die Daten des Zuwachses sind nicht normalverteilt. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman ergibt einen rho-Wert von 0.728. Dieser spricht für eine hohe positive Korrelation zwischen den Daten des Zuwachs und der Höhe. Die statistische Signifikanz wird durch einen p-Wert von  $2.2 \cdot 10^{-16}$  bestätigt (vgl. Abb. 33).

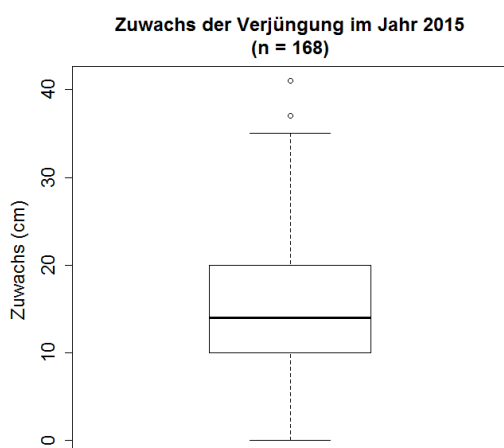


Abbildung 34: Verteilung des Zuwachses in cm der Verjüngungsindividuen im Jahr 2015.

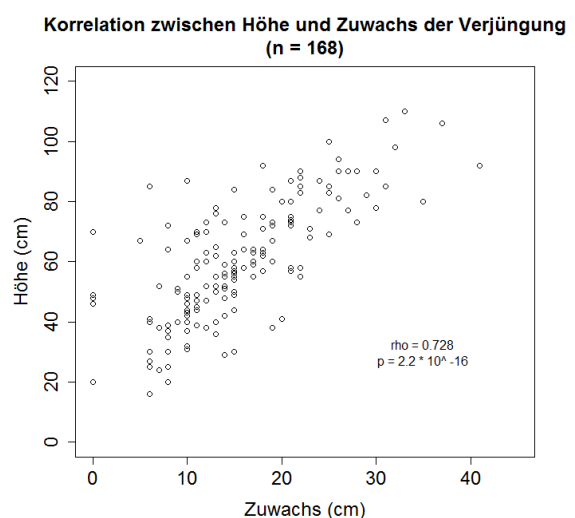


Abbildung 33: Zusammenhang zwischen Verjüngungshöhe und Zuwachs der Verjüngung im Jahr 2015.

## 4.2 Lawinensimulation mit RAMMS

Die Resultate der Lawindynamik werden anhand der maximalen Geschwindigkeit [m/s], des maximalen Druckes [kPa] und der maximalen Höhe [m] dargestellt. Diese Kennwerte beziehen sich auf den Fließanteil der Lawine. Zusätzlich werden die maximalen Schneeablagerungshöhen und die Waldzerstörung dargestellt.

### Lawineneignis 1963

Bei der Simulation des Lawineneignisses von 1963 fließt die Lawine über den südlichen Steilhang zwischen den Bremshöckern hindurch und kommt im Auffangbecken hinter dem Damm zum Stillstand. Die effektive Länge der Lawinenlaufbahn beträgt 695m. Von der Mitte bis zum Ende des Steilhanges, vor den Bremshöckern, tritt die maximale Geschwindigkeit der Lawine von 23 m/s auf. Maximale Werte des Druckes von 105 kPa sind auf der ganzen Länge entlang des Steilhanges, punktuell auch im Bereich der Bremshöcker, vorzufinden. Die Höhe der Lawine beläuft sich maximal auf 3.1m, dies jedoch nur an vereinzelten Stellen. Über weite Teile der Lawinenlaufbahn treten in der Mitte der Lawine Höhen von 1.5 m bis 2 m auf. Am Fuss des Steilhanges bei den Bremshöckern sind noch Höhen von 0.5 m bis 1 m vorzufinden (vgl. Abb. 35).

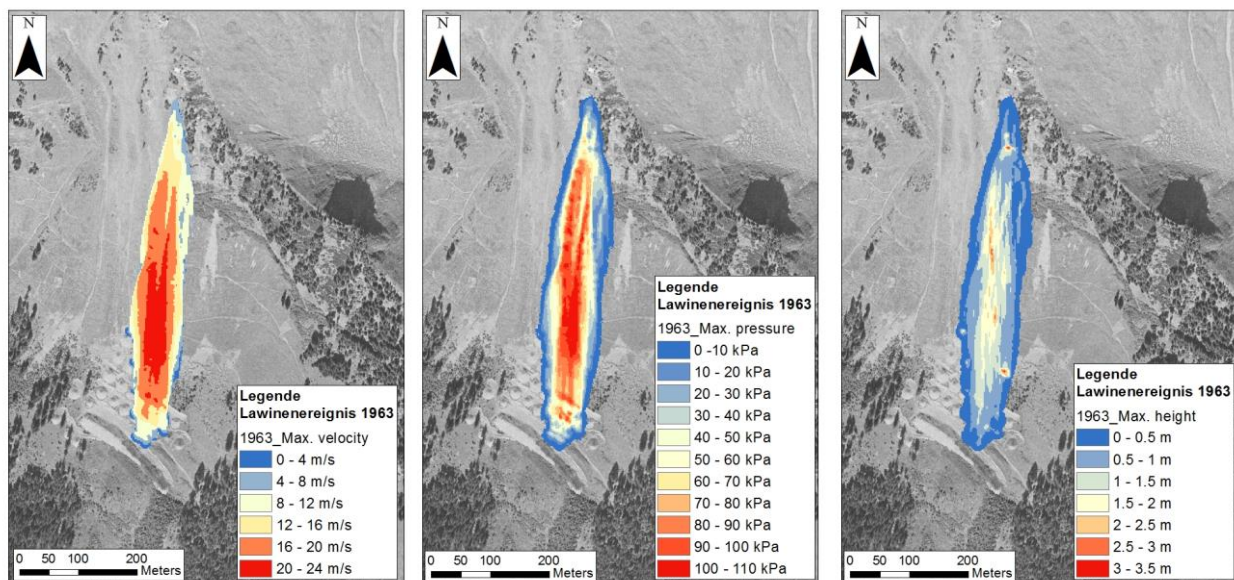
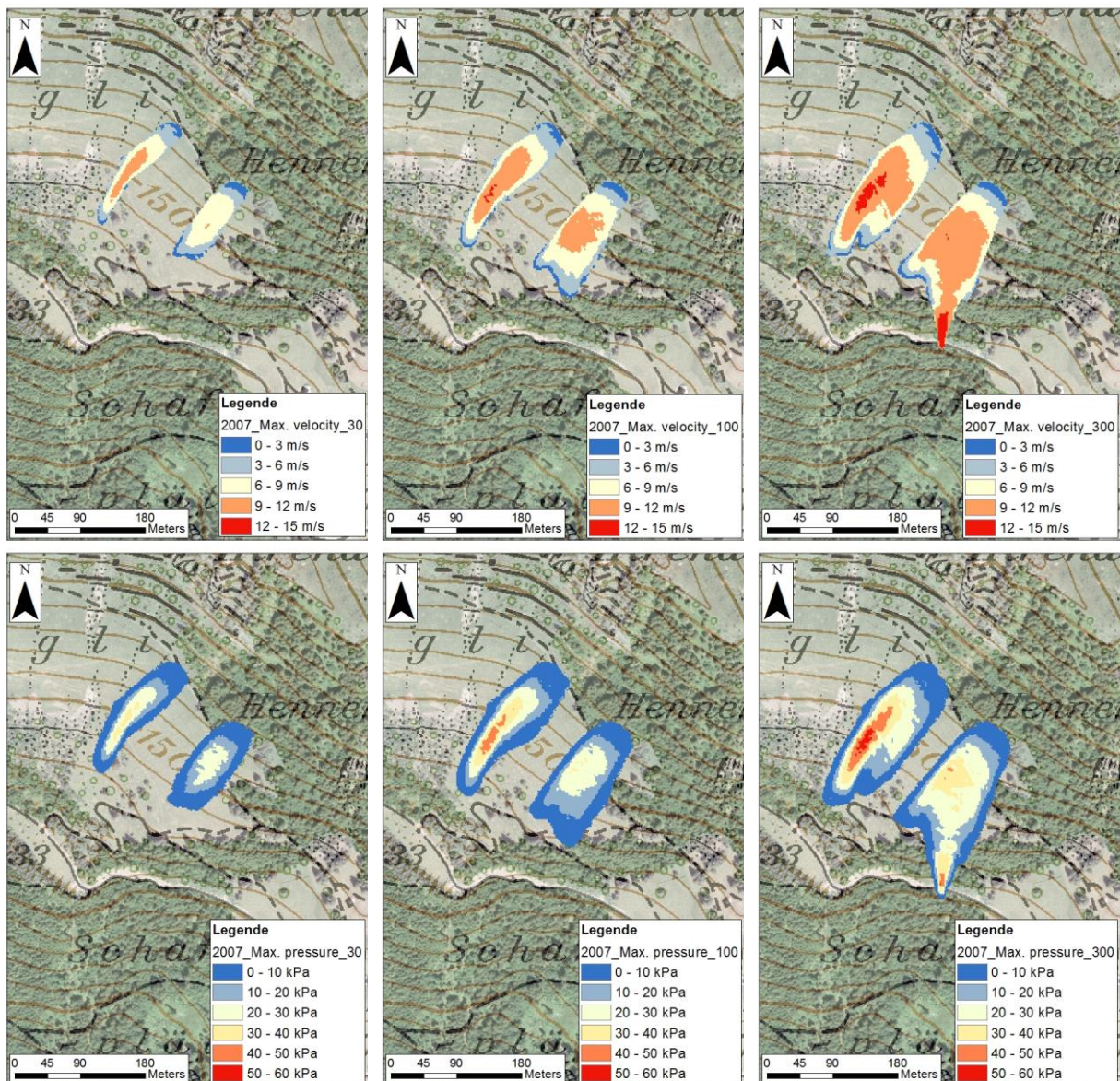


Abbildung 35: Lawinensimulation für das Lawineneignis aus dem Jahr 1963. Dargestellt sind dabei die maximale Geschwindigkeit (links), der maximale Druck (mitte) und die maximale Höhe der Lawine (rechts).

### Szenario 2007

Beim Szenario 2007, Situation vor dem Holzschlag, gibt es zwei Lawinenanrisse. Beide Anrisse liegen unterhalb des Hennefeldla-Waldes auf einer Höhe von 1560 m ü.M. Die effektive Länge der Lawinenlaufbahn nimmt mit höherer Wiederkehrsdauer, von 157 m beim östlichen Anriss des 30-jährigen Ereignisses bis zu 290m des gleichen Anrisses beim 300-jährigen

Ereignis, zu. Die meisten Lawinen kommen in der Geländeabflachung zum Stillstand. Die Ausnahme bildet eine östliche Lawine des 300-jährigen Ereignisses. Sie fließt über die Geländeabflachung und kommt auf einer Höhe von 1460 m ü.M. in den Wald, in welchem das Gelände zunehmend steiler wird. Aus diesem Grund kommt es insbesondere beim 300-jährigen Ereignis zu Schneeablagerungen im Wald. Die höchsten Werte sind bei der Grenze von Wald zu Nicht-Wald festzustellen (0.3 m bis 0.5 m). Über einen Grossteil der Fläche beträgt die Ablagerungshöhe zwischen 0 m und 0.1m. Es kommt zu keinen Waldschäden. Die Werte der maximalen Geschwindigkeit der Lawine belaufen sich auf 15 m/s beim 300-jährigen Ereignis. Die maximalen Druckkräfte (59 kPa) und Fliesshöhen (1.5 m) ergeben sich auch beim 300-jährigen Ereignis (siehe Abb. 36).



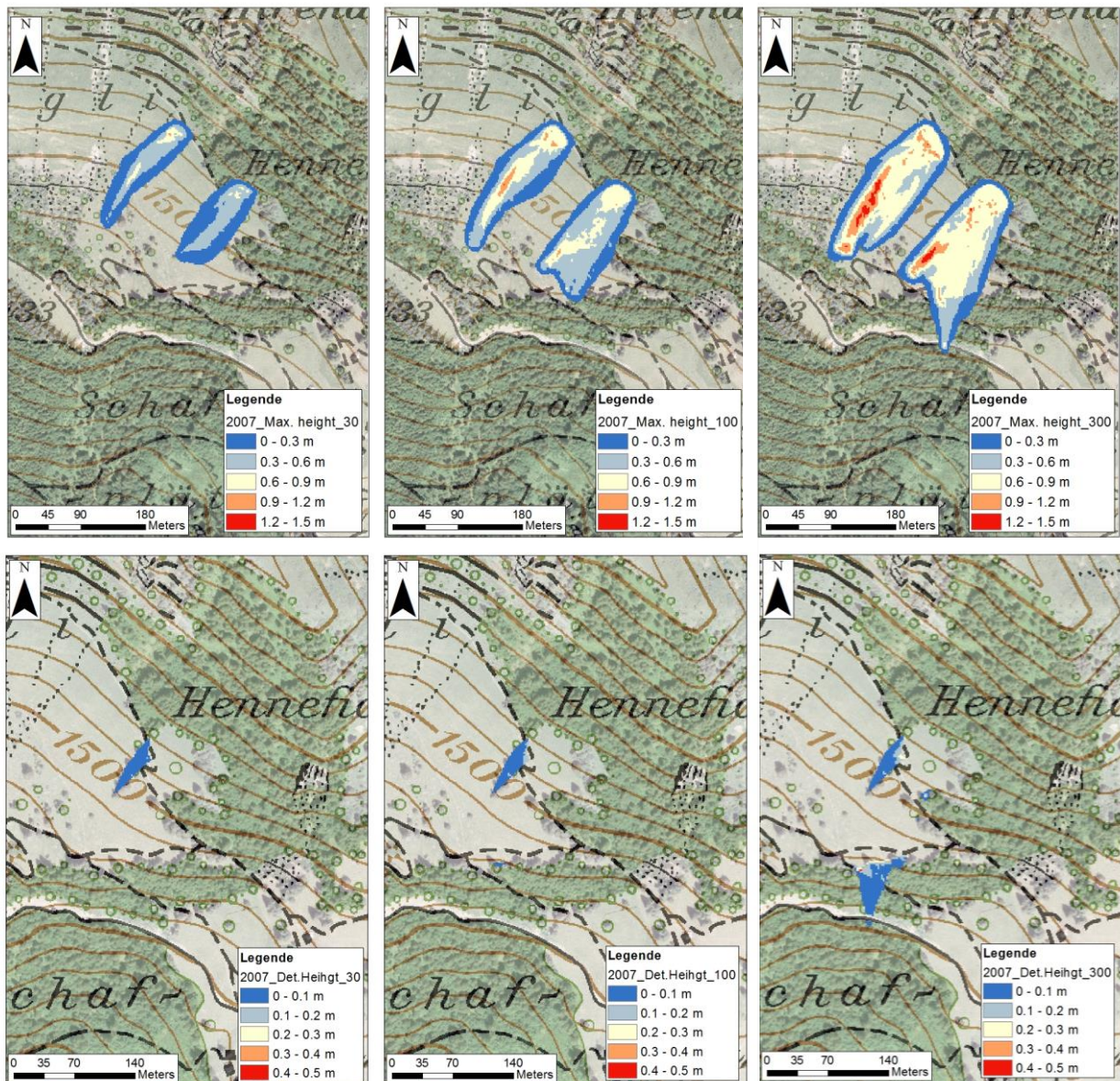
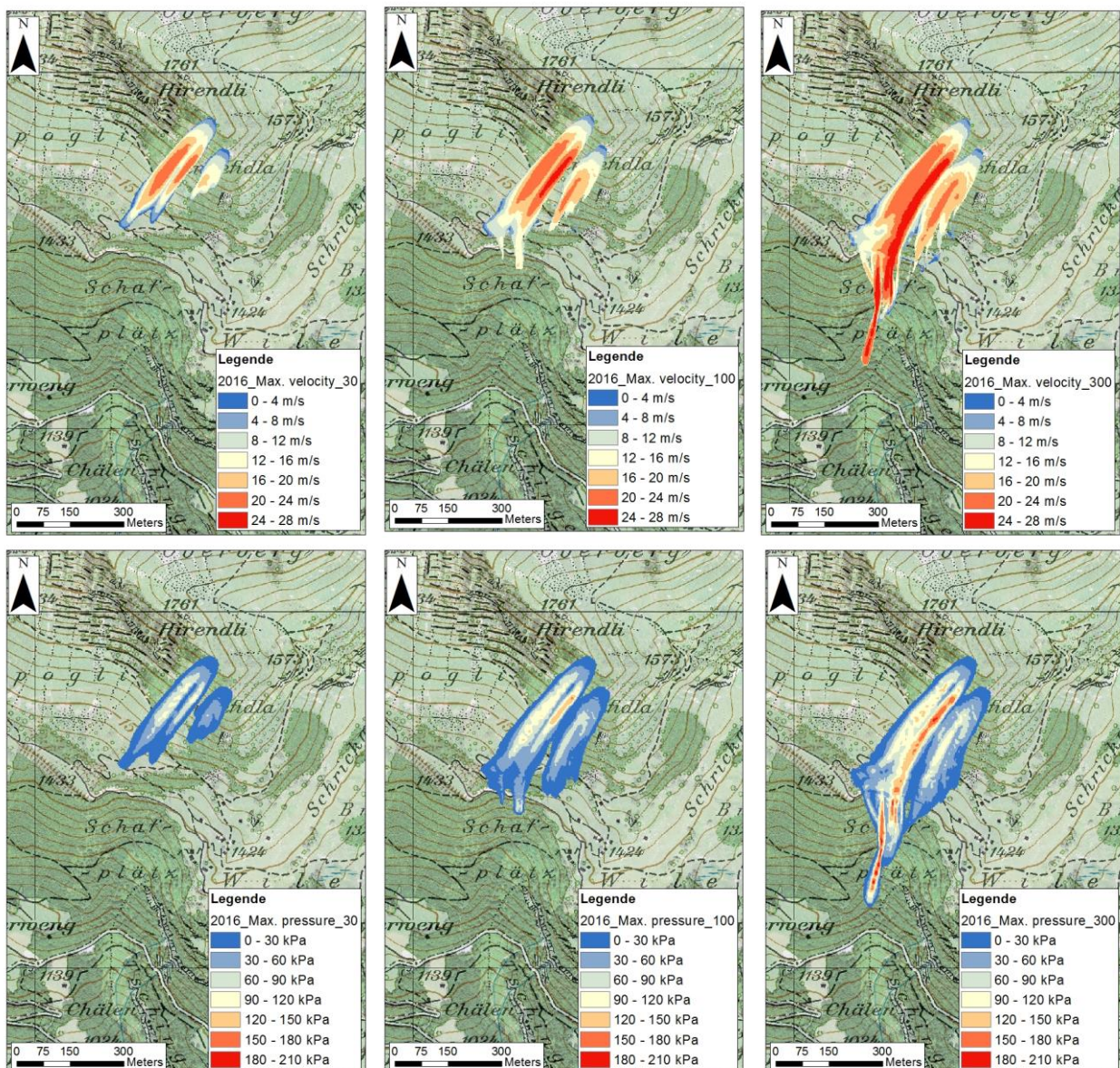


Abbildung 36: Lawensimulationen für das Szenario 2007 (Situation vor dem Holzschlag) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile) und die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile).

### Szenario 2016

Beim Szenario 2016, der Situation nach dem Holzschlag, werden zwei Lawenanrisse (aufgeteilt in mehreren kleineren Flächen) simuliert. Ein Anriss liegt in der westlichen und der zweite Anriss in der östlichen Freifläche. Die Lawinenlaufbahnen der zwei Anrisse verlaufen individuell, einzig beim 300-jährigen Ereignis gehen die Lawinen in eine gemeinsame Lawinenlaufbahn über. Bei genanntem Ereignis fließt die Lawine über die Geländestufe und kommt erst im Geländeeinschnitt auf einer Höhe von 1210 m ü.M zum Stillstand. Der Anriss

liegt auf 1720 m ü.M. Die effektive Länge der Lawinenlaufbahn beträgt somit 924 m. Die kürzeste Lawinenlauflänge (228m) ergibt sich bei dem östlichen Anriss des 30-jährigen Ereignisses. Bei diesem Ereignis kommen die Lawinen in der Geländeabflachung zum Stillstand. Die westliche Lawine des 100-jährigen Ereignisses fließt über die Geländekante und stoppt im Wald auf einer Höhe von 1380m. Beim 30-jährigen Ereignis wird zu Beginn der Lawine am meisten Schnee hinter den stehen gebliebenen Bäumen auf der Holzschlagfläche abgelagert (max. 0.5 m). Die Lawine des 300-jährigen Ereignisses überfließt seitlich die Bremsböcker, wo die Schneeablagerungen Höhen bis zu 3.6 m erreichen. Die Ablagerungen hinter den Bäumen belaufen sich grösstenteils auf 0.1 m. Es kommt zu keinen Waldschäden durch die Lawinen. Mit zunehmender Wiederkehrsdauer nehmen die maximalen Werte der Geschwindigkeit, des Druckes und der Höhe zu. Beim 30-jährigen Ereignis betragen die maximalen Werte der Geschwindigkeit 23 m/s, des Druckes 113 kPa und der Höhe 1.25 m. Beim 300-jährigen Ereignis belaufen sich die Werte auf 28 m/s, 207 kPa und 4.7m (vgl. Abb. 37).



