Schutz vor Erdrutschen und Steinschlag

Bei Kapstadt wurde eine besondere Küstenstrasse mit diversen Hilfsmitteln vor Steinschlägen und Erdrutschen geschützt. Ein Erfahrungsbericht.

Axel Volkwein WSL und Louis Melis

Chapman's Peak Drive (CPD) liegt in der Nähe von Kapstadt in Südafrika und ist eine der spektakulärsten Küstenstrassen der Welt. Sie ist ca. 10 km lang und führt von Hout Bay aus, um den ihr den Namen gebenden Berg herum, nach Noordhoek. Die Strasse wurde über einen Zeitraum von sechs Jahren, beginnend 1916, von Gefangenen des 1. Weltkriegs sowie anderen Häftlingen in den blossen Fels gehauen und liegt an ihrer höchsten Stelle ca. 60 m über dem Meeresspiegel.

Nach starken Regenfällen, insbesondere im Winter, wurde die Strasse immer gesperrt, da aufgrund der Instabilität der Klippe Gefahr von Steinschlägen und Erdrutschen bestand. Nach zu vielen tödlichen Unfällen beschloss die Southern Peninsula Municipality im September 1999, den Chapman´s Peak Drive zu sperren.

Nach über vier Jahren Sanierungsarbeiten wurde sie im Dezember 2003 als Mautstrasse wiedereröffnet. Je nach Jahreszeit befahren täglich zwischen 3500 und 9000 Touristen, Ortsansässige und Transportfahrzeuge den CPD.

Einschätzung der Steinschlaggefahr

Das Gestein oberhalb des CPD befindet sich aufgrund seiner horizontalen Schichtung sowie der stark verwitterten, sedimentären Front in einem schlechten Zustand. Es musste eine umfassende Untersuchung der Steinschlaggefahr durchgeführt werden. Zuerst musste das Gelände sehr detailliert im Modell dargestellt werden. Zu diesem Zweck wurde die Landschaft entlang des CPD von Flugzeugen photogrammetrisch erfasst. So erhielt man ein digitales Höhenlinienmodell mit einer Auf-



Abb. 1: Blick auf den Chapman's Peak Drive.

lösung von 2 m (siehe Abb. 2). Anhand der photogrammetrischen Daten einerseits und der Begehungen vor Ort andererseits wurde das Gelände unter Berücksichtigung der die Steinschlag-Flugbahn beeinflussenden Parameter klassifiziert (siehe Abb. 2). Diese Informationen wurden anschliessend in zusätzliche GIS-Schichten integriert. Es wurden 20 unterschiedliche Geländearten festgelegt und gemäss der Eingabeparameterspezifizierung der Flugbahn-Berechnungs- Software von Geotest zugeordnet.

Der nächste Schritt diente der Evaluierung der Steinschlaggefahr. Es waren nur jene Flugbahnen von Interesse, die die Strasse erreichen. Daher konnten alle Bereiche mit einer durchschnittlichen Hangneigung zwischen dem Ausgangspunkt und der Strasse von weniger als 28° als potenzielle Ausgangsbereiche ausgeschlossen werden. Die verbleibenden Ausgangspunkte konnte man auf zweierlei Arten errechnen, nämlich entweder anhand eines automatisch generierten Rasters oder mittels manuell erfasster Gesteinsbrocken. Für jeden Ausgangspunkt wurden Gesteinsbrocken unterschiedlicher Grössen verwendet, um die grösstmögliche Streuung von Steinschlag-Ereignissen zu gewährleisten. Man ging von Grössen von 0,3, 0,5 und 1,0 m^3 aus. Die manuell ermittelten zusätzlichen Steinschlagausgangspunkte wurden mit den vor Ort gewonnenen, nötigen Daten manuell ergänzt: Die Grösse des Gesteinsbrockens wurde gemessen und dessen Lage mittels GPS bestimmt. Letztendlich wurden insgesamt ca. 38 000 Steinschläge in Erwägung gezogen.



