

ENTWICKLUNG UND KALIBRIERUNG DES FLIESS- UND STAUBLAWINENMODELLS SAMOS-AT

DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF THE DENSE AND POWDER SNOW AVALANCHE MODEL SAMOS-AT

Matthias Granig¹, Stefan Oberndorfer²

ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt *SamosAT* wurde 2004 im Auftrag der Wildbach- und Lawinenverbauung gestartet und konnte Ende 2007 abgeschlossen werden. Die Implementierung der neuen Berechnungsmethoden und Computertechnologien findet auch im Modellnamen *SamosAT*, für Advanced Technology, ihren Niederschlag. Das Modell berechnet sowohl Fließ- als auch Staublawinen. Aufgrund der kompletten Überarbeitung der *Samos* Simulationssoftware wurden umfassende Kalibrierungen der einzelnen Parameter und Systemeinstellungen notwendig. Anhand von 22 gut dokumentierten Lawineneignissen wurden die internen und externen Parameter kalibriert. Die starke Vernetzung sowie Abhängigkeit der einzelnen Parameter erforderte eine systematische Untersuchung der Modellparameter. Mit Hilfe von Matrizen konnten die Ergebnisse der Parametermodifikationen den Referenzlawinendaten gegenübergestellt werden, um so die zuverlässigsten Kalibrierungswerte für das *SamosAT* Modell zu erhalten.

Keywords: Lawine, Lawinensimulation, SamosAT

ABSTRACT

The new powder snow avalanche model – *SamosAT* – was initiated in 2004 by the Forest Technical Service for Avalanche and Torrent Control and released in the end of 2007. The advanced model provides simulation tools for dense and for powder flow avalanches. The previous *Samos* simulation platform has been completely redesigned in order to provide improved results and an easier software handling. In regard of these enhanced technologies the name *Samos* has been extended by the affix *AT* for Advanced Technology. The calibration of the model was done with 22 well documented reference avalanches. In a systematic study all internal parameters were analysed and adjusted to the reference data. By creating matrices with the decisive model parameters and the reference avalanches the suitable calibration values for the dense- and powder flow model were determined.

Keywords: Avalanche simulation, SamosAT, model calibration

¹ Stabstelle Schnee und Lawinen, Wildbach und Lawinenverbauung, Swarovskistraße 22a, 6130 Schwaz, Österreich (Tel.: +43-5242-66202, Email: matthias.granig@die-wildbach.at)

² Gebietsbauleitung Pongau, Wildbach und Lawinenverbauung, Bergheimerstrasse 57, 5021 Salzburg, Österreich (Tel.: +43-662-878154, Email: stefan.oberndorfer@die-wildbach.at)

EINLEITUNG

Aufgrund des großen Siedlungsdrucks im alpinen Raum, der hohen Mobilität der Menschen und dem steigenden Bedürfnis nach Sicherheit werden immer präzisere Werkzeuge zur Gefahrenabschätzung von Lawinen notwendig. Lawinensimulationen sind ein möglicher Baustein für eine nachvollziehbare und objektive Berechnung von potenziellen Lawinewirkungen. Besonders in der Gefahrenzonenplanung stellen die Simulationen mittlerweile den Stand der Technik dar. Folglich wird eine hohe Anforderung an die Zuverlässigkeit der Modelle gestellt.

Seit dem „Lawinenwinter“ 1999 ist das Staublawinenmodell Samos im operativen Einsatz und wird daher meist als Samos99 bezeichnet. In einer großen Reihe von Nachrechnungen der Lawinenergebnisse konnten wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse mit dem Modell gewonnen werden. 2004 wurde zur Umsetzung dieses Wissens das Weiterentwicklungsprojekt SamosAT gestartet. Die Grazer Firma AVL List GmbH, die bereits das Vorgängermodell entwickelt hat, wurde mit dem Projekt SamosAT vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) beauftragt. Der Namenszusatz „AT“ im Modellnamen steht für „Advanced Technology“ und repräsentiert die Implementierung neuer Berechnungsmethoden und Computertechnologien. Das Modell SamosAT ist ein 2D bzw. 3D Simulationsprogramm für Fließ- und Staublawinen und bezieht sich im Allgemeinen auf trockene Schneelawinen.

Die Weiterentwicklung SamosAT umfasst eine völlige Überarbeitung der Programmoberfläche, der Modellansätze und der Rechennumerik. Die graphische Benutzeroberfläche wurde optimiert und bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten sowohl im Dateninput als auch im Datenoutput an. Im Gegensatz zu Samos99 stehen mehrere Reibungsmodelle zur Auswahl, die in der Endversion auf zwei Reibungsmodelle limitiert wurden. Das Reibungsmodell SamosAT ermöglicht, je nach Lawinengeschwindigkeit einen variablen Betreibungswinkel δ . Die Fließlawine wird anstatt von mitbewegten Zellen mit Hilfe eines raumfesten Euler Rechengitters simuliert. Weiters ermöglicht das Programm die Simulation von primären und sekundären Anbruchgebieten. Das Staublawinenmodell wurde einerseits auf die neueste Version der gasdynamischen Berechnungsplattform der AVL und andererseits auf ein echtes Zweiphasenmodell (Luft und Eispartikel) umgestellt (SAMPL 2007). Die einzelnen Rechenzellen im Staublawinengitter wurden um ca. ein Drittel verkleinert, um eine höhere Auflösung zu erzielen.

