# UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR



# Simulation der "kleinen Ötscherbach Lawine"

eingereicht von Funder Michael, B. Sc.

Betreut von Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl und Univ. Ass. DI Dr. Alexander Prokop

> am Institiut für Alpine Naturgefahren Department für Bautechnik und Naturgefahren



Wien, April 2014

### Danksagung:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl Univ. Ass. DI Dr. Alexander Prokop Stabstelle Schnee und Lawinen der WLV DI Stefan Kreuzer Ing. Egger Norbert Walter Friedl WLV Kärnten

#### **Ehrenwörtliche Erklärung:**

Hiermit erkläre ich, dass ich die Diplomarbeit selbständig verfassst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenene Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Diplomarbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Datum Unterschrift

#### Vorwort

In alpin geprägten Gebieten werden Nutzer dieses spezifischen Lebensraumes vor weitreichende Problemfelder gestellt. Das Passieren, Bewirtschaften oder Bewohnen einer solchen topografischen Region bedingt besondere Risiken und außergewöhnliche Ansprüche. Gebirgige Strukturen stellen aus meteorlogischer Sicht Hindernisse für anströmende Luftmassen dar, und resultieren daher oft in besonders niederschlagsreichen Landstrichen. In gebirgigen Landschaften, welche im Anschluss an nivale, alpine Regionen ausgedehnte Bereiche bilden, in denen über weite Strecken des Winters Niederschlag ausschließlich in gefrorener Form fällt und somit große Retentionsmassen bildet, stellen Lawinenabgänge eine zentrale Gefahrenquelle dar.

Die Gefahrenzonenplanung versucht dieser Gefährdung insofern vorzubeugen als dass sie durch Naturgefahren bedrohte Gebiete erkennbar macht, beziehungsweise diese von vergleichsweise ungefährdeten Gebieten räumlich abgrenzt. Um bedrohte Flächen zu erkennen, diese abgrenzen und um Auswirkungen von Lawinen besser abschätzen zu können, sind Lawinensimulationen mittlerweile Stand der Technik.

Ein zentrales Problem bei der Anwendung von Lawinensimulationsmodellen ist die Festlegung der jeweiligen Modellparameter. Das Datenmaterial, aus welchem sich die benötigten Parameter ableiten lassen, unterscheidet sich bei jeder einzelnen Lawine schon im Umfang stark. Festgelegte Methoden zur Gewinnung dieser Parameter liegen oft nicht vor.

# **INHALTSVERZEICHNIS**

1.	. Ziele und Arbeitsablauf der Arbeit1				
2.	D	as Untersuc	hungsgebiet	3	
	2.1	Klima und V	Wetter im Untersuchungsgebiet	5	
	2.	1.1 Mess	station Lackenhof:	5	
	2.	1.2 Wind	verhältnisse im Anbruchgebiet	7	
	2.	1.3 Stark	miederschläge	7	
	2.2	Vegetation	und Gelände	9	
3.	D	atengrundla	ngen des dokumentierten Ereignisses1	1	
	3.1	Daten der B	efliegung12	2	
	3.2	Datenverarb	peitung:1	5	
4.	L	awinenmode	ellierung17	7	
	4.1	Die verschie	edenen Modelle im Überblick18	3	
	4.	1.1 Voell	my Modell19	9	
	4.	1.2 ELBA	A+	1	
	4.	1.3 SAM	OSAT24	4	
	4.	1.4 RAM	MS20	8	
	4.2	Auswahl de	s geeigneten Modells29	9	
5.	D	as Modell des	s dokumentierten Ereignisses der "Kleinen Ötscherbach Lawine"	1	

	5.1 Einga	angsdaten	31
	5.1.1	Digitales Geländemodell	
	5.1.2	Anbruchgebiet	
	5.1.3	Snow Entrainment	34
	5.1.4	Widerstandsgebiete	35
	5.1.5	Schnee- und Lawinen-Parameter	37
6.	Interpr	retation der Ergebnisse	40
	6.1 Schn	eehöhenverteilung	44
	6.2 Druc	kverteilung	48
	6.3 Fließ	höhen	55
7	DM	adall das Romassungsgaraignissas dar Vlainan Ötscharbach Lawi	no" 57
/•	Das Mo	Juen des Demessungsgereignisses der "Kiemen Otschei Dach Lawi	ile
/•	7.1 Einga	angsdaten	
/.	7.1 Einga 7.1.1	angsdaten Digitales Geländemodell	
	7.1 Einga 7.1.1 7.1.2	Angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche	
	<b>Das Mo</b> 7.1 Einga <i>7.1.1</i> <i>7.1.2</i> <i>7.1.3</i>	Angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche Anrissmächtigkeit	
	<b>Das Mc</b> 7.1 Einga <i>7.1.1</i> <i>7.1.2</i> <i>7.1.3</i> <i>7.1.3.</i>	Angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche Anrissmächtigkeit Das EVA+ Tool	
	<b>Das Mic</b> 7.1 Einga <i>7.1.1</i> <i>7.1.2</i> <i>7.1.3</i> <i>7.1.3.1</i> <i>7.1.3.2</i>	Angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche Anrissmächtigkeit Das EVA+ Tool Ermittlung der 3-tägigen 150-Jährlichen Neuschneehöhe	
	<b>Das Mic</b> 7.1 Einga 7.1.1 7.1.2 7.1.3 7.1.3.1 7.1.3.2 7.1.3.3	Angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche Anrissmächtigkeit Das EVA+ Tool Ermittlung der 3-tägigen 150-Jährlichen Neuschneehöhe Graphische Kontrolle:	
	Das Mo         7.1       Einga         7.1.1       7.1.2         7.1.3       7.1.3.1         7.1.3.2       7.1.3.2         7.1.3.3       7.1.3.4	Angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche Das EVA+ Tool Ermittlung der 3-tägigen 150-Jährlichen Neuschneehöhe Graphische Kontrolle: Ermittlung der Anrissmächtigkeit nach Salm, 1990	
/.	Das Mic         7.1       Einga         7.1.1       7.1.2         7.1.3       7.1.3.1         7.1.3.2       7.1.3.2         7.1.3.3       7.1.3.4         7.1.4       7.1.4	angsdaten Digitales Geländemodell Anbruchgebietsfläche Das EVA+ Tool Ermittlung der 3-tägigen 150-Jährlichen Neuschneehöhe Graphische Kontrolle: Ermittlung der Anrissmächtigkeit nach Salm, 1990 Snow Entrainment	
/.	Das Mo         7.1       Einga         7.1.1       7.1.2         7.1.2       7.1.3         7.1.3       7.1.3.1         7.1.3.2       7.1.3.3         7.1.3.4       7.1.4         7.1.5       7.1.5	Angsdaten         Digitales Geländemodell         Anbruchgebietsfläche         Anrissmächtigkeit         Das EVA+ Tool         Ermittlung der 3-tägigen 150-Jährlichen Neuschneehöhe         Graphische Kontrolle:         Ermittlung der Anrissmächtigkeit nach Salm, 1990         Snow Entrainment         Widerstandsgebiete	

8.	Ana	lyse und	Interpretation	der	Simulationsergebnisse	im	Bezug	zur
Gef	fahrenz	onenplanu	ng	•••••		•••••	•••••	71
:	8.1 G	efahrenzone	enplanung	•••••				75
9.	Nac	hwort	••••••	•••••		•••••		77
10.	Ver	zeichnisse .		•••••		•••••	•••••	80
	10.1	Abbildung	sverzeichnis	•••••				80
	10.2	Tabellenve	rzeichnis	•••••				83
	10.3	Formelverz	zeichnis	•••••				84
	10.4	Literaturve	rzeichnis					85

## 1. <u>ZIELE UND ARBEITSABLAUF DER ARBEIT</u>

Am kleinen Ötscher im Südwesten Niederösterreichs wurde am 01.03.2009, zwei Tage nach einem Lawinen-Ereignis ein ALS (Airborn Laserscan) in Verbindung mit Luftbildaufnahmen gefertigt. Auf Basis der gewonnen Informationen aus dieser Aufnahme, sowie verschiedener weiterer Datengrundlagen dieses Ereignisses, soll im Rahmen dieser Arbeit ein Modell der "kleinen Ötscherbach Lawine" erstellt werden.

Um eine Simulation durchzuführen, muss als erstes ein geeignetes Modell ausgewählt werden. Da mittlerweile mehrere unterschiedliche Modelle im Einsatz sind, sowie an verschiedensten Lawinen getestet, kalibriert und weiterentwickelt wurden, soll diese Arbeit einen Einblick - sowohl auf die Theorie sowie auf die praktische Umsetzung – gewähren.

Die Auswertung der bestehenden Daten der gut dokumentierten Lawine soll eine möglichst genaue Kalibrierung der Eingangsparameter des Modells ermöglichen.

Dieses Modell wird schlussendlich für die Simulation eines Bemessungsereignisses kalibriert. Durch die Modellierung des Bemessungsereignisses können im Zuge dieser Diplomarbeit, Erkenntnisse über die Relevanz der Lawine in Bezug auf die Gefahrenzonenplanung in diesem Gebiet gewonnen werden.



Abbildung 1: Prinzip Skizze des Arbeitsablaufs der Diplomarbeit

### 2. DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Untersuchungsgebiet Ötscher im Südwesten Niederösterreichs ist Teil der Ybbstaler Alpen in den nördlichen Kalkalpen. Das Einzugsgebiet der Lawine liegt im Bezirk Scheibbs in der Marktgemeinde Gaming in der Katastralgemeinde Lackenhof und ist als "kleine Ötscherbach-Lawine" beziehungsweise als "Grünes Loch Lawine" bekannt.

Das Lawinenanbruchgebiet liegt an der nordöstlichen Flanke des kleinen Ötschers. Die genauen WGS84-Gipfelkoordinaten des kleinen Ötschers sind 15°09'27,7" Rechtswert und 47°51'01,4" Hochwert. Der höchste Punkt am Lawinenanriss liegt etwa bei 1500 m Seehöhe. Das Ablagerungsgebiet der Lawine befindet sich auf einer Höhe von 920 m.



Abbildung 2: Lageplan der "kleinen Ötscherbach Lawine"

Im unteren Teil der Sturzbahn am "Riffelboden" kreuzt eine Piste der Ötscherlifte das Einzugsgebiet der Lawine. Der Ablagerungsbereich der Lawine verläuft ebenfalls teilweise entlang der "Riffelabfahrt" genannten Piste.

Das gesamte Lawineneinzugsgebiet befindet sich innerhalb des Natura 2000-Gebiets "FFH- u. Vogelschutzgebiet Ötscher Dürrenstein".

#### 2.1 <u>Klima und Wetter im Untersuchungsgebiet.</u>

HANN (1904) erklärt das vorherrschende Klima im untersuchten Gelände folgendermaßen: "Das Viertel ob dem Wienerwald ist im Ganzen das regenreichste von ganz Niederösterreich und in seinen höheren Teilen auch das kälteste Gebiet in gleichen Seehöhen".

Der im Untersuchungsgebiet vorherrschende Klimatyp ist der Subtyp "VI (X)". WALTER & LIETH (1960) führen die klimatischen Merkmale detaillierter aus: "Der Klimatyp "VI" ist charakteristisch für eine temperierte, humide Zone, mit ausgeprägter aber nicht sehr langer, kalter Jahreszeit. Er wird hier durch den Klimatyp "X" überprägt, welcher Gebirgsklimate inmitten eines anderen Typen charakterisiert.".



Abbildung 3: Klimadiagramm der Station Lackenho (WALTER & LIETH, 1960)

Der Niederschlagsverlauf weist typischerweise ein Juli/August Niederschlagsmaximum auf, sowie ein sekundäres Maximum im Jänner/Februar.

#### 2.1.1 Messstation Lackenhof:

Die dem Untersuchungsgebiet am nächsten liegende Niederschlagsmessstation ist die Station Lackenhof. Sie befindet sich ungefähr zwei Kilometer südlich des Lawineneinzugsgebiets und etwa 700 m unter dem Lawinenanbruchgebiet.

#### Tabelle 1: Kennwerte der Station Lackenhof

Messstelle:	Lackenhof
HZB-Nummer:	107011
Errichtet:	1895
Sachgebiet:	NLV
Dienststelle:	HD-Niederösterreich
Messstellenbetreiber:	Hydrographischer Dienst
Höhe:	
gültig seit:	Höhe [m ü.A.]:
01.01.1895	887
01.10.2010	809

Geographische Koordinaten (WGS84):

gültig seit:	Länge (Grad,Min,Sek):	Breite (Grad,Min,Sek):	
01.01.1895	15 10 16	47 52 22	

Messgrößen,-art:	seit:
Niederschlag-Ombrometer	1895
Niederschlag-Ombrograph	1997
Schneehöhe	1897
Neuschneehöhe	1897
Temperatur	1895

Es wurde, laut den Daten des HYDROGRAPHISCHEN DIENSTES (2013), eine durchschnittliche Jahresneuschneesumme von 597 cm und eine durchschnittliche Jahresniederschlagssumme von 1894 mm zwischen 1971 bis 2009 an der Station Lackenhof gemessen.