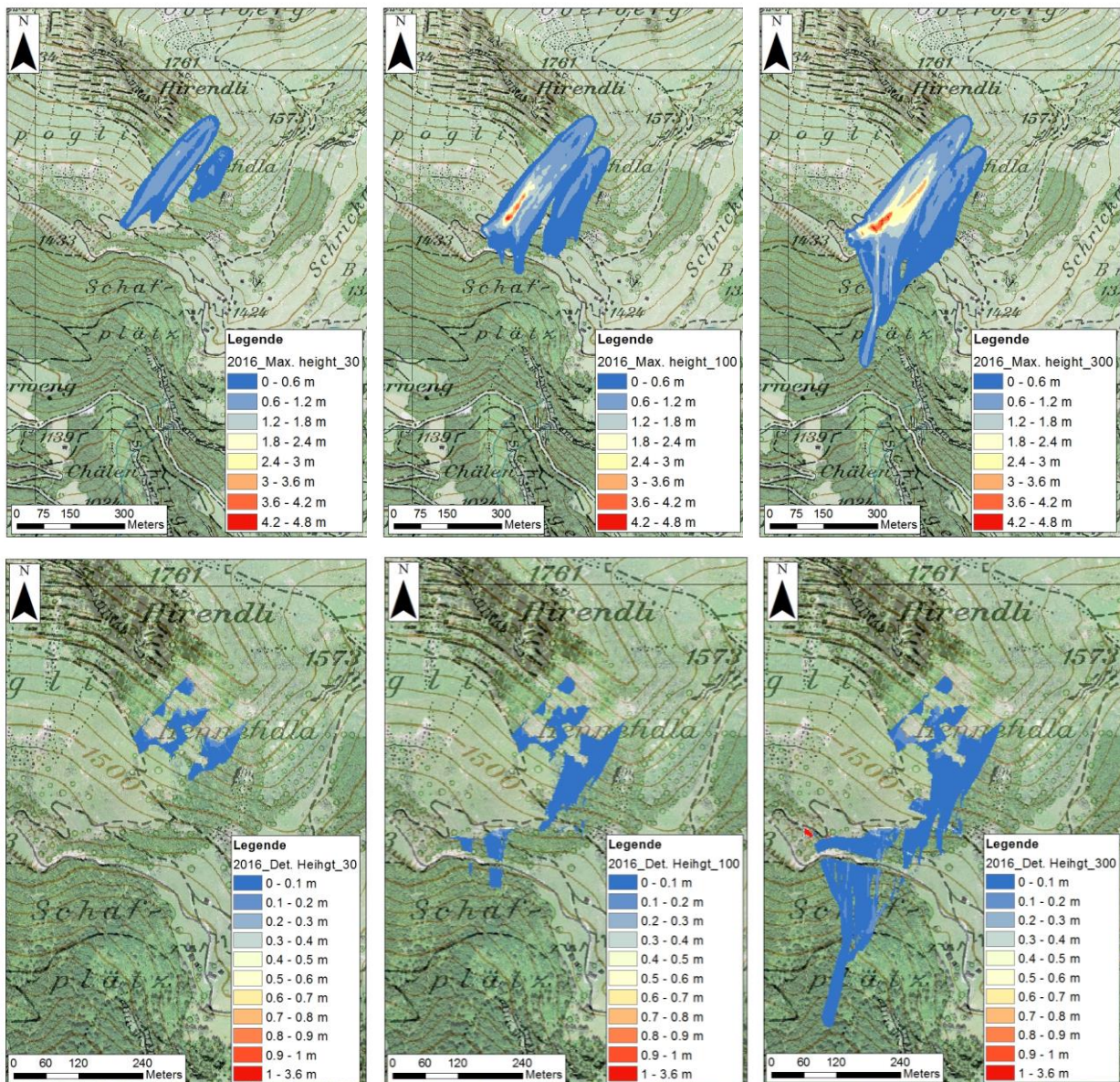
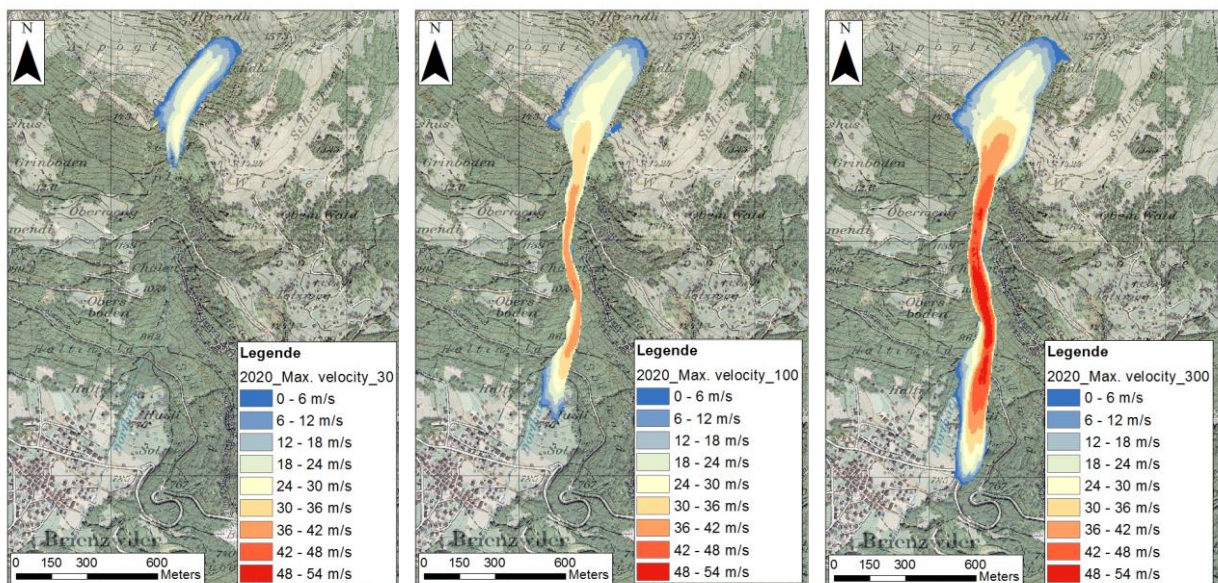


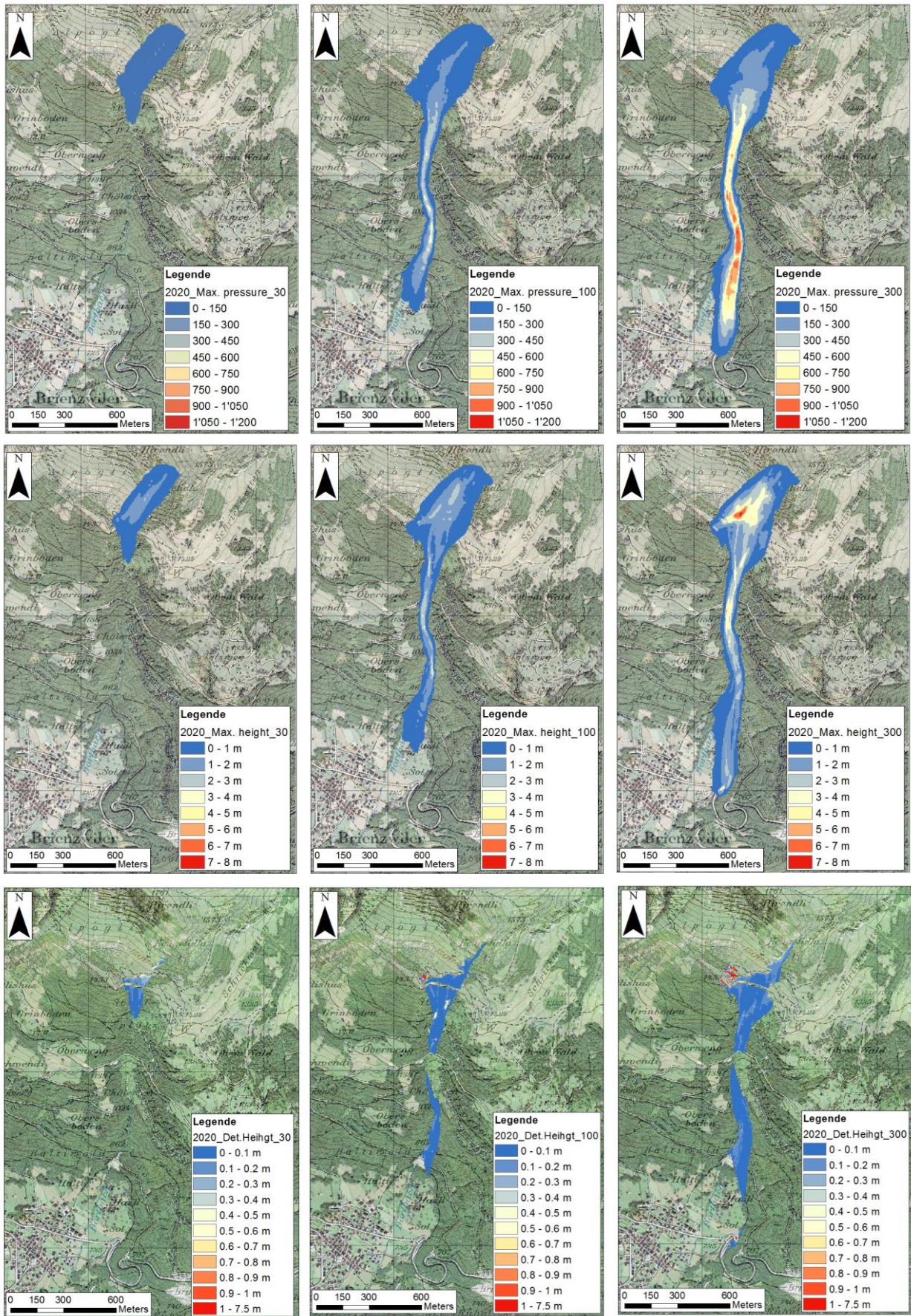
Abbildung 37: Lawinsimulationen für das Szenario 2016 (Situation nach dem Holzschlag) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile) und die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile).

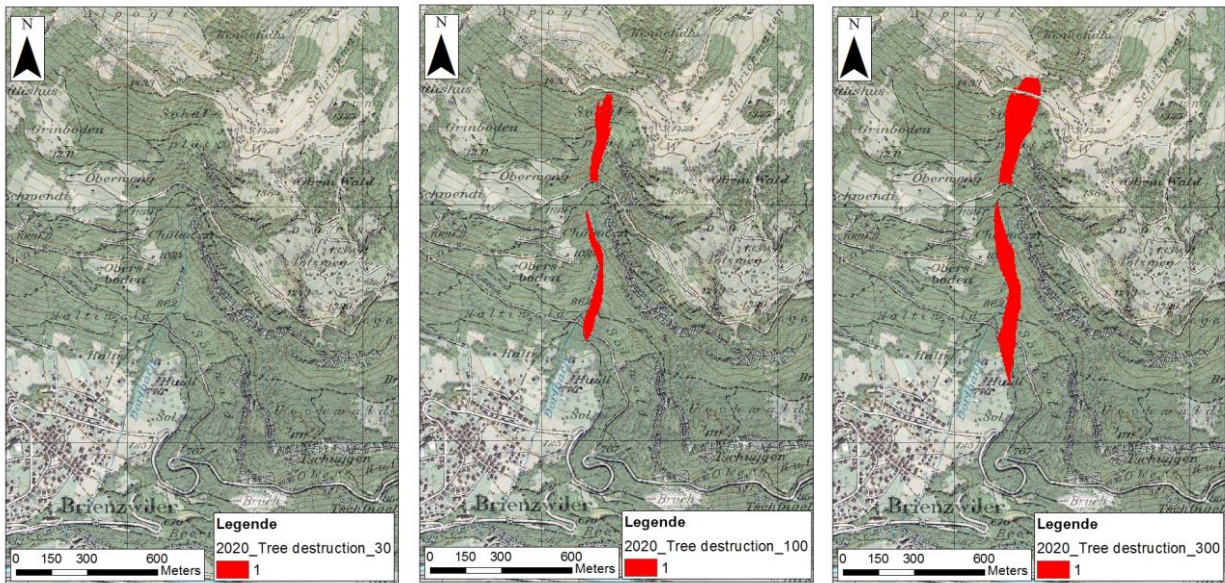
### Szenario 2020

Das Szenario 2020 entspricht der Situation nach dem Holzschlag mit zusätzlichen Kalamitäten (Windwurf, Borkenkäferbefall) auf der Holzschlagfläche. Die Lawinenarisse erfolgen auf einer Höhe von 1720 m ü.M und fließen über die Geländekante des Alpogli. Die Lawine des 30-jährigen Ereignisses läuft nach der Geländekante im Wald auf einer Höhe von 1300 m ü.M aus. Die Lawinen des 100- und 300-jährigen Ereignisses durchfließen hingegen den Wald und werden vom Geländeeinschnitt ins Tal gelenkt. Die Lawine des 100-jährigen Ereignisses kommt bei Hasli bei 770 m ü.M zum Stillstand, während die Lawine des 300-jährigen Ereignisses erst bei der Dorfstrasse auf einer Höhe von 720 zum Stoppen kommt.

Somit betragen die Lawinenlaufbahnlängen mit zunehmender Wiederkehrsdauer 745 m, 1956 m und 2205 m. Die maximale Geschwindigkeit von bis zu 54 m/s entsteht beim 300-jährigen Ereignis entlang des Geländeeinschnittes. An der gleichen Stelle kann beim 100-jährigen Ereignis eine Geschwindigkeit von bis zu 42 m/s gemessen werden. Beim 30-jährigen Ereignis beträgt die maximale Geschwindigkeit weniger, nämlich 27 m/s. Beim maximalen Druck treten je nach Wiederkehrsdauer grosse Unterschiede auf. So belaufen sich die Werte des Druckes beim 30-jährigen Ereignis punktuell auf 158 kPa, hingegen beim 300-jährigen Ereignis bis auf maximal 1057 kPa. Die maximalen Höhen treten bei der Geländeabflachung auf und belaufen sich auf 7.2 m beim 300-jährigen Ereignis. Beim 30- und 100-jährigen Ereignis liegen die maximalen Höhen entlang der Lawinenlaufbahn bei 2.1m und 3.9m. Nach der Geländestufe auf 1400 m ü.M verlaufen die Lawinen grösstenteils im Wald, wobei Schnee hinter den Bäumen abgelagert wird. Über weite Teile der Lawinenlaufbahn liegen die Werte des abgelagerten Schnees, zwischen 0 und 0.2 m. Beim 30-jährigen Ereignis treten beim Übergang von der Wiesenfläche zum Wald Ablagerungshöhen von bis zu 0.7 m auf. Beim Überfließen der Bremsböcker wird beim 300-jährigen Ereignis bis zu 7.48 m Schnee abgelagert. Durch die Lawinen des 100- und 300-jährigen Ereignisses werden Bäume gebrochen (vgl. Abb. 38).





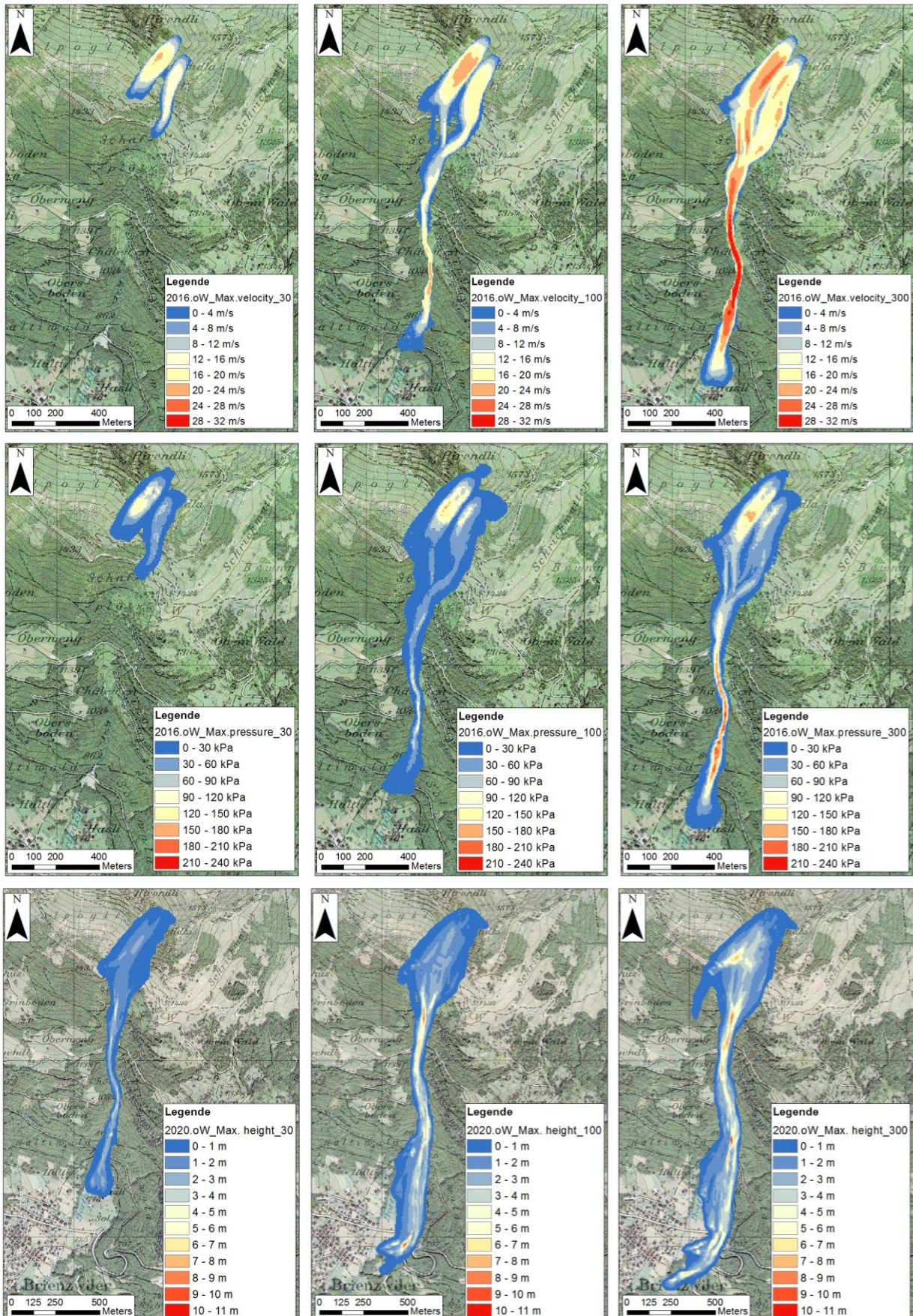


**Abbildung 38: Lawensimulationen für das Szenario 2020 (Situation nach dem Holzschlag mit zusätzlichen Kalamitäten) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile), die Schneeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile) und die Fläche der Waldzerstörung (fünfte Zeile).**

### Szenario 2016 ohne Wald

Das Szenario 2016 ohne Wald entspricht der Situation nach dem Holzschlag. Im Anrissgebiet ist der Restbestand vorhanden, jedoch hat entlang der Lawinenlaufbahn es keinen Wald. Es gibt eine westliche und östliche Freifläche. Beim 100- und 300-jährigen Ereignis fließen die zwei Lawinenanrisse zusammen. Beim 30-jährigen Ereignis kommt es zu keinem Zusammenfluss der Lawinen, da der westliche Anriss in der Geländeabflachung bei Alpogli zum Stillstand kommt. Der östliche Anriss fließt weiter und stoppt nach einer Lauflänge von 415m. Die Lawinen des 100- und 300-jährigen Ereignis überfließen die Geländeabflachung und werden durch den Geländeeinschnitt Richtung Brienzwiler gelenkt. Die Lawine des 100-jährigen Ereignisses stoppt nach 1551 m kurz oberhalb von Hasli. Das 300-jährige Ereignis fließt noch 143m weiter und kommt direkt bei Hasli zum Stillstand. Die maximale Geschwindigkeit tritt wiederum beim 300-jährigen Ereignis entlang des Geländeeinschnittes mit 32 m/s auf, während der maximale Wert beim 30-jährigen Ereignis 21 m/s und beim 100-jährigen Ereignis 23 m/s beträgt. Der maximale Druck beträgt mit zunehmender Wiederkehrsdauer 146 kPa, 165 kPa und 216 kPa. Die maximale Höhe der Lawine beläuft sich beim 300-jährigen Ereignis punktuell auf bis 10 m, Höhen zwischen 4 und 6 m treten in der Mitte der Lawinenlaufbahn auf der ganzen Länge auf. Beim 30- und 100-jährigen Ereignis sind maximale Höhen von 0.92 m und 3.62 m festzustellen. Die maximale Höhe der Schneeablagerung liegt jeweils am Anfang beim Übergang in den Wald. Mit zunehmender Wiederkehrs-

dauer nehmen auch die Ablagerungshöhen von 0.1 bis 0.5 m zu. Punktuell betragen sie beim 100- und 300-jährigen Ereignis auch bis zu 0.7 m (vgl. Abb. 39).



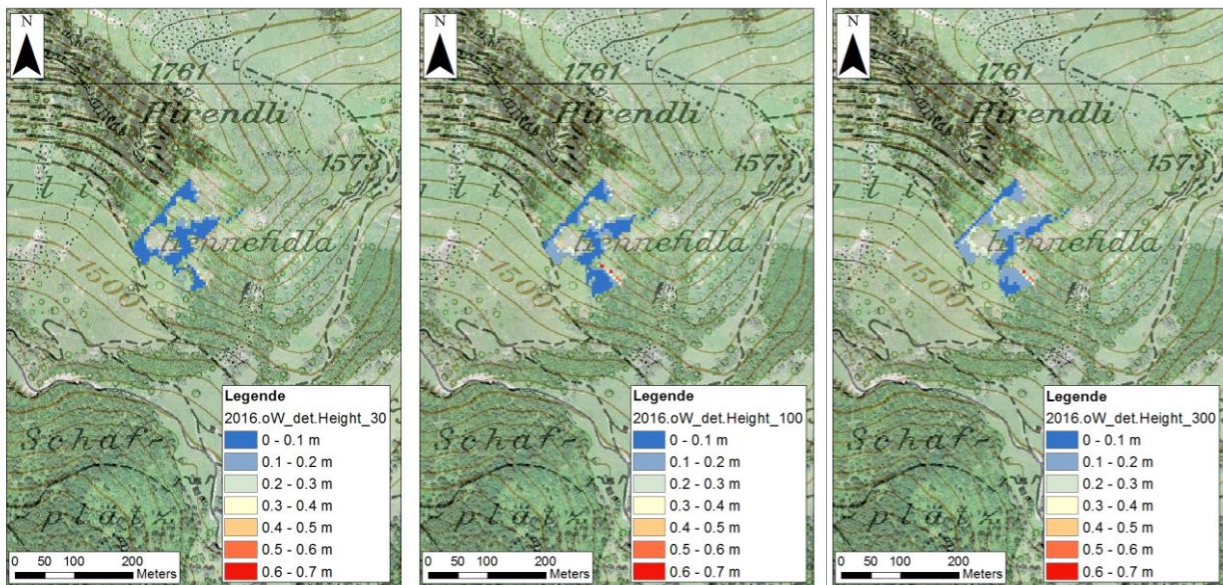


Abbildung 39: Lawensimulationen für das Szenario 2016 ohne Wald (Situation nach dem Holzschlag, ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300-jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), der maximale Druck (zweite Zeile), die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile) und die Schneeeablagerungshöhe hinter den Bäumen (vierte Zeile).