Das Programm verfügt über eine Reihe von Tools, um auf die individuellen Eigenschaften verschiedener Lawinen wie beispielsweise Topographie, Entrainmentdisposition, Einzugsgebietsrauigkeit, Lawinentyp und Lawinengröße eingehen zu können. SamosAT ermöglicht nun drei Arten des Snow-Entrainments: (i) Schneeaufnahme in eindeutig definierten Bereichen, (ii) Schneeaufnahme als globales Entrainment über den gesamten Bereich - optional unter Aufbringung von gewissen Mindestscherkräften - und (iii) Entrainment direkt in das Staublawinenmodul zur Verstärkung der Staublawinendynamik. Die Wirkung von Widerstandsgebieten wird über drei vordefinierte Szenarien gesteuert. Alternativ kann ein vom User frei wählbares Szenario als weitere Option eingesetzt werden. Neben dem Standardsuspensionsmodell steht ein abgeändertes Suspensionsmodell, unter Aktivierung der turbulenten Schmid-Zahl alternativ zur Verfügung (Sampl 2007). Die Berechnung mit der turbulenten Schmid-Zahl verstärkt die Staublawinendynamik, die vor allem bei kleineren

flächenhaften bzw. reinen Flächenlawinen geeignet erscheint (z.B.: Verwalllawine, Gargellnerköpfe-Lawine, Albona-Lawine). Die Berücksichtigung der Bruchlinienwinkel ermöglicht eine Integration der Impulsverluste an markanten Bruchflächen normal zur Lawinenrichtung in Abhängigkeit zur Winkeleinstellung. SamosAT sieht für die Simulation von Dämmen die Implementierung von sogenannten „wall lines“ vor. An diesen definierten Dammkronenlinien der „wall lines“ wird ein Impulsverlust durch Entfernen des Normalvektors am Lawinendamm berechnet.

Die Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL) der WLW in Schwaz führte in enger Zusammenarbeit mit der Firma AVL List die Kalibrierung und Optimierung der Parameter durch. Aufgrund der enormen Rechenzeiten pro Staublawinensimulation von ca. 10h war die systematische Analyse der einzelnen Einstellungen vor allem eine logistische Herausforderung, da über 500 Simulationsläufe durchgeführt wurden. Das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) in Innsbruck unterstützte die Entwicklung unter anderem mit Überprüfungen der simulierten Lawinengeschwindigkeiten mittels Radardaten.

METHODIK

Das Staublawinenmodell Samos99 überschätzt sowohl in der Hauptstoßrichtung als auch in der lateralen Ausdehnung in den meisten Fällen erheblich den maximalen Auslauf von Lawinen. Besonders die Simulation des Fließanteils kann in dieser Form in der Natur nicht nachvollzogen werden. Das klassische Samos99 Reibungsmodell wurde als eine Kombination aus Mohr-Coulomb und dem Chezy Ansatz formuliert. Die Erfahrungen zeigten, dass dieser Ansatz zu wenig sensitiv auf die Topographie reagiert und die simulierte Lawine tendenziell zu stark in die Breite fließt. Bei einem Großteil der Ergebnisse wird der maximale Auslauf überschätzt. Hingegen wird in Samos99 der maximale Auslauf bei enormen Lawinenkubaturen mit gleichmäßigem Auslauf der Lawinenbahn unterschätzt.

Infolge dessen wurden im Modell SamosAT sämtliche Berechnungsmethoden umgestellt und anhand von gut dokumentierten Referenzlawinen neu kalibriert. Der Referenzlawinendatenpool umfasst derzeit einen Lawinenbestand von 22 ausgearbeiteten Lawinenereignissen, der sukzessive erweitert wird. Eine Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur in Wien befasste sich mit diesem Thema, um den Datensatz zu vergrößern (Dichlberger 2008). Die Kalibrierung erfolgte getrennt für Fließ- und Staublawinen, da SamosAT eine separate Berechnung von reinen Fließlawinen (Flachwassermodell) oder Staublawinen (Suspensionsmodell) ermöglicht. Die Trennung beider Prozesse wurde in Absprache mit Dr. Sampl (AVL) seitens der Stabstelle (SSL) für methodisch richtig erachtet, da bei der gekoppelten Berechnung ein zu starker Massenübergang vom Fließanteil in Richtung Staubanteil erfolgt. Dadurch werden die Auslaufweiten der Fließlawine teilweise stark unterschätzt. Um beispielsweise für die Gefahrenzonenplanung die obere und untere Bandbreite (die Extrema) potenzieller Lawinenszenarien abdecken zu können, ist es erforderlich, die Fließlawinenprozesse getrennt von der Staublawinensimulation zu analysieren. Die Staublawinenberechnung erfolgt in einem gekoppelten Modell, das sich aus einem Flachwasser-, Resuspensions- und Suspensionsmodell zusammensetzt. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Referenzlawinen wurden einer qualitativen und quantitativen Analyse unterzogen und zusätzlich den in der Praxis angewendeten

Lawinensimulationsmodellen Samos99 und Elba+ gegenüber gestellt, um dadurch die Bandbreite der einzelnen Ergebnisse vergleichen zu können.

Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wurden die internen Parameter systematisch verändert, um deren Einfluss auf das Ergebnis zu quantifizieren. Die Kriterien der Analyse waren, je nach Datenverfügbarkeit der einzelnen Lawinen die Lawinenausläufänge, die Lawinendruckverteilung, die Lawinengeschwindigkeiten und die Fließhöhen. Der Berechnungsmodus erfolgte zuerst in einem iterativen Abstimmungsprozess, um die modellsensitivsten Parametereinstellungen herauszufiltern. Anschließend wurde systematisch eine Feinabstimmung mit den modellrelevanten Parametern – jene, die das Ergebnis überproportional beeinflussen – durchgeführt. Dabei wurde sukzessive ein Parameterwert modifiziert bei gleichzeitig konstant gehaltenen Grundeinstellungen. Dieser Vorgang der internen Modellparametervariation wurde sowohl für das Fließlawinen- als auch für das Staublawinenmodell systematisch durchgeführt.

Die Auswertung der Simulationen erfolgte in einer qualitativen Ergebnisanalyse. Die lawinenspezifischen Druckgrenzen, Geschwindigkeitsverteilungen, Ablagerungshöhen und Auslaufweiten wurden mit den Chronikaufzeichnungen (Ablagerungskartierungen, Drucknachrechnungen, Geschwindigkeitsberechnungen) verglichen. Anschließend wurden die Ergebnisse in einer Entscheidungsmatrix qualitativ bewertet, um dadurch die zuverlässigsten Parametereinstellungen zu ermitteln.

Ein sich stark auswirkender Faktor auf die Staublawinensimulation ist das Staubgitter. Die Staublawine wird in einem raumfesten Gitter (Euler'sches Gitter) berechnet welches nicht nur das Auslaufverhalten und die Druckverteilung sondern auch die Rechenzeit beeinflusst (mit zunehmender Zellanzahl d. h. kleinerer Gitterauflösung steigt die Rechenzeit an). Es wurden daher Tests in Bezug auf unterschiedliche Zellgrößen vorgenommen. Neben der Zellauflösung wirken sich auch die absolute Gitterhöhe und die räumliche Überdeckung des Gitters über das digitale Gelände erheblich auf das Simulationsergebnis aus. Aus diesem Grund wurde der Einfluss unterschiedlicher Gitterhöhen und die Auswirkung unterschiedlich breiter Konturpolygone (unterschiedliche Flächenabdeckung des Staubgitters) untersucht. Durch eine systematische Überprüfung konnte die Sensitivität des Staubgitters analysiert und in weiterer Folge der Einfluss des Gitters durch die Wahl einer konstanten Gitterhöhe und einer erforderlichen Gitterüberdeckung eliminiert werden.

Neben den internen Parametervariationen wurde der Einfluss der „externen“ Parameter wie Anbruchgebiet, Entrainment, Widerstandsgebiete und Geländeoberfläche (DGM) analysiert. Die Anbruchmasse wurde durch unterschiedliche Abstufungen der Anbruchdichte variiert und anhand mehrerer Referenzlawinen getestet, um die Massensensitivität des Modells zu prüfen. Die Abstufung erfolgte in 25 kg/m³ Stufen und reichte von 75 bis 300 kg/m³ Anbruchdichte. Anhand der Ereigniskartierungen konnte das Auslaufverhalten studiert werden. Die Massenzunahme durch die Schneeaufnahme entlang der Sturzbahn (Entrainment) kann in SamosAT über drei verschiedene Methoden erfolgen: Einpflügen in begrenzten Bereichen, Einpflügen im gesamten Bereich und Aufnahme der Masse direkt in den Staubanteil. In umfangreichen Tests wurden die unterschiedlichen Funktionsweisen geprüft. Die Weiterentwicklung SamosAT ermöglicht nun die Verwendung von verschiedenen Szenarien mit Widerstandsgebieten. Diesbezüglich sind Tests noch im Gange. Die digitalen Geländemodelle stellen als Rechenoberfläche die wesentliche Randbedingung dar. Anhand

von airborne Laserscan Daten wurden unterschiedliche DGM mit Rasterweiten von 3m, 5m, 10m und 25m miteinander verglichen.

BESCHREIBUNG DES REIBUNGSMODELLS SAMOS-AT (FLIESSTEIL)

Der Modellansatz von Savage-Hutter aus dem Modell Samos99 wurde völlig überarbeitet und entspricht in SamosAT einem erweiterten Voellmy Ansatz mit variablem μ und ξ , unter Beachtung des Flachwasser Ansatzes. Neben dem Standardreibungsmodell (SamosAT) steht ein zusätzliches Reibungsmodell (SamosAT1) zur Verfügung. Das Modell SamosAT1 entspricht numerisch dem SamosAT Modell, jedoch mit Aktivierung einer Mindestschubspannung τ_0 . Die Berechnung der Wandschubspannung $\tau^{(b)}$, also die flächenbezogene Reibungskraft am Boden, wird im Reibungsmodell SamosAT wie folgt formuliert (SAMPL 2007):

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

Der Parameter τ_0 [N/m²] gibt die Mindestschubspannung an, damit die Lawine zum Fließen kommt. Die Mindestschubspannung τ_0 muss durch die antreibenden Kräfte überwunden werden, damit eine Bewegung erfolgen kann. Das bedeutet, dass $\bar{\rho} \bar{h} g \cos(\alpha) > \tau_0$ sein muss, bevor sich die Lawine in Bewegung setzen kann. Die Mindestschubspannung ist unabhängig von der Fließmächtigkeit, so dass dadurch im Endeffekt seichte Lawinen überproportional stark gebremst werden. Bei dem voreingestellten Wert $\tau_0=140$ N/m² wirkt sich dieser Term praktisch nur bei Fließmächtigkeiten unter 0.5 m durch Erhöhung des Bettreibungswinkels aus (SAMPL 2007). Die Aktivierung der Mindestschubspannung wirkt sich vor allem bei lang gezogenen und flächenhaft verteilten Auslaufstrecken aus.