#### 2.1.2 Windverhältnisse im Anbruchgebiet

Die Hauptwindrichtung im Anbruchgebiet ist, laut Angaben der Betreiber der Ötscherlifte, Nord- Nordwest. (siehe Kap. 3)

In den Jahrbüchern der ZAMG wird an der Station Lunz/See, welche die nächstgelegene Station der ZAMG ist, die Hauptwindrichtung vor allem im Winter mit Nordwest angegeben. (ZAMG, 2011)

Es können durch starke Winde aus dieser Richtung große Mengen an Triebschnee aus dem Nährgebiet der Lawine in das Anbruchgebiet verfrachtet werden. (siehe Abb. 2)

#### 2.1.3 Starkniederschläge

In diesem Zusammenhang ist neben der Schneemenge, deren räumlicher Verteilung und anderen Variablen, auch die Niederschlagsintensität ausschlaggebend für den Abgang von Lawinen.

Die typischen, für Starkniederschläge ausschlaggebenden Wettermuster sind die Nordwest-Strömung und vor allem die Nord-Nordwest Strömung. Diese Muster bringen in den typischen Nordstau-Regionen den meisten Intensiv- Niederschlag. Ein abgeschnittenes Tief von Osten, aber auch eine "Vb" Großwetterlage kann hier ebenfalls zu Starkniederschlägen führen. (SEIBERT, ET AL., 2007)

Das häufige Auftreten von starken Schneefällen im Untersuchungsgebiet wird auch durch, für Niederösterreich außergewöhnlich hohe Neuschneewerte, bestätigt. So wurden etwa Monatsneuschneesummen von 490 cm im Februar 2009, und 431 cm im Februar 1999 an der Station Lackenhof gemessen.

Im Februar 2009 wurde eine 14-tägige Neuschneesumme von 427 cm gemessen, was laut STABSTELLE SCHNEE- UND LAWINEN DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (2009) einer Jährlichkeit von 80 – 100 Jahren entspricht. Ausschlaggebend für diesen Rekordwert war eine kräftige Nord-Nordwest Strömung (siehe Abb. 4).



Abbildung 4: Messreihe der Tagesneuschneesummen im Frühjahr 2009. (Datengrundlage: HYDROGRAPHISCHER DIENST, 2013)

Ebenfalls im selben Zeitraum wurde die 3-Tages-Neuschneesumme von 148 cm gemessen. Dies entspricht einer Jährlichkeit im Bereich zwischen 20 und 30 Jahren. (STABSTELLE SCHNEE- UND LAWINEN DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG, 2009)

#### 2.2 <u>Vegetation und Gelände</u>

Die "kleine Ötscherbach Lawine" liegt im Wuchsgebiet der nördlichen Randalpen – Ostteil, in der mittel-hochmontanen Höhenstufe. In diesem Bereich dominiert der typische Fichten-Tannen-Buchenwald, mit Tendenz durch anthropogene Entmischung, zu Fichte-Tanne bzw. Fichte-Buche oder zu Fichten- bzw. Buchen-Reinbeständen. (KILIAN, ET AL., 1994)

Das Anbruchgebiet der Lawine befindet sich knapp an der Waldgrenze dieser Region, auf ungefähr 1500 m Seehöhe.

Die Vegetation im Anbruch-Gebiet besteht vorwiegend aus Latschengebüsch, alpinem Kalkrasen sowie der Felsspaltenvegetation in Kalkfelsen.

An den oberen Flanken der Sturzbahn, besonders an der westlichen oberen Flanke, befinden sich Buchenreinbestände.

Im unteren Bereich des Lawineneinzugsgebiets setzt sich der Bestand überwiegend aus Fichten, Buchen und Tannen zusammen, mit vereinzelt Ahorn und Esche.

Interessant ist hier das Gebiet des Riffelbodens (siehe Abb. 5): In diesem Bereich erfährt die Lawinensturzbahn eine geländebedingte Richtungsänderung. Der Prallhang dieses Knicks wird durch einen zur Sturzbahn parallel verlaufenden Streifen von Buchen, Ahorn, jungen Fichten und vereinzelt stehenden Eschen bewachsen. Mittlerweile wurde versucht diesen Bereich in Pistennähe teilweise durch Fichten aufzuforsten. Hinter diesem Streifen besteht der Wald hauptsächlich aus dem typischen Fichten-Tannen-Buchenwald, allerdings ist hier das Alter des Bestandes deutlich geringer einzuschätzen als am gegenüberliegenden Hang.

Das ist hauptsächlich auf starke Schäden in diesem Bereich durch den Orkan Kyrill 2007 zurückzuführen. Im Bereich des Nährgebiets der Lawine kam es dadurch ebenfalls zu großflächigen Schäden, welche direkte Einwirkungen auf die Lawine, in Form von erhöhten Triebschneeablagerungen, zur Folge haben dürften.

Im Ablagerungsbereich setzt sich der Bestand aus dem für dieses Gebiet typischen Fichten-Tannen-Buchenwald, mit stellenweiser Dominanz der Fichte, zusammen. In einem Teil des Ablagerungsgebiets wurde noch vor dem dokumentierten Ereignis eine größere Fläche abgeholzt.



Abbildung 5: Verteilung der Baumarten im Lawineneinzugsgebiet

# 3. <u>DATENGRUNDLAGEN DES DOKUMENTIERTEN</u> <u>EREIGNISSES</u>

Am 27.02.2009 um ca. neun Uhr wurde die "kleine Ötscherbach Lawine" durch das Personal der Ötscherlifte mittels Handsprengung ausgelöst. Dieses Ereignis wurde durch mehrere Experten umfangreich dokumentiert.

Um relevante Daten für eine Modellierung der Lawine zu erhalten, wurden zuerst die – während des Ereignis anwesenden – Experten Norbert Egger (WLV GBL Niederösterreich West) und Walter Friedl (Betriebsleiter der Ötscherlifte) über die beobachteten Lawinenwirkungen befragt. Im Zuge der Befragung wurden auch Fotos der Lawine, aus Begehungen unmittelbar nach dem Ereignis, übergeben.

Des Weiteren wurde ein DGM (Digitales Geländemodell) einer Sommer-Befliegung mit einer Auflösung von einem Meter, sowie Orthophotos des Untersuchungsgebiets von 2007 und 2010 durch DI. Stefan Kreuzer (Katastrophenschutz Niederösterreich) zur Verfügung gestellt.

Es wurden mehrere Geländebegehungen im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Im Zuge dieser Begehungen wurden Vegetationsprofile im Transportgebiet der Lawine erstellt, und Stumme Zeugen dokumentiert.

Im Untersuchungsgebiet wurde zwei Tage nach dem Ereignis, im Rahmen eines Projekts des österreichischen Sicherheitsforschungsförderprogramms KIRAS eine Befliegung des Untersuchungsgebiets durchgeführt. Im Laufe dieser Befliegung wurden für diese Arbeit relevante Daten (Airborne Laserscan, Luftbildaufnahmen) generiert.

#### 3.1 Daten der Befliegung

Am 01.03.2009 um ca. 13.00 Uhr wurde am kleinen Ötscher und speziell im EZG (Einzugsgebiet) der "kleinen Ötscherbach Lawine" die Befliegung des Untersuchungsgebiets durchgeführt.



Abbildung 6: Berechnetes nDOM (normalisiertes digitales Oberflächenmodell) (siehe Kapitel 3.2) und räumliche Verteilung der Punktmessungen des ALS (Airborne Laserscan)

Das Ergebnis der Aufnahme wurde in Form von ALS (Airborne Laserscan) - Rohdaten und Luftbildaufnahmen für die vorausgegangene Bakkalaureatsarbeit ("Analyse der Massenverfrachtung einer Lawine auf Basis von ALS Daten" von Thomas Jerney und Funder Michael, 2011) zur Verfügung gestellt und bildet hier eine Basis zur Modell-Kalibrierung der "kleinen Ötscherbach Lawine".

Die Qualität der Laserscan- Daten ist im direkten Bereich des Wirkungsraums der Lawine leider mangelhaft.

Während im Anbruchgebiet und dem oberem Teil der Sturzbahn der Lawine die Punktdichte größtenteils einen akzeptablen Wert erreicht, ist im unteren Teil der Sturzbahn und vor allem im Ablagerungsbereich die Punktdichte zu gering um genauere Aussagen über die Schneehöhenverteilung zuzulassen.

Die mangelhafte Punktdichte und deren Verteilung kann durch den Umstand erklärt werden, dass im Zuge der Befliegung ein Laserscanner verwendet wurde, der nicht optimal für das Scannen von bewaldetem Gebiet mit Schneeoberfläche geeignet ist.

Es wurde ein Scanner des Typs "RIEGL LMS-Q680i" mit einer Wellenlänge von 1550 nm für diese Befliegung verwendet.

In Abb. 7 wird der Reflektionsgrad in Abhängigkeit zur Wellenlänge verschiedener Materialien dargestellt. Schneeoberflächen weisen im Wellenlängenbereich des verwendeten Scanners einen relativ geringen Reflektionsgrad auf.



Abbildung 7: Reflektionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Materialien (PFENNIGBAUER & ULLRICH, 2011)

Im Ablagerungsbereich kommt es zudem stellenweise zu einer Abschattung der Lawine durch die umliegende Vegetation. Gerade in diesem Bereich ist eine geschlossene Kronenüberdeckung durch die umliegenden Bäume gegeben. Die Piste ist hier zu schmal und die Flugroute nicht optimal um in diesem Bereich Messwerte zu bekommen.

Ein hoher Schneewassergehalt hat laut PROKOP (2008) ebenfalls einen negativen Effekt auf den Reflektionsgrad der Schneedecke.

Da in der Ereignisdokumentation Lawinen 2009 der STABSTELLE SCHNEE- UND LAWINEN DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (2009) von einem Anstieg der Temperaturen im

Untersuchungsgebiet zur Zeit der Aufnahme (01.03.2009 ca. 13.00) berichtet wird (in Höhenlagen von 1500 m wurden bis zu +8°C erreicht), kann man auch hier von einem limitierenden Faktor für den Reflektionsgrad ausgehen.

Sträucher und Bäume weisen allerdings einen relativ hohen Reflektionsgrad auf. Aus diesem Grund ist die Punktdichte der Messwete im bewaldeten Gebiet viel höher als in schneebedeckten Bereichen. Dieser Umstand hat eine nachträgliche Filterung der Daten (siehe Kap. 3.2) erschwert.

#### 3.2 <u>Datenverarbeitung:</u>

Die Rohdaten des ALS (Airborne Laserscan) wurden mittels RiPROCESS nachprozessiert und mittels ArcGIS unter Verwendung der Natural Neighbour Interpolation zu einem DHM (Digitales Höhenmodell) umgewandelt. Zusätzlich wurden nach der Prozessierung, mithilfe der Software RiSCAN PRO, die Daten manuell gefiltert um die Qualität des Schneeoberflächen Modells zu verbessern. Durch die manuelle Filterung konnte teilweise die Vegetation aus dem DHM entfernt werden. Ein DHM mit Vegetation und ein DHM des schneebedeckten Arbeitsgebiets ohne Vegetation wurden auf diese Weise erstellt.

Diese DHM-Raster wurden durch Subtraktion des DGM (Digitales Geländemodell) Rasters zu einem normalisierten Oberflächenmodell (nDOM) weiterverarbeitet. (siehe Abb.6).

Die Luftbildaufnahmen hingegen wurden über den gesamten Bereich des Lawineneinzugsgebiets angefertigt, und im Zuge dieser Arbeit zu einem Orthofoto weiterverarbeitet. Verwendet wurde zu diesem Zweck die Software Agisoft PhotoScan.



Abbildung 8: Orthophoto (erstellt aus den Luftbildaufnahmen der Befliegung)

Um die Übersichtlichkeit gewährleisten zu können, wurde für Darstellungen in dieser Arbeit, meist die Software ArcGIS 10 verwendet.

### 4. LAWINENMODELLIERUNG

Das Prinzip der Lawinenmodellierung zur Abschätzung von Lawinenwirkungen wird in der Praxis schon als bewährtes Werkzeug eingesetzt.

