



# Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

## SENSITIVITÄT DES LAWINENSIMULATIONSMODELLS SAMOS

## SENSITIVITY OF THE AVALANCHE SIMULATION MODEL SAMOS

Klaus Klebinder<sup>1</sup>, Rudolf Sailer<sup>2</sup>, Hans Stötter<sup>1</sup>, Armin Heller<sup>1</sup>

### ZUSAMMENFASSUNG

Das Lawinensimulationsmodell SAMOS (Snow Avalanche **MO**delling and Simulation) ist ein physikalisches Modell zur quasi-dreidimensionalen gekoppelten Simulation des Fließ- und Staubanteiles von Trockenschneelawinen. Zur Durchführung einer Lawinensimulation mit SAMOS ist neben der Bereitstellung eines digitalen Geländemodells und der Abgrenzung von Anbruchgebieten die Eingabe verschiedener Parameter nötig. Mehrere dieser Eingabewerte haben entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Lawinensimulation. In einer systematischen Studie an vier gut dokumentierten Lawinen des Tiroler Oberlandes (Österreich) sollte die Sensitivität des Modells auf die Eingabeparameter Anbruchdichte, Fließdichte und Partikeldurchmesser ermittelt werden. Weiters wird der Einfluss des Bettreibungswinkels ( $\delta$ ) auf das Modellierungsergebnis anhand von Untersuchungen an der Ryggfonnlawine (Norwegen) analysiert. Beim Einsatz von SAMOS haben sich für die Eingabe der Parameter Anbruchdichte, Fließdichte und Partikeldurchmesser „mittlere“ Größen bewährt, die Werte für  $\delta$  blieben bisher unverändert bei  $16^\circ$ . Der tatsächliche Einfluss dieser Eingabewerte auf das Berechnungsergebnis war bisher wenig bekannt und stützte sich auf wenige Erfahrungswerte. Ziel der Parameterstudie ist die grundlegende Feststellung der Sensitivität von SAMOS bezüglich der genannten Eingabewerte sowie die Eingrenzung von sinnvollen Wertebereichen für den Simulationseinsatz in der Praxis. Die Lawinensimulationen mit SAMOS können somit in der Zukunft gezielter an regionale Gegebenheiten angepasst werden und das Modell kann als verbessertes Werkzeug in der Gefahrenzonenplanung eingesetzt werden.

**Key words:** Lawinensimulation, Eingabeparameter, Sensitivitätsanalyse, Gefahrenzonenplanung

### ABSTRACT

The avalanche simulation model SAMOS (Snow Avalanche **MO**delling and Simulation) is a physical model for the coupled quasi-three dimensional simulation of dry snow avalanches. For using the avalanche model SAMOS it is necessary to supply a digital terrain model and to define release areas, but it is also obligatory to select some input parameters. Some of these parameters have decisive consequences to the result of the avalanche simulation. The sensitivity of SAMOS according to the input data release density, the density of flowing snow

---

<sup>1</sup> Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Höttinger Au 24a, 6020 Innsbruck, Österreich (E-Mail: klaus.klebinder@uibk.ac.at)

<sup>2</sup> Institut für Lawinen- und Wildbachforschung, Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Rennweg 1, 6010 Innsbruck, Österreich (E-Mail: rudolf.sailer@uibk.ac.at)

and the particle diameter should be analysed in a systematic study at four well-known avalanches in Tyrol (Austria). The effect of changed bed friction angles ( $\delta$ ) is studied additionally at the Ryggfonn avalanche (Norway). Till now the model SAMOS is used with "standard" values of the parameters release density, flow density and particle diameter, whereas the value of  $\delta$  remains at the point of  $16^\circ$ . The real influence of these input values on the results of the avalanche simulation is not known in detail and the existing knowledge was based on few experiences. The study concerning the input parameters increases the knowledge regarding the effects of changed input values and also about suggestive limits of used values. The findings will be used in the practise of avalanche simulation with SAMOS.

**Key words:** avalanche simulation, input parameters, sensitivity analyse, hazard zoning

## EINLEITUNG

Durch die zunehmende Nutzung exponierter Zonen der Alpen durch Tourismus, Verkehr und Energiegewinnung kommt es zu einer vermehrten Gefährdung von Menschenleben, Gebäuden und Infrastruktur. Um die Gefahr durch Lawinen zu reduzieren, wurde in den letzten Jahrzehnten viel zur Sicherung des alpinen Lebensraumes investiert. Zwischen 1949 und 1989 mussten beispielsweise in Österreich 350 Millionen Euro eingesetzt werden, um Anbruchverbauungen und Schutzdämme zu errichten.

Auf Grund der klimatischen Bedingungen in den Alpen stellen Trockenschneelawinen die größte Bedrohung dar. In Österreich erfolgte somit eine Konzentration auf die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodells zur Berechnung dieses Lawinentyps. Im Gegensatz zu statistischen Lawinenmodellen, welche eine Einteilung des Geländes in unterschiedliche Kategorien nötig macht, oder zu sehr vereinfachten eindimensionalen Massenschwerpunktmodellen, basieren physikalische Modelle auf fundamentalen strömungsmechanischen Grundlagen. Diese Modelle sind objektiv, da nur messbare Größen in die Berechnung eingehen, haben jedoch den Nachteil einer hohen Komplexität. Durch den Einsatz zwei- oder dreidimensionaler Modelle ist sowohl die Berechnung des Lawinenpfades als auch die seitliche (und vertikale bei 3D) Ausdehnung und die Auslauflänge der Lawine möglich. Diese Modelle, zu denen SAMOS zählt, erlauben somit eine naturnahe Simulation von Prozessen und stellen ein wichtiges Werkzeug zur Beurteilung der Lawinengefährdung dar.