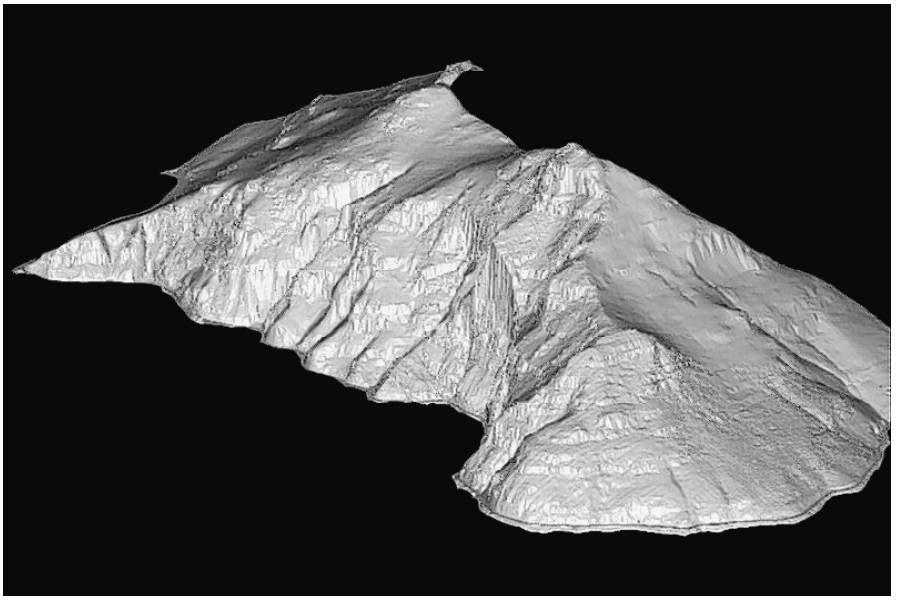


Abb.2: Digitales Höhenlinienmodell des CPD in 3-D.

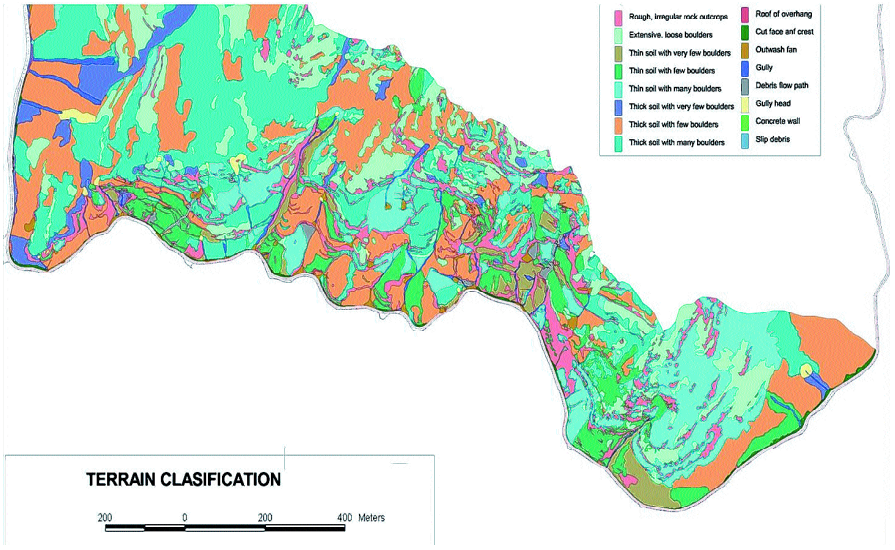


Abb. 3: 2-D-Geländeklassifikation.

Eine 3-D-Analyse jener potenziellen Steinschläge ab Aufschluss über deren Flugbahnen, die auf die 2-D-Karte projiziert wurden (siehe Abb. 3). Diese zeigt deren Verteilung und/oder Konzentration sowie die sich daraus ergebenden maximalen Energien. Zur Erwägung von Steinschlag-Schutzmassnahmen mussten, unter Verwendung der Software CRSP, noch weitere 2-D-Simulationen durchgeführt werden. Diese waren nötig, da die 2-D-Simulation auch die Abprallhöhe der Gesteinsbrocken lieferte und die Planung und Ausführung von Schutzmassnahmen, entsprechend den Gesteinsenergien, die in der 3-D-Analyse errechnet wurden, ermöglichte.

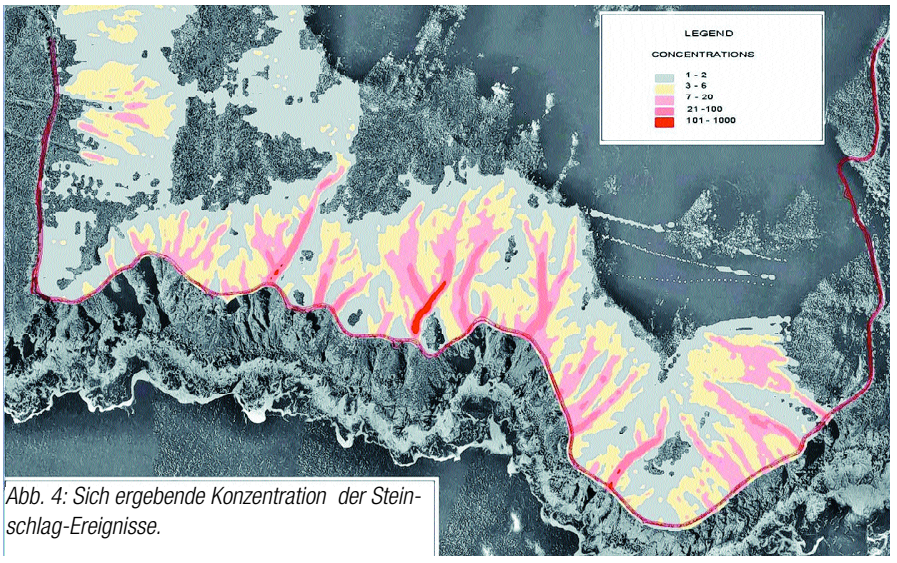


Abb. 4: Sich ergebende Konzentration der Steinschlag-Ereignisse.