In Österreich wird die Lawinenmodellierung überwiegend in der Gefahrenzonenplanung, bei der Optimierung von Schutzmaßnahmen sowie im Risiko- und Krisenmanagement verwendet. Dementsprechend umfangreich ist auch die Auswahl an verschiedensten Modellierungs-Ansätzen, Programmen und Formeln welche diesbezüglich zum Einsatz kommen. Ein Überblick über die gebräuchlichsten Modelle ist auf der folgenden Darstellung (Abb. 9) abgebildet.



Abbildung 9: Übersicht und Klassifizierung der gebräuchlichen Lawinenmodelle (GRANIG, 2012)

#### 4.1 <u>Die verschiedenen Modelle im Überblick</u>

Zur raschen Abschätzung von Auslauflängen von Fließlawinen aber auch zur schnellen Plausibilitätskontrolle von komplexeren Simulationen kommt zum Beispiel das Alpha-Beta Modell von LIED & BAKKEHOI (1980) häufig zur Anwendung. Dieses Modell wurde zuerst in Norwegen von LIED ET AL. (1995) anhand von 80 dokumentierten Lawinenereignissen für den Alpenraum adaptiert und kalibriert. Da es sich um ein statistisches Modell handelt ist die Anwendung jedoch auf klassische Lawinen-Längsschnitte begrenzt. Lawinen welche zum Beispiel in der Sturzbahn auf einen Prallhang treffen, wie zum Teil die "kleine Ötscherbach Lawine", können durch dieses Modell nur unzureichend beschrieben werden. Durch die Einfachheit dieses Modells ist es auch für eine genauere Untersuchung einer Lawine nicht geeignet.

Die gebräuchlichsten Simulationsmodelle werden in Österreich mittlerweile von den numerischen Simulationsmodellen ELBA+, und SamosAT welches durch die Stabstelle Schnee und Lawinen der Wildbach und Lawinenverbauung, sowie dem BFW (Bundesforschungszentrum für Wald) gemeinsam mit der AVL List GmbH entwickelt wurde, repräsentiert. Die Entwicklung von ELBA+ wurde, ursprünglich von der Universität für Bodenkultur ausgehend, im Mai 2004 durch die Firma NiT abgeschlossen.

Das von Experten des "Instituts für Schnee- und Lawinen- Forschung" SLF und des "Institut für Wald-, Schnee- und Landschafts- Forschung" WSL entwickelte RAMMS, findet ebenfalls breite Anwendung.

Grundsätzlich muss beim Einsatz von komplexeren Simulationsmodellen immer beachtet werden, für welche Lawinenarten sie entwickelt wurden und wo die Grenzen der Anwendbarkeit liegen.

#### 4.1.1 Voellmy Modell

Bei den numerischen Modellen ELBA+, RAMMS und SamosAT wird hauptsächlich das Voellmy Modell, als Grundlage zur Berechnung des Fließverhaltens, verwendet. Charakteristisch für dieses Modell ist es, dass es aus zwei Parametern, nämlich der Gleitreibung " $\mu$ ", welche einer Mohr Cloumoumb´schen Reibung entspricht, und der turbulenten Reibung " $\xi$ ", welche dem Reibungsmodell nach Chezy entspricht, zusammengesetzt ist.

$$S = \mu * \rho * H * g * \cos\phi + \frac{\rho * g * U^2}{\xi}$$

Formel 1: Voellmy Formel (FOLIEN ZU RAMMS INTERNATIONAL USER WORKSHOP, 2012)

#### S = Reibungswiderstand

 $\rho = Dichte$ 

g = Gravitation

#### $\phi$ = Neigungswinkel

#### U = Fließgeschwindigkeit

- H = die Fließhöhe
- $\xi$  = turbulenter Reibungswert
- $\mu = Gleitreibung$

Das einfache Voellmy Model kann vor allem zur Bestimmung der Auslaufweiten und der maximalen Fließgeschwindigkeit von sehr großen Lawinen verwendet werden. Ein Vorteil dieses Modells ist die lange praktische Anwendung sowie die daraus resultierenden, gut kalibrierten, Parameter.

Ein Nachteil ist, dass durch diese Parameter eigentlich nur das Verhalten der Lawinenfront beschreiben wird, welche ausschlaggebend für die Auslaufweiten und die maximale Geschwindigkeit ist. (CHRISTEN, ET AL., 2010)

#### 4.1.2 ELBA+

Bei dem Simulationsmodell Elba+ (Energy Line Based Avalanche Model) handelt es sich um ein zweidimensionales, rasterbasiertes, numerisches Modell zur Simulation von trockenen Fließlawinen, welches als Berechnungsmodul in eine GIS-Oberfläche integriert ist. Das Modell baut physikalisch auf einem modifizierten Ansatz nach Voellmy auf. Es kann nach einer Weiterentwicklung – sowohl mit Mohr-Coulomb' scher Reibung als auch mit einem kombinierten Fließregime aus den beiden – eingesetzt werden. In der Praxis findet jedoch hauptsächlich der modifizierte Ansatz nach Voellmy Anwendung.

Der turbulente Reibungswert " $\xi$ " hängt, im ELBA+, vorwiegend von der Geometrie der Gleitfläche ab und wird in ELBA+ über ein logarithmisches Gesetz für jede Rasterzelle in jedem Iterationsschritt neu berechnet (Keulegan Relation) (siehe Formel 2). (SAUERMOSER & RUDOLF-MIKLAU, 2012)

$$F_e = m * g * S_{fe}$$
$$S_{fe} = \frac{v^2}{\xi * h}$$
$$\xi = 8 * g * \left(-2 * \log 10 \left(\frac{k_s}{12 * h}\right)\right)^2$$

Formel 2: Berechnung des turbulenten Reibungswert im Lawinensimulationsprogramm ELBA+ (NIT TECHNISCHES BÜRO GMBH, 2005)

 $F_e = Turbulente Reibung$ 

S<sub>fe</sub> = Reibungsgefälle

m = Masse

 $k_s = Rauhigkeitslänge$ 

g = Gravitation

v = Geschwindigkeit der Lawine

#### h = die Fließhöhe

 $\xi$  = turbulenter Reibungswert

In dieser Gleichung werden eine Rauhigkeitslänge  $,k_s$ " und die Fließhöhe ,h" zu einer relativen Rauigkeit in Beziehung gesetzt. Dieses Gesetz ist bei hohen Reynolds-Zahlen unabhängig von der Viskosität des Fluids.

Durch die Einführung der Keulegan-Relation fällt eine Anschätzung des Parameters " $\xi$ " weg. Im Gegenzug erhält eine realistische Abschätzung des Anbruchgebiets und damit der Lawinenmasse eine herausragende Bedeutung. (NIT TECHNISCHES BÜRO GMBH, 2005).

Ein ähnlicher Ansatz wird zum Teil auch in SamosAT verwendet.

Der verbleibende Parameter "µ" (Gleitreibung) wurde anhand von mehreren Referenzlawinen kalibriert.

Der Frage nach der Aufnahme von Schnee durch die Lawine während eines Abgangs (Snow Entrainment) versucht ELBA+ durch Einführung eines Layers mit erodierbarem Schnee Rechnung zu tragen. (KLEEMAYER & VOLK, 2000)

Schnee kann aus diesem Layer dann aufgenommen werden, wenn die Lawine an einer bestimmten Stelle eine genügend große Normalspannung erzeugt. Die Größen, die das Snow Entrainment daher beeinflussen sind die Grenz-Normalspannung, die Dichte und die Fließhöhe der Lawine. (NIT TECHNISCHES BÜRO GMBH, 2005)

Die Ergebnisse der Simulation werden direkt als Polygon Feature in der GIS-Oberfläche ausgegeben. Elba+ ist nach KLEEMAYER & VOLK (2000) bei grundsätzlicher Vorkenntnis von Lawinendynamik und GIS und einem fünstündigen Einschulungsaufwand mit geringem Betreuungsaufwand, problemlos selbstständig durchzuführen.

Elba+ hat sich in der Gefahrenzonenplanung in Österreich bewährt, das liegt auch am verhältnismäßig überschaubarem Aufwand. ELBA+ wird mittlerweile häufig zur Plausibilitätskontrolle von Simulationsergebnissen, üblicherweise für Auslauflängen komplexerer Modelle, verwendet.

#### 4.1.3 SAMOSAT

SamosAT stellt eine Weiterentwicklung des numerischen Lawinensimulationsprogramms Samos99 dar. Es wurde ebenfalls für "trockene Schneelawinen" entwickelt. "Trocken bedeutet in diesem Zusammenhang, dass während des Strömungsvorganges keine Kohäsionskräfte zwischen den Eispartikel wirken" (SAMPL & AVL LIST GMBH, 2006). Das Reibungsmodell basiert in SamosAT ebenfalls auf dem in Kap. 4.1.1 beschriebenen Ansatz von Voellmy, wurde aber erweitert.

$$\tau^{(b)} = \tau_0 + \tan \delta \cdot \left( 1 + \frac{R_s^0}{R_s^0 + R_s} \right) \cdot \sigma^{(b)} + \frac{\overline{\rho}\overline{\mu}^2}{\left( \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\overline{h}}{R} + B \right)^2}$$

Formel 3: Reibungsmodell SamosAT (SAMPL & AVL LIST GMBH, 2006)

 $\begin{aligned} \tau^{(b)} &= \text{Flächenbezogene Reibung} \\ \\ \tau_0 &= \text{Mindestschubspannung (notwendig damit Lawine anfängt zu fließen)} \\ \\ \delta &= \text{Bettreibungswinkel (tan $\delta$ entspricht der Gleitreibung $\mu$)} \\ \\ \sigma^{(b)} &= \text{Normalspannung (senkrecht auf den Boden)} \\ \\ R_s^0 &= \text{empirische Konstante} \\ \\ R_s &= \text{Verhältnis zwischen turbulenten Kräften und Normaldruck} \end{aligned}$ 

Der Term  $\frac{R_s^0}{R_s^0 + R_s}$  erhöht den Bettreibungswinkel mit abnehmender Geschwindigkeit und steigendem Druck.

 $\overline{\rho}$  = Dichte der Lawine

- $\overline{h}$  = Fließhöhe der Lawine
- $\overline{u}$  = Geschwindigkeit der Lawine
- $\kappa$  = Karman'sche Konstante (eine universelle Konstante aus der Grenzschichttheorie turbulenter Strömungen)
- R = geometrische Rauigkeit des Bodens
- B = Rauhigkeitskonstante (ebenfalls aus der Grenzschichttheorie)

Der Term  $\frac{1}{\kappa} \ln \frac{\overline{h}}{R} + B$  entspricht dem Reibungsmodel nach Chezy ( $\xi$ )

SamosAT ist in der Lage auch Staublawinen zu modellieren. Dabei wird von einer vertikal verteilten drei Ebenen Struktur ausgegangen (Abb.10).



Abbildung 10: 3-Ebenen Struktur von SamosAT (SAMPL & AVL LIST GMBH, 2006)

Diese drei Ebenen werden jeweils durch ihre Dichte definiert (siehe Abb. 10). Die Staubschicht, welche die oberste Ebene des Modells darstellt, wird als dreidimensionaler "Fluss" auf der Fließ-Ebene, zusammen mit der Luft mehrere hundert Meter über dem Boden, modelliert.

Diese Staubschicht wird wie eine turbulente, partikelbeladene Gasströmung mit kleinen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Partikeln und Gas behandelt und über ein Resuspensionsmodell mit dem Fließanteil der Lawine gekoppelt. Es handelt sich also um ein 2D Fließmodell mit einem 3D Staubmodell, welche über den Massenübergang verknüpft sind. (SAMPL & AVL LIST GMBH, 2006)

SamosAT ermöglicht mehrere Arten der Aufnahme von Schnee durch die Lawine (Snow Entrainment). Räumlich kann man ein "globales Entrainment" und ein auf festgelegte Bereiche beschränktes Entrainment unterscheiden. Zusätzlich kann man ein "erosives Entrainment" und "Frontentrainment" wählen. Beim erosiven Entrainment wird die

Massenaufnahme über die spezifische-Flächen-Aufnahme-Energie [J kg<sup>-1</sup>] (Energie um eine Einheitsmasse Schnee vom Boden zu erodieren) gesteuert. Es wird also davon ausgegangen, dass die Lawine über ihren Kontakt zur Gleitfläche, bei Aufbringung einer gewissen Energie, Schnee in den Lawinenkörper aufnimmt. Bei Frontentrainment wird die Masse in einer zuvor definierten Tiefe an der Lawinenfront aufgenommen. Als dritte Möglichkeit ist eine Schneeaufnahme direkt in den Staubanteil der Lawine möglich. Hier wird davon ausgegangen, dass bei einem Überströmen von Schneeflächen, nur durch den Staubanteil der Lawine, ebenfalls Schnee aufgenommen werden kann.