Der Tangens des Bettreibungswinkels δ entspricht dem μ (trockene Reibung). Der effektive Bettreibungswinkel δ_{eff} ist gleich dem Verhältnis zwischen Bodenschubspannung und Normalspannung (Druck) senkrecht auf den Boden (SAMPL 2007). Eine Erhöhung des Bettreibungswinkels wirkt sich bremsend auf die Lawine aus.

$$\delta_{eff} = \frac{\tau^{(b)}}{\sigma^{(b)}} \quad [2]$$

R_s^0 bestimmt die Bettreibungsüberhöhung mit abnehmender Geschwindigkeit. Diese ist eine empirische Konstante. Das Auseinanderfließen im Ablagerungsbereich wird über den Wert R_s^0 gesteuert. Mit abnehmender Geschwindigkeit der Lawine wird das Auseinanderfließen verhindert. Eine Erhöhung von R_s^0 bewirkt einen kontinuierlichen Anstieg des Bettreibungswinkels im Auslaufbereich.

$R_s = \frac{\bar{\rho} \bar{u}^2}{\sigma^{(b)}}$ ist das Verhältnis zwischen turbulenten Kräften und Normaldruck durch die

Lawinenlast am Boden (SAMPL 2007). Der Term $\frac{R_s^0}{R_s^0 + R_s}$ erhöht den Bettreibungswinkel

mit abnehmender Geschwindigkeit und steigendem Bodendruck. Das verhindert vor allem im Auslaufbereich das langsame Auseinanderfließen der Lawine, nachdem sie praktisch schon zum Stillstand gekommen ist (SAMPL 2007).

Die Normalspannung $\sigma^{(b)}$ [N/m²] ist gleich dem Bodendruck durch die Lawinenauflast.

Die Karman'sche Konstante κ (kappa) ist eine universelle Konstante aus der Grenzschichttheorie turbulenter Strömungen (siehe z.B. GERSTEN, HERWIG, 1992).

R [m] ist die geometrische Rauigkeit des Bodens. Um die Geschwindigkeiten zu erhöhen und größere Auslaufweiten zu erreichen muss die Rauigkeit herabgesetzt werden.

B ist eine aus der Grenzschichttheorie stammende Rauigkeitskonstante.

BESCHREIBUNG DES STAUBMODELLS IN SAMOS-AT

Trockenschneelawinen bestehen aus einem Eispartikel-Luft Gemisch. Nach dem Verhältnis der beiden Komponenten des Binärgemisches ändert sich auch das dynamische Verhalten. Je nach Volumsanteil von Eispartikel [$\rho=900\text{kg/m}^3$] und Luft [$\rho=1,25\text{kg/m}^3$] spricht man von Fließlawinen oder Staublawinen. Für Staublawinen wird ein Volumsanteil von ca. 1:100 angegeben. Deshalb wird die Strömung im Wesentlichen vom Verhalten der Luft bestimmt. Das bedeutet, dass eine Staublawine wie eine turbulente, partikelbeladene Gasströmung mit kleinem Geschwindigkeitsunterschied zwischen Partikel und Luft behandelt werden kann (SAMPL 2007).

Der Fließzustand ohne nennenswerte zwischengelagerten Luftanteile wird als Fließlawine bezeichnet (Volumsanteil < 1:10). Die mittlere Dichte einer solchen Strömung kann bis zu 400kg/m^3 betragen. Der modellhafte Aufbau einer Staublawine besteht nach SAMPL (2007) aus einer Fließschicht, die über die Geländeoberfläche abgeleitet. An diese Schicht schließt sich die als sehr dünn zu betrachtende Resuspensionsschicht an. Darüber kann sich eine Staubschicht entwickeln, welche in ihrer Ausdehnung jene der zuvor angeführten Schichten bei weitem übertreffen kann.

Die Berechnung des Staubanteils erfolgt in der AVL-FIRE V8 Berechnungsplattform, die über das Resuspensionsmodell mit dem Fließanteil gekoppelt wird. Zur Simulation des Staubanteiles wird über das Berechnungsgebiet ein dreidimensionales Simulationsgitter generiert, das in eine große Anzahl von Berechnungszellen unterteilt wird. Als Randbedingung für die Staubsimulation wird die zwischen Staub- und Fließanteil herrschende Schubspannung τ_w , die vom Geschwindigkeits- und Dichteunterschied zwischen den Teilen abhängt, benötigt. Der Massenstrom j_w von Fließ- zu Staublawine wird pro Fließlawinen-Oberflächeneinheit berechnet. Multipliziert mit der Zeitschrittweite Δt und der zugeordneten Fläche A_p ergibt sich die von der Fließ- zur Staublawine übergeführte Teilmasse $\Delta m_{res} = j_w A_p \Delta t$ pro Berechnungsschritt und entsprechend viele Eispartikel werden in der darüber liegenden Staublawinenzelle erzeugt. Die Anfangsgeschwindigkeit der Eispartikel wird auf die Geschwindigkeit der darunter liegenden Fließlawinen-Oberflächeneinheit gesetzt (SAMPL 2007).