SAMOS wurde zwischen 1991 und 1999 in Zusammenarbeit des Institutes für Lawinen- und Wildbachforschung der Forstlichen Bundesversuchsanstalt<sup>3</sup>, der AVL Ges.m.b.H. in Graz, dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft und dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung entwickelt. Im Jänner 1999 wurde das Modell fertiggestellt und es konnte an gut dokumentierten Katastrophenlawinen der Jahre 1984 bis 1988 verifiziert werden. Dabei zeigt das Modell eine gute Übereinstimmung mit den realen Ereignissen (Sampl et al. 1999). Weitere Vergleiche mit tatsächlichen Lawinenereignissen (Sampl et al. 2000) sowie mit einer künstlich ausgelösten Lawine im Vallée de la Sionne, Schweiz, (Sailer et al. 2002), an der die Entrainmentfunktion von SAMOS angewandt wurde, zeigen ebenfalls die Funktionstüchtigkeit des Modells. Seit Beginn des Jahres 2000 befindet sich SAMOS an der Stabstelle für Lawinensimulation des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung im praktischen Einsatz. Durch zahlreiche Simulationen hat sich das Modell in der Zwischenzeit bewährt und es konnten wertvolle Erfahrungen gewonnen sowie Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Es fehlen jedoch noch grundlegende und

---

<sup>3</sup> heute: Bundesamt und Forschungszentrum für Wald (BFW)

systematische Untersuchungen, die einen gezielten und effizienten Einsatz von SAMOS erleichtern würden. Eine ausführliche Parameterstudie stellt einen ersten Schritt dar, um detaillierte Informationen über die Auswirkung einer veränderten Anbruchdicke, Fließdicke und eines variierten Partikeldurchmessers zu ermitteln (Klebinder 2003). In einer weiteren Studie, die im Rahmen des Projektes SATSIE (Avalanche Studies and Model Validation in Europe) durchgeführt wird, sollte der Einfluss des Bettreibungswinkels ( $\delta$ ) eruiert werden (Issler et al. in Bearbeitung). Weitere Untersuchungen, wie beispielsweise der Einfluss unterschiedlich hochauflösender digitaler Geländemodelle (DGM), erfolgten zeitgleich zu dieser Parameterstudie (Schmidt 2003; Schmidt et al. 2003).

## SAMOS GRUNDLAGEN

SAMOS ist ein auf physikalischen Gesetzen basierendes Modell zur quasi dreidimensionalen Berechnung von Trockenschneelawinen. Das Modell basiert auf dem mehrphasigen Aufbau von Trockenschneelawine und ermöglicht eine zeitgleiche gekoppelte Simulation der einzelnen Lawinphasen. Trockenschneelawinen bestehen aus einem Eispartikel- Luft Gemisch und können grundsätzlich in zwei Phasen unterteilt werden:

- Eine bis zu  $400 \text{ kg m}^{-3}$  dichte Fließphase: Darin spielt die zwischen den Partikeln eingelagerte Luft eine geringe Rolle. Die interpartikulären Wechselwirkungen (Stöße) kennzeichnen das Verhalten der Lawine.
- Sehr oft (jedoch nicht zwingend) bildet sich über der Fließphase eine Staubphase aus, die durch einen hohen Anteil an Luft gekennzeichnet ist. Die Dichte des Aerosols liegt bei  $5 - 10 \text{ kg m}^{-3}$  und die Luft bestimmt im Wesentlichen das Verhalten der Lawinephase.

Auf Grund des unterschiedlichen Verhaltens der beiden Lawinphasen sind separate Modellansätze für den Fließ- und den Staubanteil notwendig. SAMOS beruht auf einem zweidimensionalen granularen Modell für die Fließphase, welches grundsätzlich auf den Modellansatz von Savage und Hutter (1989) zurückgreift. Bei der dreidimensionalen Modellierung für die Staubphase wird nach dem  $k-\epsilon$  Modell vorgegangen. Der Austausch von Masse und Impuls zwischen den beiden Schichten erfolgt in einer dünnen Resuspensionsschicht und wird durch die sogenannte Reynolds- Analogie beschrieben. Die Berechnung der Fließphase erfolgt durch Zerlegung des Anbruchgebietes in mehrere tausend Massenelemente (Lagrangesche Partikel), die sich mit der Fließlawinen mitbewegen. Die Berechnung der Staublawine hingegen erfolgt in einem raumfesten Gitter (Eulersches Gitter), das mehrschichtig auf der Geländeoberfläche ruht. Normalerweise erfolgt die Simulation mit 64000 ( $80 \times 40 \times 20$ ) Gitterzellen, es ist jedoch eine höhere Auflösung möglich. Die Berechnung der Staubphase basiert auf dem CFD- Programm FIRE der AVL (Sampl et al. 1999; Sampl und Zwinger o.J.). Zur Simulation einer Lawine mit SAMOS ist die Eingabe folgender Daten notwendig:

- Digitales Geländemodell, Auflösung  $\leq 10 \text{ m}$  (Schmidt 2003; Schmidt et al. 2003)
- Abgrenzung der Anbruchgebiete mit Anbruchmächtigkeit und -dicke
- Dichte der Fließlawine
- Partikeldurchmesser der suspendierten Teilchen
- Numerische Parameter (Simulationszeit, zeitliche Auflösung, Gitterauflösung, Anzahl der Lagrangischen Partikel u. a.)

Als Option stehen weiters die Festlegung von sogenannten Widerstandsgebieten (z. B. Wald) und die Definition von Schneeaufnahme (Snow Entrainment) in der Sturzbahn zur Verfügung. Weitere Schneeparameter (Bettreibungswinkel  $\delta$ , innerer Reibungswinkel  $\Phi$  und dynamischer Reibungskoeffizient  $c$ ) sind konstante Werte und können im Programm nicht verändert

werden. SAMOS bietet eine graphische Benutzeroberfläche, welche die Eingabe von Daten bzw. die Analyse von Resultaten ermöglicht. Das Programm erlaubt weiters den Export von Simulationsergebnissen in übliche Vektor- und Rasterformate zur weiteren Bearbeitung mittels Geographischer Informationssysteme. Die gekoppelte Simulation (beide Phasen) einer Lawine dauert, abhängig von Rechnerleistung und Laufzeit der Lawine ca. fünf Stunden. Die Berechnung der Fließphase allein nimmt lediglich wenige Minuten in Anspruch, wird jedoch nur zur Abschätzung der Laufzeit eingesetzt.