Im Staubmodell wird die Deposition bzw. Wiederaufnahme von Partikeln in der Sturzbahn bzw. im Auslaufbereich einer Lawine im Wesentlichen durch die minimale Partikelreflexionsgeschwindigkeit, sowie die Aufnahme-Minimalgeschwindigkeit gesteuert. Die Partikelreflexionsgeschwindigkeit ist die minimale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Partikel und Oberfläche bei einer Reflexion des Partikels von der Oberfläche. Bei Unterschreiten dieses Wertes wird der Partikel abgelagert. Die Aufnahme-Minimalgeschwindigkeit bestimmt, ab welcher Staublawinengeschwindigkeit eine Schneeaufnahme erfolgt. (JÖRG & GRANIG, 2013)

Die äußeren und inneren Parameter von SamosAT wurden von GRANIG & OBERNDORFER (2007) anhand von 22 gut dokumentierten Referenzlawinen kalibriert. Die zur Kalibrierung verwendeten Lawinen sind vorwiegend Großlawinen mit über 60.000 m<sup>3</sup> Lawinenmasse. Bei kleineren Lawinen muss das Anwendungsverfahren angepasst werden.

Zur erleichterten Anwendung werden bei SamosAT sogenannte Parametersets verwendet. Diese Parametersets sind Voreinstellungen spezifischer Schnee- und Lawinenparameter des jeweiligen Lawinentyps. Es gibt also ein Parameterset für Fließlawinen, jeweils mit und ohne Snow Entrainment, sowie für Staublawinen, ebenfalls mit und ohne Snow Entrainment. Bei Bedarf kann jeder Wert dieser Parametersets angepasst werden.

Die im Vergleich zu vielen anderen Simulationsmodellen relativ komplexe Methode der Modellierung von Staublawinen, setzt einen höheren Grad an Aufwand voraus und eine umfassendere Auseinandersetzung mit dem Thema Lawinenmodellierung.

#### 4.1.4 RAMMS

RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) ist ein zweidimensionales numerisches Simulationsmodel, entwickelt für die Berechnung der Dynamik von Massenbewegungen (Lawinen, Rutschungen, Muren, Steinschlag). Das für die Simulation von Lawinen verwendete Modul RAMMS Avalanche ist sozusagen eine Weiterentwicklung des eindimensionalen Modells AVAL welches wiederum auf das 1990 entwickelte Voellmy-Salm Modell aufbaut.

RAMMS beruht physikalisch ebenfalls auf einem modifizierten zwei-Parameter-Modell nach Voellmy. Es wird mittlerweile, für das Avalanche Modul, aber auch der sogenannte "random kinetic energy" kurz RKE-Ansatz in Form einer Erweiterung des Voellmy Modells angeboten.

Im RKE-Modul wird von über die Fließtiefe gemittelten Geschwindigkeiten ausgegangen, welche parallel zur Geländeneigung verlaufen. Diese Schichten beeinflussen sich in paralleler und nicht parallel verlaufenden Richtungen gegenseitig. (CHRISTEN, ET AL., 2010)

Dieses Modul befindet sich teilweise noch in der Entwicklung und ist noch nicht in die Praxis der Gefahrenzonenplanung integriert. Das Programm selbst ist sehr benutzerfreundlich aufgebaut und zeichnet sich durch hohe Funktionalität und gute Visualisierungsmöglichkeiten der Ergebnisse aus.

RAMMS war früher an das GIS GRASS gekoppelt, funktioniert mittlerweile aber als eigenständiges Programm. Es wurden die meisten für die Lawinensimulation, laut SALM ET AL. (1990), relevanten Funktionen eines GIS in das Programm übernommen und in die neue Oberfläche integriert.

Die Reibungsparameter  $\mu$  (Gleitreibung) und  $\xi$  (turbulente Reibung) können durch Angabe der Wiederkehrperiode und der Volumenkategorie der Lawine vom Programm automatisch global geschätzt werden. Eine genauere Beschreibung der Widerstandsparameter des Voellmy Modells kann durch eine Geländeanalyse der verschiedenen Layer ebenfalls automatisch erfolgen (FOLIEN ZU RAMMS INTERNATIONAL USER WORKSHOP, 2012). Die Grundlage für die Schätzung der Parameter bilden Daten aus dem Lawinenversuchsgelände Vallée de la Sionne (Wallis/Schweiz).

Ein anderer wichtiger Eingangswert ist das Digitale Geländemodell (DGM). Dieses kann, ähnlich dem Modell SamosAT, automatisch in eine sinnvolle Auflösung von 5 m umgewandelt werden. Höhere Auflösungen sind nicht zu empfehlen da kleine Geländeunebenheiten im Lawineneinzugsgebiet oft durch Schnee aufgefüllt sind, und somit die Geländerauhigkeit reduziert wird. Durch die reduzierte Auflösung des DGM wird diesem Umstand im Modell Rechnung getragen.

Anbruchgebiete können direkt im Programm eingezeichnet oder als Shapefile importiert werden. Das Einzeichnen der Anbruchgebiete im Programm wird durch mehrere integrierte Funktionen, wie etwa einer automatisierten Umrechnung und Darstellung des digitalen Geländemodells als Neigungskarte, unterstützt. (FOLIEN ZU RAMMS INTERNATIONAL USER WORKSHOP, 2012)

Es können zudem bis zu drei Snow Entrainment Layer ausgewiesen werden. Dies benötigt die Eingabe der Dichte des Schnees der Entrainmentfläche, sowie die Bestimmung eines Entrainment Koeffizienten und der Schneeöhe des Layers. (CHRISTEN, ET AL., 2010)

Im Rahmen der Ergebnisinterpretation muss beachtet werden, dass generell in der wissenschaftlichen Betrachtungsweise von der klaren Trennung zwischen Fließ- und Staublawinen (SamosAT) abgegangen wird. Dagegen gewinnt die Beschreibung des "Fluidsed Layers" als dichtere Mischform einer Lawine zunehmend an Bedeutung. Auch die Betrachtungsweise in RAMMS geht in diese Richtung. (GRANIG, 2012)

Diesem Ansatz wird auch durch die Implementierung des oben erwähnten RKE-Modells Rechnung getragen.

#### 4.2 <u>Auswahl des geeigneten Modells</u>

Der Grund für die Auswahl des Modells SamosAT war in erster Linie der Umstand, dass dieses Modell in der Gefahrenzonenplanung im Bereich Lawinen in Österreich zum Einsatz
kommt. Die Kalibrierung des Modells sowie Erfahrungswerte aus der praktischen Anwendung sind aus diesen Gründen relativ weit fortgeschritten.

Die, in dieser Arbeit modellierte und von mehreren Experten dokumentierte, Lawine ist nach Auswertung der, im Zuge der Ereignisdokumentation gefertigten, Fotos sowie nach Aussage der, während des Ereignis anwesenden, Experten als Staublawine abgegangen. Das Modell SamosAT wurde speziell zur Modellierung von Lawinen dieses Typs entwickelt.

Ein weiterer Kritikpunkt sind die zur Kalibrierung des Modells verwendeten Referenzlawinen. Die Exposition und Höhenlage sowie der Typ der Referenzlawinen fließt in die Parameter-Kalibrierung des jeweiligen Modells mit ein und sollte möglichst mit den Daten der zu modellierenden Lawine zusammenpassen um eine gute Übereinstimmung mit der realen Situation im Lawineneinzugsgebiet herzustellen.

Die Referenzlawinen des Modells SamosAT, wie in GRANIG & OBERNDORFER (2007) beschrieben, sind in Bezug auf Höhenlage, Exposition und Lawinentyp gegenüber der "kleinen Ötscherbach Lawine" gut verteilt.

Das Einzugsgebiet der "kleinen Ötscherbach Lawine" weist aber eine vergleichsweise geringe Fallhöhe sowie eine im unteren Bereich liegende Seehöhe des Anbruchgebiets auf.

# 5. <u>DAS MODELL DES DOKUMENTIERTEN EREIGNISSES DER</u> <u>"KLEINEN ÖTSCHERBACH LAWINE"</u>

Zur Modellierung des dokumentierten Lawinenabgangs vom 27.02.2009 wurde das Lawinensimulationsprogramm SamosAT (Vers. 2013\_07) verwendet.

Die für diese Lawine relevanten Eingangsdaten und deren Herkunft werden in Tab. 2 zusammengefasst.

# 5.1 <u>Eingangsdaten</u>

Eingangsdaten:	Herkunft:	
DGM (Digitales Geländemodell)	Abteilung Hydrologie und Geoinformation	
	Niederösterreich	
Anbruchgebiete	Erstellt mit Hilfe der Daten der Befliegung (siehe Kap.	
	3.1)	
Bereiche mit erhöhten Oberflächenrauhigkeiten	Generiert aus DGM und Daten der Befliegung (3.1.1)	
Schneeaufnahmebereiche	Generiert aus Orthophoto und DGM	
(Snow Entrainment Areas)		
Spezifische Schnee und Lawinenparameter	Parametersets, Schneeprofil	

#### Tabelle 2: Eingangsdaten und Herkunft

### 5.1.1 Digitales Geländemodell

Ein grundlegender Faktor des Modells ist das DGM (Digitales Geländemodell). Das DGM sollte in einer Auflösung von mindestens 5 m vorhanden sein (siehe Kap. 3). Nach Import des DGM wird automatisch die Auflösung auf diese 5 m angepasst. Das DGM kann einfach als Raster im ASCII Grid-Format mit dem Dateisuffix .txt importiert werden.

### 5.1.2 Anbruchgebiet

Eine wichtige Eingangsgröße stellt das Anbruchgebiet dar. Die Fläche des Anbruchgebiets kann entweder direkt im Programm erstellt werden oder als \*.dxf-Datei importiert werden.

Zunächst wurde die Fläche des Anbruchgebiets im ArcGIS auf Basis des erstellten Orthophotos und des normalisierten digitalen Oberflächenmodells (siehe Kap. 3.2), welches ebenfalls aus den Daten der Befliegung generiert wurde, bestimmt. Zu diesem Zweck wurden die beiden Raster halb-transparent dargestellt und die Fläche als Polygon im \*.shp Format digitalisiert. Dieser Arbeitsschritt wurde im ArcGIS 10 durchgeführt.

Als Anrissmächtigkeit wurde der, durch während der Sprengung anwesendes Personal der Ötscherlifte, auf 1,8 m geschätzte Wert, verwendet. Die gesamte Anbruchkubatur der Lawine beträgt in diesem Modell 109000 m<sup>3</sup>. Die Dichte der anbrechenden Schneeschicht wurde mit 170 kg/m<sup>3</sup> angenommen. Der im Programm empfohlene Wert liegt bei 150 kg/m<sup>3</sup>. Die Schneedichte von 170 kg/m<sup>3</sup> wurde gemäß GELDSETZER ET AL. (2000), auf Basis eines Schneeprofils, welches durch den Lawinenwarndienst Niederösterreich am 24.02.2009 in der Nähe des Anbruchgebiets auf ca. 1130 m Höhe gefertigt worden war, angenommen.



Abbildung 11: Ermittlung des Anbruchgebietes mithilfe des erstellten normalisierten digitalen Oberflächenmodels und des Orthophotos (siehe Kap. 3.2)



Abbildung 12: Schneeprofil (erstellt durch den Lawinenwarndienst Niederösterreich)

## 5.1.3 Snow Entrainment

Als nächster Schritt werden Entrainmentflächen ausgewiesen (siehe Kap. 4.1.3). Im Modell wurde erosives Entrainment gemäß JÖRG & GRANIG (2013) verwendet. Die Fläche wurde großflächig im unbewaldeten oberen Teil der Sturzbahn eingezeichnet.

Die Anbruchgebietsfläche zieht sich bis zum Prallhang am Riffelboden, da ab diesem Punkt von einer Geschwindigkeitsabnahme auszugehen ist und zudem die Lawinenbahn ab hier durch bewaldetes Gebiet verläuft. Beides sind Gründe gegen ein positives Entrainment in diesem Bereich. Der ungleichmäßig bewaldete Teil in der oberen Sturzbahn der Lawine, welcher durch das Ereignis fast vollständig zerstört wurde, ist als Entrainmentfläche ausgewiesen. Eine Analyse des normalisierten digitalen Oberflächenmodells lässt hier auf eine Erosion der Schneedecke schließen.

