

# Energy absorption of trees in a rockfall protection forest

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
MARTIN JOEL OSKAR, JONSSON  
MSc in Civil engineering, Royal Institute of Technology Stockholm  
born 01.12.1975  
citizen of Sweden

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Alessandro Dazio, examiner  
Prof. Dr. Anders Eriksson, co-examiner  
Dr. Walter Ammann, co-examiner

2007

---

## Abstract

In mountain areas rockfalls are frequent events. Their unpredictability, in terms of frequency and magnitude, determines the potential hazard for humans, settlements, and infrastructure in these areas. Different artificial protection methods against rockfall exist, such as barriers and restraining nets. However, a natural form of protection is provided by the forest growing on mountain slopes. The difficulty when regarding the forest stand as a protection barrier against rockfall is to assess and predict its protective effect. The aim of this study is to develop a numerical model that can be used to estimate the energy absorption capacity  $E_{\text{cap}}$  of a single tree during a rockfall. These values can thereafter be implemented in a coupled rockfall singletree model, which can then be used to study the protective effect of the forest.

The rock-tree interaction was investigated with full-scale impact tests, which simulated a rock impact on a Norway spruce tree (*Picea abies* (L.) Karst.) in its natural environment. Every test was monitored with high-speed cameras and accelerometers and provided information about the behaviour of the tree structure during a rock impact. The complex interaction between a rock and a single Norway spruce tree was then simulated using the finite element method. Despite the large natural variations in the wood and the soil material properties, as well as the complex interaction between single roots and the surrounding soil; the numerical singletree model (NSTM) developed gave results, which agreed well with the full-scale impact tests. These tests were performed with a lower energy than the one required for a rock to penetrate through the tree stem. In order to validate NSTM for higher energy levels, full-scale rockfall experiments performed at Cemagref in Grenoble on Silver fir trees (*Abies alba*) growing on a natural slope were used. Even though these trees are much related to Norway spruce trees, neither the material properties nor the size of the root-soil plate are the same. However, comparing the experimentally obtained energy absorption capacity  $E_{\text{cap}}$  with the calculated values, an excellent agreement was obtained.

Using NSTM and performing parameter studies with a spherical rock, the energy absorption capacity  $E_{\text{cap}}$  could be predicted as a function of diameter at breast height DBH and the position of the impacting rock in terms of impact height above ground level  $H_{\text{imp}}$ , eccentricity with respect to the tree center line  $\chi$ , and impact angle  $\alpha_{\text{imp}}$ . Using only the size of the tree in terms of DBH as previously done to define  $E_{\text{cap}}$  is insufficient as  $E_{\text{cap}}$  also depends on the position of the impacting rock. Furthermore, the tree stem and the root-soil system absorbed different amounts of energy. When simulating the full-scale impact tests, it was found that about 2/3 of the initial kinetic energy was absorbed by the tree stem and  $\sim 1/3$  by the root-soil system. However, this relationship seems to be dependent upon the impact velocity  $v_{\text{imp}}$  and the shape of the impacting object. For a spherical rock with diameter 1.45 m impacting the tree with 24 m/s, about 4/5 of the energy was absorbed in the tree stem. Both cases show that the tree stem is the most important factor for the energy absorption capacity.

In order to study the protective effect of damaged trees, a series of computations were carried out assuming the inner part of the stem to be hollow. Removing a circular inner part of the tree stem with a diameter corresponding to 50% of the tree stem diameter

---

yielded a reduction of  $E_{\text{cap}}$  of just 15%, hence indicating that even a heavily damaged tree can offer considerable protection against rockfall.

In order to estimate the protection effect of the forest the single tree behaviour was implemented in a rockfall trajectory code. The energy absorption capacity implemented for a single tree was based upon statistical analysis as a function of DBH,  $H_{\text{imp}}$ ,  $\chi$ , and  $\alpha_{\text{imp}}$ . For this purpose, NSTM is too complex to be directly implemented in a coupled rockfall singletree model, thus the trees are only placeholders used to detect the impact between the tree and the falling rock. This was done without explicitly considering the directional change of the rock trajectory during the impact. The latter originates from changes in the topography only.

None of the existing coupled rockfall singletree models includes the effect of  $H_{\text{imp}}$  and  $\alpha_{\text{imp}}$ . Therefore, with the improvements identified in this study, a more realistic behaviour of the falling rock and the energy absorption capacity of a single tree can be simulated; hence, the potential hazard caused by a falling rock when reaching settlements, buildings or infrastructure can be more accurately estimated.

A case-study showed that the kinetic energy of the falling rock is strongly reduced by the forest and that it is possible to investigate the protection effect of the forest accurately with the developed coupled rockfall singletree model. However, for future simulations, the developed code must be calibrated and validated. Furthermore, if the coupled rockfall singletree model is extended with a module which is capable of simulating forest growth and different forest management strategies; the long-term protection effect of the forest can be studied and quantified.

---

## Kurzfassung

Steinschlag ist ein häufiges Phänomen in Berggebieten und bedroht die dortigen Siedlungen und Verkehrswege. Insbesondere, da die Auftretenshäufigkeit und die Grösse der fallenden Steine nur schwer vorhersehbar sind. Verschiedene künstliche Baumassnahmen wie Netzverbauungen, Dämme oder Wände können zum Schutz vor dieser Naturgefahr verwendet werden. Im Gegensatz dazu ist der Bergwald eine natürlich gewachsene Schutzmassnahme. Es ist jedoch schwierig, die Schutzfunktion eines Waldes gegen Steinschlag zu beurteilen bzw. zu quantifizieren. Ziel dieser Arbeit ist darum, ein numerisches Modell zu entwickeln um die Energieaufnahmefähigkeit  $E_{cap}$  eines einzelnen Baumes in Bezug auf Steinschlag zu bestimmen. Diese Information kann daraufhin in ein Einzelbaummodell innerhalb einer Trajektorienanalyse integriert werden, um damit die Schutzfunktion eines ganzen Waldes zu untersuchen.