## UNTERSUCHUNGSPARAMETER

Die **Anbruchdichte** bestimmt neben der Fläche des Anbruchgebietes und der Schneemächtigkeit die Anbruchmasse der Lawine. Die Anbruchfläche(n) werden mittels Polygonzug abgegrenzt, die Anbruchmächtigkeit kann direkt eingegeben werden oder nach der Formel von Salm et al. (1990) automatisch festgelegt werden. In der bisherigen Praxis wurde zur Simulation mit SAMOS vorwiegend der Wert von  $125 \text{ kg m}^{-3}$  eingesetzt. Diese Anbruchdichte stellt einen mittleren Wert für Neuschnee dar. Analysen aus Schneebrettanrissen zeigen Schneedichten zwischen  $50$  und  $450 \text{ kg m}^{-3}$  wobei die häufigsten Werte zwischen  $100$  und  $250 \text{ kg m}^{-3}$  liegen (McClung und Schaerer 1993).

Die **Fließdichte** stellt die konstante Dichte des strömenden Fließanteiles der Lawine dar. Durch mechanische Einwirkungen liegt dieser Wert im Allgemeinen höher als der Wert der Anbruchdichte. In der Literatur werden stark schwankende Werte für die Dichte der Fließphase angegeben, die Angaben können jedoch auf Werte zwischen  $100$  und  $300 \text{ kg m}^{-3}$  eingegrenzt werden (McClung und Schaerer 1993; Hutter 2003). Die bisher gebräuchliche Fließdichte von  $200 \text{ kg m}^{-3}$  bei Simulationen liegt somit im mittleren Bereich.

Der **Partikeldurchmesser** stellt die charakteristische Größe der Schneepartikel dar, die in die Staubphase der Lawine suspendiert werden. Im bisherigen Einsatz hat sich ein Wert von  $1,0 \text{ mm}$  bewährt, wobei bei der Rekonstruktion von Lawinenereignissen auch Werte von  $0,2 \text{ mm}$  eingesetzt wurden. Kleinere Werte konnten dann eingesetzt werden, wenn der Schneefall vor dem Lawinenereignis bei sehr kalten Temperaturen und wenig Wind stattfand und somit ein sehr geringes Gewicht (= kleiner Durchmesser) der einzelnen Schneepartikel vorhanden war. Als Beispiel kann das Lawinenereignis vom 13. März 1988 an der Wolfgrubenlawine (St. Anton/ Tirol) herangezogen werden.

Der **Bettreibungswinkel**  $\delta$  hängt vor allem von Schneeeigenschaften wie Temperatur, Dichte und Wassergehalt, aber auch vom Druck des Lawinenschnees senkrecht zur Bodenoberfläche ab. Weiters nimmt der Wert mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Als Richtlinie gibt Salm et al. (1990) Werte für  $\mu$  zwischen  $0,155$  ( $\delta \approx 8,3^\circ$ ) für seltene Großlawinen und  $0,3$  ( $\delta \approx 16,7^\circ$ ) für kleinere Lawinen und Nassschneelawinen an. Der Wert für  $\delta$  ist bei SAMOS mit  $16^\circ$  ( $\mu = 0,287$ ) fixiert und kann im Normalfall nicht geändert werden.

**Tab. 1:** Bisher gebräuchliche Eingabewerte

**Tab. 1:** In general used input parameters

	<b>Anbruchdichte</b>	<b>Fließdichte</b>	<b>Partikeldurchm.</b>	<b>Bettreibungsw.</b>
a)	$125 \text{ kg m}^{-3}$	$200 \text{ kg m}^{-3}$	$1,0 \text{ mm}$	$16^\circ$
b)	$100 - 250 \text{ kg m}^{-3}$	$100 - 300 \text{ kg m}^{-3}$	?	$8,3 - 16,7^\circ$

a) bisherige SAMOS Standardwerte

b) aus Literatur bekannte Werte (McClung und Schaerer 1993; Hutter 2003; Salm et al. 1990)

# UNTERSUCHUNG DER PARAMETER ANBRUCHDICHTE, FLIEßDICHTE UND PARTIKELDURCHMESSER

Im Zuge einer Parameterstudie werden die drei SAMOS Eingabewerte Anbruchdichte, Fließdichte und Partikeldurchmesser systematisch untersucht (Klebinder 2003). Diese Studie sollte die grundsätzliche Sensitivität des Modells bezüglich dieser Eingabewerte klären sowie sinnvolle Grenzwerte festlegen. Das Ansprechverhalten des Modells auf einzelne Parameter war bis zur Durchführung der Studie nur wenig bekannt und beruhte meist auf wenigen Erfahrungswerten. Beispielsweise war die Wirkung von Änderungen des Partikeldurchmessers (kleiner Durchmesser = große Staumasse) bekannt, über die Sensitivität in einzelnen Wertebereichen waren jedoch wenige Erkenntnisse vorhanden. Im bisherigen Einsatz von SAMOS haben sich aus diesem Grund „mittlere“ Eingabewerte (vergl. Tabelle 1) für Simulationen durchgesetzt. Um jedoch eine gezielte, effiziente und situationsabhängige Anwendung des Modells zu ermöglichen, ist eine genaue Kenntnis über das Ansprechverhalten unablässig.

