ETH zürich

ETH Library

Modelling Wet Snow Avalanches with Thermal Effects, Snowcover Entrainment and Lubricated Sliding

Doctoral Thesis

Author(s):
Vera Valero, César

Publication date:
2016

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-010893246

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 23943

Modelling Wet Snow Avalanches with Thermal Effects, Snowcover Entrainment and Lubricated Sliding

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CÉSAR VERA VALERO

Ingeniero Aeronáutico,
Universidad Politécnica de Madrid

born on 05.04.1982

citizen of Spain

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. M. Funk, examiner

Prof. Dr. M. Naaim, co-examiner

Prof. Dr. K. Steffen, co-examiner

Dr. P. Bartelt, co-examiner

2016

Abstract

Snow avalanches are dangerous, gravity-driven geophysical flows. They consist of a fast-moving mass of snow clods that are formed when the snowcover is set in motion. Immediately after release, the snowcover breaks up into blocks of diverse sizes which become increasingly rounded by frictional interactions in the core of the avalanche. The primary problem in avalanche dynamics is to physically describe the motion of the churning particle ensemble. Due to the great number of particles, however, the motion of the particle ensemble must still be mathematically described using continuum theories of moving fluids. The ensemble properties of the continuum are defined by the sum of all the frictional interactions between particles and between particles and the ground. The myriad particle interactions are far from simple, but inevitably must be considered in continuum models in order to accurately describe and simulate avalanche flows. This is particularly true for wet snow avalanches where the temperature of the particles is near to the melting point of ice and considerable meltwater can be present in the porous ice-matrix of the clods of flowing snow. The high snow temperature and the presence of meltwater define the mechanical response of the avalanche mass under gravity. Thus, the micro-scale interactions between particles lead to different macroscopic avalanche regimes and therefore different avalanche velocities and runout distances.

In this dissertation we develop a continuum model for avalanche flow accounting for the temperature and moisture content of the moving snow. We first extend existing continuum theories to consider the mechanical energy dissipated by moist particle interactions. We must consider two temperatures: the true thermal temperature and the so-called "granular" temperature, which is associated with random particle movements within the granular ensemble. The model extension therefore requires an internal energy equation to calculate the mean flow temperature as well as an equation to track the kinetic energy of random particle motions. Meltwater produced from frictional heating can be quantified. A third mass conservation equation, however, is necessary to track the meltwater trapped in the pore space of the particles. Knowing this quantity allows us to understand how moist particles damp the granular temperature and to postulate lubrication functions that simulate wet snow sliding. With this approach we can simulate dense, viscous-type flows typically associated with wet snow avalanches.

The additional source of heat and meltwater is from snowcover entrainment.

Avalanches can start from cold snow slabs but entrain warm snow at lower elevations. Often this snow is wet, either from rain or intense thermal heating. To apply the proposed model to solve practical avalanche problems therefore requires the specification of the snowcover temperature, density and moisture content along the avalanche path. A set of documented case studies is used to test the model by reproducing measured runout distances and area covered by the avalanche deposits. Long avalanche runout is possible depending on the initial and boundary conditions of a specific problem. We performed a sensitivity analysis to demonstrate how runout distances and inundated areas can vary as a function of the initial and boundary conditions such as temperature, moisture content, and density of the snowcover. In a final application we fed the model with simulated snowcover data derived from actual meteorological measurements to forecast wet snow avalanche runout in an operational environment. We demonstrate using sensitivity analysis why the specification of boundary conditions leads to great model uncertainties. This work is a first step towards the application of avalanche dynamics models as operational tools to assess the current wet snow avalanche risk.