Die Interaktion zwischen Baum und Steinschlag wurde mittels masstabgetreuen Feldexperimenten an Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) in ihrer natürlichen Umgebung untersucht. Der Einschlag eines Versuchsschlittens und die Reaktion des Baumes wurden mit Beschleunigungsgebern und Hochgeschwindigkeitskameras detailliert erfasst. Die kinetischer Energie und die Einschlaghöhe wurden dabei variierten. Das komplexe Zusammenspiel zwischen Steinschlag und Baum wurde anschliessend mittels der Finiten Element Methode simuliert. Trotz der grossen Parameterstreuung für die Holz- und Bodeneigenschaften sowie der komplexen Interaktion zwischen einzelnen Wurzeln und dem sie umgebenden Boden zeigte das numerische Einzelbaummodell (NSTM = numerical singletree model) eine gute Übereinstimmung mit den Feldversuchen. Die Versuche waren so dimensioniert, dass der Versuchsschlitten die getesteten Bäume nicht durchschlagen konnte. Um jedoch das NSTM für höhere Energien zu kalibrieren, wurden die Ergebnisse von Steinschlagversuchen - durchgeführt vom Cemagref in Grenoble - an Tannen (*Abies alba*) ebenfalls in ihrer natürlichen Umgebung mit einbezogen. Obwohl die Holz- und Wurzeltellereigenschaften verschieden sind von denjenigen der zuvor getesteten Fichten, konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der theoretischen und der experimentell ermittelten Energieaufnahmefähigkeit  $E_{cap}$  erzielt werden.

Mit Hilfe des NSTM und durch passende Parameterstudien mit einem kugelförmigen Stein kann die Energieaufnahmefähigkeit  $E_{cap}$  als Funktion vom Durchmesser in Brusthöhe DBH und der Einschlagposition; Höhe über Boden  $H_{imp}$ , Exzentrizität  $\chi$  und Einschlagwinkel  $\alpha_{imp}$  beschrieben werden. Es hat sich gezeigt, dass DBH als einziges Beschreibungskriterium des Baumes ungenügend ist, da die Energieaufnahmefähigkeit auch von der Einschlaghöhe relativ zur Baumgrösse abhängt. Insgesamt werden nur 2/3 der Steinenenergie durch den Baum selbst aufgenommen. Das restliche Drittel wird über den Boden absorbiert. Aber auch dieser Wert hängt noch von der Einschlaggeschwindigkeit  $v_{imp}$  und der Form des Steins ab. Für einen kugelförmigen Stein mit einem Durchmesser von 1.45 m und einer Geschwindigkeit von 24 m/s werden ungefähr 80% der Energie durch den Baumstamm aufgenommen. Weitere Simulationen zeigen, dass die Schutzwirkung von bereits beschädigten Bäumen mit einem zu 50% innen hohlen Baumstamm sich nur um etwa 15% reduziert.

Um die Schutzwirkung eines ganzen Waldes zu erhalten, wurde das Einzelbaumverhal-

---

ten in ein Programm zur Berechnung von Steinschlagtrajektorien implementiert. Die Energieaufnahmefähigkeit der Einzelbäume variierte somit statistisch als Funktion von DBH,  $H_{\text{imp}}$ ,  $\chi$ , and  $\alpha_{\text{imp}}$ . Jedoch ist diese Art von Simulation zu zeitintensiv, um sie effizient für eine statistisch angemessene Zahl von Trajektorien einzusetzen. Darum wurden die Einzelbäume so simuliert, dass sie nur noch die Kollision mit dem Stein erfassen und diesen entsprechend ihrer Energiekapazität abbremsen. Die dadurch weggefallenen allfälligen Richtungsänderungen der Steinbahn werden nicht mehr berücksichtigt. Die Richtungsänderungen werden nur durch die Variation der Topographie verursacht.

Keines der existierenden Einzelbaummodelle berücksichtigt die Einwirkung von  $H_{\text{imp}}$  und  $\alpha_{\text{imp}}$ . Daher kann durch die in dieser Studie erarbeiteten Verbesserungen ein mehr realistisches Verhalten eines fallenden Steins und die Energieaufnahmekapazität eines Einzelbaumes simuliert werden. Folglich kann auch die potenzielle Gefahr eines fallenden Steins, der Siedlungen, Gebäude oder Infrastrukturanlagen erreicht, genauer abgeschätzt werden.

Mittels einer Fallstudie wurde gezeigt, dass die kinetische Energie eines fallenden Steins durch Wald stark reduziert wird und dass es möglich ist, die Schutzwirkung des Waldes mittels des gekoppelten Steinschlag - Einzelbaummodells ausreichend genau vorhersagen zu können. Für zukünftige Simulationen sollte das entwickelte Programm kalibriert und validiert werden. Weiters kann, wenn das gekoppelte Modell mit einem Zusatzmodul versehen wird, das imstande ist, Waldbewachung und verschiedene Forstverwaltungsstrategien zu berücksichtigen, die langfristige Schutzwirkung des Waldes näher studiert und quantifiziert werden.