SamosAT ermöglicht eine echte Zweiphasen-Berechnung der Eispartikel und der Luftschichten, um die gasdynamischen Prozesse realistischer darstellen zu können. Neben dem Massenzuwachs ermöglicht diese Methode auch den Massenverlust durch Sedimentation entlang der Lawinensturzbahn. Somit kann dieser Massenverlust auch zu Verzögerung der Lawine führen, besonders an starken Knickungen und Biegungen. Das Berechnungsgitter

muss in Lawinen-Stoßrichtung groß genug ausgelegt werden, damit die bremsende Wirkung der zu verdrängenden Luft auch im Auslaufbereich ausreichend berücksichtigt wird. Ebenso muss die laterale Überdeckung des Rechengitters auf der digitalen Geländeoberfläche ausreichend groß definiert werden, damit das gesamte mitbewegte Luftvolumen in die Berechnung miteinbezogen werden kann.

ERGEBNISSE DER KALIBRIERUNG VON SAMOS-AT

Das Fließ- und Staublawinenmodell SamosAT wurde anhand von 22 Referenzlawinen kalibriert (Tabelle 1). Darüber hinaus wurden im Rahmen der Bearbeitung von Lawinenprojekten der SSL begleitende Testrechnungen durchgeführt, um eine breite Bandbreite an Lawinen prüfen zu können.

Tab. 1: Übersicht der Referenzlawinen.

Tab. 1: Overview of the reference data.

Nr.	Lawinenname	BL	Bezirk	Gemeinde	GBL	Kategorie
1	Aherbach	T	IBK Land	Gries im Sellrain	6.3	GL
2	Albona	V	Bludenz	Klösterle	7.2	GL
3	Alplehner	T	IBK Land	Rum	6.3	GL
4	Arzler Alm	T	IBK-Land	Mühlau	6.3	KL
5	Bleiberglawine	K	Villach-Land	Bleiberg	5.2	KL/GL
6	Birkgraben	Stmk	Liezen	Donnersbachwald	4.2	GI
7	Fleisskargraben	Stmk	Liezen	St. Nikolei im Sölkatal	4.2	GL
8	Galtür	T	Landeck	Galtür	6.2	GL
9	Gargellnerköpfe	V	Bludenz	St. Gallenkirchen	7.2	KL/GL
10	Heiligenblut	K	Spittal/Drau	Heiligenblut	5.4	GL
11	Kanisfluh	V	Bregenz	Bregenzer Wald	7.1	GL
12	Kerngraben	Sbg	Lungau	Tamsweg	3.3	KL
13	Madlein	T	Landeck	Ischgl	6.2	GL
14	Moosbach	T	Landeck	Kappl	6.2	GL
15	Naunzalm	T	Schwaz	Pill	6.4	GL
16	Ronggtobel	V	Bludenz	St. Gallenkirchen	7.2	GL
17	Roßbodenlawine	T	Landeck	Ischgl	6.1	GI
18	Schoberwies	Stmk	Liezen	Bad Aussee	4.2	GL
19	Wand	T	Schwaz	Tux	6.4	GL
20	Wiestal	T	Reutte	Bichlberg	6.1	GL
21	Wolfsgruben	T	Landeck	St. Anton	6.2	GL
22	Verwall	T	Imst	Sölden	6.2	GL

Exemplarisch werden vier Lawinen näher betrachtet. Im Anhang werden die Darstellungen der Lawinen Moosbach, Madlein, Kanisfluh und Fleißkargraben angefügt, um den Vergleich mit den Referenzdaten zu visualisieren.

Die Moosbachlawine ist als Runsenlawine einzustufen (Abbildung 1 und 2). Das Anbruchgebiet liegt leicht kesselförmig auf einer Höhe von 2400 bis 2000m. Die Sturzbahn weist eine Kanalisierung im unteren Abschnitt auf. Das Einzugsgebiet der Moosbachlawine erstreckt sich zwischen 2400m und 1100m. Das Anbruchgebiet umfasst eine Fläche von 36,6ha. Das Ereignis aus dem Jahr 1984 wurde genauer rekonstruiert. Es handelte sich um eine Staublawine, deren Fließ- und Staubanteil im Ablagerungsbereich kartiert wurde. Die Drucknachrechnung bei der zerstörten Brücke durch HUFNAGL (1986) ergab eine Belastung von 163kN/m². Die Nachrechnung der Schäden bei der alten Volksschule von TSCHOM

(1984) ergab eine minimale Intensität von $8,0\text{kN/m}^2$ und eine maximale Intensität von $13,4\text{kN/m}^2$. Beide Prozesstypen konnten mit gutem Ergebnis nachgerechnet werden. Die Drücke bei der zerstörten Brücke liegen etwas unter den Drucknachrechnungen, aber durchaus in einem plausiblen Wertebereich. Die Schäden bei diesem Bauwerk können hauptsächlich dem Fließanteil zugerechnet werden. Die Druckverteilung der Staublawine bei der Volksschule stimmt nahezu mit den Nachrechnungen überein.