## Vorgangsweise

Um den Bezug zur Praxis der Lawinsimulation möglichst nahe zu halten, wird bei der Fest-

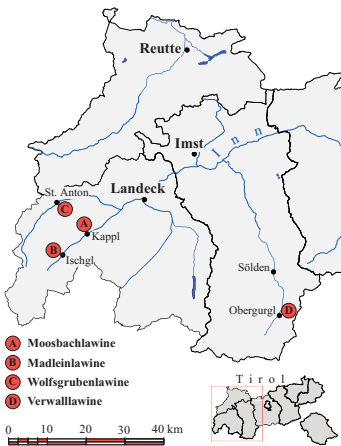


Abb. 1: Untersuchungsgebiete

Fig. 1: Investigation areas

legung der Parameterabgrenzungen und besonders bei der Wahl der Auswerteindikatoren auf relevante Fragestellungen in der Gefährdenzonenplanung Rücksicht genommen. Bei der Festlegung der Parametergrenzen sollten sowohl realistische als auch extreme Werte berücksichtigt werden. Die Abstufung erfolgt so, dass die Sensitivität des Modells in den einzelnen Wertebereichen grundsätzlich feststellbar ist. Neben Studien an (einfachen) künstlichen Geländeformen werden die Simulationen an den vier bereits zur Verifizierung von SAMOS herangezogen Lawinstrichen durchgeführt. Zwischen 1984 und 1988 traten große Lawineneignisse auf (Abb. 1), die hohen Sachschaden hervorriefen und zum Teil Todesopfer forderten. Die detaillierte Dokumentation dieser Ereignisse durch den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung bietet sehr gute Voraussetzung zur Durchführung der Parameterstudie (Hagen 1991; Hufnagl 1988). Im Zuge der Parameter-

studie wird jede der vier Testlawinen mit festgelegten Rahmenbedingungen simuliert, wobei immer nur eine der drei Untersuchungsgrößen variabel ist. Dabei wird von einer Parameterkombination ausgegangen, die im Folgenden als „Standardparameter“ bezeichnet werden. Dies sind jene Werte, die im Zuge der Modellentwicklung die beste Übereinstimmung mit den entsprechenden Lawineneignissen zeigten. Von diesen Größen wird erwartet, dass sie das Ereignis realistisch wiedergeben.

Die Werte für die Parameter Anbruchdichte und Fließdichte werden in  $50 \text{ kg m}^{-3}$  Schritten zwischen den Grenzen  $50 \text{ kg m}^{-3}$  und  $350 \text{ kg m}^{-3}$  variiert, die Größen für den Partikeldurchmesser betragen  $0,2 \text{ mm} - 0,3 \text{ mm} - 0,5 \text{ mm} -$  weiters  $0,5 \text{ mm}$  Schritte bis  $3,0 \text{ mm}$ . Alle weiteren Eingabeparameter (DGM, numerische Parameter, Widerstandsgebiete, Entrainment usw.) bleiben unverändert.

Zur Auswertung der Berechnungen werden zahlreiche Indikatoren festgelegt, die das

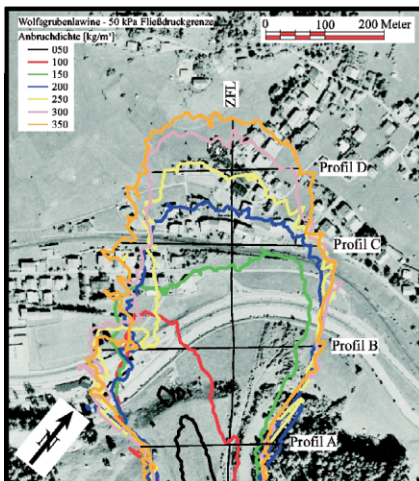
Verhalten der simulierten Lawine aufzeigen und Aufschlüsse über relevante Fragestellungen in der Gefahrenzonenplanung bringen. Unter anderem wird analysiert:

- Auslauflänge entlang einer definierten zentralen Fließlinie (ZFL)
- Auslaufbreite an mehreren definierten Profilen
- Ausdehnung der Fließablagerung
- Verhältnis der Massen im Staub- bzw. Fließanteil
- Frontgeschwindigkeit
- Druckprofile an definierten Punkten

Die gesamte Studie beruht auf über hundert Simulationen, deren Resultate mittels zwölf unterschiedlichen Indikatoren bewertet wurden. Die Auswertung erfolgt, soweit möglich, automatisiert mit Geographischen Informationssystemen.

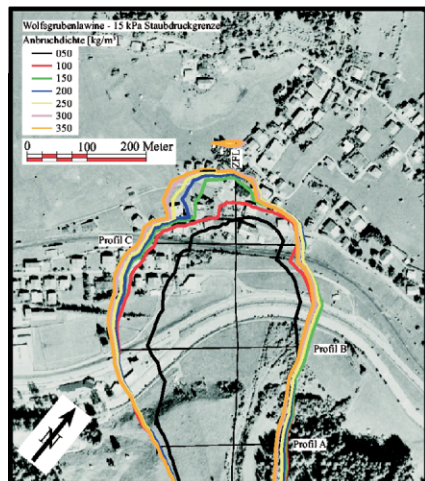
## Ergebnisse

Die **Anbruchdichte** ist ein bestimmender Parameter zur Festlegung der Ausgangsbedingungen einer Lawinsimulation. Dem entsprechend wirkt sich die Höhe dieses Wertes im Wirkungsbereich der Lawine aus. Mit zunehmender Anbruchdichte (entspricht einer proportionalen Erhöhung der Anbruchmasse) muss mit einer Erweiterung der Gefährdungszone sowohl des Fließ- als auch des Staubanteiles gerechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Erhöhung der Anbruchmasse primär zu einer Verstärkung des Fließanteiles führt und die Zunahme des Staubanteils unterproportional klein ist. Dies ist auf die im Verhältnis zur Massenzunahme geringe Erweiterung der Oberfläche des Fließanteiles, an der die Suspension der Schneepartikel stattfindet, zurückzuführen. Weist die Sturzbahn der Lawine zudem eine starke Kanalisierung auf, wird dieser Effekt verstärkt.



**Abb. 2:** 50 kPa Grenze des Fließanteiles bei variabler Anbruchdichte

**Fig. 2:** 50 kPa outline of dense flow layer by changed release density



**Abb. 3:** 15 kPa Grenze des Staubanteiles bei variabler Anbruchdichte

**Fig. 3:** 15 kPa outline of powder snow layer by changed release density

Abbildung 2 und 3 zeigen am Beispiel der Wolfgrubenlawine die Ausdehnung des Fließ- und Staubanteiles bei unterschiedlichen Anbruchdichten. Die Reichweite der Fließphase differiert hier um mehrere hundert Meter, jene der Staubphase variiert hingegen geringer und stagniert

ab einem Wert von  $150 \text{ kg m}^{-3}$ . Entsprechend der erhöhten Fließmasse kommt es mit zunehmender Anbruchdichte zu einer erheblichen Ausweitung des Ablagerungsbereiches. Die Steigerung der Startmasse führt zu einer deutlichen Zunahme der Frontgeschwindigkeit und somit zu höheren Maximaldrücken in der Sturzbahn. Dabei ist zu beachten, dass das Druckmaximum bei großen Anbruchdichten zunehmend in Richtung des Auslaufbereiches, und somit oftmals in Richtung besiedeltem Gebiet vorrückt.