### Szenario 2020 ohne Wald

Das Szenario 2020 ohne Wald beschreibt die Situation nach dem Holzschlag mit zusätzlichen Kalamitäten. Entlang der Lawinenlaufbahn hat es keinen Wald. Bei diesem Szenario durchfließen die Lawinen des 30-, 100- und 300-jährigen Ereignisses den Geländeeinschnitt entlang des Dorfbaches und kommen erst ausserhalb des Waldes zum Stillstand. Die Lawine des 30-jährigen Ereignisses stoppt bei Hasli auf einer Höhe von 780 m. Die Lawine des 100-jährigen Ereignisses fliesst weiter und verschüttet dabei die Dorfstrasse und die Brünigstrasse, wobei die Lawine auf einer Höhe 680 m ü.M zum Stillstand kommt. Die Lawine des 300-jährigen Ereignisses fliesst noch 170 m bis auf 660 m ü.M. weiter. Die Längen der Lawinenlaufbahnen betragen mit zunehmender Wiederkehrsdauer 1956 m, 2420 m und 2587 m. Die maximalen Geschwindigkeiten der Lawine treten entlang des Geländeeinschnittes auf und betragen 35 m/s (30-jähriges Ereignis), 54 m/s (100-jähriges Ereignis) und 58 m/s (300-jähriges Ereignis). Die maximalen Werte des Druckes nehmen mit zunehmender Wiederkehrsdauer stark zu - von 274 kPa (30-jähriges Ereignis) bis zu 1287 kPa (300-jähriges Ereignis). Die maximale Höhe der Lawine beträgt punktuell beim 300-jährigen Ereignis 10.3 m. Die maximale-Höhe des 100-jährigen Ereignisses ist mit 10.9 m sogar noch etwas höher. Maximale Höhen zwischen 4 und 6 m treten entlang der Lawinenlaufbahn flächiger auf. Beim 30-jährigen Ereignis belaufen sich die Werte auf maximal 5.3 m (vgl. Abb. 38).

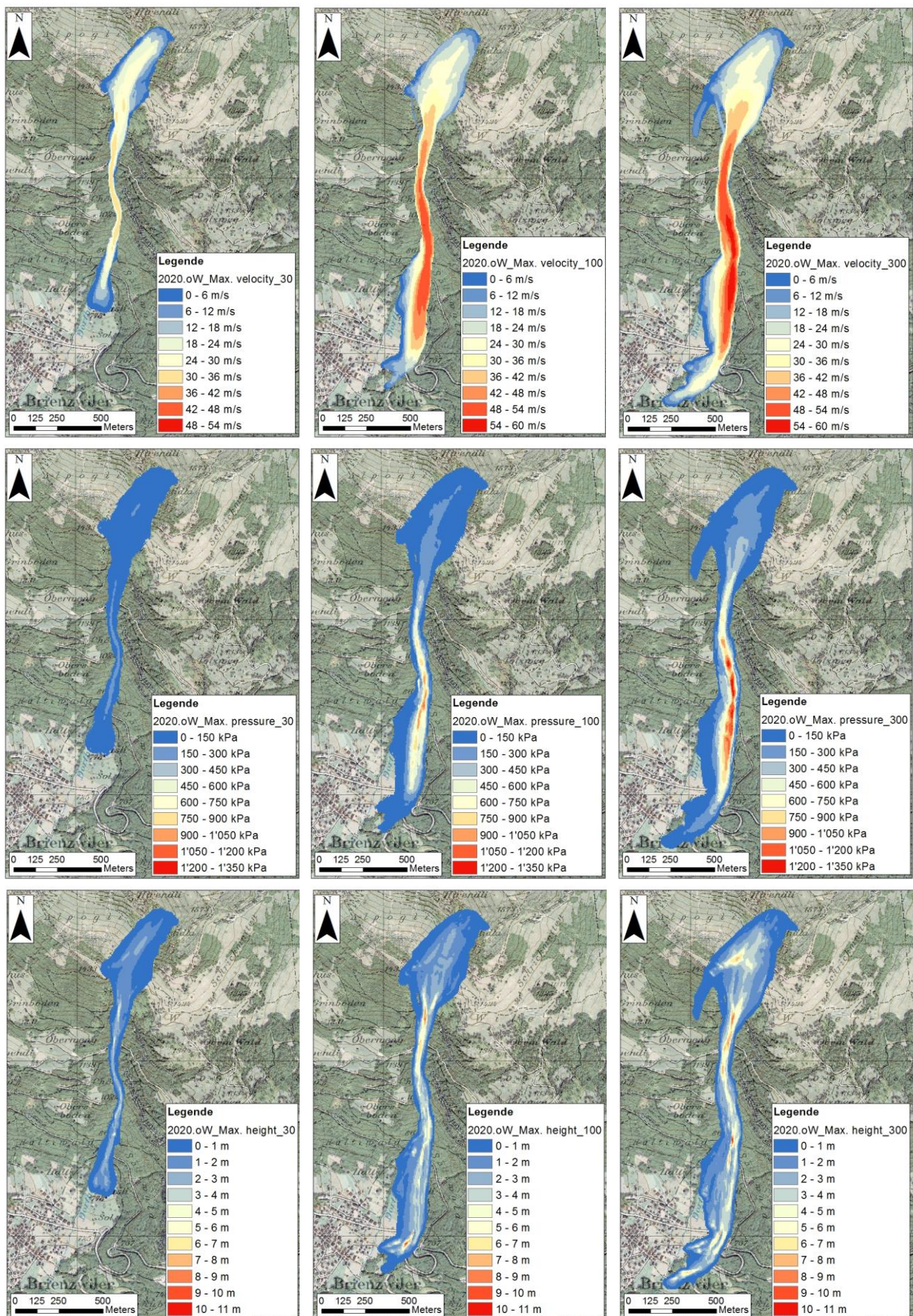


Abbildung 40: Lawinsimulationen für das Szenario 2020 ohne Wald (Situation nach dem Holzschlag mit zusätzlichen Kalamitäten, ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn) in einem 30-jährigen, 100-jährigen und einem 300 jährigen Ereignis. Dargestellt sind dabei für jedes Ereignis die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit in der Lawine (erste Zeile), den maximalen Druck (zweite Zeile) und die maximale Höhe der Lawine (dritte Zeile).

## Gesamtübersicht aller Szenarien

Werden die einzelnen Szenarien individuell betrachtet, lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Wiederkehrsdauer grundsätzlich die Werte der untersuchten Parameter steigen (vgl. Tab. 6). Dies stimmt nahezu für alle Parameter. Ausnahmen bilden die Werte der maximalen Ablagerungshöhe (max. D) des Szenarios im Jahr 2016 und die Werte der maximalen Höhe (max. H) des Szenarios 2020 ohne Wald. Im Weiteren fällt auf, dass beim Szenario 2016 die Differenzen der Werte der unterschiedlichen Wiederkehrsdauer am kleinsten und beim Szenario 2020 am grössten sind. Vergleicht man die verschiedenen Szenarien (2007, 2016, 2020) untereinander, wird ersichtlich, dass die Werte des Szenarios 2007 über alle Wiederkehrsdauern gesehen die kleinsten sind und die Werte des Szenarios 2020 den grössten entsprechen. Beträchtliche Unterschiede ergeben sich zwischen den einzelnen Szenarien bei den Werten des maximalen Druckes (max. P) und den Auslauflängen. Auch bei der maximalen Ablagerungshöhe sind grosse Differenzen zu erkennen. Hohe Werte ergeben sich beim Szenario 2016 mit Wiederkehrsdauer von 300 Jahren und beim Szenario 2020 mit Wiederkehrsdauer von 100 und 300 Jahren. Werden die erstellten Grafiken betrachtet, wird erkannt, dass die hohen Werte vor allem im Bereich der Bremsverbauung auftreten. Die höchsten Schneeablagerungen im Wald belaufen sich punktuell bis auf einen Meter, weit verbreitet sind Ablagerungen zwischen 0 m und 0.3 m.

Wird das Szenario 2016 mit dem Szenario 2016 ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn verglichen, sind bezüglich des Druckes beim Szenario ohne Wald für jede Wiederkehrsdauer höhere Werte festzustellen. Auch bei der Lawinenlänge sind, bis auf den westlichen Anriss beim 30-jährigen Ereignis, die Werte des Szenarios ohne Wald höher. Besonders bei den Lawinenlängen sind grosse Unterschiede zu beobachten. Bei den restlichen Parametern kann keine klare Tendenz festgestellt werden. Je nach Wiederkehrsdauer sind die Werte des Szenarios mit Wald oder ohne Wald grösser. Beim Vergleich des Szenarios 2020 mit dem Szenario 2020 ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn stellt sich heraus, dass unabhängig von der Wiederkehrsdauer und bei allen Parametern die Werte des Szenarios 2020 ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn grösser sind als beim Szenario 2020. Der grösste Unterschied zwischen dem Szenario 2020 und Szenario 2020 ohne Wald wird bei dem 30-jährigen Ereignis für die Lawinenlänge festgestellt.

Tabelle 6: Gesamtübersicht aller untersuchten Parameter der Szenarien 2007, 2016, 2020, 2016 ohne Wald, 2020 ohne Wald mit Wiederkehrsdauer von 30, 100 und 300 Jahren (V=Geschwindigkeit, P=Druck, H=Höhe, D=Schneeablagerungshöhe, Waldzerstörung, Lawinenlänge)

Wiederkehrsdauer	Szenario	max. V [m/s]	max. P [kPa]	max. H [m]	max. D [m]	Waldzerstörung	Lawinenlänge [m]	
							West	Ost
30 Jahre	2007	10.5	36.7	0.9	0.1	nein	206	157
	2016	23.0	113.3	1.3	0.6	nein	477	228
	2020	26.9	158.6	2.1	0.7	nein	745	
100 Jahre	2007	12.5	49.2	1.2	0.5	nein	237	199
	2016	25.7	158.3	4.7	0.5	nein	596	354
	2020	42.6	585.5	3.9	3.6	ja	1956	
300 Jahre	2007	15.02	59.1	1.5	0.5	nein	257	290
	2016	28.3	207.3	4.7	3.6	nein	924	
	2020	53.9	1057.4	7.2	7.5	ja	2205	
Wiederkehrsdauer	Szenario	max. V [m/s]	max. P [kPa]	max. H [m]	max. D [m]	tree destruction	Lawinenlänge [m]	
							West	Ost
30 Jahre	2016 ohne Wald	21.1	146.3	0.9	0.4	nein	375	415
	2020 ohne Wald	35.3	274.3	5.3	-	-	1956	
100 Jahre	2016 ohne Wald	22.9	164.8	3.6	0.7	nein	1551	
	2020 ohne Wald	54.0	1086.7	10.9	-	-	2420	
300 Jahre	2016 ohne Wald	32.5	215.7	6.5	0.6	nein	1694	
	2020 ohne Wald	58.2	1287.7	10.3	-	-	2587	

## 5 Diskussion

### 5.1 Feldaufnahmen

#### 5.1.1 Aktuelle Schutzwirkung

Nach Bebi et al. (2009) sind bei Hangneigungen von 30° Lückenlängen von 25m notwendig, damit Lawinenanrisse entstehen können. Bei einem tiefen Kronendeckungsgrad (<35%) und einer Hangneigung von 35° reicht ein Wert von 10 m (Schneebeli and Bebi 2004). Frehner et al. (2005) beschreiben die kritische Lückenlänge im Lawinenschutzwald bei 35° mit 50 m und die kritische Lückenbreite in wintergrünem Wald mit 15 m. Das Ausmass der offenen Flächen auf der Untersuchungsfläche übersteigt diese Werte um ein Mehrfaches. Es ist davon auszugehen, dass die stabilisierende Wirkung des Waldes auf die Schneedecke stark vermindert ist. Aufgrund der freilandähnlichen Verhältnisse bezüglich der Schneeeinterzeption, der Strahlungs- und Windverhältnissen beschränkt sich der Einfluss des Waldes auf die Bodenrauhigkeit und die Stützwirkung der Baumstöcke.

Die Fernerkundung von Ueli Ryter hat ergeben, dass auf der Fläche 308 Baumstöcke vorhanden sind. Während der Feldaufnahmen entstand jedoch der Eindruck, dass es mehr Baumstöcke auf der Fläche hat. Diesen Eindruck bestätigt auch das Anzeichnungsprotokoll vom Holzschlag 2010 und der Zwangsnutzung im Folgejahr. Aufgrund dieser Informationen sind auf der Fläche nämlich 570 Baumstöcke vorhanden. Der Unterschied zu den 308 Baumstöcken aus der Fernerkundung wird durch ungenügende Qualität bzw. nicht optimale Perspektive der Fotos begründet. Für die weitere Diskussion wird von 570 Baumstöcken auf der Fläche ausgegangen. Wird die Flächenausdehnung der entstanden Freiflächen berücksichtigt (1.55 ha), ergibt dies eine Stammzahl/ha von 367. Frehner et al. (2005) erklären, dass die Schutzwirksamkeit vor Lawinenanrissen mit einer Stammzahl/ha (BHD > 8cm) von 500 bei einer Hangneigung von 30° und von 1000 bei 40° erfüllt ist. Meyer-Grass und Schneebeli (1992) stellen die nötige Stammzahl/ha in Abhängigkeit zur Hangneigung und zum Waldtyp. Die Untersuchungsfläche gehört zum Waldtyp 3 (Fichten-, Tannenwald, mehr als 90% wintergrüne Arten) und die durchschnittliche Hangneigung der Fläche beträgt 38°. So ergibt sich eine minimal nötige Stammzahl/ha von 250 mit BHD grösser als 16cm. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Viglietti (2010, zitiert in Fankhauser 2010), der für Hangneigungen zwischen 35° und 40° Stammzahlen/ha von 240 (BHD >16 cm) und 360 (BHD > 8 cm) für die Verhinderung von Lawinenanrissen fordert. Im Lawinenkataster wurden bis zum aktuellen Zeitpunkt keine Lawinenanrisse aus der Untersuchungsfläche verzeichnet. So kann davon ausgegangen werden, dass die Stammzahl/ha bis zum Holzschlag 2010 genügend gross war. Es kann jedoch sein, dass es kleinere Waldlawinenereignisse gab, welche unbemerkt blieben. Aufgrund der fehlenden Waldwirkungen ist nicht klar, ob die Stamm-

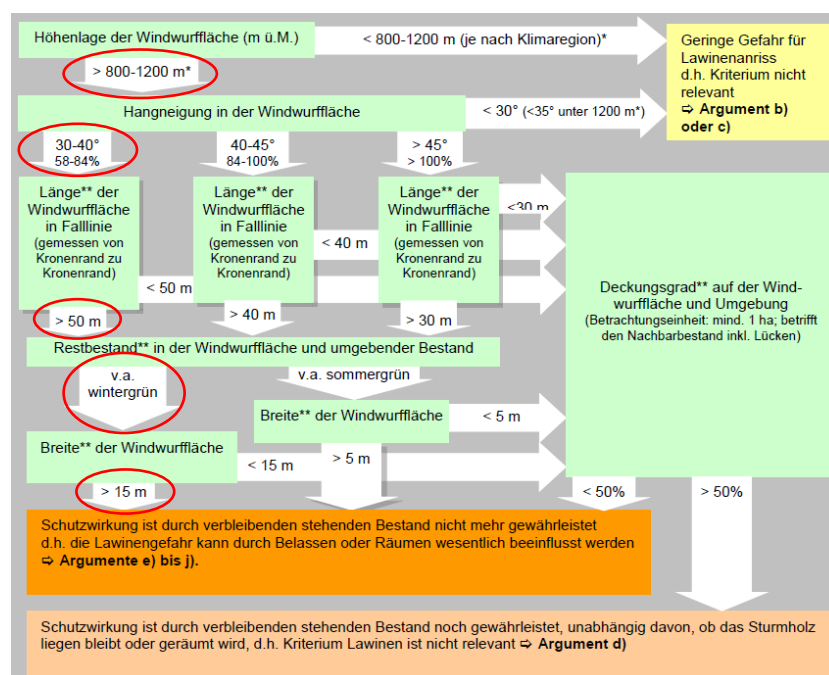
zahl/ha von 367, die Schneedecke genügend stabilisieren kann. Ein möglicher Versuch dies abzuschätzen erfolgt mit der Betrachtung der räumlichen Verteilung der Baumstöcke. Es kann erkannt werden, dass zwischen den Baumstöcken keine Lücken auftreten, welche die Grenzwerte bezüglich der maximalen Lückengrösse im Wad überschreiten. Frehner et al. (2005) halten jedoch fest, dass die Stützwirkung der Bäume alleine normalerweise nicht ausreicht um Lawinenanrisse zu verhindern. Auch wenn die Stützwirkung nicht abschliessend als genügend oder ungenügend beurteilt werden kann, ist hingegen klar, dass die stabilisierende Wirkung auf die Schneedecke sich auf die Höhe der Baumstöcke (Wirkhöhe) beschränkt.

Als weitere Voraussetzung für eine Schneedeckenstabilisierung muss der Durchmesser der Stämme berücksichtigt werden. Die Feldaufnahmen des Durchmessers auf Schnitthöhe ergaben einen mittleren Wert von 51 cm. Der durchschnittliche BHD des Holzschlages von 2010 betrug 46 cm. Der um 5 cm höhere Wert der Feldaufnahmen ist insofern erstaunlich, da mehr als 75% der untersuchten Schnitthöhen über der Messhöhe (1.3 m) des BHD liegen. Aus diesem Grund wurde eher ein tieferer Wert als 46 cm erwartet. Da für die Feldaufnahmen jedoch nur 104 Baumstöcke berücksichtigt wurden, die Messung des Durchmessers übers Kreuz erfolgte und die Möglichkeit besteht, dass die Kluppierung im Jahr 2010 über 1.3 m ab Boden erfolgte, wird die Abweichung als gering eingestuft. Beide Werte (46 cm und 51 cm) liegen weit über dem kritischen Durchmesserwert von 6 bis 14 cm, welcher für das Brechen von subalpinen Baumarten aufgrund des Schneedruckes in der wissenschaftlichen Literatur angegeben wird (Bebi et al. 2009).

Bezüglich der Bodenrauhigkeit ist unter anderem die Wirkhöhe der Rauigkeitselemente relevant. Die Feldaufnahmen haben einen mittleren Wert von 140 cm für die Höhe der Baumstöcke ergeben. Frehner et al. (2005) meinen, dass die Baumstöcke so hoch wie möglich, in Abhängigkeit der Arbeitssicherheit, abgeschnitten werden sollen. Mit Betrachtung der Arbeitssicherheit, lassen sich zum Teil auch die tiefer abgeschnittenen Baumstöcke erklären. Ein weiterer möglicher Grund für die tiefen Stöcke ist die gute Holzqualität. Bei den Feldaufnahmen wurden nur wenige Stöcke mit Anzeichen von Rotfäule beobachtet. Für Waldstandorte in der subalpinen Stufe kann Moderholz eine wichtige Voraussetzung für die Verjüngung sein (Frehner et al. 2005). Die Situation auf der Holzschlagfläche wird jedoch so beurteilt, dass bei der Wahl der Baumstockhöhe der Schutz vor Schneebewegungen als prioritär betrachtet werden kann. Neben den Baumstöcken sind auch Querbäume für die Erhöhung der Bodenrauhigkeit von grosser Bedeutung (Frehner et al. 2005). Neben den Baumstöcken wurden auch die vorhandenen Querbäume in der Fernerkundung von Ueli Ryter digitalisiert. Dabei wurden 79 Querbäume erkannt, dieser Wert liegt erstaunlicher Weise über der Anzahl Querbäume (47), die sich aufgrund des Anzeichnungsprotokolles und der Zwangsnutzung

ergibt. Die genaue Betrachtung des aktuellen Orthophotos und die gemachten Beobachtungen bei den Feldaufnahmen lassen sogar noch auf eine grössere Anzahl als die 79 Querbäume schliessen. Die Wirkung der Querbäume bezüglich der Stabilisierung der Schneedecke ist besonders hoch, wenn unter anderem die Stämme schräg zur Falllinie liegen (BAFU 2008). Auf der Untersuchungsfläche liegen die Stämme meist quer und vereinzelt auch schräg zur Falllinie. Zu den Querbäumen wurden bei den Feldaufnahmen nur sporadisch Messungen bezüglich ihrer Wirkhöhe gemacht. Diese lassen auf eine durchschnittliche Wirkhöhe von 0.6m schliessen. Die Wirkhöhen der Querbäume liegen auf der ganzen untersuchten Fläche meist deutlich unter der durchschnittlichen Wirkhöhe der Baumstöcke. Laut BAFU (2008) sollten die Abstände zwischen den Querbäumen, welche relevant für die Wirkhöhe sind, kleiner als 20 m sein. Dieser Wert wird zum Teil auf der Untersuchungsfläche überschritten. Zudem sollten die schutzwirksamen Stämme, zusätzlich durch dazwischen liegendes Holz unterstützt werden, da ein einzelner Stamm nur begrenzt vor Schneebewegungen schützen kann (BAFU 2008). Dieses dazwischen liegende Holz fehlt auf der Untersuchungsfläche, wird jedoch teilweise durch die Baumstöcke sowie die Äste von der Holzaufarbeitung ersetzt, wobei die Wirkhöhe der Äste als gering eingeschätzt wird. Ein möglicher Einfluss begrenzt sich auf Bodenlawinen.

Für die Beurteilung der Holzschlagfläche wurde die Annahme getroffen, dass die Holzschlagfläche mit einer Windwurffläche zu vergleichen ist. Unter dieser Annahme wurde die Schutzwirkung der Holzschlagfläche mithilfe eines Entscheidungsbaumes für die Beurteilung des Restbestandes von Windwurfflächen beurteilt (vgl. 39).



**Abbildung 41: Entscheidungsbaum für die Beurteilung der Schutzwirkung des Restbestandes nach Windwurf (Quelle: BAFU 2008)**

Mit den entsprechenden Werten der Höhenlage (1540 – 1700 m ü.M.), der Hangneigung (38°), der Länge der Holzschlagfläche (> 50m), dem Restbestand (v.a. Fichten) und der Breite der Holzschlagfläche (> 15 m) resultiert, dass die Schutzwirkung durch den verbleibenden Bestand nicht mehr gewährleistet ist. Die Lawinengefahr kann jedoch durch das Totholz wesentlich beeinflusst werden (BAFU 2008). Dies deckt sich mit der Einschätzung der Felddaufnahmen.