Die Madleinlawine ist eine Runsenlawine (Abbildung 3 und 4). Für die Rückrechnung des Ereignisses von 1984 wurden drei Anbruchgebiete kartiert, welche eine Fläche von $51,3\text{ha}$ aufweisen (HUFNAGL 1988). Die flächengewichtete Anbruchmächtigkeit beträgt $0,91\text{m}$ wodurch sich ein Abbruchvolumen von 586.185m^3 ergibt. Die Sturzbahn erstreckt sich zwischen einer Seehöhe von 2770 und 1370m . Ein Staublawinenereignis ereignete sich im Jahr 1984, dessen Ablagerungen und Schäden genauer erhoben wurden (Fließ- und Staubanteil). Die Druckwirkung der Lawine wurde anhand des Schadens am Wählamt nachgerechnet und ergibt einen Staudruck von $9,2\text{kN/m}^2$. Jedoch wird seitens TSCHOM angemerkt, dass diese Werte zu gering sind, da der vorgelagerten Parkgarage ein erheblicher Anteil an der Energievernichtung zuzuschreiben ist. Als Schätzwert für die Lawinengeschwindigkeit bei diesem Referenzpunkt wird 100km/h ($27,8\text{m/s}$) angegeben. Die Fließlawine mit SamosAT stimmt mit der Chronikaufzeichnung gut überein. Ebenso ist die Staublawinensimulation plausibel, wengleich die laterale Verteilung des Druckbereiches im Vergleich zum Chronikereignis gering ausfällt. Die Staubdrücke beim Wählamt liegen im Bereich der Drucknachrechnung.

Aufgrund der Topographie der Lawinensturzbahn ist die Kanisfluhlawine als Mischlawine einzustufen (Abbildung 5 und 6). Das Lawineneinzugsgebiet ist im oberen Bereich sowie im Mittelteil flächig und geht im unteren Abschnitt in eine ausgeprägte Runse über. Anhand der Chronikaufzeichnungen ist bekannt, dass die Fließlawine dieser Runse folgt, hingegen ein Arm der Staublawine am orographisch rechten Hang zu Tale strömt. Die Sturzbahn der Lawine reicht von 1900m bis auf eine Höhe von 800m . Das Anbruchgebiet weist eine Fläche von $14,5\text{ha}$ auf. Es wurden drei separate Lawinenereignisse von der Wildbach und Lawinenverbauung in Bregenz dokumentiert. Am $19.02.1999$ ereignete sich eine reine Staublawine deren geschätzte Anbruchmächtigkeit mit $1,5\text{m}$ angegeben wurde. Diese Lawine richtete Schäden an Almhütten an, die ebenfalls kartiert wurden. Am $22.02.1999$ ereignete sich eine Fließlawine mit einer geschätzten Anbruchmächtigkeit von $0,8\text{m}$. Zusätzlich wurde die maximale Reichweite eines früheren Staublawinen Ereignisses kartiert. Die Ergebnisse für die Fließlawine mit SamosAT sind plausibel, wengleich die Reichweite des Ablagerungskegels zu groß und etwas zu breit ausfällt. Der orographisch linke Ausbruch der Fließlawinenablagerung konnte nicht nachgebildet werden. Dieser lässt vermuten, dass das Ereignis eine Fließlawine mit Nassschneeanteil war. Die Staublawinensimulation ergibt mit SamosAT brauchbare Ergebnisse. Der orographisch rechte Ausbruch kann andeutungsweise nachgebildet werden. Die Drücke im Bereich der beschädigten Häuser sind ausreichend hoch, um die aufgenommenen Schäden verursachen zu können.

Die Fleisskargabenlawine ist von ihrer Topographie eine klassische Runsenlawine (Abbildung 7 und 8). Die Anbruchgebiete befinden sich in einem breiten Kessel, wobei beim Referenzlawinenereignis nur die beiden orographisch rechts gelegenen Anbruchgebiete ausgelöst wurden. Die absolute Sturzhöhe beträgt 1150m (von 2075 bis auf 925m). Die flächengewichtete Anbruchmächtigkeit beider Anbruchgebiete ist $1,47\text{m}$. Beide Anbruchgebiete bedecken eine Fläche von $23,9\text{ha}$. Es wurde ein Ereignis von Februar 2005

genauer dokumentiert. Dieses ist von der Lawincharakteristik als Mischlawine zu klassifizieren. Es wurden der Fließanteil und der Staubanteil von MAYERL et al. (2005) digital erfasst. Weiters wurde ein zweiter kleinerer Fließlawinenabgang aufgenommen. Es kann anhand dieser Daten die Situation des Ereignisses vom Februar 2005 zufrieden stellend abgebildet werden. Die Fließlawine konnte mit gutem Ergebnis simuliert werden. Das Staublawinenergebnis stimmt mit den Chronikaufzeichnungen gut überein. Bemerkenswert ist die orographisch linke Einbuchtung der 5kPa Zone, da genau an dieser Stelle das Gelände eines Hauseingangs durch den Staubanteil der Lawine verbogen wurde.