Die Dichte des aufgenommenen Schnees wurde mit den empfohlenen 100 kg/m<sup>3</sup> angesetzt. Die Mächtigkeit der erodierbaren Schneeschicht wurde mit 30 cm gemäß den empfohlenen Werten angenommen. (JÖRG & GRANIG, 2013)



Abbildung 13: Entrainmentgebiet der dokumentierten Lawine

### 5.1.4 Widerstandsgebiete

Gebiete, in denen von erhöhtem Widerstand bezüglich der Oberflächenrauhigkeit der Lawinenbahn auszugehen ist, wie etwa in bewaldetem Gebiet, müssen im Modell extra ausgewiesen werden. Zu diesem Zweck wurde das aus ALS (Airborne Laserscan)-Daten und dem Sommergeländemodell ermittelte normalisierte Oberflächenmodell (nDOM) (siehe Kap. 3.2) verwendet. In diesem Arbeitsschritt wurde das nDOM halb-transparent über dem Orthophoto (2007) dargestellt und Polygone über Flächen, mit annähernd gleicher Kronenhöhe, digitalisiert.

Auf diese Weise werden bewaldete Zonen mit ähnlicher Baumhöhe zu Widerstandsgebieten aggregiert. Die Höhe jedes einzelnen Widerstandsgebiets kann im Modell separat angegeben werden.



Abbildung 14: Digitalisierte Widerstandsgebiete über normalisiertem digitalen Oberflächenmodell (siehe Kap. 3.2)

### 5.1.5 Schnee- und Lawinen-Parameter

Es wurden zwei Varianten dieses Modells simuliert: Eine Staublawine ohne Snow Entrainment, unter Verwendung des Parametersets "PSA ohne Entrainment" (siehe Abb. 15). Analog dazu wurde eine Staublawine mit Snow Entrainment und dem Parameterset "PSA mit Entrainment" (siehe Abb. 16) simuliert. Das Modell ohne Entrainment dient hier zur Kontrolle der Annahmen des Modells mit Entrainment. (siehe Kap. 5.1.3)

Parameter-Set:PSA ohne Entrainment
🛱 Schneeaufnahme-Parameter
– globale Schneeaufnahme - Flächendichte [kg/m2]:0
<ul> <li>globale Schneeaufnahme - Raumdichte [kg/m3]:100</li> </ul>
globale Schneeaufnahme - Schneemächtigkeit [m]:0
- Scherwiderstand:0
Verformungswiderstand:0
<ul> <li>Spezifische Flaechen-Aufnahme-Energie:0</li> </ul>
🗄 Punktquelle für Masse
🔁 Anbruch- und Aufnahmemächtigkeiten von DHM
- Reibungsgesetz:samosAT
🛱 Materialkennwerte
Formel-Kennwerte:tau0=0 mue=0.155 Rs0=0.222 kappa=0.43 R=0.1 B=4.13
- innerer Reibungswinkel:0
- Strömungsdichte:200
Damm-Restitutionskoeffizient:0
<ul> <li>Staublawinenkoppelung:particles suspension</li> </ul>
🖻 Staublawinenparameter
Mindest-Froude-Zahl f ür Staubentstehung:400
<ul> <li>Partikel-Suspensionskoeffizient:0.01</li> </ul>
Partikeldurchmesser:0.0008
materielle Partikeldichte:900
Partikel-Widerstandskoeffizient:3
<ul> <li>Partikel-Restitutionskoeffizient:0.965</li> </ul>
- Dispersionsfaktor:1.4
Partikelreflexionswinkel [deg]:30
- minimale Partikelreflexionsgeschwindigkeit:10
🛱 Wandrauhigkeit
Minimale Wandrauhigkeit:0.1
<ul> <li>Rauhigkeits-Saltationskonstante:0.0001</li> </ul>
Lauhigkeits-Suspensionskonstante:10
direkte Schneeaufnahme:nein
L Aufnahme-Minimalgeschwindigkeit:13

Abbildung 15: Parameterset "PSA ohne Entrainment"

Parameter-Set:PSA mit Entrainment
🛱 Schneeaufnahme-Parameter
globale Schneeaufnahme - Flächendichte [kg/m2]:0
globale Schneeaufnahme - Raumdichte [kg/m3]:100
globale Schneeaufnahme - Schneemächtigkeit [m]:0
<ul> <li>Scherwiderstand:0</li> </ul>
- Verformungswiderstand:0
<ul> <li>Spezifische Flaechen-Aufnahme-Energie:200</li> </ul>
🗄 Punktquelle für Masse
🗄 Anbruch- und Aufnahmemächtigkeiten von DHM
Reibungsgesetz:samosAT
🗄 Materialkennwerte
- Formel-Kennwerte:tau0=0 mue=0.155 Rs0=0.222 kappa=0.43 R=0.1 B=4.13
ninerer Reibungswinkel:0
- Strömungsdichte:200
Damm-Restitutionskoeffizient:0
Staublawinenkoppelung:particles suspension
🖻 Staublawinenparameter
<ul> <li>Mindest-Froude-Zahl f ür Staubentstehung:400</li> </ul>
<ul> <li>Partikel-Suspensionskoeffizient:0.01</li> </ul>
· Partikeldurchmesser:0.0008
- materielle Partikeldichte:900
<ul> <li>Partikel-Widerstandskoeffizient:3</li> </ul>
Partikel-Restitutionskoeffizient:0.965
Dispersionsfaktor:1.4
- Partikelreflexionswinkel [deg]:30
minimale Partikelreflexionsgeschwindigkeit:10
🛱 Wandrauhigkeit
Minimale Wandrauhigkeit:0.1
Rauhigkeits-Saltationskonstante:0.0001
Rauhigkeits-Suspensionskonstante:10
<ul> <li>direkte Schneeaufnahme:ja</li> </ul>
Aufnahme-Minimalgeschwindigkeit:13

Abbildung 16: Parameterset "PSA mit Entrainment"

# 6. INTERPRETATION DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Simulation wurden als Ablagerungshöhe, Druckverteilung und als Fließhöhe in Form von \*.dxf-Dateien in ArcGIS 10 exportiert. Im ArcGIS 10 wurden die Ergebnisse mit dokumentierten Phänomenen des Ereignisses verglichen und ausgewertet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation mit Snow Entrainment verwendet, da diese eine bessere Übereinstimmung mit der dokumentierten Lawine aufweisen.

Als Kriterium wurden hier vor allem die Ablagerungshöhen bzw. die Massenbillanz und die Auslaufweite des Fließanteils der Lawine betrachtet. Zu diesem Zweck wurden die simulierten Ablagerungen mit den Daten des ALS (Airborne Laserscan) (Kap. 3.2) verglichen (Abb. 20).



Abbildung 17: Simulierte Ablagerungshöhe des dokumentierten Ereignisses



Abbildung 18: Simulierte Druckverteilung des dokumentierten Ereignisses



Abbildung 19: Simulierte Fließtiefen des dokumentierten Ereignisses

# 6.1 <u>Schneehöhenverteilung</u>

Im oberen Teil der Sturzbahn wurde die simulierte Ablagerungshöhe mit dem grob gefilterten, aus ALS (Airborne Lasersscan) Daten generierten, normalisierten digitalen Oberflächenmodell (nDOM) ( siehe Kap 3.2) verglichen. (Abb. 20)

Die Schneehöhen des nDOM Rasters, stimmen qualitativ in allen Bereichen, in denen die Punktdichte des Laserscans ausreichend war, sehr gut mit den simulierten Ergebnissen überein.

Allerdings fließen in die Höhendifferenzwerte des nDOM auch andere Faktoren ein. Die unter der Schneeoberfläche begrabene Vegetation, Wildholz, sowie der Bestand einer nicht erodierten Restschneedecke führt hier stellenweise zu deutlich höheren Werten als in den simulierten Ablagerungshöhen.



Abbildung 20: Simulierte Ablagerungen über dem, aus ALS (Airborne Laserscan) -Daten generierten normalisierten digitalem Oberflächenmodel (siehe Kap. 3.2)



Abbildung 21: Vergleich der simulierten Ablagerungshöhen, in Meter, über einem Orthophoto (aufgenommen 3 Tage nach dem Ereignis)

Im Bereich des Ablagerungsgebiets zeigt das simulierte Ergebnis eine gute Übereinstimmung mit den dokumentierten Daten. In diesem Bereich liegt aber kein DHM (Digitales Höhenmodell) der Schneeoberfläche vor (siehe Kap. 3). Aus diesem Grund wurde das Ergebnis mit den, aus Luftbildaufnahmen generierten, Orthophotos sowie mit direkt nach dem Ereignis, aufgenommenen Fotos verglichen.

Der Vergleich der simulierten Ablagerungshöhen im Ablagerungsbereich der Lawine passt ebenfalls gut zu den aufgenommenen Fotos.



Abbildung 22: Ablagerungsgebiet - aufgenommen bei einer Geländebegehung im Sommer 2013



Abbildung 23: Ablagerungsgebiet 3 Tage nach dem Ereignis - aufgenommen von Ing. Egger Norbert (WLV)

# 6.2 <u>Druckverteilung</u>

Der Vergleich der entwaldeten Fläche in der Sturzbahn der Lawine weist eine gute Übereinstimmung mit der simulierten Druckverteilung der Staublawine auf.



Abbildung 24: Druckverteilung und entwaldete Flächen der Sturzbahn

Man kann allerdings erkennen, dass an der westlichen Flanke der Sturzbahn die Entwaldung nicht genau der simulierten Druckverteilung entspricht, obwohl die Bäume in diesem Bereich starke Schäden aufweisen, welche sehr wahrscheinlich von dem dokumentierten Ereignis stammen. Man kann hier davon ausgehen, dass der Buchenbestand an der westlichen Flanke der Sturzbahne ein anderes Widerstandsverhalten aufweist als die großteils durch immergrüne Baumarten bewachsene Ostflanke der Sturzbahn. Abb. 25 und 26 zeigen Schäden an der westlichen Flanke der oberen Sturzbahn der Lawine. Im oberen Teil der Westflanke der Lawinensturzbahn kann man neben entwurzelten Bäumen auch abgebrochene Bäume erkenne. In diesem Bereich kann von hohen Druckkräften der Lawine ausgegangen werden. Im unteren Teil dieses Gebiets (Abb. 26) hingegen kommt es ausschließlich zu Entwurzelung von einzelnen Buchen sowie Schäden an tief gewachsenen Ästen.



Abbildung 25: Foto an der Position "Foto 1" (siehe Abb. 24)



Abbildung 26: Foto an der Position "Foto2" (siehe Abb. 24)



Abbildung 27: Schäden im Bereich des Prallhangs, an der Position "Foto 3" (siehe Abb. 24) - aufgenommen von Waslter Friedl (Ötscherlifte GesmbH)

Am Prallhang der Lawinen im sogenannten "Riffelboden" entsteht in der Simulation eine teilweise Entkoppelung des Staubanteils vom Fließanteil der Lawine. Hier reicht die Druckverteilung der Staublawine weit über den Fließanteil der Lawine hinaus auf den Prallhang (Abb. 27).



Abbildung 28: Druckverteilung der simulierten Lawine im Ablagerungsbereich über dem Orthophoto (2007)

Im Ablagerungsbereich sind die Druckwirkungen der Lawine durch eine Schlägerung in diesem Bereich schwer festzustellen. Einige Bäume in diesem Bereich weisen allerdings typische Schäden (fehlende Baumkronen) auf. Anhand Abb. 28 und 29 ist eine gewisse Auflockerung des Baumbestandes, in den Gebieten mit hohem Druck der simulierten Lawine, erkennbar.



Abbildung 29: Druckverteilung der Simulierten Lawine im Ablagerungsbereich über dem, aus den Daten der Befliegung erstelltem, Orthophoto



Abbildung 30: Ablagerungsbereich (siehe Abb. 29 "Foto 4") der Lawine – aufgenommen von Walter Friedl (Ötscherlifte GesmbH) direkt nach dem Ereignis

In Abb. 30 kann man die Wirkung der Lawine im Ablagerungsbereich erkennen. Die an der Schneeoberfläche liegenden Äste sind dabei ein Anzeichen für die Ausdehnung des Staubanteils der Lawine. Die geknickten und geworfenen Bäume deuten auf eine noch relativ hohe Druckwirkung der Lawine in diesem Bereich hin.

# 6.3 Fließhöhen

Die simulierten Fließhöhen wurden mit Schäden und Fotos, welche im Zuge einer Geländebegehnungen aufgenommenen wurden, verglichen.

In Abb. 31 sind Schneeablagerungen an den, am Rand der Lawinenbahn gelegenen, Fichten erkennbar. Diese Ablagerungen sind an der, der Fließrichtung der Lawine abgewandten, Seite der Bäume zu finden. Ablagerungen in diesem Gebiet sind auf den hohen Staubanteil der Lawine zurückzuführen.