Aufgrund der Holzentnahme beim Holzschlag 2010 ist die Bodenrauhigkeit auf der Untersuchungsfläche dagegen weniger stark als bei einem Windwurf. Auf den Vivian Sturmflächen wurden bis zum aktuellen Zeitpunkt nur wenige Lawinen beobachtet (Bebi et al. 2015). Dies steht im Gegensatz zu Untersuchungen von Fankhauser 2010, welche die Lawinenschutzfunktion der Vivianflächen 20 Jahre nach dem Sturm grösstenteils als ungenügend eingestuft hat (ebd.). Bebi et al. (2015) schliessen daraus, dass der Beitrag der Bodenrauhigkeit in nicht oder nur teilweise geräumten Flächen höher ist, als dies, aufgrund der als ungenügend beurteilten Lawinenschutzfunktion, vermuten lässt. Daraus wird abgeleitet, dass die aktuelle Situation gegenüber Nassschneelawinen und Bodenlawinen eine gute Schutzfunktion bietet, jedoch die Schutzfunktion bei Oberlawinen begrenzt ist. Dies wird durch den Vergleich zwischen zwei Luftbildaufnahmen aus dem Winter 2011/12 bestätigt (vgl. Abb. 40). Auf der Untersuchungsfläche sind bei einer Schneehöhe von 1.4 m, keine Anzeichen von Schneebewegungen zu finden, wobei hinter der Untersuchungsfläche auf dem Osthang des Wilerhorns zum gleichen Zeitpunkt deutliche Schneebewegungen stattfinden. Dies ist abhängig von der Lage der Gleitfläche in der Schneedecke und der abgleitenden Schneemächtigkeit. Laut BAFU (2008) sind bei Hangneigungen von über 30° und bei einer Überdeckung der Wirkhöhe, durch mehr als 50 cm Neuschnee, Lawinenanrisse zu erwarten.



Abbildung 42: Flugaufnahme 11.02.2012: Holzschlagfläche (links), Osthang Wilerhorn (rechts) (Quelle: KAWA 2016).

### 5.1.2 Entwicklung der Schutzwirkung

Die Entwicklung der Schutzwirkung ist einerseits von der Dauer, in welcher die Baumstöcke und liegenden Stämme vor Lawinenanrissen schützen und andererseits von der Dauer bis die Baumverjüngung zu einem schutzfähigen Wald herangewachsen ist, abhängig (Kupferschmid et al. 2004). Wie die Feldaufnahmen der Holzersetzung bei den Baumstöcken gezeigt haben, gehört ein grosser Teil der Messungen der Kategorie 1 an. Nach Sipolla und Renvall (1999) entspricht der Kategorie 1 Holz, welches hart und frisch sowie mit Rinde bedeckt ist. Aufgrund der vorbeugenden Massnahmen gegenüber der Ausbreitung des Buchdruckes wurden beim Holzschlag im Jahr 2010 Rindenstreifen bei den Baumstöcken entfernt. So sind die Baumstöcke nur noch teilweise mit Rinde bedeckt. Da der Holzschlag im Jahr 2010 durchgeführt wurde, wird das Holz nicht als frisch eingestuft, da gemäss Albrecht (1990) Holz in den ersten zwei Jahren nach dem Absterben als frisch bezeichnet wird - anschliessend beginnt dessen Zersetzung. Die Beobachtungen der Härte des Holzes decken sich mit der Kategorie 1 der Renvall-Methode. Die Resultate der Renvall-Methode müssen insofern relativiert werden, da die Messungen einerseits von der menschlichen Kraft abhängig sind und andererseits die Härte des Holzes nur in den äusseren 6-8cm gemessen wird. So sind nur begrenzt Rückschlüsse auf die Holzersetzung zulässig. Dies bestätigen die gemachten Beobachtungen der Feldaufnahmen. So mussten zum Teil hohle Baumstöcke aufgrund des Messwertes der Kategorie 1 zugeteilt werden, was jedoch nicht der Realität entsprechen kann. Die positive Wirkung des Totholzes auf den Lawinenschutz wird in der Wissenschaft seit 30 Jahren diskutiert (Frehner et al. 2005, Kupferschmid et al. 2004, Noack et al. 2004). Bebi et al. (2015) besagen, dass das liegengelassene Holz auch 20 Jahre nach Vivian zu einer erhöhten Bodenrauhigkeit beiträgt, jedoch mehr als die Hälfte seiner ursprünglichen Wirkung verloren hat. Dabei ist die Qualität der Restwirkung stark von Standortigenschaften, der Struktur des Ausgangsbestandes und der Verankerung des Holzes im Boden abhängig. Auch Amman (2006) setzt die Dauer der Wirkung in Abhängigkeit zu Standorten mit schneller respektive langsamer Zersetzung. Die hohen jährlichen Niederschlagssummen von 2000mm auf der Untersuchungsfläche deuten auf eine schnelle Zersetzung hin. Jedoch wird dies durch die süd-westliche Exposition relativiert, da dies als ein Standort mit langsamer Zersetzungsrate eingestuft wird. Dadurch wird die Schutzwirkung der Baumstöcke auf 25 Jahre geschätzt, das entspricht einer Wirkungsdauer bis ins Jahr 2036. Bei den Querbäumen muss mit einer kürzeren Schutzwirkung gerechnet werden, da die Stämme einerseits am Boden liegen und andererseits in den Sommermonaten durch die Bodenvegetation beschattet werden.

Der mittlere Wert der untersuchten Fichtenpflanzung liegt bei 58 cm. Es wird angenommen, dass die Fichten mit einem Alter von drei Jahren gepflanzt wurden. Diese Annahme bestäti-

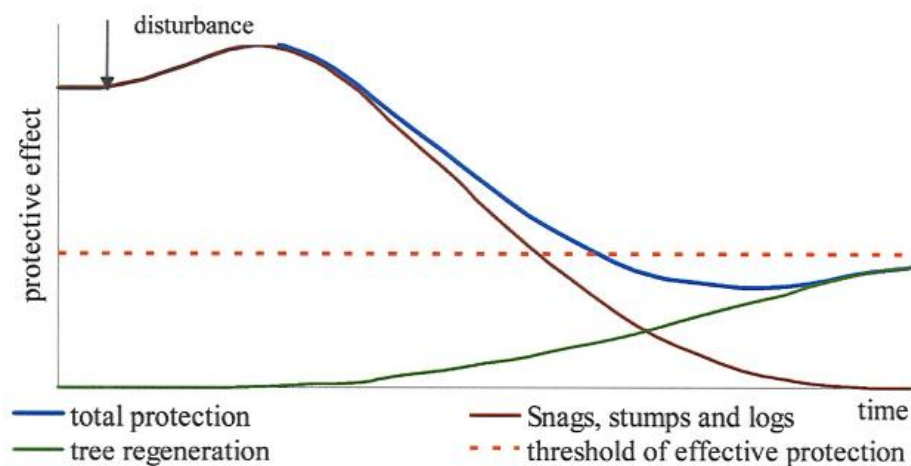
gen die Untersuchungen von Ryter (2014) bezüglich der Hochlagenaufforstungen. Aufgrund der Pflanzung im Jahr 2012 ergibt sich somit ein Alter von acht Jahren. Für die Untersuchungen von Ryter (2014) stammen 13 Probebäume auch aus der Lawinenverbauung am Wilerhorn, welche westlich an die Untersuchungsfläche angrenzt. Der Wert von 58 cm im Alter acht Jahre lässt sich in den Messreihen als guten Mittelwert einordnen. Die Untersuchungen zur Naturverjüngung von Rammig et al. (2005) ergeben jedoch für Fichten im Alter von acht Jahren einen mittleren Wert von 40cm. Da die Daten aus tieferen Höhenlagen zwischen 1400 m und 1590 m stammen, ist der Unterschied einerseits durch die schlechteren Standortbedingungen aufgrund der Exposition (NW-NE) und andererseits durch den Unterschied zwischen Naturverjüngung und Pflanzung zu erklären. Wird für die Schutzwirkung der Verjüngung die Bedingung gestellt, dass sie doppelt so hoch sein muss wie die maximal mögliche Schneehöhe eines 100-jährigen Ereignisses (2.38m), wird für die Untersuchungsfläche ein Wert von 4.76 m bestimmt. Durch einsetzen dieses Wertes in der Wachstumskurve von Ryter (2014), ergibt sich somit ein Alter von 30 Jahren. Das heisst, die gepflanzten Fichten können, bezogen auf die Höhe in 22 Jahren, die Schutzwirkung gegenüber Lawinenanrissen auf der Untersuchungsfläche übernehmen.

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel diskutiert spielt auch die Stammzahl/ha eine wichtige Rolle für die Schutzwirkung gegenüber Lawinen. Auf der Untersuchungsfläche wurden 800 Fichten gepflanzt. Untersuchungen zu Überlebensraten von Fichtenpflanzungen in einer Aufforstungsfläche im Berner Oberland ergaben 13 Jahre nach der Pflanzung eine Sterberate von 40% (Ryter 2014). Dieser Wert wird als eher tief eingeschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass mindestens die Hälfte der gepflanzten Fichten in 22 Jahren abgestorben ist. Laut dieser Einschätzung würde das noch einer Stammzahl/ha von 258 entsprechen, welche zum Zeitpunkt der Übernahme der Schutzfunktion vorhanden wären. Da die Stammzahl/ha in Abhängigkeit zum Durchmesser steht, muss auch der Durchmesser abgeschätzt werden. Der Waldstandort 60 „Typischer Hochstauden-Fichten-Wald“ wird als mässig bis gut wüchsig eingestuft (Burger et al. 1996). So müsste bei den Ertragstafeln für die Bonität einen Wert von 18 oder 20 gewählt werden. Dies steht jedoch im Widerspruch zum Wachstumsmodell von Ryter (2014), welches für das Alter von 50 Jahren eine Höhe von 12 m angibt. Wird aufgrund dessen eine Bonität von 12 gewählt, ergibt sich ein Oberdurchmesser von 14 cm für ein Alter von 40 Jahren (EAFV 1983). Da die Ertragstafeln für das Mittelland und für Bestände mit mässiger Hochdurchforstung entwickelt wurden, ist dieser Wert mit Vorsicht zu verwenden. Bezogen auf die Stammzahl/ha muss damit gerechnet werden, dass die Fichten im Alter von 30 Jahren noch nicht einen Durchmesser von 16 cm aufweisen. Somit würde die Stammzahl/ha von 258 die Anforderungen von Viglietti (2010, zitiert in Fankhauser 2010) wie auch von Frehner et al. (2005) nicht erfüllen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass

bei den Feldaufnahmen nur die gepflanzten Fichten berücksichtigt wurden. Die vorhandene Naturverjüngung von Vogelbeere, Bergahorn und Fichte werden die Stammzahl/ha zusätzlich erhöhen. Die Untersuchungen von Schönenberger und Brang (2006) über die Naturverjüngung auf Windwurf Flächen in Hochlagen haben jedoch gezeigt, dass die Entwicklung sehr zögerlich verläuft. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Naturverjüngung gegenüber der Pflanzung erst zehn Jahre später die Schutzwirkung übernehmen kann (Schönenberger und Brang 2006, Frehner et al. 2005).

### 5.1.3 Synthese Schutzwirkung

Die Lawinenschutzwirkung ist zum aktuellen Zeitpunkt durch die Baumstöcke und die Querbäume mit einer maximalen Wirkhöhe von 1.4 m gegeben. Es wird davon ausgegangen, dass diese Schutzwirkung für die nächsten 20 Jahren erhalten bleibt - jedoch mit abnehmender Tendenz. Die gepflanzten Fichten erreichen in 22 Jahren die minimal erforderliche Höhe, da aber die Stammzahl/ha mit grosser Wahrscheinlichkeit zu gering ist, kann die Schutzwirkung zu diesem Zeitpunkt nicht übernommen werden. Die Naturverjüngung wird erst ca. zehn Jahre später die minimal erforderliche Höhe von 4.76 m erreichen. Das würde bedeuten, dass die abnehmende Schutzwirkung des Totholzes nicht unmittelbar durch die gepflanzten Fichten und die Naturverjüngung übernommen werden kann. Wie in Abbildung 41 dargestellt, kommt es somit zu einem Defizit bezüglich der Schutzwirkung.



**Abbildung 43: Verlauf der Schutzwirkung nach einer Störung, die Schutzwirkung der Verjüngung verläuft nicht synchron mit der abnehmenden Schutzwirkung des Totholzes, es kommt zu einem Schutzdefizit (Quelle: Kupferschmid Albisetti 2003).**

Da es sich bei den verwendeten Daten um eine Momentaufnahme der Situation handelt, lässt diese nur eine grobe Interpretation der Entwicklung der Schutzfunktion zu. Mithilfe Folgeaufnahmen könnte die Interpretation verbessert werden. Im Weiteren haben sich die Auf-

nahmen nur auf einen Teil der relevanten Elemente bezogen. Auch hier könnten mit weiteren Aufnahmen der Naturverjüngung, der Querbäume und der Holzersetzung ein Mehrwert an Information erzeugt werden. Die minimal erforderliche Höhe für die Baumverjüngung basiert zudem auf Extremwerten für ein 100-jähriges Ereignis. Das heisst, bei geringeren Schneehöhen kann die Baumverjüngung bereits zu einem früheren Zeitpunkt die Lawinenschutzwirkung übernehmen. Für die Entwicklung der Baumverjüngung spielen Faktoren wie z.B. kleinstandörtliche Wachstumsbedingungen, Wildeinfluss eine Rolle, die in dieser Arbeit nur mit einer groben Abschätzung berücksichtigt wurden. Durch den Einsatz von Simulationsmodellen wie beispielsweise „RegSnag“ könnte die Entwicklung der Verjüngung weiter verifiziert werden. Zuletzt ist die Beurteilung der Schutzwirkung gegenüber Lawinen auch von den verwendeten Grenzwerten abhängig. Diese sind je nach Literatur unterschiedlich und grundsätzlich nach ihrer Gültigkeit in Frage zu stellen. Aufgrund der erwähnten Gründe soll an dieser Stelle eine Entwicklung, welche zu keinem Schutzdefizit führt, nicht ausgeschlossen werden.

## 5.2 Lawinensimulation

### 5.2.1 Methode

#### Input-Parameter

Mittels einer Parameterstudie konnte die Sensitivität der Eingangsgrößen zum Teil erfasst werden. Für die Parameterstudie wurden die Werte bezüglich der Kohäsion, der Temperatur, des K-value, des Durchmessers der Bäume sowie der Höhe der Erosionsschicht berücksichtigt, wobei die Erosionshöhe in dieser Arbeit jeweils der Hälfte der Anrissmächtigkeit entspricht, was jedoch eine starke Vereinfachung der Realität ist. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Parametern, können diese nicht einzeln betrachtet werden. So war es nur begrenzt möglich Tendenzen festzustellen, wenn für die Parameter höhere respektive tiefere Werte eingesetzt wurden.

Mittels Kalibrierung der Eingabewerte wurde ein Lawinenereignis am Wilerhorn nachberechnet. Aufgrund der ungenügenden Informationsgrundlage gestaltete sich die Nachberechnung allerdings als schwierig. Durch die fehlenden Informationen bezüglich der Anrissmächtigkeit, der Anrissfläche sowie einer klar definierten Auslaufstrecke basiert die Kalibrierung der Parameter auf Annahmen. Für die Anrissmächtigkeit wurden die Werte der SLF-Beobachterstation Hasliberg verwendet. Nach der Korrektur des Wertes für die Untersuchungsfläche ergab dies lediglich einen Wert von 14 cm für die Anrissmächtigkeit. Für eine Lockerschneelawine wird dieser Wert als zu tief eingestuft. Aufgrund der Topographie wurde die Anrissmächtigkeit, wegen vermuteter Tribschneeablagerungen, auf 40 cm erhöht. Aufgrund der Beschreibung der Lawine aus dem Jahr 1963 handelte es sich dabei um eine schmale Lockerschneelawine. So wurde bei der Bestimmung der Anrissfläche eine maximale Breite von 30 m berücksichtigt. Dies ergab ein Lawinenvolumen von  $1378 \text{ m}^3$ , welches als ein realistisches Volumen für eine kleine Lawine eingeschätzt wird. Trotz der vielen Unsicherheiten kann bezüglich der Auslaufstrecke eine gewisse Übereinstimmung gefunden werden: Wie beim Lawinenereignis von 1963 durchfließt die modellierte Lawine die erste und zweite Reihe der Bremshöcker und kommt im Auffangbecken hinter dem Damm zum Stillstand. Die Lawine von 1963 floss etwas östlicher durch die Bremshöcker als die modellierte Lawine. Dieser Unterschied erstaunt etwas, da die Anrissörtlichkeit mithilfe alter Fotos bestimmt werden konnte und so in die Bestimmung der Anrissfläche einfluss. Mit einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 21 m/s entspricht die Lawine nach Sauermoser et. al (2011b 65) einer trockenen Fließlawine. Auch die Fließhöhe bei flächigen Abflüssen von 1.5 m bis 2 m wird von Sauermoser et al. (2011b 68) als Charakteristika von Fließlawinen bezeichnet. Da die Eingabewerte auf vielen Annahmen basieren, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sie genau den Verhältnissen von 1963 entsprechen. Im Weiteren ist

anzunehmen, dass auch mit einer Kombination von anderen Eingabewerten ein ähnliches Resultat erzeugt werden könnte.

### **Szenariobildung**

Aufgrund des Holzschlages im Jahr 2010 war klar, dass ein Szenario (2007) die Situation vor dem Holzschlag wiedergibt und ein Szenario (2016) der Situation nach dem Holzschlag entspricht. Das Szenario 2020 wurde als Referenzszenario für eine extreme Bestandesentwicklung definiert, welches aufzeigen sollte, welche Berechnungsergebnisse sich ohne Wald im Anrissgebiet ergeben. Wie in der Praxis üblich wurden die möglichen Ereignisgrößen der Szenarien nach 30-, 100- und 300-jähriger Wiederkehrsdauer kategorisiert. Da festgestellt wurde, dass die Berechnungsergebnisse stark von der Anrissmächtigkeit und Anrissfläche, sprich Anrissvolumen, abhängig sind, musste ein besonderes Augenmerk auf die Bestimmung dieses Wertes gelegt werden. Die Definition der Anrissflächen stellte sich als der schwierigste Prozess heraus. Dies lässt sich auf die wenigen Anhaltspunkte, welche zur Verfügung standen, zurückführen. Da im Lawinenkataster des Kantons Bern die Prozessräume der Lawinenereignisse als einheitliche Fläche dargestellt werden, konnten die Anrissflächen von früheren Ereignissen am Wilerhorn nicht eruiert werden. So erfolgte die Bestimmung der Anrissgebiete, unter Berücksichtigung der entsprechenden Wiederkehrsdauer, nach standardisiertem Vorgehen, wie es in der Praxis gängig ist (Margreth 2015, Bründl et al. 2009). Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Abschätzung der Anrissflächen und deren Lage, zu einem grossen Teil auf eigener Annahme basiert. Mithilfe der Unterstützung lokaler Experten wurde versucht, diese Annahmen zu verifizieren. Das Modell für die semiautomatische Bestimmung von Lawinenanrissgebieten, welches vom SLF entwickelt wurde, könnte weitere nützliche Hinweise geben.

Die Bestimmung der Anrissmächtigkeit erfolgte mithilfe des Gumbel-Diagramms der SLF-Beobachterstation Hasliberg. Nach der Anleitung von Margreth (2015) wurden die Basiswerte des Gumbel-Plots für die Untersuchungsfläche korrigiert. Bei dieser Korrektur wurden für alle definierten Anrissgebiete der verschiedenen Szenarien die gleichen Durchschnittswerte bezüglich der Höhenlage und der Hangneigung verwendet. Bei einer detaillierteren Untersuchung müssten die spezifischen Werte jedes einzelnen Anrissgebietes berücksichtigt werden. Die berechneten Werte von 58 cm (30-j. Wiederkehrsdauer), 66 cm (100-j. Wiederkehrsdauer) und 74 cm (300-j. Wiederkehrsdauer) sind kleiner als die von der Abteilung Naturgefahren bestimmten Werte für die Region Berner Oberland Ost. Die Werte der Abteilung Naturgefahren stellen jedoch eine Annahme über eine grössere Region dar und beinhalten zusätzlich einen Sicherheitsfaktor. Bei der Verwendung der Extremwerte aus der Gumbel-Statistik muss jedoch bedacht werden, dass diese Statistik auf Extremwerten basiert. Wird die Messreihe der letzten 55 Jahre der Beobachterstation Hasliberg betrachtet, kann festge-

stellt werden, dass im Jahr 1966 der Wert des 100-jährigen Ereignisses erreicht wurde. Im Jahr 1976 entsprach die 3-Tages-Neuschneemenge knapp dem Wert des 30-jährigen Ereignisses. Alle anderen Werte liegen meist deutlich unter den definierten Anrissmächtigkeiten.

Aufgrund der fehlenden Datengrundlage bezüglich der Schneebedingungen am Wilerhorn wurde in dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass die Schneebedingungen am Wilerhorn identisch mit den Bedingungen bei der SLF-Beobachterstation Hasliberg sind. Diese Annahme kann mit Vorbehalt anhand einer Fotodokumentation vom 11. Januar 2012 bestätigt werden (vgl. Abb. 40).



**Abbildung 44: Flugaufnahme vom 11.02.2012 der Holzschlagfläche (Quelle: KAWA 2016).**

Auf obiger Aufnahme sind nur vereinzelt Baumstämme auf der Fläche zu erkennen, während der grösste Teil der Rauigkeitselemente vom Schnee überdeckt wird. An diesem Tag wurde bei der Messstation in Hasliberg eine Schneehöhe von 271 cm gemessen. Wird dieser Ausgangswert für die Untersuchungsfläche korrigiert, wird eine Schneehöhe von 138 cm ermittelt. Aufgrund des Wissens über die mittlere Baumstammhöhe von 140 cm, kann eine minimale Schneehöhe von 138 cm optisch bestätigt werden.

Durch die Bestimmung der Anrissfläche und der Anrissmächtigkeit ergab sich das Anrissvolumen, welches zwischen  $714 \text{ m}^3$  und  $29\,370 \text{ m}^3$  liegt. Nach der Einteilung von Bartelt et al. (2013) handelt es sich in dieser Grössenordnung um sehr kleine und kleine Lawinen. Aufgrund der gegebenen Prozessräume wurden entsprechende Dimensionen erwartet und scheinen plausibel. Das Anrissvolumen steigt einerseits bei zunehmender Wiederkehrsdauer. Dies begründet sich jeweils durch eine höhere Anrissmächtigkeit und eine grössere Anrissfläche. Andererseits steigt das Anrissvolumen auch von dem Szenario 2007 bis zum Szenario

rio 2020 an. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass beim Szenario 2007 die Bestockungsfläche am grössten und beim Szenario 2020 am kleinsten ist und das potentielle Lawinenanrissgebiet somit zunimmt.