Anhand der Studie kann gezeigt werden, wie wichtig eine gewissenhafte Bestimmung der Anfangsbedingungen für das Ergebnis der Simulation ist. Die Wahl der korrekten Anbruchmasse ist eine unumgängliche Voraussetzung für den Erfolg einer Lawinsimulation. Der Parameterwert von  $125 \text{ kg m}^{-3}$  sollte, in Verbindung mit einer sorgfältigen Abgrenzung der Anbruchgebiete und der Wahl der einer korrekten Anbruchhöhe (Extremwertstatistik, Richtlinien; Salm et al. 1990), in den meisten Fällen zu sinnvollen Ergebnissen führen. Sind besondere Umstände bekannt (z. B. stark windverfrachteter Schnee im Anbruchgebiet) muss die Anbruchdichte entsprechend angepasst werden.

Die **Fließdichte** erweist sich als äußerst wichtiger Parameter zu Steuerung der simulierten Fließphase. Dabei ist bei geringen Werten ( $50$  bis  $150 \text{ kg m}^{-3}$ ) mit einer großen Reichweite des Fließanteiles zu rechnen, die sich auch in entsprechenden Fließablagerungen widerspiegelt. Hier können durch Variationen des Eingabewertes ebenfalls Schwankungen von mehreren hundert Metern erzielt werden.

Die Auswirkung auf die Reichweite und Ausdehnung der Staubphase ist gering und führt lediglich zu Schwankungen, die im Bereich weniger Meter liegen. Der Einfluss der Fließdichte auf das Verhältnis der Massen beider Lawinphasen ist gering und liegt deutlich unten den Auswirkungen einer Änderung der Anbruchdichte und des Partikeldurchmessers. Die Frontgeschwindigkeit der simulierten Lawine ist bei geringen Dichten am höchsten, hingegen steigt der maximal auftretende Druck in der Fließphase auf Grund des Einflusses der Dichte mit zunehmenden Parameterwerten an. Dabei kommt es zu einer Verlagerung der Maxima in Richtung des Anbruchgebietes.

Vor allem bei Lawinen, deren Fließanteil ein hohes Gefährdungspotential aufweist, sollte die Wahl der Fließdichte sorgfältig diskutiert werden. Gegebenenfalls muss von der Praxis (Simulation mit  $200 \text{ kg m}^{-3}$ ) abgewichen und ein geringerer Wert eingesetzt werden. Da die reelle Fließdichte einer Lawine schwer zu eruiieren ist, kann hier auch kein Vergleich mit den Gegebenheiten in der Natur herangezogen werden.

Die aus der bisherigen Praxis bekannte Erkenntnis, dass der **Partikeldurchmesser** die maßgebliche Größe zur Steuerung der Staubphase ist, kann durch die Studie bestätigt werden. Je kleiner der Eingabewert gewählt wird, desto mehr Masse wird in den Staubanteil transferiert. Die Sensitivität von SAMOS ist vor allem im Bereich unter  $1,0 \text{ mm}$  sehr groß. Wird an Stelle des üblicherweise verwendeten Parameterwertes ( $1,0 \text{ mm}$ ) der Wert  $0,5 \text{ mm}$  angewandt, so ist mit einer Zunahme der Staubmasse um ca.  $20 \%$  zu rechnen. Ab  $1,5$  bis

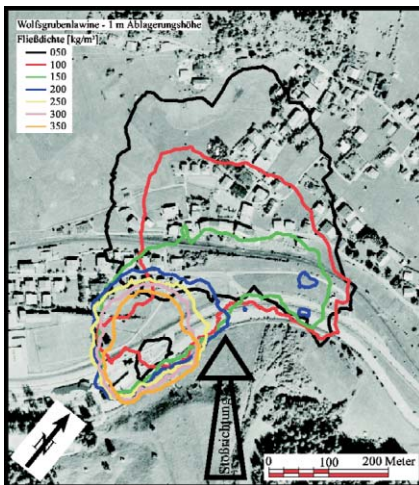


Abb. 4: Ablagerung ( $> 1\text{m}$ ) bei variabler Fließdichte

Fig. 4: Deposition ( $> 1\text{m}$ ) by changed density of flowing snow

2,0 mm wird nur mehr wenig Masse suspendiert und die simulierte Lawine nimmt zunehmend den Charakter einer reinen Fließlawine an. Der Wirkungsbereich der Staubphase ändert sich im Bereich kleiner Parameterwerte sehr stark und es kommt zu Änderungen der Auslaufänge um mehrere hundert Meter. Am Beispiel der Wolfsgrubenlawine (vergl. Abbildung 5) führt die Wahl eines Durchmessers von 0,5 mm zu einer Verschiebung der 15 kPa Isobare um mehr als hundert Meter gegenüber einer Simulation mit einem Partikeldurchmesser von 1,0 mm.