Key words: wet snow, avalanche modeling, natural hazards, numerical simulation

Zusammenfassung

Lawinen sind gravitative, geophysikalische Ströme mit grossem Gefahrenpotential. Sie bestehen aus einer sich schnell fortbewegenden Masse von Schneeblöcken, deren Bildung erfolgt sobald sich die Schneedecke in Bewegung setzt. Unmittelbar nach der Auslösung bricht die Schneedecke in Blöcke unterschiedlicher Grösse, deren Formen sich aufgrund von Reibungsinteraktionen innerhalb des Lawinenkernes zunehmend der einer Kugel annähern. Das Hauptproblem in der Modellierung der Lawinendynamik ist die physikalische Beschreibung der Bewegung dieser sich verknetenden Massen. Aufgrund der grossen Partikelanzahl wird in Lawinendynamikmodellen die Gesamtheit der Partikel mathematisch als ein sich bewegendes Kontinuum beschrieben. Die Bewegung dieses Kontinuums ist durch die Summe der Reibungskräfte zwischen den Partikeln selbst und zwischen den Partikeln und dem Boden bestimmt. Damit Prozesse in Lawinendynamikmodellen richtig beschrieben und simuliert werden können, müssen diese komplexen Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Dies gilt vor allem für Nassschneelawinen, bei welchen die Temperatur der Partikel nahe ihrem Schmelzpunkt liegt und erhebliche Mengen an Schmelzwasser in der porösen Eismatrix der sich bewegenden Schneeblöcke vorhanden sein können. Die hohen Schneetemperaturen und das Vorhandensein von Schmelzwasser ändern die mechanische Reaktion der Lawine auf die Schwerkraft. Somit bilden sich durch das Wechselspiel der Partikel auf der Mikroskala verschiedene makroskopische Fliessregime mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Auslaufdistanzen.

In dieser Dissertation leiten wir ein Kontinuum-Modell für Lawinen her, welches die Temperatur und den Feuchtigkeitsgehalt des sich bewegenden Schnees miteinbezieht. Wir erweitern existierende Kontinuumstheorien um die mechanische Energie zu berücksichtigen, welche durch die Interaktion von feuchten Partikeln verbraucht wird. Hierbei müssen wir zwei Temperaturen berücksichtigen: Einerseits die wahre thermische Temperatur und andererseits die sogenannte "granulare"' Temperatur, welche mit den zufälligen Partikelbewegungen innerhalb des granularen Ensembles assoziiert ist. Die Modellerweiterung bedarf daher einer Gleichung zur Beschreibung der inneren Energie, die es ermöglicht die durchschnittliche Fliesstemperatur der Lawine zu bestimmen, sowie einer Gleichung um die kinetische Energie der zufälligen Partikelbeweungen nachzuvollziehen. Die Schmelzwassermenge, welche durch Reibungswärme entsteht, kann somit quantifiziert werden. Eine dritte Massenerhaltungsgleichung ist dennoch nötig um das Schmelzwasser zu verfolgen, welches sich in den Hohlräumen der Partikel

befindet. Diese Gleichung liefert das Verstädnis wie feuchte Parktikel die granulare Temperatur senken und ermöglicht es eine Reibungsfunktion zu postulieren, welche die Bewegung von Nassschnee beschreibt. Mit diesem Modell ist es schliesslich möglich dichte, zähfliessende Prozesses welche bei Nassschneelawinen auftereten zu simulieren.

Das Mitreissen von nassen Schneepartikeln und -blöcken aus der Schneedecke (Entrainment) ist eine weitere Wasserquelle. Lawinen können aus einem kalten Schneebrett entstehen und sich dann durch das Mitreissen von warmem, nassem Schnee in niedrigeren Lagen in Nassschneelawinen verwandeln. Der aufgenommene Schnee bezieht seine Feuchtigkeit dabei oft durch Regen oder starkes thermisches Erwärmung. Um das vorgeschlagene Modell anzuwenden Bedarf in der Praxis daher Wissen über die Schneedeckentemperatur, Schneedichte und Feuchtigkeitsgehalt entlang des Lawinenpfades. Das Modell wurde zuerst anhand von dokumentierten Fallstudien getestet, indem gemessene Auslaufdistanzen und Ablagerungsflächen nachmodelliert wurden. Abhänig von den Anfangs- und Randbedingungen eines bestimmten Problems können sich grosse Auslaufstrecken ergeben. In einem nächsten Schritt wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu zeigen, wie Auslaufdistanz und Ablagerungsfläche in Abhängigkeit der Anfangs- und Randbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt, und Dichte der Schneedecke variieren. In einer letzten Anwendung wurden simulierte Schneedeckendaten, abgeleitet aus aktuellen meteorologischen Messungen, verwendet, um die Auslaufdistanz einer Nassschneelawine im Rahmen eines Sicherheitskonzeptes vorherzusagen. Das Modell hat gezeigt, dass es Lawinenbahnen gibt, bei welchen kleine Änderungen der Anfangsbedingungen zu grossen Unterschieden in den Ergebnissen führen. Diese Arbeit ist ein erster Schritt in Richtung einer operationellen Anwendung von Lawinendynamikmodellen zur Beurteilung des aktuellen Nassschnee-Lawinenrisikos.

Stichwörter: Nassschnee, Lawinenmodellierung, Naturgefahren, Numerische Modellierung