Für die Modellierungen wurde die Annahme getroffen, dass bei einem Lawinenanriss mit bestimmter Anrissmächtigkeit die maximale Schneehöhe vorhanden ist. Diese wurden ebenfalls mithilfe des Gumbel-Plots berechnet. Für die Bestimmung der Höhe der Gleitfläche wurde von der maximalen Schneehöhe der entsprechenden Wiederkehrsdauer die jeweilige Anrissmächtigkeit subtrahiert. Dies ergab Gleitflächen auf einer Höhe von 1.27 m (30-j. Wiederkehrsdauer), 1.72 m (100-j. Wiederkehrsdauer), 1.99 m (300-j. Wiederkehrsdauer). Wie realistisch diese Annahme ist, muss in Frage gestellt werden. Die Messwerte der Beobachtersstation Hasliberg zeigen, dass im Jahr 1966, als die Anrissmächtigkeit des 100-jährigen Ereignis erreicht wurde, die maximale Schneehöhe sogar über dem Wert des 300-jährigen Ereignisses lag. Da das genaue Messdatum jedoch nicht eruiert werden konnte, ist nicht klar ob die Ereignisse zum gleichen Zeitpunkt auftraten. Die Berechnungen basieren jedoch auf der Annahme, dass die maximalen Werte des 3-Tages-Schneedeckenzuwachs und der maximalen Schneehöhe zum gleichen Zeitpunkt auftreten. So ergab sich, dass die Gleitfläche der Oberlawinen beim Szenario 2016 meist oberhalb der Wirkhöhe der Rauigkeitselemente auf der Holzschlagfläche lag. Einzig beim 30-jährigen Ereignis war die Wirkhöhe der Baumstämme um 13 cm höher als die Gleitfläche. Dies wurde jedoch bei den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Es soll nochmals betont werden, dass die Bildung der Szenarien auf Annahmen von Extremverhältnissen basieren. Beim Szenario 2007 scheint sich die Frage zu stellen, wie realistisch überhaupt ein Lawinenanriss unterhalb der Waldfläche ist. Beim Szenario 2016 wurde der Einfluss der vorhandenen Bodenrauhigkeit aufgrund der Höhe der Gleitfläche nicht berücksichtigt. Eine Reduktion der Anrissmächtigkeit wäre jedoch durchaus realistisch. Beim Szenario 2020 wird die angenommene Bestandesentwicklung als eher unwahrscheinlich eingeschätzt. Käme es zu diesem Szenario, müsste die Anrissmächtigkeit, aufgrund der erhöhten Bodenrauhigkeit, wiederum verkleinert werden.

## 5.2.2 Resultate der Lawinensimulation

### Maximale Geschwindigkeit

Bei den Resultaten kann ein Zusammenhang zwischen der maximalen Geschwindigkeit und dem zunehmenden Anrissvolumen festgestellt werden. (vgl. Abb. 45). Diesen Zusammenhang bestätigen auch McClung und Schaerer (2006, 130), die maximale Geschwindigkeit steht in direkter Abhängigkeit zu: (1) Masse des Lawinenanrisses; (2) Erosionsmasse; (3) Reibungseigenschaften; (4) Höhenunterschied der Lawinenlaufbahn; und (5) Hangneigung

entlang der Lawinenlaufbahn. Laut Sauer Moser et al. (2011b, 65) sind Geschwindigkeiten zwischen 10-20 m/s charakteristisch für nasse Fließlawinen, 20-40 m/s entsprechen trockenen Fließlawinen und 30-70 m/s sind bei Staublauinen vorzufinden. Werden die maximalen Geschwindigkeiten des Szenarios 2007 betrachtet (vgl. Tab. 7), entsprechen diese nach Sauer Moser et al (2011b, 65) einer nassen Fließlawine. Werden die Lawinen dieses Szenarios als Schneesrutsche betrachtet, scheint dies eine realistische Vorstellung zu sein. Dieses Bild steht jedoch etwas im Gegensatz zu der Temperatur, welche mit -10 °C definiert wurde. Die maximalen Geschwindigkeiten des Szenarios 2016 liegen im Bereich von trockenen Fließlawinen. Auch dies deckt sich mit den erwarteten Resultaten aufgrund der gewählten Eingabewerte. Das Szenario 2020 weist die höchsten Geschwindigkeiten auf. Sie liegen ausserhalb der Klasse der trockenen Fließlawinen. Dies lässt sich jedoch durch die steile Hangneigung nach dem ersten Drittel der Lawinenlaufbahn und die Kanalisierung der Lawine durch den Geländeeinschnitt erklären. McClung und Schaerer (2006, 130) bestätigen eine höhere Geschwindigkeit sobald Lawinen kanalisiert werden. Dabei treten aufgrund der Reibung auf der Seite die höchsten Geschwindigkeiten in der Mitte der Runse auf. Dies lässt sich auch aus den Resultaten des Szenario 2020 (100- und 300-jähriges Ereignis) erkennen. McClung und Schaerer (2006, 130) besagen, dass mit dem Höhenunterschied (H) der Lawinenlaufbahn durch die mathematische Formel  $v_{max} = 1.8 * \sqrt{H}$  eine Obergrenze für die maximale Geschwindigkeit der Lawine definiert wird. Dieser Zusammenhang soll genutzt werden um die Resultate der Geschwindigkeit zu plausibilisieren. Wie aus der Tabelle 7 zu entnehmen ist, werden diese Obergrenzen bei keinem Ereignis überschritten. Daraus wird der Schluss gezogen, dass die Resultate bezüglich der maximalen Geschwindigkeiten als realistisch betrachtet werden können.

**Tabelle 7: Höhenunterschied der Lawinenlaufbahn, berechnete Obergrenze der max. Geschwindigkeit, effektive Geschwindigkeit der Szenarien 2007, 2016, 2020 mit Wiederkehrsdauer 30-, 100- und 300-Jahre.**

Szenario	2007			2016			2020		
	30	100	300	30	100	300	30	100	300
Wiederkehrsdauer [Jahre]	30	100	300	30	100	300	30	100	300
Höhenunterschied [m]	100	110	115	260	340	510	420	950	1000
Obergrenze max. V [m/s]	18	19	19	29	33	40	36	55	57
effektive Geschwindigkeit [m/s]	10.4	12.5	15	23	25.6	28.3	26.9	42.5	53.9

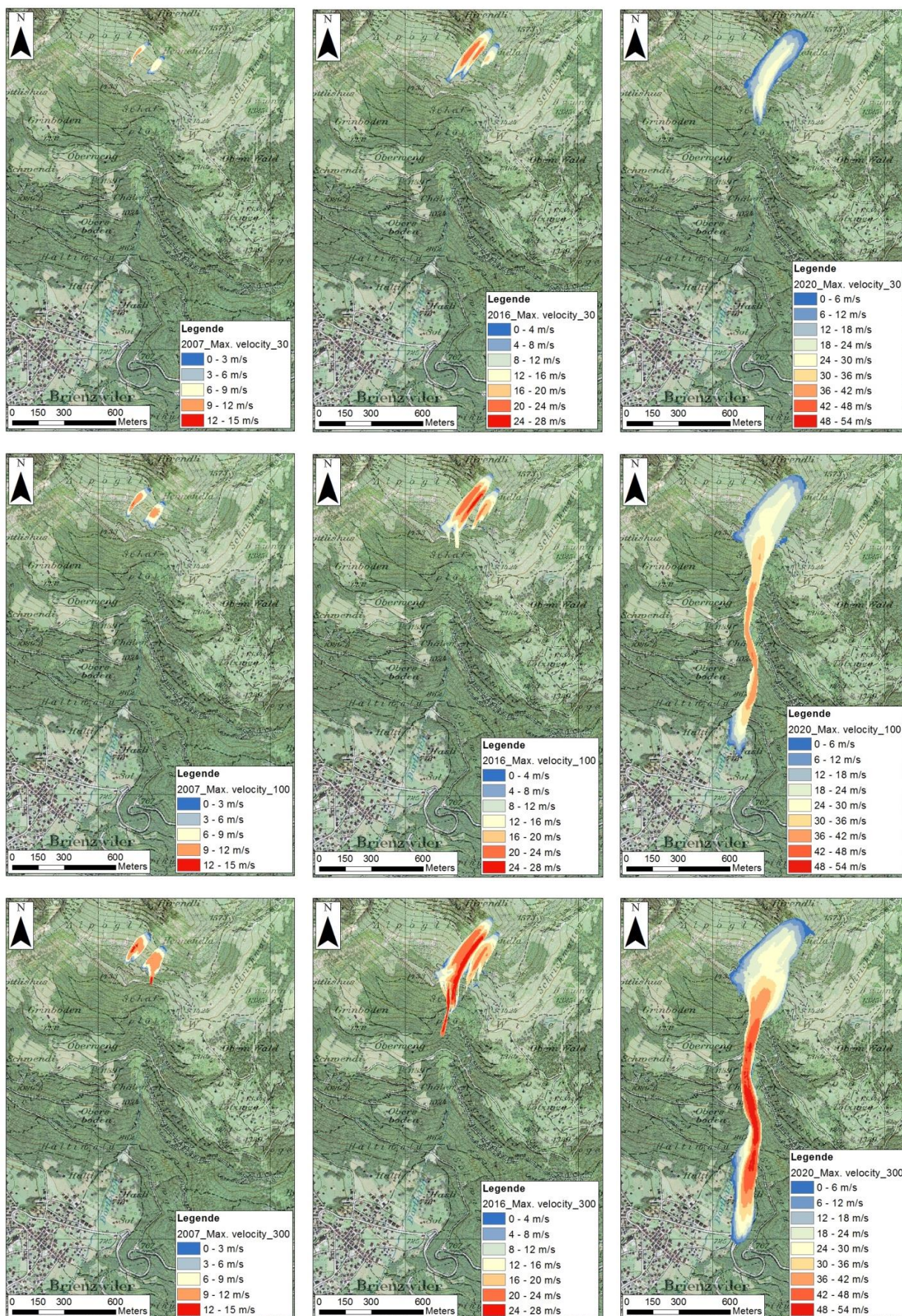


Abbildung 45: Vergleich der maximalen Geschwindigkeit der Szenarien 2007, 2016 und 2020, dargestellt in einem 30-jährigen(1. Zeile), 100-jährigen (2. Zeile) und 300-jährigen Ereignis (3. Zeile).

## Maximaler Druck

Das Resultat des maximalen Druckes entspricht dem Lawinendruck einer Fließlawine, welcher auf ein nicht umströmtes Hindernis erfolgt (Sauer Moser et al. 2011b, 91). Dieser dynamische Aufpralldruck [ $P_f$ ] wird mit dem Impulssatz  $P_f = \rho * v^2$  berechnet und ist proportional zur quadrierten Fließgeschwindigkeit [ $v^2$ ] und der Dichte [ $\rho$ ] der Fließlawine. Wie im vorangehenden Abschnitt dargelegt, wird die Geschwindigkeit als realistisch eingeschätzt. So könnte grundsätzlich aufgrund der Abhängigkeit des Druckes von der Geschwindigkeit abgeleitet werden, dass die Resultate des Druckes auch plausibel sind (vgl. Abb. 46). Diese Schlussfolgerung wird anhand des Kennwertes für die Fließlawinendichte überprüft. In der Praxis wird oft eine durchschnittliche Fließdichte von  $300 \text{ kg/m}^3$  verwendet (Margreth 2007). In der Literatur wird jedoch zwischen trockenen und nassen Fließlawinen unterschieden. Es werden Werte von  $50\text{-}300 \text{ kg/m}^3$  (trocken) und  $150\text{-}500 \text{ kg/m}^3$  genannt (McClung und Schaeffer 2006, 134, Hanausek 2000, 96, Margreth 2015). In der Extended-Version von RAMMS::AVALANCHE wird eine variierende Dichte in der Lawine berücksichtigt. Mithilfe des Impulssatzes soll die durch das Programm berechnete Dichte, welche zur Bestimmung des maximalen Druckes verwendet wurde, bestimmt werden. Wie aus der Tabelle 8 zu entnehmen ist, liegen die so ermittelten Werte für die Dichte zwischen  $214 \text{ kg/m}^3$  und  $364 \text{ kg/m}^3$ . Dies deckt sich grundsätzlich mit den genannten Werten in der Literatur. Die Werte oberhalb von  $300 \text{ kg/m}^3$  erstaunen indes, da durch die Wahl der Eingabedaten keine Kennwerte für Nassschneelawinen erwartet wurden. Ansonsten lassen die Werte der Fließdichte auf realistische Druckwerte schließen. Auch Hanausek (2000, 96) bestätigt, dass Lawinendrucke zwischen 50 und 1000 kPa in Fließrichtung erreicht werden. Werden die berechneten Werte mit den Intensitätsklassen für den Prozess Fließlawine verglichen, welche für die Bildung der Intensitätskarten gültig sind, muss festgestellt werden, dass die Druckwerte wohl zu hoch sind. Bei jedem berechneten Ereignis treten Werte auf, die einer starken Intensität ( $>30 \text{ kPa}$ ) entsprechen. Dies scheint eher unrealistisch zu sein.

**Tabelle 8: Maximale Geschwindigkeit, maximaler Druck und Dichte der Szenarien 2007, 2016 und 2020 mit Wiederkehrsdauer 30-, 100- und 300 Jahre.**

Szenario	2007			2016			2020		
	30	100	300	30	100	300	30	100	300
Wiederkehrsdauer [Jahre]	30	100	300	30	100	300	30	100	300
max. Geschwindigkeit [m/s]	10.4	12.5	15	23	25.6	28.3	26.9	42.5	53.9
max. Druck [kPa]	36.6	49.2	59.1	113.2	158.2	207.2	158.6	585.5	1057.36
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	338	315	263	214	241	259	219	324	364

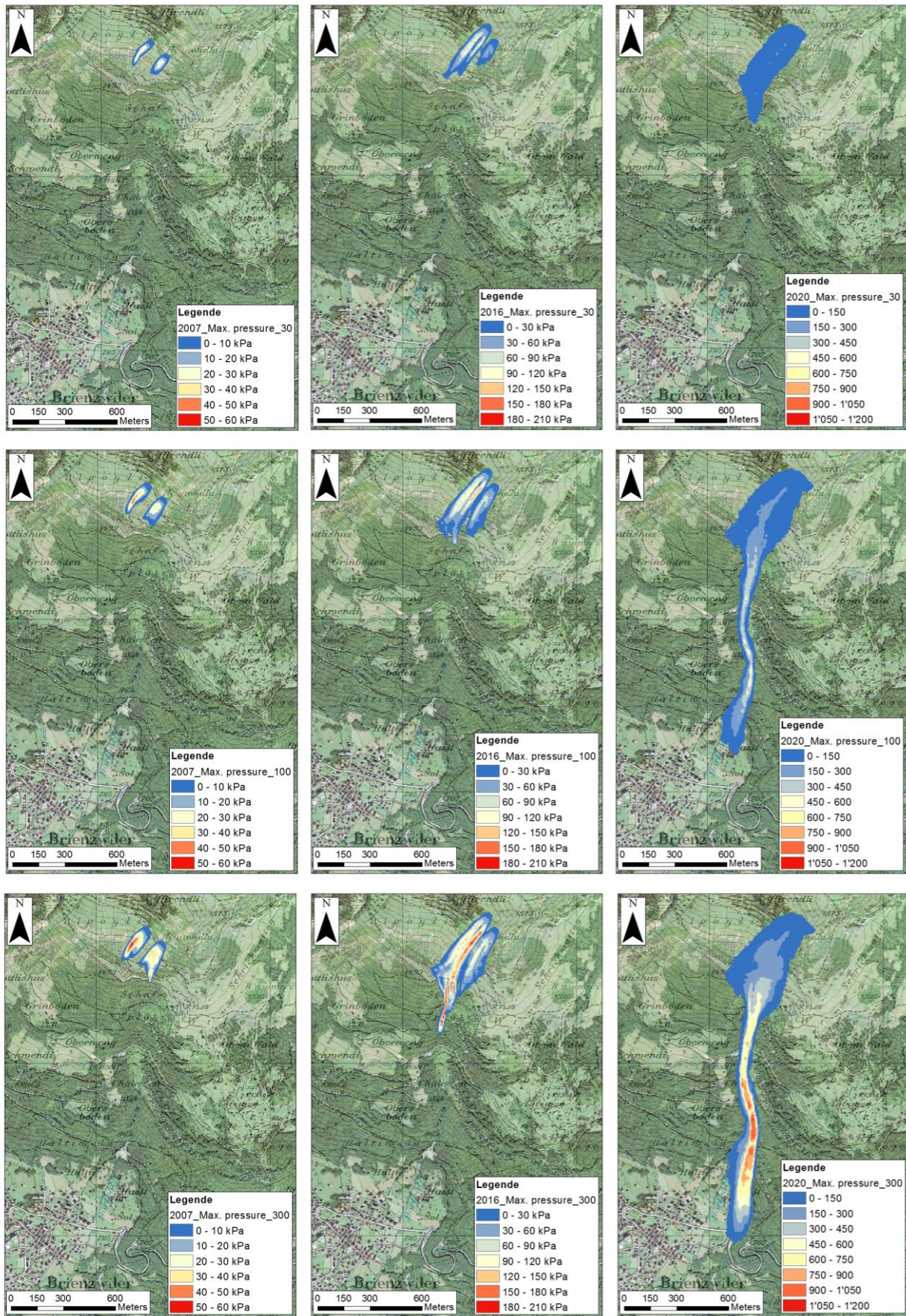


Abbildung 46: Vergleich des maximalen Druck der Szenarien 2007, 2016 und 2020, dargestellt in einem 30-jährigen (1. Zeile), 100-jährigen (2. Zeile) und 300-jährigen Ereignis (3. Zeile).

**Maximale Höhe**

Sauermoser et al. (2011b, 68) beschreibt die typischen Fliesshöhen eines flächigen Abflusses von Fliesslawinen mit 1 bis 3 m. Der Vergleich mit den Resultaten zeigt, dass die Werte über grosse Teile in diesem Bereich liegen (vgl. Abb. 47). Es gibt zwei Bereiche an denen höhere Fliesshöhen bestimmt wurden. Der eine Bereich liegt bei der Geländeabflachung bei Alpogli, wobei es sich wie im Feld beobachtet um eine kleine Mulde handelt. Dort werden beim Szenario 2016 (300-j. Wiederkehrsdauer) Fliesshöhen von bis zu 5 m berechnet. Beim Szenario 2020 (300-j. Wiederkehrsdauer) sind es sogar 8 m. Der zweite Bereich liegt beim Geländeeinschnitt, wo beim Szenario 2020 (300-j. Wiederkehrsdauer) Fliesshöhen von 5 m berechnet wurden. Dies scheint jedoch aufgrund der Kanalisierung der Lawine als realistisch.

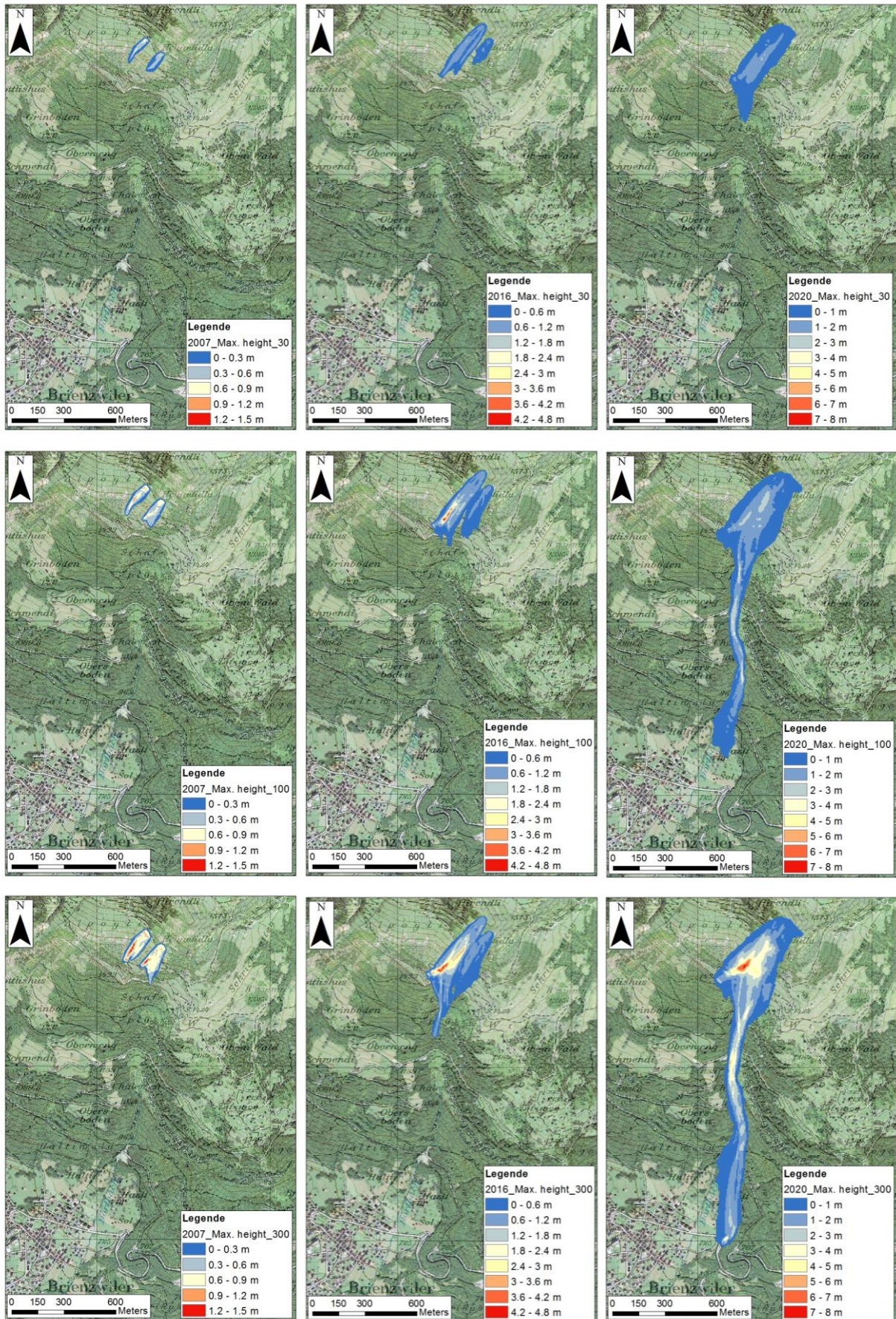


Abbildung 47: Vergleich der maximalen Höhe der Szenarien 2007, 2016 und 2020, dargestellt in einem 30-jährigen (1. Zeile), 100-jährigen (2. Zeile) und 300-jährigen Ereignis (3. Zeile).