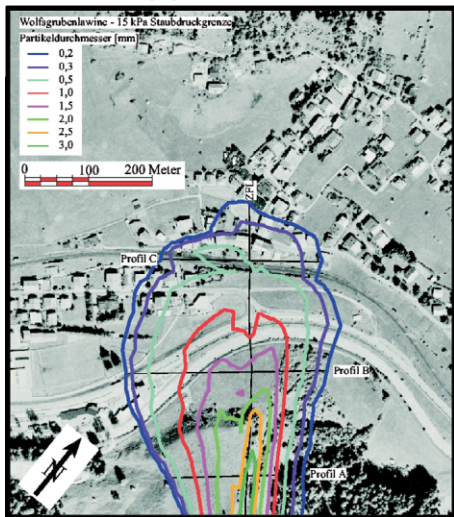


Abb. 5: 15 kPa Grenze des Staubanteiles bei variablem Partikeldurchmesser

Fig. 5: 15 kPa outline of powder snow layer by changed particle diameter

Geschwindigkeit. Die Rekonstruktion extremer Staublawineneignisse (z. B. Wolfsgrubenlawine 1988), deren Schäden größtenteils durch starke Aerosolwirkung auftraten, ist nur mit sehr kleinen Partikeldurchmessern (hier 0,2 mm) möglich. Der bisher gebräuchliche Einsatz eines Partikeldurchmessers von 1,0 mm muss, um auch extreme Staublawineneignisse zu berücksichtigen, gegebenenfalls auf geringere Werte reduziert werden. Bei bekannter Gefährdung durch den Staubanteil ist die Wahl kleinerer Partikeldurchmesser (0,5 bis 0,8 mm) angebracht. Nur bei Lawinen, deren Gefährdungspotential überwiegend vom Fließanteil ausgeht, ist der Einsatz eines Partikeldurchmessers größer 1,0 mm zulässig. Die sinnvolle Obergrenze des Partikeldurchmessers beträgt 1,5 mm, da sich bei größeren Werten kaum mehr Staubanteil ausbildet und die Simulationsergebnisse nur mehr geringe Unterschiede aufweisen.

## UNTERSUCHUNG DER PARAMETER BETTREIBUNGSWINKEL UND ENTRAINMENT

Seit dem Winter 1982/83 werden in Norwegen Messungen an künstlich und natürlich ausgelösten Lawinen durchgeführt. Das Testgebiet liegt im Gemeindegebiet von Stryn (Region Sogn og Fjordane, Süd-West Norwegen). Die Fallhöhe der nach Nord exponierten Ryggfonnlawine beträgt auf eine Horizontalerstreckung von 2100 m in etwa 900 m. Die Höhe der Anbruchgebiete liegt dabei zwischen 1400 m und knapp 1600 m, der Talboden, in dem die

Lawinen zum Stillstand kommen, liegt auf ca. 600 m. In den letzten Jahren gab es mehrere von der Europäischen Union geförderte Projekte (SAME, CADZIE, SATSIE), in welche auch die Ergebnisse der lawinendynamischen Messungen (Drücke, Geschwindigkeiten, Wirkung von Lawinendämmen) der Ryggfönnlawinen eingeflossen sind. An diesen Messungen ist auch das Institut für Lawinen- und Wildbachforschung (BFW) beteiligt. Im derzeit aktuellen Projekt SATSIE (Avalanche Studies and Model Validation in Europe) werden mit Hilfe mehrerer Simulationsmodelle (unter anderem auch mit SAMOS) Nachrechnungen von 12 gut dokumentierten Ryggfönnlawinen durchgeführt (Issler et al. in Bearbeitung). Ein Schwerpunkt der Nachrechnungen ist es, optimale Parameterkombinationen für die jeweilige Lawine zu finden. Bei den SAMOS Simulationen wird dabei lediglich der Bettreibungswinkel  $\delta$  variiert. Alle anderen Parameter werden entsprechend den Standardparametern als unveränderliche Größen behandelt. Die kartierten Auslauflängen bzw. Ablagerungen und Geschwindigkeitsmessungen stehen als Referenzgrößen für die Vergleiche zur Verfügung. Zudem sind auch Abschätzungen der Netto-Entrainmentmassen (zwischen Anbruch und Ablagerung) vom Norwegischen Geotechnischen Institut (NGI) durchgeführt worden. Seit kurzem (Modulimplementierung 2001) ist es mit SAMOS optional möglich eine Schneeaufnahme (Entrainment) während des Lawinenabgangs zu berücksichtigen (Sailer et al. 2002). Generell beeinflusst eine zusätzliche Aufnahme von Lawinenschnee während des Lawinenabgangs das gesamte Verhalten der Lawine entscheidend (Sailer et al. 2002; Sovilla und Bartelt 2002; Sovilla et al. 2001). Bei jenen Lawinen, für die Netto-Entrainment Werte dokumentiert sind, wurde die SAMOS Simulation unter Berücksichtigung eines globalen Entrainments (Sailer et al. 2002) durchgeführt. Neben der Definition der Entrainmentfläche (hier global, d.h. Gesamtfläche der Lawinenbahn) bedarf es auch der Festlegung einer Entrainment Dichte. Diese entspricht bei der hier vorgestellten Studie der vom NGI vorgegebenen Anbruchdichte, die auch für die Bestimmung der Anbruchmasse verwendet wird. Die errechneten Auslauflängen und Frontgeschwindigkeiten sind somit das Resultat aus der Kombination eines angepassten Bettreibungswinkels  $\delta$  und der Berücksichtigung von zusätzlicher Schneeaufnahme (Entrainment).

Berechnungen mit einem fixen Bettreibungswinkel ( $\delta = 16^\circ$ ) und ohne Berücksichtigung eines Entrainments zeigten ursprünglich zwar relativ gute Ergebnisse bei den Geschwindigkeitsvergleichen, jedoch große Abweichungen bei den Auslauflängen und der Verteilung der Lawinenablagerung gegenüber den Kartierungen. Erst durch eine entsprechende Veränderung des Bettreibungswinkels und der Verwendung des Entrainment Moduls von SAMOS konnten realistischere Ergebnisse erzielt werden (Tabelle 2). Die mittlere Abweichung der Auslauflänge gegenüber den Kartierungen beträgt -10 m (Std. Abweichung 35 m). Die größten Fehler gegenüber den Beobachtungen ergeben sich aus der Nachrechnung der Lawine, die am 17. Februar 2000 abgegangen ist (-100 m). Die Kartierung dürfte allerdings die Wirkung der dichten Staubphase widerspiegeln. Daher ist es nicht verwunderlich, dass keines der in der Studie verwendeten Modelle die Fließablagerungen genügend genau repräsentiert (Issler et al. in Bearbeitung). Sehr wohl stimmt der kartierte Auslaufbereich mit der 1 kPa Staubgrenze der untersten Ebene der SAMOS Berechnung gut überein. Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass diese Ablagerungen aus einer dichten Saltationsschicht herrühren.