Die simulierten Fließhöhen am Prallhang der Lawine (siehe Abb. 19) sind etwas kurz ausgefallen. Dies kann jedoch an einer Vorverfüllung des Grabens am Riffelboden liegen. Diese Vorverfüllung ist im Geländemodell der Simulation nicht extra berücksichtigt worden.



Abbildung 31: Schneeablagerungen an Fichten im Ablagerungsbereich der Lawine – aufgenommen direkt nach dem Ereignis durch Walter Friedl (Ötscherlifte Gesmbh)



Abbildung 32: Schaden an einem Baum in der Sturzbahn der Lawine

In Abb. 32 sieht man einen Schaden an einer Fichte (westlicher Randbereich der oberen Surzbahn). Dieser Schaden liegt an der, der Fließrichtung direkt zugewandten, Seite des Baumes und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Wirkungen des modellierten Ereignisses zurückzuführen. Die simulierte Fließhöhe in diesem Bereich liegt zwischen 2 m und 3 m. Der Schaden befindet sich in einer Höhe von knapp 4 m.

# 7. <u>DAS MODELL DES BEMESSUNGSGEREIGNISSES DER</u> "KLEINEN ÖTSCHERBACH LAWINE"

Das Modell der Bemessungslawine wurde auf Basis der in Kap. 6 simulierten Lawine kalibriert. Die Eingangsparameter: Anbruchgebiet, Widerstandsgebiete, Entrainmentbereich, wurden dabei neu ermittelt.

# 7.1 <u>Eingangsdaten</u>

Eingangsdaten:	Herkunft:	
DGM (Digitales Geländemodell)	Abteilung Hydrologie und Geoinformation	
	Niederösterreich	
Anbruchgebiete	Geländestudie u. Szenarioanalyse, EVA+	
Bereiche mit erhöhten Oberflächenrauhigkeiten	Generiert aus DGM und Daten der Befliegung (siehe	
	Kap. 3.1)	
Schneeaufnahmebereiche	Generiert aus Orthophoto und DGM	
(Snow Entrainment Areas)		
Spezifische Schnee und Lawinenparameter	Parametersets	

### Tabelle 3: Eingangsdaten und Herkunft

### 7.1.1 Digitales Geländemodell

Das DGM wurde unverändert aus der Simulation des dokumentierten Ereignisses übernommen. (siehe Kap. 5.1.1)

### 7.1.2 Anbruchgebietsfläche

Um das Anbruchgebiet des Bemessungsereignisses zu bestimmen wurde das gesamte Einzugsgebiet der Lawine auf Basis einer Neigungskartierung in Kombination mit Orthophotos und den Daten der Geländebegehnungen nach potentiellen Anbruchgebieten untersucht. Dabei wurden speziell jene Gebiete in Betracht gezogen, welche in Abb.33 dargestellt sind.



Abbildung 33: Potentielle Anbruchgebiete

Die Geländebegehnungen und die Luftbildaufnahmen des Gebiets haben gezeigt, dass in den sekundären Anbruchgebieten 1 und 2 (siehe Abb. 33) kleinere Lawinenabgänge möglich sind. Bei genauerer Betrachtung ist die Größe der Lawinen durch eine relativ starke Bewaldung des Gebiets eingeschränkt. Hier wird maximal von kleinen Waldlawinen ausgegangen, welche auf die Lawine aus dem primären Anbruchgebiet kaum eine Auswirkung haben.

Allerdings ist wahrscheinlich, dass die durch die Dynamik der Lawine begünstigte fortschreitende Ausbreitung der Buchenbestände (siehe Kap. 2.2), eine Ausweitung der sekundären Anbruchgebiete bewirken kann.

In beiden sekundären Anbruchgebieten ist die Sturzbahn auf parallel zur Hauptlawine verlaufende Gräben beschränkt. Dies wurde durch eine Fließlawinensimulation mittels SamosAT bestätigt.

Das Anbruchgebiet der "kleinen Grünloch Lawine", welches westlich des primären Anbruchgebiets der "kleinen Ötscherbach Lawine" liegt, verläuft zur Gänze in einem parallel zum Einzugsgebiet der "kleinen Ötscherbach Lawine" liegendem Graben und reicht unter Umständen bis auf die darunterliegende "Distelpiste" der Ötscherlifte. Die "kleine Grünloch Lawine" hat aber keinerlei Einfluss auf die "kleine Ötscherbach Lawine". Es wurde daher nur das primäre Anbruchgebiet im Modell der Bemessungslawine berücksichtigt.

Die Abgrenzung des Anbruchgebiets wurde mittels ArcGIS, durch Verwendung einer Neigungskarte, eines Orthophotos und unter Berücksichtigung der Geländekrümmung bestimmt. Laut ONR 24805 sind Lawinen bei einer Geländeneigung von 28° – 55° möglich.

Laut MARGRETH (2004) spielt auch die Bewaldung eine grundlegende Rolle in der Entstehung von Anbruchgebieten. Hier sind vor Allem immergrüne Bäume wie zum Beispiel Fichten oder Tannen wirksam.

"In Kammbereichen, insbesondere in Leeseiten von Gebirgen, kommt es zu massiven Schneeakkumulationen, welche weit über den normalen Niederschlag hinausgehen. Diese Akkumulationen werden noch durch die Morphologie eines Anbruchgebietes gefördert, wenn dieses eine leichte Muldenform aufweist, sodass Einwehungen von mehreren Richtungen möglich sind." (SAUERMOSER & RUDOLF-MIKLAU, 2012)



Abbildung 34: Anbruchgebietsfläche des Bemessungs Ereignisses

Das Anbruchgebiet des dokumentierten Ereignisses wurde dabei im entsprechenden Neigungsbereich bis zum Grat nach oben und bis zum Waldrand im Osten vergrößert.

Nach unten wurde das Anbruchgebiet mit dem Grad der Felswand begrenzt. Da die Luftbildaufnahmen eine Verfüllung des Bereichs unterhalb der direkt an das Anbruchgebiet angrenzenden Felswand zeigen, wurde dieser Bereich nicht als Anbruchgebiet in das Modell übernommen.

### 7.1.3 Anrissmächtigkeit

Die Anrissmächtigkeit wurde in dieser Arbeit gemäß SALM, ET AL., 1990 ermittelt. Dieses Verfahren hat sich im Bereich der Lawinenmodellierung, vor allem in der Praxis, etabliert.

Ein grundlegender Eingangswert für diese Methode bildet die 150-jährliche dreitägige mittlere Neuschneehöhe.

In dieser Arbeit wurde das EVA+ (Extreme Value Analysis enhanced) Tool verwendet um eben diese für das Bemessungsszenario notwendige 3-tägige Neuschneehöhe, mit einem Wiederkehrintervall von 150 Jahren, zu ermitteln.

### 7.1.3.1 <u>Das EVA+ Tool</u>

EVA+ (Extreme Value Analysis enhanced) ist ein interaktives Online-Tool für Extremwert-Statistische Analysen von meteorologischen Daten. Es wurde von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) im Zuge des METEORISK-Projektes (Intereg 3b) entwickelt, und wird seit dem laufend erweitert und verbessert.

Das EVA+ Tool besteht aus einer Datenbank in Kombination mit Web-basierten Tools und erleichtert und vereinheitlicht extremwertstatistische Auswertungen von externen Experten, wie etwa dem Lawinenwarndienst oder Ingenieurbüros. Das EVA+ Tool steht auch den Experten der Wildbach- und Lawinenverbauung zur Verfügung. Es eignet sich vor allem für wissenschaftliche Arbeiten sowie gutachterliche Tätigkeiten bzw. Vorhersagen.

Derzeit verwertete Parameter sind Niederschlagsparameter wie Regen, Schneehöhe, Neuschnee, Schneehöhendifferenz, mittlerweile aber auch Wind, Temperatur, Abfluss und Erdbebenmagnituden. Mit Erlaubnis des Eigentümers können auch Messstationen, welche nicht von der ZAMG betrieben werden, in die Datenbank integriert werden. Die Stationen des Hydrographischen Dienstes sind mittlerweile ebenfalls in die Datenbank des EVA+ integriert worden und nutzbar. Der von ZINGERLE (2013) vorgeschlagene Ablauf, in Schritten, einer Analyse im EVA+ Tool ist folgender:

- "1. Schnellschuss: Standardeinstellungen belassen:
  - •Distribution: GEV (Generalisierte Extremwertverteilung)
  - •Adaption Method: MLE (Maximum Likelihood)
  - •Completeness of selected Periods: 90%
  - •Bei Summenparametern: Missing in Aggregation Interval: 100%
- 2. Analyse durchführen
- 3. Qualität der Anpassung überprüfen (goodness of fit)
  - •Länge der Datenreihe
  - •Quantile Plot
  - •Probability Plot
  - •Return Level Plot
  - •Konfidenzintervall
  - •*shape parameter*  $\xi$
  - •Kennzahlen

# 4. Wiederholung mit GPD (Generalized Pareto Distribution), eventuell auch mit L-Moments

## 5. Bester Fit gewinnt"

Die Ergebnisse werden durch das EVA+ Tool in einer übersichtlichen Form dargestellt und können als .pdf- oder als .csv-Datei exportiert werden. Für eine erste Kontrolle der Qualität der Ergebnisse werden mehrere Grafiken automatisch erstellt. (siehe Abb. 36)

### 7.1.3.2 Ermittlung der 3-tägigen 150-Jährlichen Neuschneehöhe

Als Datengrundlage wurden im EVA+ Tool die Daten der Station Lackenhof ausgewählt. Als theoretische Verteilung die 3-parametrige GEV (Generalisierte Extremwertverteilung) ausgewählt.

Die generalisierte Extremwertverteilung ist, laut HOSKING, ET AL. (1985), weit verbreitet im Bereich des Modellierens von extremen Naturereignissen.

Auch die typische Gumbel-Verteilung kann im EVA+ verwendet werden. Eine dritte mögliche Verteilung ist die GPD (Generalized Pareto Distribution).

Die generalisierte Pareto-Verteilung wird, laut JUÁREZ & SCHUCANY (2004), als Extremwert-Modell häufig für Werte über hohen Grenzwerten verwendet.

Das EVA+ Tool beinhaltet eine Funktion welches, in diesem Zusammenhang eine POT (peak over threshold – Analyse), ermöglicht. Die POT-Analyse verwendet einen sogenannten Schwellenwert. Anstatt der Jahreshöchstwerte werden Messwerte, welche über diesem Schwellenwert liegen, für die Anpassung der theoretischen Verteilung verwendet.

Da ein sinnvoller Schwellenwert für die vorliegenden Daten nicht ermittelt werden konnte wurde auf eine Verwendung der POT-Analyse in dieser Arbeit verzichtet.

Die Station Lackenhof besitzt eine relativ lang zurückreichende Messreihe von Neuschneehöhen von 111 Jahren. Die Parameterschätzung wurde deshalb mittels der MLE-Methode (Maximum Likelihood) durchgeführt. Die gewünschte Methode zur Parameterschätzung kann ebenfalls im EVA+ direkt ausgewählt werden. Die verfügbaren Methoden sind MLE und die LME (L-Momente).

Allgemein gilt nach ALKASASBEH & RAQAB (2009), dass die LME-Methode einen theoretischen Vorteil gegenüber der konventionellen MLE-Methode, durch eine höhere Robustheit gegenüber Ausreissern, besitzt. Sie ist dadurch in kleinen Stichproben oft genauer als die MLE-Methode.

T [Years]	fresh snow (day) [cm]	CI [%]
1	67.7	9
2	85.4	8
3	95.9	8
4	103.3	8
5	109.0	9
6	113.7	9
7	117.7	9
8	121.1	10
9	124.1	10
10	126.9	10
15	137.3	12
20	144.6	13
25	150.3	14
30	155.0	15
40	162.4	16
50	168.1	17
75	178.4	20
100	185.7	22
150	196.1	24
200	203.4	26
300	213.7	29

Abbildung 35: Ergebnisse der Extremwert-Analyse

Das Ergebnis der Analyse im Bezug zur 150-jährlichen dreitägigen Neuschneehöhe ist 196,1 cm, bei einem Konfidenzintervall von ±24%. (Abb. 36)
### 7.1.3.3 Graphische Kontrolle:



Der <u>Return Level Plot</u> (Abb. 36) stellt den theoretischen Wiederkehrintervall dar (rote Linie). Zusätzlich wird der 95% Konfidenzintervall (blaue Linie) und die einzelnen Messungen (orange Punkte) abgebildet.

Der <u>Density Plot</u> (Abb. 36) zeigt die theoretische Verteilungsfunktion (blaue Linie), angepasst an das Histogramm der Messungen (rosa Balken).