## Wechselwirkung Wald-Lawine

Feistl et al. (2014) hat in Abhängigkeit zur Stammzahl/ha, zum „K-value“, zur Anordnung der Bäume (Einzel, Gruppe) und zur Astigkeit des Baumes die Höhen sowie das Volumen der Schneeablagerungen (Detrainment) untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Ablagerungshöhen zwischen 1 cm und 50 cm als angemessen betrachtet werden können (ebd.). Die Resultate der Modellierungen liegen meist in diesem Bereich (vgl. Abb. 48). An einzelnen Stellen resultieren Höhen bis 7.5 m (Szenario 2020). Diese sind jedoch auf den Einfluss der Bremsverbauung zurückzuführen. Bei den Resultaten fällt auf, dass meist beim Übergang von einer Freifläche zur Waldbestockung und im Anriss- und Beschleunigungsbereich höhere Werte bezüglich des „Detrainments“ dargestellt werden. Für den Anrissbereich wurde dies als plausibel erklärt, da aufgrund tieferer Geschwindigkeiten auch mehr abgelagert werden kann. Aufgrund der variierenden Resultate (Szenario 2016), kann diese Annahme nicht vollumfänglich bestätigt werden. Die höheren Werte bei Übergängen von einer Freifläche in den Wald könnten aufgrund der Geländeabflachung bei Alpogli erklärt werden. Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass zum aktuellen Zeitpunkt die Berechnungen des Detrainments wenig sensitiv auf unterschiedliche Eingabewerte reagieren. Zudem werden mögliche Erosionsprozesse von Schnee im Wald noch nicht berücksichtigt.

Teich et al. (2012, 2014) hat aufgezeigt, dass der Wald einen wesentlichen Einfluss auf die Auslauflänge einer Lawine ausüben kann. Dies kann auch beim Vergleich der Szenarien 2016 und 2020 mit Wald und ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn festgestellt werden (vgl. Abb). Aufgrund der Schneeablagerungen im Wald, wird der Lawine Schneemasse entzogen.-Dies führt zu einer Verkürzung der Auslaufstrecke. Bei der Betrachtung der Resultate darf jedoch nicht vergessen gehen, dass bei der Situation ohne Wald die Lawine aufgrund der grösseren Erosionsfläche noch zusätzliche Schneemasse aufnimmt. Beim berechneten Untersuchungsobjekt muss auch der Topografie einen Einfluss auf die Auslauflänge zugeschrieben werden. Für die Lawinenlänge scheint entscheidend zu sein, ob die Lawine über die Geländeabflachung bei Alpogli in den Bereich des Geländeeinschnittes kommt. Ist dies der Fall, fließt die Lawine immer entlang des Dorfbaches durch den Haltiwald und stoppt erst kurz vor Hasli (Szenario 2016 ohne Wald 100-j. Ereignis) oder fließt weiter und erreicht vereinzelt Häuser und die Dorfstrasse (Szenario 2020 100-, 300-j. Ereignis; Szenario 2016 ohne Wald 300-j. Ereignis; Szenario 2020 ohne Wald 30-,100-,300-j. Ereignis). Einzige Ausnahme bildet das 300-jährige Ereignis des Szenarios 2016, bei welchem trotz Überfließen der Geländestufe die Lawine im Bereich des Geländeeinschnittes zum Stillstand kommt. Dies lässt sich wohl auf die kleineren Fliesshöhen von max. 1.8 m zurückzuführen. Wie in der Literatur oft diskutiert wird, ist auch bei den Resultaten ein Trend festzustellen, welcher besagt, dass mit zunehmender Lawinengrösse die Waldwirkung auf die Auslauflänge ab-

nimmt (vgl. Abb.). Beim 100- und 300-jährigen Ereignis des Szenario 2020 müssen die Resultate bezüglich der Auslauflänge kritisch betrachtet werden, da unklar ist, welchen Einfluss die Waldzerstörung bei den Berechnungen auf die Auslaustrecke hat. Durch die frei werdende Energie beim Brechen der Bäume müsste die Auslaufstrecke tendenziell ansteigen.

Ab einem Lawinendruck von 100 kPa wird in der Literatur eine mögliche Waldzerstörung diskutiert (Sauer Moser et al. 2011, 101). Im Vergleich mit den Resultaten fällt auf, dass beim 300-jährigen Ereignis des Szenarios 2016 im Wald Werte über 100 kPa modelliert werden, dies jedoch zu keiner Waldzerstörung führt. Als möglicher Grund werden die relativ tiefen Fliesenhöhen von 1.2 m bis 1.8 m betrachtet. Die Betrachtung des 100-jährigen Ereignisses im Szenario 2020 lässt zudem den Schluss zu, dass in der Modellierung eine Waldzerstörung erst ab 300 kPa auftritt.

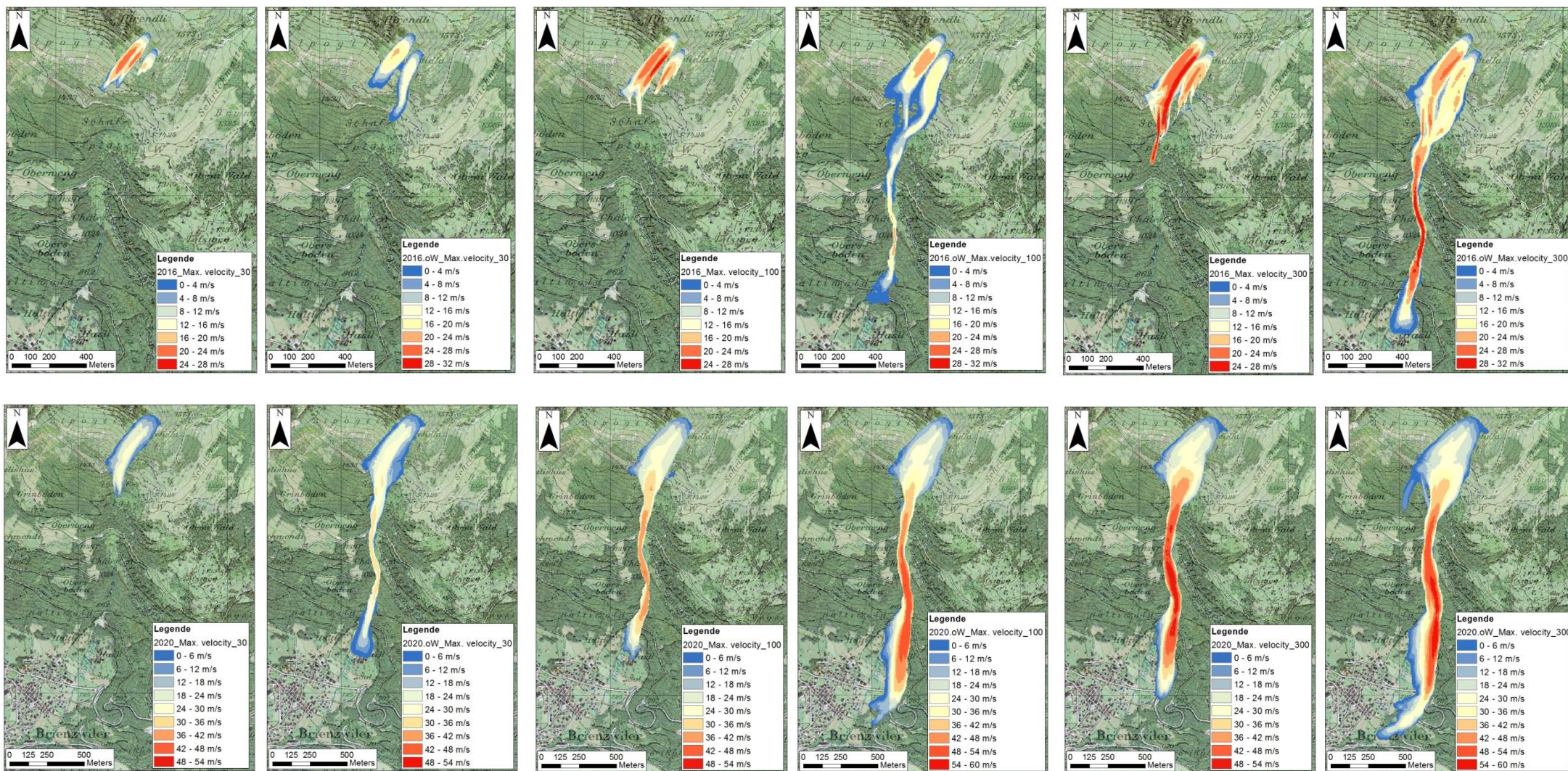


Abbildung 48: Vergleich der maximalen Geschwindigkeiten zwischen den Szenarien 2016 und 2016 ohne Wald (1. Zeile) sowie Szenario 2020 und 2020 ohne Wald (2. Zeile) mit einem 30-jährigen Ereignis (1+2 Spalte), 100-jährigen Ereignis (3+4 Spalte) und 300-jährigen Ereignis (5+6 Spalte).

### 5.2.3 Synthese

Bei der Modellierung der einzelnen Szenarien wurden alle Parameter gleich belassen und nur die Anrissmächtigkeit und die Anrissfläche, sprich das Anrissvolumen für die jeweilige Wiederkehrsdauer verändert. Dies entspricht nur begrenzt der Realität, macht jedoch den Vergleich der verschiedenen Szenarien transparenter. Bei einem Quervergleich über alle Ereignisse kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Anrissvolumen und der Lawinenlänge sowie den dargestellten Werten der Lawinendynamik erkannt werden. Die dargestellten Resultate der Modellierungen können jedoch nicht als allgemeingültig betrachtet werden, da sie nur unter Berücksichtigung der verwendeten Inputparameter gelten. Da die Modellierung auf vielen Annahmen basiert, sind auch die Aussagekraft und die Qualität der Berechnungen als kritisch zu beurteilen. Der Vergleich der berechneten Werte mit Richtgrößen zur Lawinendynamik zeigt jedoch, dass die Ergebnisse durchaus in einem realistischen Bereich liegen. Weitere Anwendungen mit veränderten Variablen würde die Aussagekraft der Modellierung erhöhen. Insgesamt ist zu bedenken, dass die Modellierungen Extremereignisse darstellen. Die Frage, wie realistisch ein Lawinenanriss überhaupt ist, müsste mit lokalen Experten geklärt werden, denn diese Entscheidung kann das Programm dem Anwender (noch) nicht abnehmen.

## 6 Schlussfolgerungen

Die aktuelle Schutzwirkung der Untersuchungsfläche am Wilerhorn gegenüber Bodenlawinen wird als hoch eingestuft. Die vorhandenen Baumstöcke und Querbäume führen zu einer Stabilisierung der Schneedecke. Dies zeigte sich im Winter 2011/12, als die Schneehöhen im langjährigen Vergleich hoch waren und die Rauigkeitselemente durch die Schneedecke überdeckt wurden. Trotz kleinerer Hangneigung, kam es auf angrenzenden Wiesenflächen zu deutlichen Schneebewegungen. Daraus kann die Wirkung der Bodenrauigkeit abgeleitet werden. Durch die Wirkhöhe der Querbäume von 0.6 m und der Baumstöcke von 1.4 m ist die stabilisierende Wirkung auf die Schneedecke jedoch in der Höhe begrenzt. So ist die Schutzwirkung gegenüber Oberlawinen, bei welchen die Gleitfläche höher als 1.3 m über dem Boden liegt, beschränkt. Aufgrund der natürlichen Holzabbauprozesse muss im Allgemeinen mit einer abnehmenden Schutzwirkung der Baumstöcke und Querbäumen gerechnet werden. Es wird jedoch eine minimale Schutzwirkung bis ins Jahr 2036 erwartet. Bis zu diesem Zeitpunkt sollten die im Jahr 2012 gepflanzten Fichten die Schutzfunktion aufgrund ihrer Höhe übernehmen können. Da jedoch damit gerechnet wird, dass dann eine zu geringe Stammzahl vorhanden ist, welche die geforderte Höhe besitzt, muss die vollumfängliche Übernahme der Schutzfunktion in Frage gestellt werden. Diese Beurteilung gilt aufgrund der verwendeten Grenzwerte für extreme Szenarien und gilt daher eher als pessimistisch.

Die verschiedenen Szenarien von Waldzuständen im Hennefeldla-Wald wirken sich stark auf die simulierten Lawinen aus. Mit abnehmender Waldfläche nehmen die Auslauflänge sowie die Werte bezüglich der Fliessgeschwindigkeit, der Fliesshöhe und des Aufpralldruckes von Lawinen zu. Dies erstaunt insofern nicht, als dass der Hennefeldla-Wald potentiell Lawinenanrissgebiet bestockt. Durch den Holzschlag wurden die wesentlichen Qualitäten eines funktionstüchtigen Schutzwald stark vermindert. Die daraus resultierende Vergrösserung der Lawinenanrissfläche führt zu einem höheren Lawinenanrissvolumen, welches die Resultate der Modellierung massgebend bestimmt. Da bei den Berechnungen jeweils nur die Werte bezüglich der Anrissmächtigkeit und Anrissfläche verändert wurden, lässt sich daraus schliessen, dass die Extended-Version von RAMMS::AVALANCHE sehr sensitiv auf veränderte Lawinenanrissvolumen reagiert. Aufgrund der topographischen Gegebenheiten und eines intakten Lawinenschutzwaldes entlang der Lawinenlaufbahn waren die Auswirkungen auf Extremszenarien begrenzt. Die Wichtigkeit des Hennefeldla-Waldes als Lawinenschutzwald konnte mit der Modellierung eines Szenarios ohne Waldbestockung im Anrissgebiet aufgezeigt werden. Bei diesem Szenario kamen die modellierten Lawinen beim 100- und 300-jährigen Ereignis erst im Bereich des Dorfes Brienzwiler zum Stillstand.

Die Berücksichtigung von Situationen mit und ohne Wald entlang der Lawinenlaufbahn hat einen wesentlichen Einfluss auf die simulierte Auslaufstrecke der Lawine. Ist kein Wald entlang der Lawinenlaufbahn vorhanden, ist die Auslaufstrecke länger als bei einer Situation mit Wald. Dies lässt sich auf zwei wesentliche Faktoren zurückführen: Erstens nimmt bei einer Situation ohne Wald die Lawine entlang ihrer Laufbahn zusätzlich Schnee auf, was die Schneemasse weiter erhöht. Zweitens kommt es bei einer Lawine, welche durch eine Waldfläche fließt, zu Schneeablagerungen hinter den Bäumen. Diese Reduktion der Schneemasse führt bei den Simulationen zu einer kürzeren Auslaufstrecke. Dabei wird eine allfällige Erosion von Schnee im Wald durch das Berechnungsmodell nicht berücksichtigt, wobei dies nicht der Realität entspricht. Im Weiteren müssen die Resultate bezüglich der Auslauflänge der Lawinen bei den Ereignissen mit Waldzerstörung kritisch beurteilt werden. Die werdende Energie, welche beim Brechen der Bäume entsteht, erhöht die Auslauflänge in der Realität tendenziell.

Der Vergleich mit Lawinendynamik-Kennwerten aus der Literatur zeigt, dass die berechneten Werte durchaus als realistisch eingeschätzt werden können. Weitere Anwendungen und Validierungen dieser sich in Entwicklung befindenden Version von RAMMS::AVALANCHE, werden helfen, die Lawinengefahr in bewaldeten Gebieten und die Lawinenschutzfunktion des Waldes noch besser abzuschätzen.

## 7 Literaturverzeichnis

Albrecht L, 1991. Die Bedeutung des toten Holzes im Wald. Forstwiss. Cent.bl., 110 (2), 106-113.

Ammann M, 2006. Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. Doktorarbeit, veröffentlicht. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 191 S.

BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2008. Sturmschaden-Handbuch. Vollzugshilfe für die Bewältigung von Sturmschadenereignissen von nationaler Bedeutung im Wald (3. Überarbeitete Auflage). Bundesamt für Umwelt, Bern, 241 S.

Bartelt P, Bühler Y, Buser O, Christen M, Meier L, 2012. Modelling mass dependent flow regimes transitions to predict the stopping and depositional behavior of snow avalanches. Journal Geophysical Research, 117 (F1)

Bartelt P, Bühler Y, Christen M, Deubelbeiss Y, Salz M, Schneider M, Schumacher L, 2013. User Manual v1.5. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 110 S.

Bärtschi C, 2011. Kieselkalke der Schweiz: Charakterisierung eines Rohstoffes aus geologischer, Petrographischer, wirtschaftlicher und umweltrelevanter Sicht. Doktorarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 175 S.

Bebi, P, Kulakowski, D, Rixen C, 2009. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems – state of research and implications for management. Forest Ecology and Management, 257: 1883-1892.

Bebi P, Putallaz J.-M, Fankhauser M, Schmid U, Schwitter R, Gerber W, 2015. Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 166, 168–176.

Brang P, Schönenberger W, Bachofen H, Zingg A, Wehrli A, 2004. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.). Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen. WSL, Birmensdorf, S. 55-66.

Bründl M 2009. Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 420 S.

Burger T, Stocker R, Danner E, 1996. Standortkundlicher Kartierungsschlüssel für die Wälder der Kantone Bern und Freiburg. Kommentare zu den Waldgesellschaften. ARGE Kaufmann & Partner, Burger + Stocker, Lenzburg, 121 S.

Christen M, Gerber W, Graf Ch, Bühler Y, Bartelt P, Glover J, Mc Ardell B, Fesitl T, Steinkogler W, 2012. Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit „RAMMS“ (Rapid

- MASS Movements). Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, 169, 282-293.
- EAFV (Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen), 1983. Fichte Etragstafeln (3 Auflage). EAFV, Birmensdorf, 77 S.
- EISLF (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Schnee und Lawinen im Winter 1962/63. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern, 139 S.
- Fankhauser M, 2010. Lawinenschutzwirksamkeit auf Vivian-Windwurfllächen. Stand der Verjüngung 20 Jahre nach dem Sturmereignis. Bachelorarbeit. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos und Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 47 S.
- Feistl T, Bebi P, Teich M, Bühler Y, Christen M, Thuro K, Bartelt P, 2014. Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches. *Journal of Glaciology*, 60 (219), 124-138.
- Feistl T, 2015. Vegetation effects on avalanche dynamics. Doktorarbeit. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos und Technische Universität, München, 121 S.
- Feistl T, Bebi P, Christen M, Margreth S, Diefenbach L, Bartelt P, 2015. Forest damage and snow avalanche flow regime. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 1-14.
- Frehner M, Wasser B, Schwitter R, 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- Frey W, Thee P, 2002. Avalanche protection of windthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *Forest Snow Landscape Research*, 77 (1/2), 89-107.
- Gnägi C, Labhart T-P, 2015. Geologie der Schweiz (9. überarb. Aufl.). hep-Verlag, Bern, 208 S.
- Gwerder L, 2011. Die Zersetzung des Totholzes auf Vivian-Sturmflächen. Semesterarbeit, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 25 S.
- Hanausek E, 2000. Die Lawine. In: Gabl K, Lackinger B, Rabofsky E (Hrsg.). *Lawinenhandbuch* (6. Aufl.). Tyrolia-Verlag, Innsbruck-Wien, S. 85-106.
- Hanausek E, Hopf J, 200. Schutz vor Lawinen, Permanenter Lawinenschutz. In: Gabl K, Lackinger B, Rabofsky E (Hrsg.). *Lawinenhandbuch* (6. Aufl.) Tyrolia-Verlag. Innsbruck-Wien, S. 107-115.

Harvey S, Rhyner H, Schweizer J, 2014. Lawinenkunde. Bruckmann Verlag GmbH, München, 192 S.

Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M. and Morice C.P., 2012: Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117.

KAWA (Amt für Wald des Kantons Bern), 1965. Winterbeobachtungen 1962/63 und 1963/64 in den Lawinenverbaugebieten des Berner Oberlandes. Forstinspektion Oberland, Interlaken, 7 S.

KAWA (Amt für Wald des Kantons Bern) 2002. Vereinfachter Standortschlüssel. Abgerufen am 13.07.2016,  
[https://www.vol.be.ch/vol/de/index/wald/wald/planung\\_grundlagen/standortschluesel.assetref/dam/documents/VOL/KAWA/de/Planung\\_Grundlagen/Standortschluesel/kawa-standortschluesel-register.pdf](https://www.vol.be.ch/vol/de/index/wald/wald/planung_grundlagen/standortschluesel.assetref/dam/documents/VOL/KAWA/de/Planung_Grundlagen/Standortschluesel/kawa-standortschluesel-register.pdf)

KAWA (Amt für Wald des Kantons Bern), 2003. Regionaler Waldplan Brienersee 2003. Abgerufen am 13.07.2016,  
[http://www.vol.be.ch/vol/de/index/wald/wald/planung\\_grundlagen/planung\\_rwp/planung\\_rwp\\_13.assetref/dam/documents/VOL/KAWA/de/Planung\\_Grundlagen/Regionale\\_Waldplanung/13\\_Brienersee/planung\\_rwp\\_13\\_T\\_Text.pdf](http://www.vol.be.ch/vol/de/index/wald/wald/planung_grundlagen/planung_rwp/planung_rwp_13.assetref/dam/documents/VOL/KAWA/de/Planung_Grundlagen/Regionale_Waldplanung/13_Brienersee/planung_rwp_13_T_Text.pdf)

KAWA (Amt für Wald des Kantons Bern), 2016. Lawinenverbauung Wilerhorn-Alpogli und weitere Dokumente. Projektordner. Naturgefahren Abteilung, Interlaken

Keller M, 2013. Feldaufnahme Anleitung für das schweizerische Landesforstinventar. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Abgerufen am 25.07.2016,  
[https://www.lfi.ch/publikationen/publ/LFI4\\_AAAnleitung\\_2013.pdf](https://www.lfi.ch/publikationen/publ/LFI4_AAAnleitung_2013.pdf)

Kupferschmid Albisetti A.D, 2003. Succession in a protection forest after picea abies dieback. Doktorarbeit. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 237 S.

Kupferschmid A.D, Brang P, Bugmann H, Schönenberger W, 2004. Schutzwirkung von Gebirgsfichtenwäldern nach Buchdruckerbefall. Wie gut schützen Totholzbestände vor Naturgefahren? *Wald und Holz*, 85 (1), 33-36.

Margreth S, 2004. Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.). Schutzwald und Naturgefahren. Forum für Wissen. WSL, Birmensdorf, S. 21-26.

Margreth S, 2007. Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug Nr. 0704. Bundesamt für Umwelt, Bern, WSL Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos. 136 S.