Die berechneten Geschwindigkeiten zeigen eine durchschnittliche Abweichung von  $-3.0 \text{ m s}^{-1}$  (Std. Abweichung  $4.1 \text{ m s}^{-1}$ ). Die größten Geschwindigkeitsdifferenzen, bei gleichzeitig guter Übereinstimmung mit den Auslauflängen, sind bei den größten Lawinen (10. Jänner 1983 und 8. Februar 1997) zu finden.

Ein Kernelement der Versuchsanlage in Ryggfönn ist ein 16 m hoher und 100 m breiter Auffangdamm, dessen Wirkung erst unter Berücksichtigung veränderter Bettreibungswinkel zur Geltung kommt (Tabelle 2). Die Verteilung der Ablagerungen (Prozentsatz der

Ablagerungen die vom Damm zurückgehalten werden) entspricht im Großen und Ganzen den beobachteten Werten. Jedoch ist es weder mit SAMOS noch mit einem anderen in der Studie verwendeten Modell möglich, den Effekt des Damms ausreichend genau zu berücksichtigen. Informationen zu den Auswirkungen von Dämmen auf die dynamische Lawinensimulation sind ein weiteres Ziel, das im SATSIE Projekt verfolgt wird.

**Tab. 2:** Ergebnisse der SAMOS Nachrechnungen, Ryggfjonn Lawinen

**Tab. 2:** Results of SAMOS calculations, Ryggfjonn Avalanches

Avalanche	Bett-reibungs-winkel [Grad]	Front-geschwindig-keit <sup>1)</sup> [m s <sup>-1</sup> ]	Abweichung <sup>2)</sup> [m]	Ablagerungs-vertiefung <sup>3)</sup> [%]	Start Masse [kilo Tonnen]	Globales Entrainment Dichte [kg m <sup>-3</sup> ]	Globales Entrainment Dicke [m]	Globales Entrainment Masse [kilo Tonnen]	Globales Entrainment <sup>3)</sup> [%]
830110 C	19	35 (46)	0	20 (67)	32.8	-	-	-	(33)
830308 D	26	24 (23)	0	100 (100)	4.9	350	0.30	12.5	250 (220)
850213 E	20	34 (34)	+10	70 (87)	4.3	250	0.15	4.2	98 (100)
870128 A	16	50 (48)	-20	14 (79)	10.6	350	0.25	13	118 (100)
880411 F	23	37 (38)	-60	99 (91)	3.5	300	0.2	7.7	220 (190)
881223 C	24	33 (31)	+20	85 (87)	11.4	300	0.25	13.1	115 (150)
900307 C	24	41 (43)	0	95 (90)	3.9	250	0.2	5.2	133 (160)
930327 A	15	26 (35)	+10	30 (64)	5.5	-	-	-	(-15)
940124 C	22	30 (33)	+10	92 (94)	8.9	-	-	-	(60)
950303 D	20	31 (35)	+10	88 (75)	4.3	250	0.08	4.1	95 (60)
970208 B	20	38 (45)	0	38 (65)	24.0	300	0.14	9.8	40 (60)
000217 C	11	49 (49)	-100	4 (38)	9.9	250	0.27	16.6	168 (180)

<sup>1)</sup> beobachtete oder gemessene Werte in Klammern

<sup>2)</sup> "+" SAMOS zu große Ausläufänge, "-" SAMOS zu geringe Ausläufänge (im Verleiche mit den kartierten Ergebnissen)

<sup>3)</sup> Prozent der oberhalb des Damms abgelagerten Lawinenmasse

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Nachrechnung von Lawinenereignissen im Sinne einer Modellvalidierung und Verifikation ist ein wichtiger Arbeitsschritt in der gesamten Modellbildungs- und Weiterentwicklungskette. Zum einen hängt die Glaubwürdigkeit eines Werkzeuges von den Bedingungen ab, unter denen es getestet wird, zum anderen ergibt sich durch den Verifikationsprozess eine intensive Diskussion mit den Anwendern und Praktikern. Die Ergebnisse der Versuchdurchführungen zeigen Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten eines Modells auf. Am Institut für Lawinen- und Wildbachforschung des BFW<sup>4</sup> wurde in den letzten Jahren intensiv an der Verifikation des Lawinensimulationsmodells SAMOS gearbeitet. Ein Schwerpunkt dabei war es, die Sensitivität des Modells im Hinblick auf die variablen Eingangsparameter (Anbruchdichte, Fließdichte, Partikeldurchmesser) zu testen. Dabei zeigt sich, dass die Fließdichte großen Einfluss auf das Simulationsergebnis der Fließphase hat und gegebenenfalls geringere Dichten zu wählen sind. Das Ergebnis der Staubphase hängt weitgehend vom gewählten Partikeldurchmesser ab. Dieser muss in kritischen Situationen allenfalls auf kleinere Werte reduziert werden. Die Festlegung einer entsprechenden Anbruchmasse (Anbruchhöhe und -dichte) ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulation (Klebinder 2003).

In einer weiteren Studie wurde untersucht, wie und in welchem Ausmaß digitale

<sup>4</sup> Bundesamt und Forschungszentrums für Wald

Geländemodelle unterschiedlicher Herkunft und Qualität die Simulation von Lawinen mit SAMOS beeinflussen. Erwartungsgemäß führen qualitativ hochwertige digitale Geländemodelle zu verbesserten Simulationsergebnissen. Dies trifft insbesondere bei flächigen Lawinenbahnen zu, an denen Geländemodelle aus Laserscan Daten hervorragende Resultate liefern. Standardmäßig lieferbare digitale Geländemodelle mit einer Auflösung von 10 m (erzeugt vom Österreichischen Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) sind für Simulationszwecke nur bedingt einsetzbar (Schmidt 2003; Schmidt et al. 2003).