DISKUSSION DER MODELLENTWICKLUNG SAMOS-AT

Das Programm SamosAT wurde seit Anfang des Jahres 2007 an der Stabstelle Schnee und Lawinen der WLV mit der AVL List GmbH in einem umfassenden Projekt kalibriert und auf die Praxistauglichkeit getestet. Weiters konnten auf Grund von abgeschlossenen Lawinenprojekten der SSL die Kalibrierungseinstellungen mit der Zielsetzung einer praxisbezogenen Absicherung der Parameter geprüft und in Abstimmung mit der AVL nachjustiert werden. Die Simulationen mit den Referenzlawinen zeigen, dass SamosAT für den operativen Einsatz geeignet ist und das Model kann je nach Berechnungsmodus, sowohl für Fließ- als auch für Staublawinensimulationen verwendet werden.

Systematische Überprüfungen der zusätzlichen Tools wie beispielsweise die direkte Schneeaufnahme in den Staubanteil, die Widerstandsgebiete, das alternative Suspensionsmodell oder die „wall lines“ sind noch ausständig. Die Verwendung im operativen Bereich muß für diese Zusatzfeatures noch in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Die Modellentwicklung per se kann als abgeschlossen betrachtet werden. Die Simulationen mit den 22 Referenzlawinen ergeben für den Fließ- und Staubanteil in den Grundfunktionen mit den vorgeschlagenen Kalibrierungswerten verifizierte und nachvollziehbare Ergebnisse.

LITERATURVERZEICHNIS

- Christen M., Bartelt P., und Gruber U. (2002): „AVAL-1D: Numerische Berechnung von Fließ- und Staublawinen“. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.
- Dichlberger G. (2008): „Auswertung und Analyse von ausgesuchten Referenzlawinen“. Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Gersten K., Herwig H. (1992): „Strömungsmechanik“. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- Granig M. (2006): „Anwenderrichtlinie ELBA+ modifiziert“. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Stabstelle Schnee und Lawinen, Schwaz.
- Gruber U., Bartelt P., Margreth S. (1999): „Anleitung zur Berechnung von Fließlawinen“. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.
- Hagen G., Hufnagl H. J. (1986): „Beobachtungen an den Katastrophenlawinen der Jahre 1981, 1984 und 1986 sowie Ergebnisse von Nachrechnungen von Lawinenwirkungen“. Internationales Symposium on Avalanche Formation, Movement and Effects, Davos, Schweiz.
- Hufnagl H. (1988): „Ergebnisse einer rechnerischen Auswertung von fünf Lawinen des Katastrophenwinters 83/84“. Interpraevent 88, Vol. 3, Graz.
- Mayerl, M., Janu, S. (2005): „Lawinenbericht des Regionalbüros Stainach“. Interner Bericht, WLV, Stainach.
- Oberndorfer S., Granig M. (2007): „Modellkalibrierung des Lawinensimulationsmodells SamosAT“. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung. Stabstelle Schnee und Lawinen, Schwaz.
- Sampl P., Zwinger T., Kluwick A. (1999): „SAMOS Simulation von Trockenschneelawinen“. Wildbach und Lawinenverbau, 63. Jhg., April 1999, Heft 138, Villach.
- Sampl P. (1999): „SAMOS – Handbuch“. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Wien.
- Sampl P. (2007): „SamosAT – Modelltheorie und Numerik“. AVL List GmbH, Graz (In print).
- Sauermoser S. (2003): „Ergänzung SAMOS - Handbuch – Anwenderrichtlinien“. Stabstelle für Schnee und Lawinen, Schwaz.
- Sauermoser S., Herbert A., Hagen F. (2003): „Recalculation of the Galtür Avalanche with different models – a comparison“. IGS Tagung, Davos.
- Schellander H. (2004): „Die Bestimmung von mittleren Anbruchhöhen für Lawinen in Tirol“. Zang, Innsbruck.
- Tschom H. (1984, 1986, 1988): „Nachrechnung statischer Belastungen bei Katastrophenlawinen“. Interne Unterlagen der GBL OI der WLV, Imst.
- Voellmy A. (1955): „Über die Zerstörungskraft von Lawinen“. Schweizer Bauzeitung, 73. Jhg.
- Volk G. (2005): „Handbuch ELBA+“. NiT Technisches Büro GmbH, Pressbaum.

ANHANG

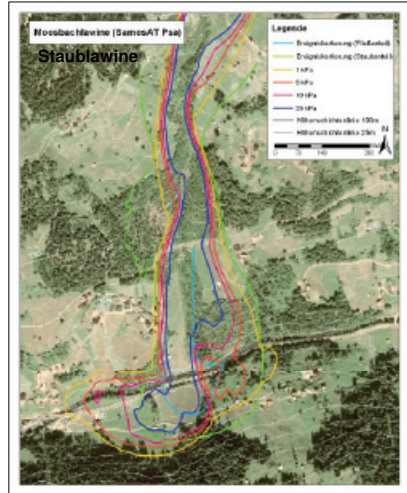
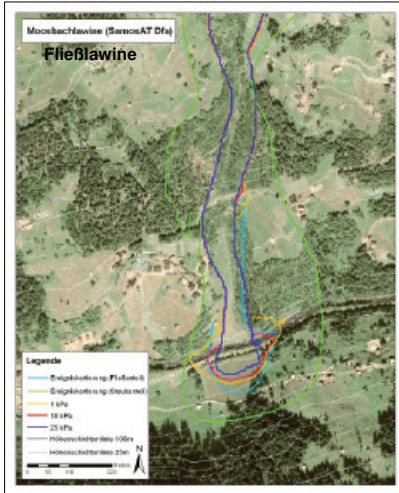


Abb. 1 und 2: Moosbach Fließ- und Staublawinensimulation im Vergleich zur Kartierung (hellblaue und grüne Linie).