Im <u>Pobability Plot</u> (Abb. 36) wird die Verteilungsfunktion des theoretischen Modells, verglichen mit der Verteilungsfunktion der Messungen, durch die blaue Linie dargestellt. Je geringer die Abweichung der Messwerte (orange Punkte) von dieser Linie, desto besser also die Qualität des Modells. Im Probability Plot ist darauf zu achten, dass die mittleren und unteren Werte wichtiger sind als die Werte im höheren Bereich. Da im oberen Bereich die Wahrscheinlichkeit 1 annimmt.

Im <u>Quantil Plot</u> (Abb 36) werden berechnete Schneehöhenwerte mit den gemessenen Werten verglichen. Zuvor werden die Daten der Größe nach geordnet. Am Quantil Plot kann man erkennen, welche Messwerte durch das Modell über bzw. unterschätzt werden.

Anhand von Abb. 36 kann man erkennen, dass die Verteilung sehr gut mit dem Modell übereinstimmt.

#### 7.1.3.4 Ermittlung der Anrissmächtigkeit nach Salm, 1990

Der extremwertstatistisch ermittelte Wert aus dem EVA+ Tool wird nun nach SALM, ET AL. (1990) gemäß dem Seehöhenunterschied zwischen Messstation und Anbruchgebiet korrigiert. Vorgeschlagen wird hier der Wert von 5 cm auf jeweils 100 m Seehöhenunterschied. Dies macht einen Zuschlag von rund 30 cm aus.

Der nächste Korrekturfaktor wird durch eventuelle Triebschneeablagerungen im Einzugsgebiet bestimmt. Hier wird ein Wert zwischen 30 cm und 50 cm vorgeschlagen. Da es im Anbruchgebiet der "kleinen Ötscherbach Lawine" laut Walter Friedl (siehe Kap. 3) zu massiven Triebschneeablagerungen aus dem nordwestlich gelegenem Nährgebiet kommt, wird ein Zuschlag von 50 cm angenommen.

Der auf Triebschneeablagerungen und Höhenunterschied korrigierte Wert wurde noch, gemäß SALM, ET AL. (1990), mit der Neigungsabhängigkeit korrigiert. Bei einer im ArcGIS 10 errechneten durchschnittlichen Hangneigung des Anbruchgebietes von 36,8° ergibt sich ein Faktor von 0,67.

Es wurde eine mittlere Anrissmächtigkeit von rund 1,85 m errechnet. Es ergibt sich somit ein Anbruchvolumen von rund 143.000 m<sup>3</sup>.

#### 7.1.4 Snow Entrainment

Das Snow Entrainmentgebiet (siehe Kap. 4.1.3) wurde gemäß den veränderten Verhältnissen, neu ermittelt.

Aufgrund der, hauptsächlich durch den Abgang der in Kap. 5 modellierten Lawine, veränderten bewaldeten Fläche, wurde das Entrainmentgebiet neu ermittelt. Dabei wurde lateral die Entrainmentfläche bis an den Waldrand gezogen. Die untere Grenze wurde wie im Modell des dokumentierten Ereignisses wieder im Gebiet des Prallhangs eingezeichnet. In diesem Punkt ist das in Kap. 3.1.1 erstellte normalisierte digitale Oberflächenmodell bei der Ermittlung der Grenzen des bewaldeten Gebiets von Nutzen gewesen.



Abbildung 37: Entrainmentfäche der Bemessungslawine

## 7.1.5 Widerstandsgebiete

Die Widerstandsgebiete wurden ebenfalls den aktuellen Bewaldungsverhältnissen des Lawineneinzugsgebiets angepasst. Zu diesem Zweck wurde, analog zu Kap. 5.1.4 mittels ArcGIS 10, Gebiete in denen eine annähernd homogene Bewuchs Hohe vorherrschte, Flächen digitalisiert.



Abbildung 38: Widerstandsgebiete der Bemessungslawine

7.1.6 Schnee- und Lawinen-Parameter

Es wurden drei Simulationen dieses Modells durchgeführt. Zuerst eine Staublawine ohne Snow Entrainment, unter Verwendung des Parametersets "PSA ohne Entrainment". Ebenso wurde dasselbe Modell mit Entrainment und dem Parameterset "PSA mit Entrainment" erstellt (siehe Kap. 5.1.5).

Das Modell ohne Entrainment wurde jedoch nur zur Kontrolle der Annahmen im Modell mit Entrainment herangezogen. (siehe Kap. 7.1.4)

Zusätzlich wurde eine Simulation einer Fließlawine als Bemessungsereignis durchgeführt. In diesem Fall wurde das Parameterset "DFA mit Entrainment" (siehe Abb. 39) verwendet. (siehe Kap. 8.1.1)

-	Parameter-Set:DFA mit Entrainment
÷	Schneeaufnahme-Parameter
-	globale Schneeaufnahme - Flächendichte [kg/m2]:0
-	globale Schneeaufnahme - Raumdichte [kg/m3]:100
	globale Schneeaufnahme - Schneemächtigkeit [m]:0
	- Scherwiderstand:0
	<ul> <li>Verformungswiderstand:0</li> </ul>
	Spezifische Flaechen-Aufnahme-Energie:5000
	🗄 Punktquelle für Masse

Abbildung 39: Parameterset "DFA mit Entrainment"

# 8. <u>ANALYSE UND INTERPRETATION DER</u> <u>SIMULATIONSERGEBNISSE IM BEZUG ZUR</u> <u>GEFAHRENZONENPLANUNG</u>

Die wichtigsten Resultate der Simulation sind in folgenden Bildern dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation des Bemessungsereignisses sind, im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des dokumentierten Ereignisses, plausibel. (siehe Kap. 6)

Durch das höhere Anbruchvolumen ist die räumliche Verteilung der Ablagerungen etwas weiter als die Ablagerungen der dokumentierten Lawine.



Abbildung 40: Simulierte Ablagerungshöhen der Bemessungs-Staulawine links. Ablagerungshöhen der dokumentierten Lawine (siehe Kap. 6)



Abbildung 41 Druckverteilung der simulierten Bemessungs-Staublawine links. Druckverteilung des dokumentierten Ereignissses rechts.

Der Druck ist im Ergebnis der Bemessungslawine höher als im Ergebnis des dokumentierten Ereignisses. Im Simulationsergebnis des dokumentierten Ereignisses kommt Druck, oberhalb der 25 kPa Grenze, nicht vor. Dies ist ebenfalls hauptsächlich durch das höhere Anbruchvolumen der Bemessungslawine begründet. Die räumliche Verteilung des Drucks ist, vor allem, im Ablagerungsbereich breiter ausgedehnt.



Abbildung 42: Fließtiefe der Bemessungsstaublawine links. Fließtiefe des dokumentierten Ereignisses (siehe Kap. 6) rechts.

Die Fließtiefen sind sich in beiden Simulationsergebnissen ähnlich. Die Ausdehnung im Ablagerungsbereich unterscheidet sich.

Interessant ist an diesem Ergebnis vor allem der Umstand, dass die dokumentierte Lawine eine höhere laterale Ausbreitung in Richtung des Prallhangs beschreibt.



Abbildung 43: Simulierte Druckverteilung der Bemessungs-Fließlawine

Die Druckverteilung der Bemessungs-Fließlawine ist im Besonderen für die Ermittlung der Gefahrenzonen notwendig (siehe Kap. 8.1).

#### 8.1 <u>Gefahrenzonenplanung</u>

Gesetzlich verankert ist die Gefahrenzonenplanung in Österreich im Forstgesetz 1975, BGBl. Nr. 440/1975, Abschnitt 2, sowie in der Verordnung über die Gefahrenzonenpläne 1976, BGBl. Nr. 436/1976.

"Die Gefahrenzonen stellen eine gutachterliche Feststellung der Summenlinie aller Möglichkeiten im Falle eines Bemessungsereignisses dar, und können als qualifizierte Gutachten mit Prognosecharakter gewertet werden [...]. Generelles Ziel der Gefahrenzonenplanung ist die Darstellung von Bereichen, die durch Wildbäche und Lawinen gefährdet sind, des Grades der Gefährdung sowie der für Schutzmaßnahmen zu reservierenden Flächen." (STÖTTER & FUCHS, 2006)

Laut LEBENSMINISTERIUM (2010) wird das Flächenausmaß und die Intensität der Gefährdungen, in diesem Zusammenhang, durch rote und gelbe Gefahrenzonen dargestellt.

Die Gelbe Gefahrenzone der Lawine ist gemäß LEBENSMINISTERIUM (2010) ein Teil des raumrelevanten Bereichs, innerhalb des Plangebiets, in dem eine Druckwirkung der Lawine zwischen 1 und 10 kN/m<sup>2</sup> beziehungsweise eine Schneeablagerungshöhe von 0,2 m - 1,5 m vorkommt. In der roten Gefahrenzone ist diese Druckwirkung > 10 kN/m<sup>2</sup>, beziehungsweise die Ablagerungshöhe > 1,5m.



Abbildung 44: Ermittelte Gefahrenzonen im Ablagerungsbereich, ohne Berücksichtigung der Raumrelevanz

Durch die Ergebnisse der Simulation der Bemessungslawine wurden Druckbereiche und Abllagerungshöhen (Abb. 40) der Lawine ermittelt (siehe Kap. 7). Da nicht automatisch von einer Staublawine als Bemessungsereignis ausgegangen werden kann, wurden die Druckbereiche der simulierten Fließlawine ebenfalls in die Ausweisung der Gefahrenzonen miteinbezogen. Zu diesem Zweck wurden die errechneten Druckverteilungen mit dem Merge-Tool in ArcGIS10 zu einem Polygon-Shapefile zusammengefügt.

Die kombinierte Druckverteilung wurde des Weiterem in die, für eine Ausweisung der Gefahrenzonen notwendigen, Druckgrenzen (1-10 kN/m<sup>2</sup> u. > 10 kN/m<sup>2</sup>) unterteilt.

Das Ergebnis dieser Einteilung, im Ablagerungsgebiet der Lawine, ist in Abb. 44 dargestellt.

### 9. <u>NACHWORT</u>

Da sich das Einzugsgebiet der "kleine Ötscherbach Lawine" in einem Schigebiet befindet, wird die Lawine bei Gefährdung der Betriebssicherheit regelmäßig durch Sprengung ausgelöst um das Gefährdungspotential der Lawine so gering wie möglich zu halten.

Dieser Umstand führt dazu, dass eine länger andauernde Akkumulation von Schnee im Anbruchgebiet weniger zum Gefährdungspotential der Lawine beiträgt, als in kurzer Zeit in Form von Starkniederschlägen gefallene, oder durch starken Wind verfrachtete, Schneemassen.

Durch Eingehen der dreitägigen 150-jährlichen Neuschneemenge in das Bemessungsverfahren, sowie einer mit dem maximalen Wert von 50 cm angenommenen Triebschneeablagerung, wird in der vorliegenden Arbeit diesem Umstand Rechnung getragen. (siehe Kap. 7.1.3 und Kap. 2.1.3)

Ein Lawineneinzugsgebiet ist als dynamisches System zu verstehen, welches sich der vorherrschenden Dynamik der Lawine mit der Zeit anpasst. Durch das "Sprengen" der Lawine wird dieses System stark beeinflusst.

Durch das Fehlen von permanenten technischen Schutzmaßnahmen können vor allem auch waldbauliche Maßnahmen (soweit möglich), im Lawineneinzugsgebiet, die Dynamik der "kleinen Ötscherbach Lawine" mitbestimmen.

#### Zusammenfassung:

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein möglichst genaues Modell der kleinen Ötscherbachlawine zu erstellen. Durch dieses Modell sollten Erkenntnisse über die Dynamik der Lawine gewonnen werden. Dies soll in weiterer Folge zu einer Zonierung, analog zur Gefahrenzonenplanung in Österreich, des bedrohten Gebiets führen.

Als erster Schritt wurden möglichst viele Informationen über die "kleine Ötscherbachlawine" gesammelt. Anhand von Geländebegehungen, Befragung von ortskundigen Experten sowie Analyse der vorhandenen Wetter- und Gelände-Daten wurde eine Datengrundlage für die folgende Modellierung der Lawine geschaffen. Ein gut dokumentierter Abgang der Lawine stellt in dieser Arbeit eine weitere Informationsgrundlage dar. Von diesem Ereignis wurde durch eine Befliegung des Lawineneinzugsgebiets auch ein ALS (Airborne Laserscan) aufgenommen. Aus den Daten des ALS wurde ein DOM (digitales Oberflächenmodell) der Schneeoberfläche gefertigt. Dieses DOM findet als Grundlage für die Kalibrierung des Lawinenmodells Anwendung.

Das Lawinenmodell wurde mit Hilfe des Lawinesimulationsprogramms SamosAT gefertigt. Dieses Simulationsprogramm wurde aus mehreren verschiedenen Gründen für diese Arbeit ausgewählt.