- Margreth S, 2015. Gefahrenkarten – Lawinenmodellierungen. Vorlesungsunterlagen, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 16 S.
- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie), ohne Datum. Klimadiagramme und Normwerte. Abgerufen am 13.07.2016, <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klimanormwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html?station=mer>
- Meyer-Grass M, Imbeck H, 1985. Waldlawinen: gefährdete Bestände, Massnahmen. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 6 S.
- Meyer-Grass M und Schneebeli M, 1992. Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnissen. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 1992. Tagungspublikation, Band 2, 443-455
- Mc Clung D, Schaerer P, 2006. The Avalanche Handbook (3. überarb. Aufl.). Mountaineers Books, Seattle, 464 S.
- Nairz P, Sauermoser S, Kleemayer K, Gabl K, Stoffel M, Margreth S, 2011. Lawinen: Entstehung und Wirkung. In: Gabl K, Lackinger B, Rabofsky E (Hrsg.). Lawinenhandbuch (6. Aufl.) Tyrolia-Verlag. Innsbruck-Wien, S. 21-62.
- Noack A, Schönenberger W, Thee P, 2004. Schützen Windwurfflächen vor Lawinen und Steinschlag? Wald und Holz, 10/2014, 43-46.
- Puttalaz J-M, 2010. Protection à long terme contre les avalanches sur les surfaces de cha-blis. Masterarbeit, unveröffentlicht. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos und Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 116 S.
- Osborn T.J. and Jones P.D., 2014: The CRUTEM4 land-surface air temperature dataset: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. Earth System Science Data 6, 61-68.
- SAC (Schweizerischer Alpen-Club), 2001. Wetterkunde für Wanderer und Bergsteiger. SAC-Verlag, Bern, 136 S.
- Rammig A, Bebi P, Bugmann H, Fahse L, 2005. Adapting a growth equation to model tree regeneration in mountain forests. European Journal Forest Research, DOI 10.1007.
- Ryter U, 2014. Hochlagenaufforstungen in Lawinenverbauungen im Berner Oberland. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 165, 259-267.
- Staeger D, 1942. Besonderheiten der helvetischen Oberkreide am Wilerhorn (Brüniggebiet). Geologisches Institut Bern, abgerufen am 11.07.2016, <http://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=mnbn-001:1942:-:327>

Gnägi C, Labhart T-P, 2015. Geologie der Schweiz (9. überarb. Aufl.). hep-Verlag, Bern, 208 S.

Gwerder L, 2011. Die Zersetzung des Totholzes auf Vivian-Sturmflächen. Semesterarbeit, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 25 S.

Huber-Eicher B, 2013. Einführung in die statistische Analyse von geplanten Versuchen. Vorlesungsunterlagen, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 42 S.

Swisstopo (Bundesamt für Landestopografie), ohne Datum. Landeskarte, abgerufen am 06.07.2016,

[https://map.geo.admin.ch/?topic=ech&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-fbe&layers=ch.swisstopo.zeitreihen,ch.bfs.gebaeude\\_wohnungs\\_register,ch.bav.haltstellen-oev,ch.swisstopo.swisstlm3d&layers\\_visibility=false,false,false,false&layers\\_timestamp=18641231,,,&X=180204.10&Y=654860.40&zoom=4](https://map.geo.admin.ch/?topic=ech&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-fbe&layers=ch.swisstopo.zeitreihen,ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,ch.bav.haltstellen-oev,ch.swisstopo.swisstlm3d&layers_visibility=false,false,false,false&layers_timestamp=18641231,,,&X=180204.10&Y=654860.40&zoom=4)

Salm B, 1982. Lawinenkunde für den Praktiker. Schweizer Alpen-Club, Bern, 148 S.

Salm B, Zarn B, Bigger V, 1987. Schnee, Lawinen und Lawinenschutz. Vorlesungsunterlagen, unveröffentlicht. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 284 S.

Salm B, Burkard A, Gubler H, 1990. Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung EISLF, Davos, 14 S.

Sauermoser S, Stoffel M, Margreth M, 2011a. Entwicklung der Lawinen und des Lawinenschutzes: Historischer Überblick. In: Rudolf-Miklau F, Sauermoser S (Hrsg.). Handbuch Technischer Lawinenschutz. Ernst & Sohn GmbH & Co KG, Berlin, S. 13-20.

Sauermoser S, Granig M, Kleemayr K, Margreth S, 2011b. Grundlagen und Modelle der Lawindynamik und Lawinenwirkung. In: Rudolf-Miklau F, Sauermoser S (Hrsg.). Handbuch Technischer Lawinenschutz. Ernst & Sohn GmbH & Co KG, Berlin, S. 63-101.

Schneebeli M, Bebi P, 2004. Hydology: Forest and Snow and Avalanche Control. In: Burley, J., Evans, J. and Youngquist, J. A. (Eds.) Encyclopedia of Forest Science. Elsevier, London, S. 397-402.

Schönenberger W, Brang P, 2006. Wiederbewaldung von „Vivian“-Windwurfflächen im Gebirgswald. Wald und Holz, 87 (7), 38-41.

- Skolaut C, Rudolf-Miklau F, Stoffel M, 2011. Analyse, Bewertung und planliche Darstellung von Lawinengefahren (-risiken). In: Rudolf-Miklau F, Sauermoser S (Hrsg.). Handbuch Technischer Lawinenschutz. Ernst & Sohn GmbH & Co KG, Berlin, S. 106-108.
- SLF (WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung), 2000. Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 588 S.
- Teich M. and Bebi, P. 2009. Avalanche protection forest in GIS-based risk analyses – a case study in Switzerland. *Forest Ecology and Management* 257 (9), 1910-1919.
- Teich M, 2013. Snow avalanches in forested terrain. Doktorarbeit. SLF Davos und Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, S. 318.
- Teich M, Fischer J-T, Feistl T, Bebi P, Christen M, Grêt-Regamey A, 2014. Computational snow avalanche simulation in forested terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 2233–2248.
- Tiri R, 2009. Interaktionen zwischen verschiedenen Baumeigenschaften und Lawinen. Masterarbeit, unveröffentlicht. SLF Davos und Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 80 S.
- Trauffer M, 2016. Revierförster Brienzwiler. E-Mail vom 3.07.2016.
- Ulrich M, 2008. Strukturierung und Dynamik von Waldgrenznahen Wäldern mit verminderter Lawinenschutzwirksamkeit in der Landschaft Davos. Bachelorarbeit, unveröffentlicht. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Wädenswil, 64 S.
- Wasser B, Perren B, 2014. PROTECT Bio.Methodik zur Beurteilung der Wirkung biologischer Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung bei Risikoanalysen. Synthesebericht Phase III. BAFU (Bundesamt für Umwelt), Bern, 140 S.
- Zaugg A, 2016. Lawinenbildung im Wald –Ursache und Einflussfaktoren. Semesterarbeit, unveröffentlicht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, 46 S.

## **Anhangsverzeichnis**

### **Anhang 1**

1.1 Schutzwaldhinweiskarte Wilerhorn

1.2 Lawinenkataster Wilerhorn

1.3 Bestandeskarte Wilerhorn

### **Anhang 2**

2.1 Entscheidungshilfe „K-value“

2.2 Definierte Input-Flächen für die Simulationen

2.3 Gumbel-Diagramm mit den Extremwerten aus der Messreihe 1960 – 2015  
der SLF Beobachterstation Hasliberg 1825 m

## Anhang 1.1 Schutzwaldhinweiskarte Wilerhorn

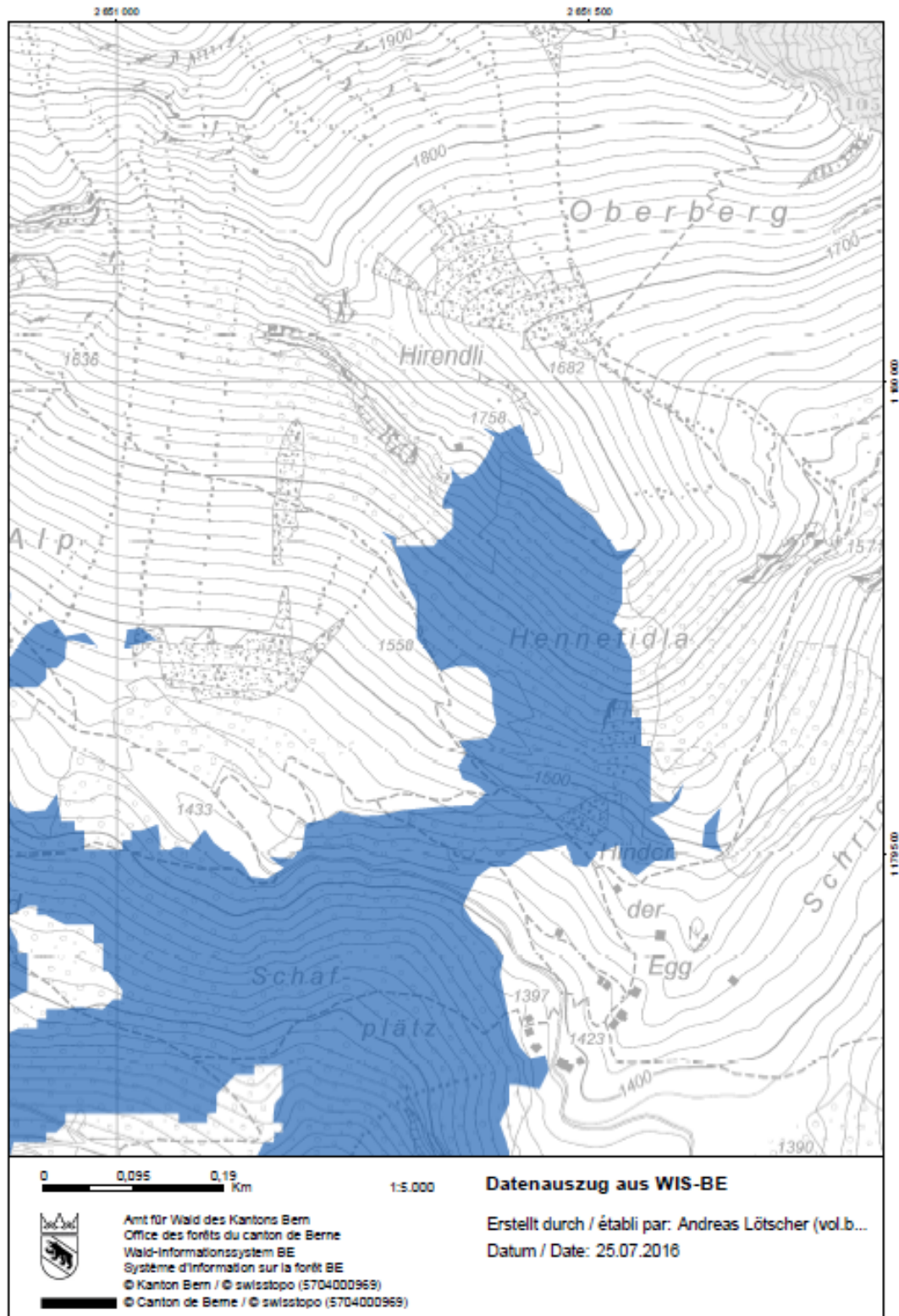


Abbildung 49: Auszug aus der Schutzwaldhinweiskarte des Kantons Bern, Blau dargestellt Objektschutzwald für Lawinenprozesse (Quelle: KAWA 2016).

## Anhang 1.2 Lawinenkataster Wilerhorn

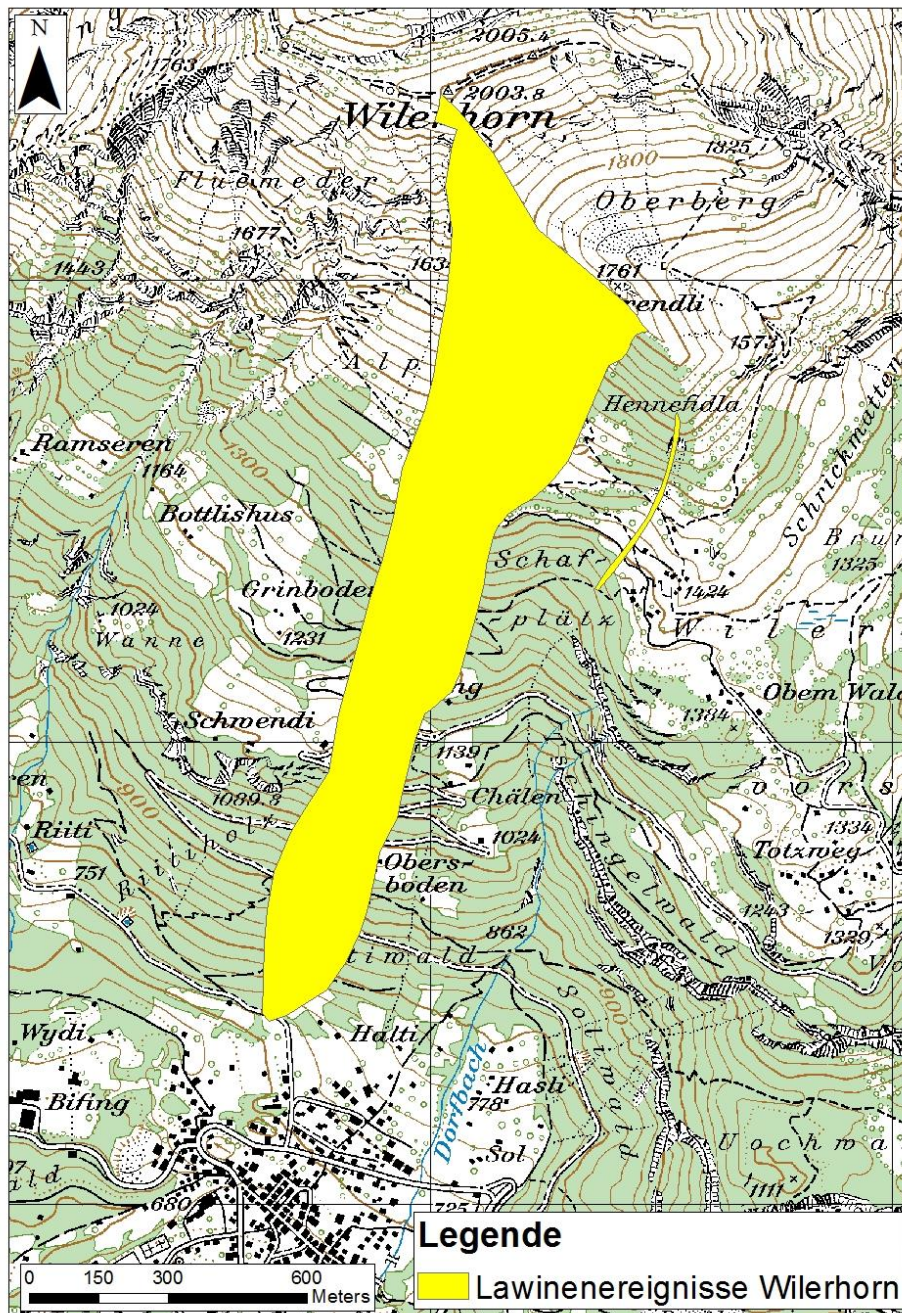


Abbildung 50: Auszug aus dem Lawenschutzkataster des Kantons Bern, gelb dargestellt: Umhüllung aller Lawinenerignisse am Wilerhorn (Quelle: KAWA 2016).

## Anhang 1.3 Bestandeskarte Wilerhorn

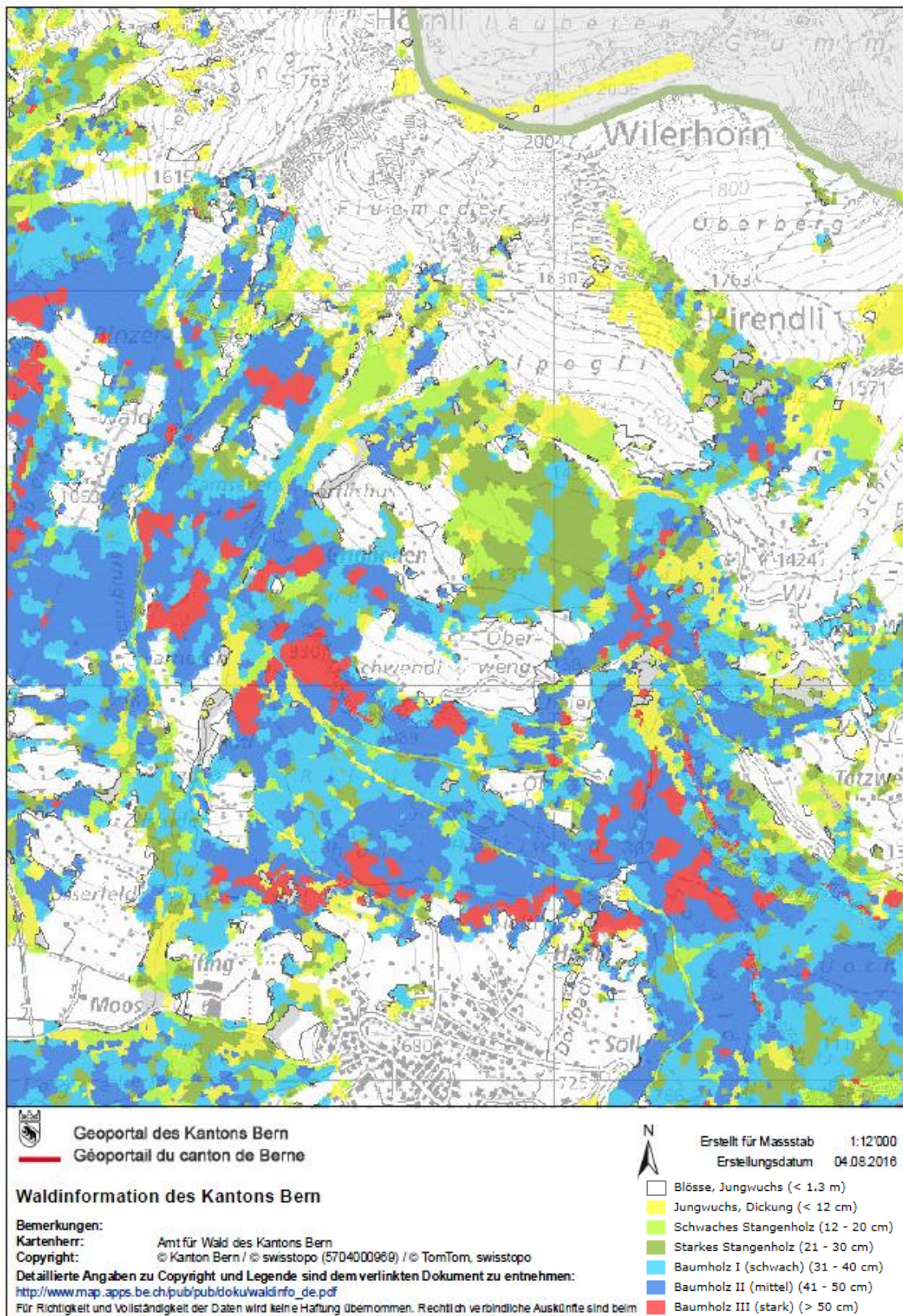


Abbildung 51: Auszug aus der Bestandeskarte des Kantons Bern (Quelle: KAWA 2016).

## 2.1 Entscheidungshilfe K-value

**Look-up table of K-values for forest shape files**

Choose the characteristics of forest area to obtain the corresponding K-value or Code.

forest type	crown coverage*	roughness**	K-value***	Code
evergreen / mixed	dense (> 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	48	A
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	38	B
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	28	C
	scattered, grouped (40% - 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	43	D
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	33	E
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	23	F
	open (20% - 40%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	38	G
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	28	H
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	18	I
larch / deciduous trees	dense (> 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	35	J
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	25	K
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	15	L
	scattered, grouped (40% - 70%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	30	M
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	20	N
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	10	O
	open (20% - 40%) coverage	rough (stumps/shrubs/saplings); height > 100 cm	25	P
		knobby (scree/stepped/seedlings); height 20 - 100 cm	15	Q
		smooth (grass/leaves/smooth rock); height < 20 cm	5	R


\* Can be determined analysing orthophotos. Pictures below show example cases.

\*\* Quantity for ground roughness as well as small vegetation and dead wood in the avalanche path. Examples below.

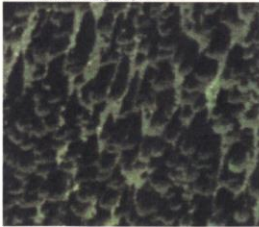
\*\*\* K in [Pa] represents the braking power per square meter that the forest exerts on the avalanche flow. It can be chosen manually if forest structure is not clear or in between two classes.

Crown coverage:

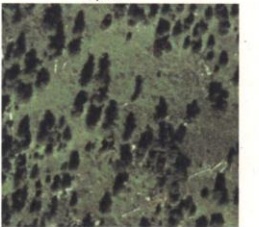
dense



scattered, grouped




open




Roughness:


rough



knobby



smooth



Features of ground roughness should be present every few meters. If there are only few large obstacles the roughness can be classified as knobby.

Abbildung 52: Entscheidungshilfe für die Bestimmung des K-values (Quelle: Teich et al. 2014).