Fig. 1 and 2: Moosbach dense and powder snow avalanche in comparison to reference data (light blue and green line).

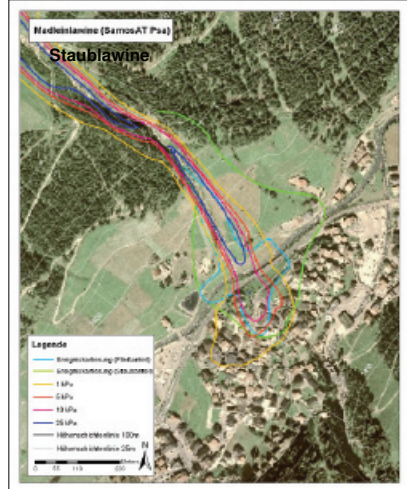
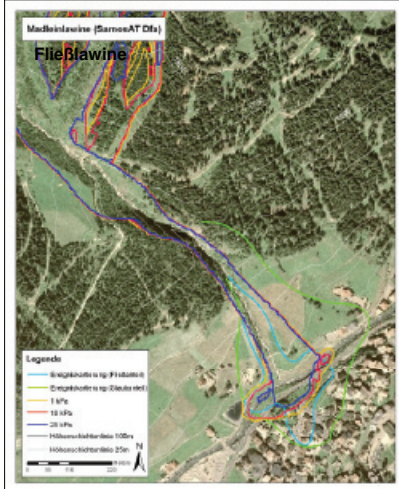


Abb. 3 und 4: Madlein Fließ- und Staublawinensimulation im Vergleich zur Kartierung (hellblaue und grüne Linie)

Fig. 3 and 4: Madlein dense and powder snow avalanche in comparison to reference data (light blue and green line)

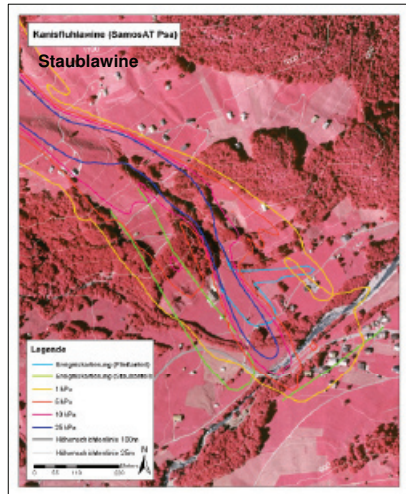
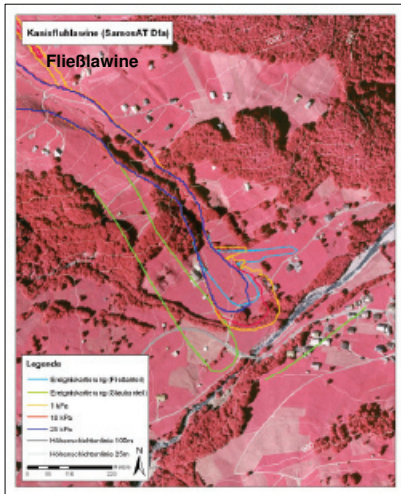


Abb. 5 und 6: Kanisfluh Fließ- und Staublawinensimulation im Vergleich zur Kartierung (hellblaue und grüne Linie)

Fig. 5 and 6: Kanisfluh dense and powder flow avalanche in comparison to reference data (light blue and green line)

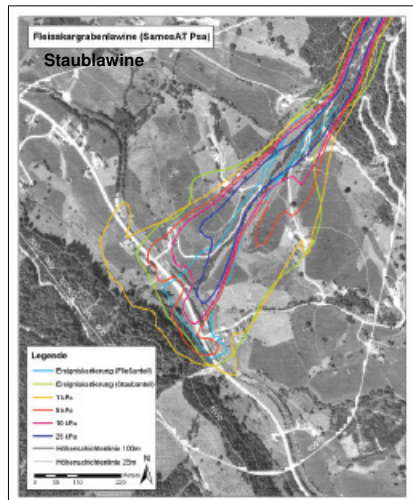
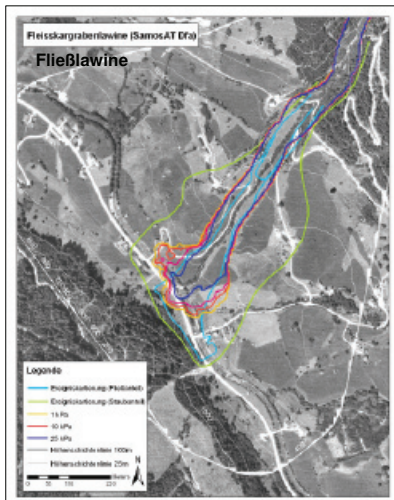


Abb. 7 und 8: Fleisskargraben Fließ- und Staublawinensimulation im Vergleich zur Kartierung (hellblaue und grüne Linie)

Fig. 7 and 8: Fleisskargraben dense and powder snow avalanche in comparison to reference data (light blue and green line)