Als nächster Schritt wurde der dokumentierte Abgang der Lawine modelliert.

Nach der Auswertung der Ergebnisse wurde ein Bemessungsereignis nach den Kriterien der Gefahrenzonenplanung festgelegt. Das Modell der dokumentierten Lawine wurde daraufhin mit den Eingangsparametern des Bemessungsereignisses angepasst und Simulationen im SamosAT durchgeführt.

Um schließlich Lawinengefahrenzonen abzugrenzen wurden die Ergebnisse der Simulation ausgewertet und auf deren Plausibilität überprüft. Die durch die Simulation errechneten roten und gelben Zonen stellen dabei das Ergebnis der vorliegenden Untersuchung dar.

#### Abstract:

The aim of this thesis was to create an accurate model of the "kleine Ötscherbachlawine". The results derived from the simulation of this model should lead to calculated boundaries of hazard zones in accordance with the Austrian guidelines for hazard zoning.

As a first step, all available information about the avalanche was collected. Several field observations, interrogations of local experts, as well as analyses of weather and terrain Data were carried out. In this context a digital surface model of the snow surface in the catchment area, which was created from airborne laser scanner data, serves as basis for the calibration of the model.

The next step was to build a model of the definite event using the avalanche simulation software SAMOS-AT. With the information, received from the simulation results, a second model was created. The second model represents the design event of this particular avalanche.

After the simulation of the second model, the results of the observation were checked for plausibility. The results were then used to define hazard zones according to the Austrian guidelines for hazard zoning. These hazard zones represent the final results of this Thesis.

# 10. <u>VERZEICHNISSE</u>

## 10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip Skizze des Arbeitsablaufs der Diplomarbeit2
Abbildung 2: Lageplan der "kleinen Ötscherbach Lawine"
Abbildung 3: Klimadiagramm der Station Lackenho (WALTER & LIETH, 1960)5
Abbildung 4: Messreihe der Tagesneuschneesummen im Frühjahr 2009. (Datengrundlage: HYDROGRAPHISCHER DIENST, 2013)
Abbildung 5: Verteilung der Baumarten im Lawineneinzugsgebiet
Abbildung 6: Berechnetes nDOM (normalisiertes digitales Oberflächenmodell) (siehe Kapitel 3.2) und räumliche Verteilung der Punktmessungen des ALS (Airborne Laserscan)
Abbildung 7: Reflektionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Materialien (PFENNIGBAUER & ULLRICH, 2011)
Abbildung 8: Orthophoto (erstellt aus den Luftbildaufnahmen der Befliegung)16
Abbildung 9: Übersicht und Klassifizierung der gebräuchlichen Lawinenmodelle (GRANIG, 2012)
Abbildung 10: 3-Ebenen Struktur von SamosAT (SAMPL & AVL LIST GMBH, 2006)26
Abbildung 11: Ermittlung des Anbruchgebietes mithilfe des erstellten normalisierten digitalen Oberflächenmodels und des Orthophotos (siehe Kap. 3.2)
Abbildung 12: Schneeprofil (erstellt durch den Lawinenwarndienst Niederösterreich)33
Abbildung 13: Entrainmentgebiet der dokumentierten Lawine
Abbildung 14: Digitalisierte Widerstandsgebiete über normalisiertem digitalen
Oberflächenmodell (siehe Kap. 3.2)

Abbildung 15: Parameterset "PSA ohne Entrainment"
Abbildung 16: Parameterset "PSA mit Entrainment"
Abbildung 17: Simulierte Ablagerungshöhe des dokumentierten Ereignisses
Abbildung 18: Simulierte Druckverteilung des dokumentierten Ereignisses
Abbildung 19: Simulierte Fließtiefen des dokumentierten Ereignisses
Abbildung 20: Simulierte Ablagerungen über dem, aus ALS (Airborne Laserscan) -Daten generierten normalisierten digitalem Oberflächenmodel (siehe Kap. 3.2)
Abbildung 21: Vergleich der simulierten Ablagerungshöhen, in Meter, über einem Orthophoto (aufgenommen 3 Tage nach dem Ereignis)
Abbildung 22: Ablagerungsgebiet - aufgenommen bei einer Geländebegehung im Sommer 201347
Abbildung 23: Ablagerungsgebiet 3 Tage nach dem Ereignis - aufgenommen von Ing. Egger Norbert (WLV)
Abbildung 24: Druckverteilung und entwaldete Flächen der Sturzbahn
Abbildung 25: Foto an der Position "Foto 1" (siehe Abb. 24)
Abbildung 26: Foto an der Position "Foto2" (siehe Abb. 24)
Abbildung 27: Schäden im Bereich des Prallhangs, an der Position "Foto 3" (siehe Abb. 24) - aufgenommen von Waslter Friedl (Ötscherlifte GesmbH)
Abbildung 28: Druckverteilung der simulierten Lawine im Ablagerungsbereich über dem Orthophoto (2007)
Abbildung 29: Druckverteilung der Simulierten Lawine im Ablagerungsbereich über dem, aus den Daten der Befliegung erstelltem, Orthophoto
Abbildung 30: Ablagerungsbereich (siehe Abb. 29 "Foto 4") der Lawine – aufgenommen von Walter Friedl (Ötscherlifte GesmbH) direkt nach dem Ereignis

Abbildung 31: Schneeablagerungen an Fichten im Ablagerungsbereich der Lawine -
aufgenommen direkt nach dem Ereignis durch Walter Friedl (Ötscherlifte Gesmbh)55
Abbildung 32: Schaden an einem Baum in der Sturzbahn der Lawine
Abbildung 33: Potentielle Anbruchgebiete
Abbildung 34: Anbruchgebietsfläche des Bemessungs Ereignisses
Abbildung 35: Ergebnisse der Extremwert-Analyse65
Abbildung 36: Graphische Auswertung der ersten Analyse
Abbildung 37: Entrainmentfäche der Bemessungslawine
Abbildung 38: Widerstandsgebiete der Bemessungslawine
Abbildung 39: Parameterset "DFA mit Entrainment"70
Abbildung 40: Simulierte Ablagerungshöhen der Bemessungs-Staulawine links.
Ablagerungshöhen der dokumentierten Lawine (siehe Kap. 6)
Abbildung 41 Druckverteilung der simulierten Bemessungs-Staublawine links.
Druckverteilung des dokumentierten Ereignissses rechts
Abbildung 42: Fließtiefe der Bemessungsstaublawine links. Fließtiefe des dokumentierten
Ereignisses (siehe Kap. 6) rechts
Abbildung 43: Simulierte Druckverteilung der Bemessungs-Fließlawine74
Abbildung 44: Ermittelte Gefahrenzonen im Ablagerungsbereich, ohne Berücksichtigung der
Raumrelevanz

## 10.2 <u>Tabellenverzeichnis</u>

Tabelle 1: Kennwerte der Station Lackenhof	6
Tabelle 2: Eingangsdaten und Herkunft	31
Tabelle 3: Eingangsdaten und Herkunft	57

## 10.3 Formelverzeichnis

Formel 1: Voellmy Formel (Folien zu RAMMS International User Workshop,	
2012)	.19
Formel 2: Berechnung des turbulenten Reibungswert im Lawinensimulationsprogramm	
ELBA+ (NiT Technisches Büro GmbH,	
2005)	.21
Formel 3: Reibungsmodell SamosAT (Sampl & AVL List GmbH,	
2006)	.23

#### 10.4 Literaturverzeichnis

KILIAN, W., MÜLLER, F. & STARLINGER, F., 1993. Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs: Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. Wien: Forstl. Bundesversuchsanst. Waldforschungszentrum, 1993.

ALKASASBEH, M. & RAQAB, M., 2008. Estimation of the generalized logistic distribution parameters: Comparative study. In: Statistical Methodology, Volume 6, Issue 3. Amman: Elsevier, p. 262–279, 2008.

CHRISTEN, M., KOWALSKI, J. & BARTELT, P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. In: Cold Regions Science and Technology Volume 63. Davos: Elsevier, p. 1-14, 2010.

Folien zu RAMMS International User Workshop, 2012. Introduction to RAMMS. Davos: s.n., 2012.

GELDSETZER, T., JAMIESON, B., DEPT. OF CIVIL ENGINEERING, UNIVERSITY OF CALGARY & DEPT. OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS, 2000. Estimating dry snow density from grain Form and Hand Hardness. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop, October 2000. Montana: American Avalanche Association, p.121-127, 2001.

GRANIG, M., 2012. Modellierung von Naturgefahren-Prozessen. In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz Heft 169. Wien: Verein der Diplomingenieure der WLV Österreicher, 2012.

GRANIG, M. & OBERNDORFER, S., 2007. Entwicklung und Kalibrierung des Fliess- und Staublawinenmodells Samos-AT. In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz Heft 158. Wien: Verein der Diplomingenieure der WLV Österreicher, 2007.

HANN, J., 1904. Klimatographie von Niederösterreich. 2. Wien: Direktion d. K. K. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1904.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. & WOOD, E. F., 1985. Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments. In: Technometrics Vol. 27. Cambrige: ASQC and the American Statistical Association, p. 251-261, 1985.

HYDROGRAPHISCHER DIENST, 2013. EHYD. [Online] Available at: <u>http://ehyd.gv.at</u> [Zugriff am 04 2013].

JÖRG, P. & GRANIG, M., 2013. Entrainmentstudie SamosAT-2013. Schwaz: Stabstelle Schnee und Lawinen, 2013.

JUÁREZ, , S. F. & SCHUCANY, W. R., 2004. Robust and Efficient Estimation for the Generalized Pareto Distribution. In: Extremes Vol. 7. s.l.: Springer Science, p. 237-251, 2004.

KLEEMAYER, K. & VOLK, G., 2000. Integration von dynamisch variablen Fließparametern in ein 2D Voellmy Lawinenmodell. Villach: Internationales Symposion Interpraevent. s.n., p. 451-461, 2004.

LEBENSMINISTERIUM, 2010. die.wildbach - Richtlinie für die Gefahrenzonenplanung. Wien: Die Wildbach & Lebensministerium, 2011.

LIED, K. & BAKKEHOI, S., 1980. Empirical calculations of snow avalanche runout distance based on topographic parameters. In: Journal of Glaciology Vol. 26. Cambridge: International Glaciological Society, p. 165-177, 1980.

LIED, K., HOPF, J., BAKKEHOI, S. & WEILER, C., 1995. Calculation methods for avalanche run-out distance for the Austrian Alps. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute NGI, 1995.

MARGRETH, S., 2004. Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. Davos Dorf: Forum für Wissen, 2004.

NIT TECHNISCHES BÜRO GMBH, (Hrsg.), 2005. Handbuch (2005/04/24) ELBA+. Pressbaum: s.n., 2005.

PFENNIGBAUER, M. & ULLRICH, A., 2011. Multi-Wavelenght Airborne Laser Scanning. New Orleans: International LIDAR Mapping Forum (ILMF), 2011.

PROKOP, A., 2008. Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow. Wien: Cold Regions Science and Technology, Volume 54, Issue 3, p. 155–163, 2011.

SALM, B., BURKARD, A. & GUBLER, H. U., 1990. Berechnung von Fließlawinen eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Davos: Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, Nr. 47, 1990.

SAMPL, P., 2007. SamosAT Beschreibung der Modelltheorie und Numerik. Graz: AVL List GmbH., 2007.

SAUERMOSER, S. & RUDOLF-MIKLAU, F., 2011. Handbuch Technischer Lawinenschutz. Berlin: WILEY-VCH, 2011.

SEIBERT, FRANK & FORMAYER, 2005. Synoptic and regional patterns of heavy precipitation in Austria. Wien: Springer-Verlag, 2005.

STABSTELLE SCHNEE- UND LAWINEN DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG, 2009. Ereignisdokumentation Lawinen 2009. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Forstwesen, 2009.

STÖTTER, J. & FUCHS, S., 2006. Umgang mit Naturgefahren – Status quo und zukünftige Anforderungen. In: Recht im Naturgefahrenmanagement. Innsbruck: Studienverlag, pp. 19-34, 2006.

WALTER, H. & LIETH, H., 1960. Klimadiagramm-Weltatlas. Jena: Fischer, 1967.

ZAMG, 2011. ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik - Jahrbücher. [Online] Available at: <u>http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch</u> [Zugriff am 11 2013].

ZAMG, 2013. EVA+ Tool. [Online] Available at: <u>http://eva.zamg.ac.at/evaplus/</u> [Zugriff am 11 2013]. ZINGERLE, C., 2013. Schulungsunterlagen WLV Fortbildung, Liezen: s.n.