## 2.2 Definierte Flächen für die Simulation mit RAMMS

### Szenario 2007

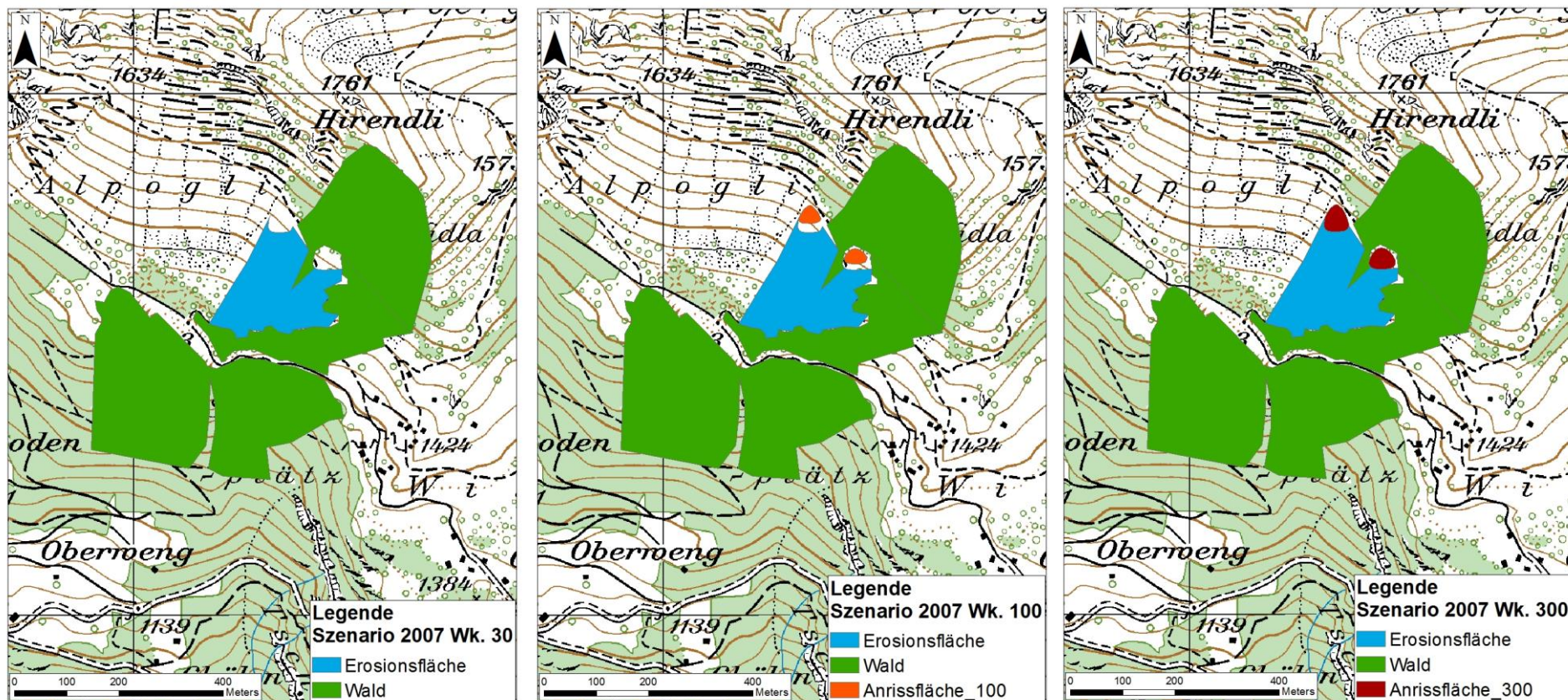


Abbildung 53: Für das Szenario 2007 definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis..

## Szenario 2016

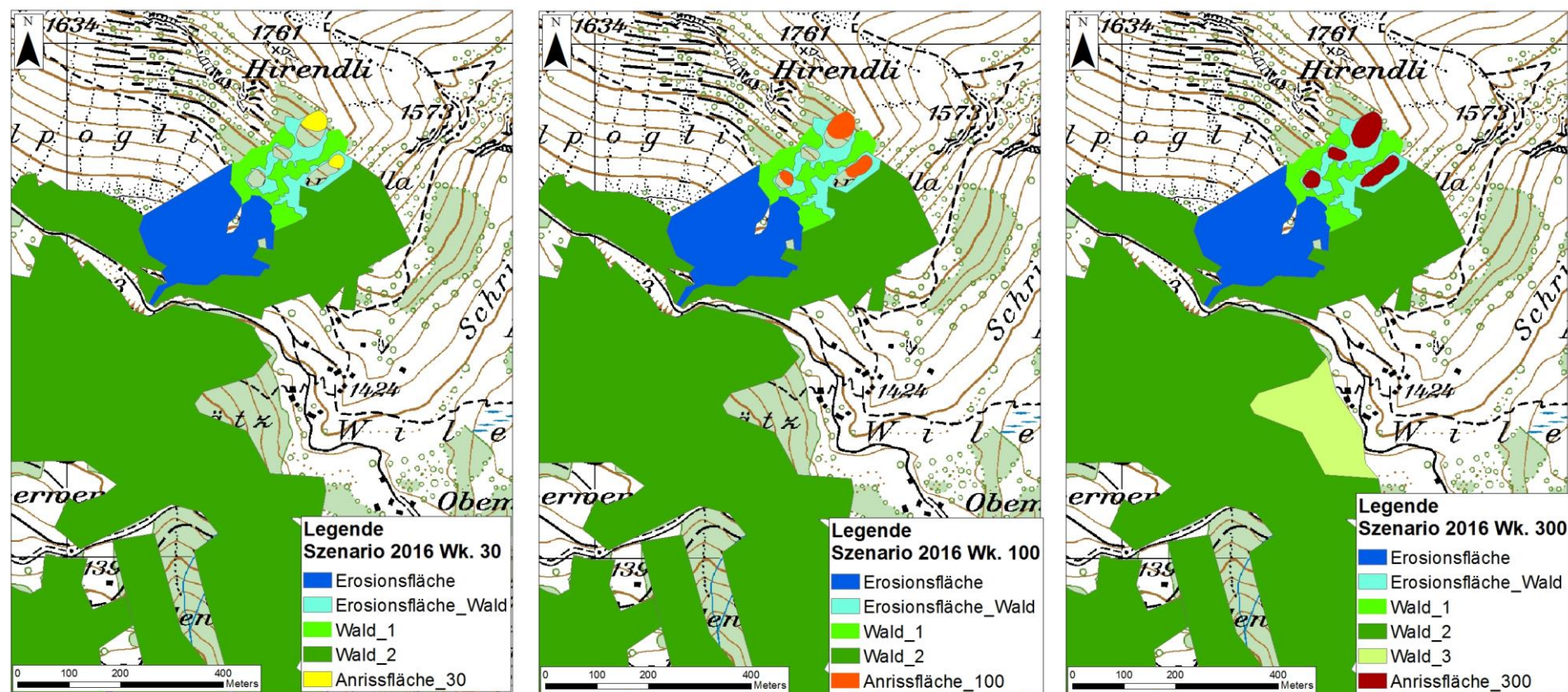


Abbildung 54: Für das Szenario 2016 definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.

Szenario 2020

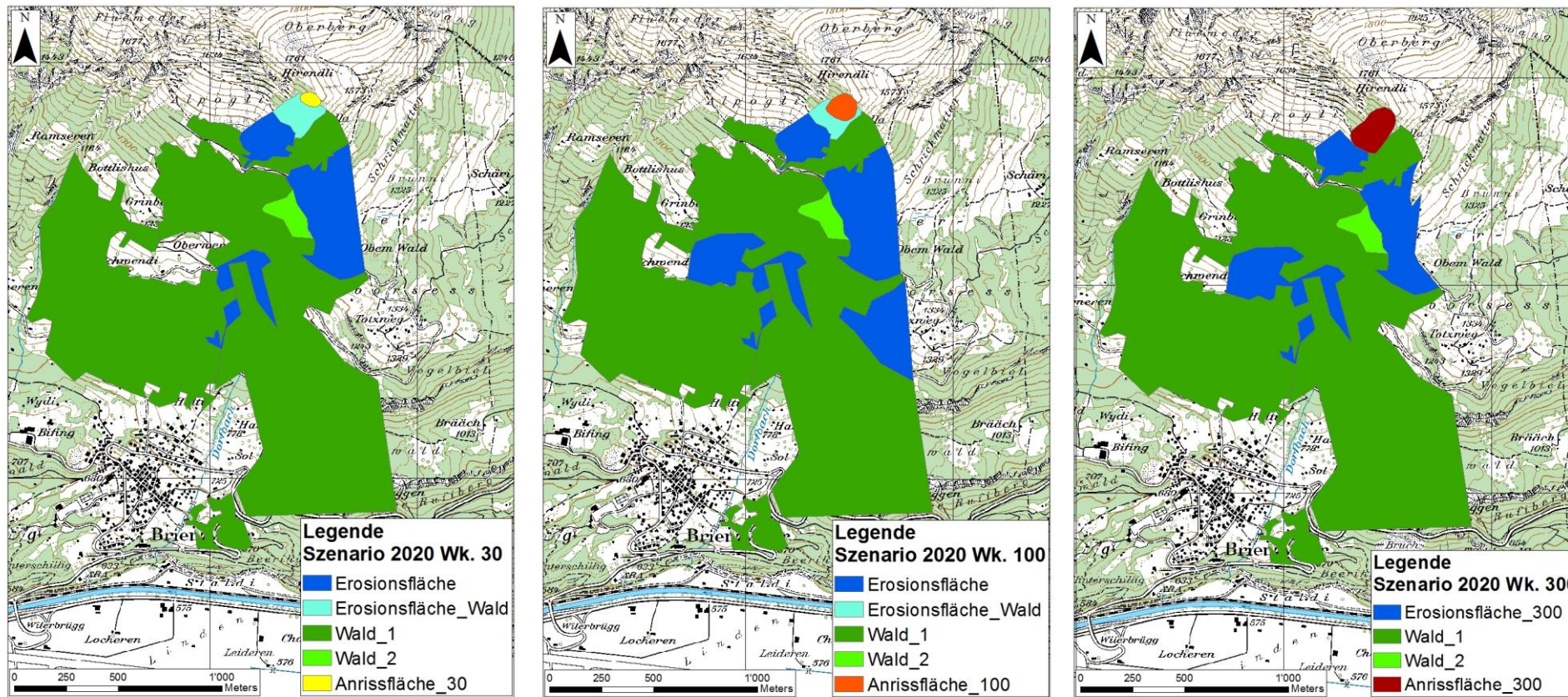


Abbildung 55: Für das Szenario 2020 definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.

## Szenario 2016 ohne Wald

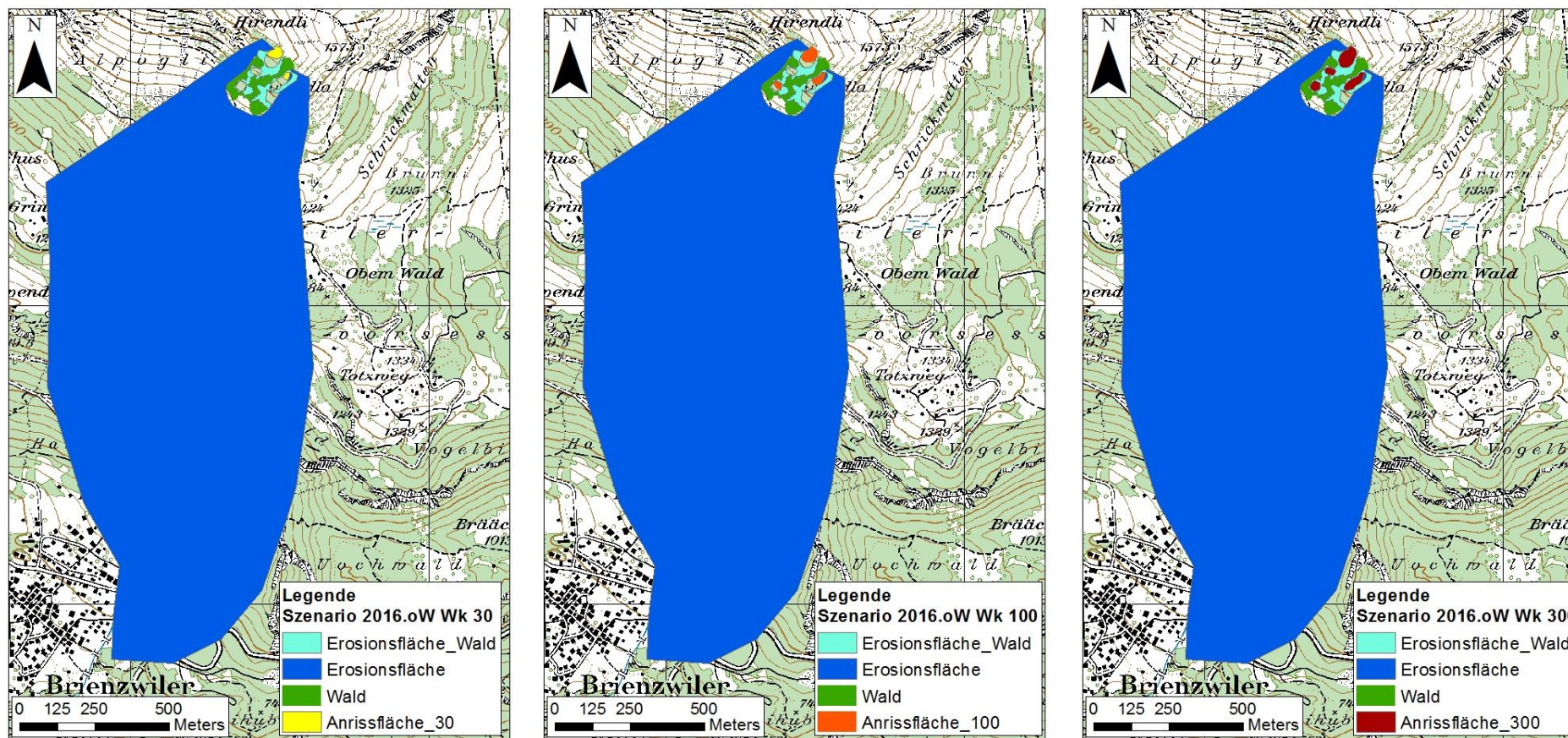


Abbildung 56: Für das Szenario 2016 ohne Wald definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.

Szenario 2020 ohne Wald

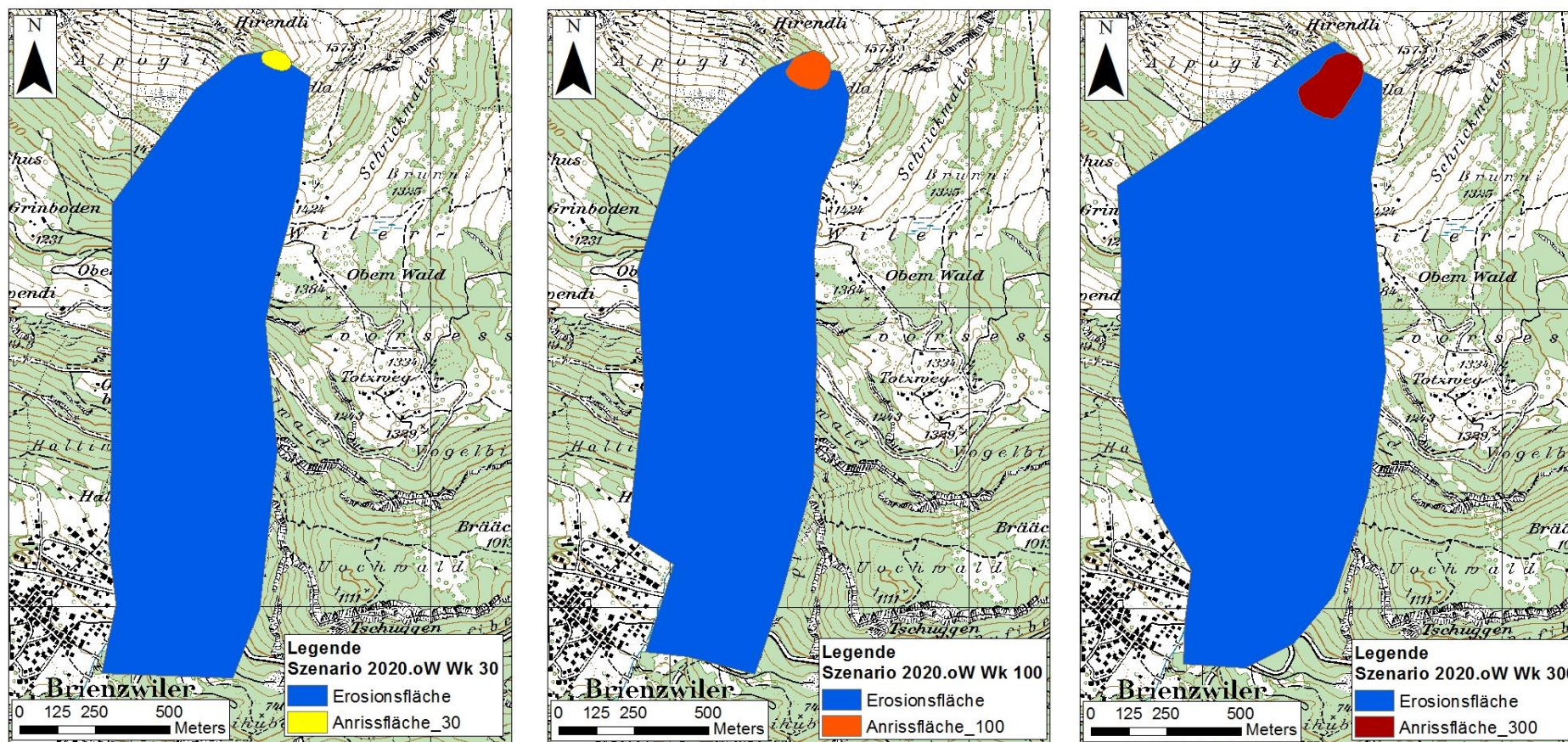
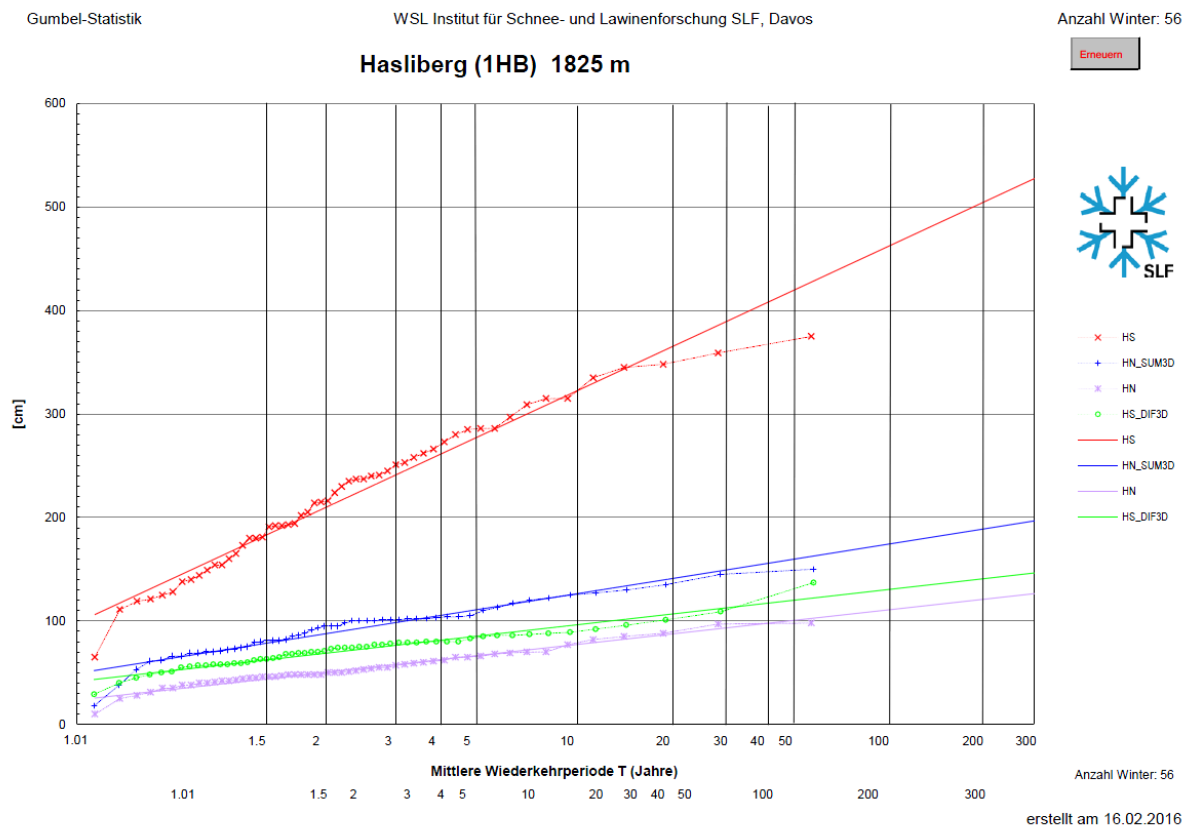


Abbildung 57: Für das Szenario 2016 ohne Wald definierte Erosionsflächen, Waldflächen und Anrissflächen, dargestellt für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis.

## 2.3 Gumbel-Diagramm mit den Extremwerten aus der Messreihe 1960 – 2015 SLF-Beobachterstation Hasliberg 1825 m



Extremwerte für Gumbel-Statistik

Hasliberg (1HB) 1825 m  
Anzahl Winter: 56

HJAHR	HS	HS_DIF3D	HS_DIF3D	HN	HN_SUM3D	HN_SUM3D	HN_SUM10D	HN_SUM30D
1960	180	51	138	25	53	62		147
1961	180	79	121	77	102	108		126
1962	315	137	167	97	145	153		190
1963	286	88	160	55	98	149		227
1964	65	29	41	28	38	49		72
1965	230	63	88	66	104	107		172
1966	309	70	141	51	81	96		113
1967	286	79	144	46	70	84		108
1968	315	80	255	70	150	168		190
1969	214	73	132	35	66	92		140
1970	359	68	212	42	69	78		126
1971	191	40	113	10	18	30		37
1972	125	79	88	82	82	102		107
1973	83	83	171		88	104		130
1974	205	89	166	98	113	133		175
1975	375	80	125	61	117	148		190
1976	165	109	107	55	100	100		173
1977	253	69	124	44	105	130		212
1978	297	92	152	88	122	176		227
1979	215	69	108	45	101	125		132
1980	285	75	143	68	95	130		187
1981	335	77	183	70	125	170		237
1982	345	87	238	62	130	155		223
1983	235	57	152	48	81	114		185
1984	237	63	154	48	100	149		187
1985	193	70	120	48	100	122		153
1986	224	80	187	41	103	136		200
1987	258	59	173	42	101	134		256
1988	280	80	143	50	102	142		217
1989	154	58	120	45	79	98		116
1990	160	75	146	38	85	108		123
1991	128	64	80	60	75	82		106
1992	262	71	124	65	95	136		146
1993	149	60	93	38	70	88		96
1994	173	65	116	48	81	88		143
1995	266	74	158	46	95	130		142
1996	119	50	78	50	69	71		105
1997	140	45	136	31	74	120		205
1998	144	74	92	46	100	127		142
1999	348	96	261	85	135	188		270
2000	240	59	119	40	91	121		150
2001	245	68	159	59	80	104		190
2002	154	56	74	40	66	90		115
2003	251	86	146	47	120	140		243
2004	192	74	104	52	101	111		136
2005	216	58	138	43	72	126		172
2006	194	62	94	48	73	79		132
2007	192	86	120	57	127	140		145
2008	202	77	142	53	93	143		187
2009	237	101	129	65	110	131		204
2010	138	85	85	69	104	118		130
2011	121	48	64	35	61	65		88
2012	273	55	193	48	86	116		211
2013	241	78	151	50	102	135		223
2014	111	58	62	58	62	73		89
2015	181	57	98	54	71	94		158

Abbildung 58: Gumbel Diagramm der SLF-Beobachterstation Hasliberg 1825 m, mit Extremwerten aus der Messreihe 1960-2015 (Quelle: SLF ohne Datum).