Instrumentierte Versuchsstrecken entlang derer Messungen (Drücke, Geschwindigkeiten, Wirkung von Dämmen, etc.) natürlicher oder künstlich ausgelöster Lawinen durchgeführt werden, gewinnen insbesondere für die Verifikation von Lawinensimulationsmodellen an Bedeutung. Analysen von Lawinenabgängen im Vallée de la Sionne (Wallis, Schweiz) und in Ryggfönn (Norwegen) zeigen eindeutig, dass die Schneeaufnahme während des Lawinenabgangs (Entrainment) ein bedeutender Faktor in Hinblick auf Reichweiten und Druckwirkung sein kann. Nachrechnungen solcher Lawinen mit SAMOS unter Verwendung des Entrainment Moduls zeigen eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit gemessenen Werten (Sailer 2003; Sailer et al. 2002). Bei den Berechnungen der Ryggfönnlawinen wird erstmals der Bettreibungswinkel, der in SAMOS generell als unveränderliche Größe gilt, systematisch verändert, so dass eine möglichst gute Kongruenz mit den beobachteten Ereignissen erzielt werden kann. Generell konnte mit größeren Bettreibungswinkeln ( $\delta > 19^\circ$ ) bezüglich Ablagerung und Geschwindigkeit bessere Ergebnisse erzielt werden, wobei weder hinsichtlich der Anbruchdichte noch der Größe der Lawinen Trends ableitbar sind. Faktum ist, dass es sich aufgrund der geographischen Lage des Untersuchungsgebietes (Nähe zum Meer; unter Umständen Schneefall bei Temperaturen nahe  $0^\circ\text{C}$ ) um relativ hohe Schneedichten sowohl im Anbruchgebiet als auch in der Sturzbahn und dem Auslaufbereich handelt. Detaillierte Auswertungen und vor allem Vergleiche mit Gebieten im Alpenraum stehen noch aus.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist eine laufende Verifikation ein wichtiger Faktor zur Weiterentwicklung und Verbesserung des Lawinesimulationsmodells SAMOS. Studien in Testgebieten (mit teilweise aufwendiger Instrumentierung) und die Nachrechnung von Großereignissen sind dabei geeignete Methoden. Die Akzeptanz von Lawinensimulationsmodellen ist sehr vom gewissenhaften Validierungs- und Verifikationsprozess abhängig. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund des Modellcharakters und teilweise, den Praktikern bestens bekannten, schwierigen Rahmenbedingungen (Festlegung der Anbruchgebiete und –dichten, Abweichung des winterlichen Geländes vom Sommergeländemodell, etc.) nur eine hinreichend genaue aber nicht exakte Nachbildung der Wirklichkeit stattfinden kann. Ein nicht zu unterschätzender positiver Effekt durch die Nachrechnung von Großereignissen ergibt sich aus dem Erfahrungsaustausch und den Diskussionen mit Anwendern und Praktikern (Forsttechnischer Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung, Ingenieurkonsulenten) insbesondere hinsichtlich der Gültigkeit und der Anwendungsgebiete der Simulationsmodelle.

## LITERATUR

- Hagen G. (1991): "Praktische Erfahrungen mit Rechnungen nach Lawinenmodellen". *Sonderdruck aus der Zeitschrift Wildbach- und Lawinenverbau*, No. 117; 137 – 146.
- Hufnagl H. J. (1988): "Ergebnisse einer rechnerischen Auswertung von fünf Lawinen des Katastrophenwinters 1983/84". *Proc. Interpraevent 1988 - Graz*, Vol. 3; 227 – 249.
- Hutter K. (2003): "Unterlagen zum Fortbildungskurs: Schnee und Eis im Spannungsfeld umwelt- und klimarelevanter Naturgefahren". 27. – 31. Jänner 2003, Oberurgl.
- Issler D., Barbolini M., De Blasio F. V. et al. (In preparation): "Simulations of observed dry-snow avalanches in the full – scale test site Ryggfomn, Norway".
- Klebinder K. (2003): "Sensitivität des Lawinenmodells SAMOS bezüglich der Eingabeparameter Anbruchdichte, Fließdichte und Partikeldurchmesser". *Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck*, Innsbruck.
- McClung D., Schaerer P. (1993): "The avalanche handbook". Fourth printing 1998; 76,115.
- Sailer R., Rammer L., Sampl P. (2002): "Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar". *Natural Hazards an Earth System Sciences*, Vol. 2, No. 3/4; 211 - 216.
- Sailer R. (2003): "Case studies with SAMOS - comparison with observed avalanches". *Proc. AVL - Advanced Simulation Technologies, International User Meeting 2003*.
- Salm B., Burkard A., Gubler H. U. (1990): "Berechnung von Fließlawinen – Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen". *Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung*, No. 47, Davos.
- Sampl P., Zwinger T., Kluwick A. (1999): "SAMOS – Simulation von Trockenschneelawinen". *Wildbach- und Lawinenverbau*, No. 138; 7 – 21.
- Sampl P., Zwinger T., Schaffhauser H. (2000): "Evaluation of Avalanche Defense Structures with the Simulation Model SAMOS". *Felsbau*, Vol. 18, No. 1; 41 – 46.
- Sampl P., Zwinger T. (accepted): "Avalanche Simulation with SAMOS". *Annals of Glaciology*.
- Savage S. B., Hutter K. (1989): "The motion of a finite mass of granular flow material down a rough incline". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 199; 177 – 215.
- Schmidt R., Heller A., Sailer R. (2003): "Die Eignung verschiedener digitaler Geländemodelle für die dynamische Lawinensimulation mit SAMOS". In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (Editors): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XV, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2003*; 455 – 464.
- Schmidt R. (2003): "Untersuchung verschiedener digitaler Geländemodelle hinsichtlich ihrer Eignung für die dynamische Lawinensimulation mit dem dreidimensionalen zweiphasigen Simulationsprogramm SAMOS". *Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Innsbruck*, Innsbruck.
- Sovilla B., Bartelt P. (2002): "Observation and modelling of snow avalanche entrainment". *Natural Hazards an Earth System Sciences*, Vol. 2, No. 3/4; 169 - 179.
- Sovilla B, Sommariva F, Tomaselli A. (2001): "Measurements of mass balance in dense snow avalanche events". *Annals of Glaciology*, Vol. 32; 230 – 236.