Steinschlag-Schutzmassnahmen

Das Hauptaugenmerk bei der Auswahl der richtigen Schutzmassnahme wurde darauf gelegt, dass die Auswirkungen auf die Landschaft am CPD möglichst gering gehalten werden. Um den CPD so natürlich wie möglich zu erhalten, waren massive oder klar erkennbare Konstruktionen unerwünscht. Aus diesem Grund schieden Verbauungen, wie z.B. grosse Bereiche umfassende Hangstabilisierungen durch Spritzbeton, aber auch riesige Steinschlag-Schutzgalerien aus. Als bevorzugte Alternative erwies sich daher die Verwendung flexibler und fast durchsichtiger Steinschlagzäune, die in der Lage sind, Steinschläge mit einer Energie von bis zu 3000 kJ abzufangen. Dies entspricht einer Masse von 10 Tonnen, die sich mit 25 m/s (= 90 km/h) fortbewegt.

Die berechneten, die Strasse gefährdenden Steinschlag-Flugbahnen wurden in die Energieklassen <500 kJ, <750 kJ, <1500 kJ, <2000 kJ und <3000 kJ eingeteilt, die sowohl den schweizerischen Steinschlag-Schutzrichtlinien [6] als auch den maximalen Zaunkapazitäten der verschiedenen Steinschlagschutzvorrichtungen entsprechen. Letztendlich wurden insgesamt 1615 m Zäune angebracht.

Lösungen für energiereiche Steinschlag-Ereignisse (> 3000 kJ)

Steinschlag-Energien von über 3000 kJ entwickeln sich für gewöhnlich nur in äusserst expo-

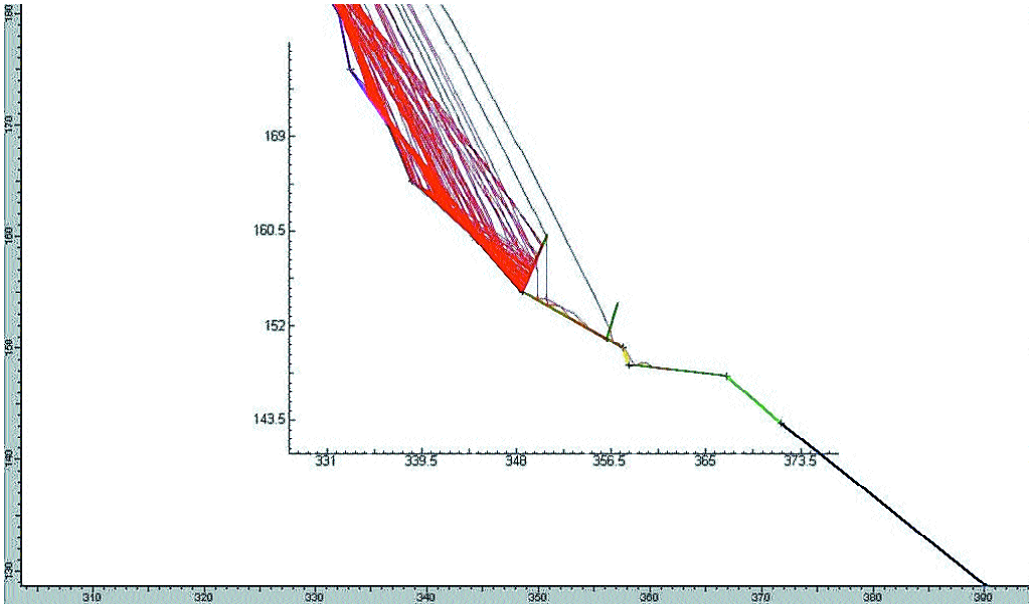


Abb. 5: 2-D-Steinschlag-Flugbahn-Analyse inklusive Barrieren (rechts).

nierten Lagen, die sich hauptsächlich auf kurze Strassenabschnitte konzentrierten. Insgesamt mussten rund 6000 davon berücksichtigt werden. Man konnte sie unter Kontrolle bringen, indem man entweder Massnahmen ergriff, um die Energie weiter oberhalb der Strasse zu verringern, oder indem man stärkere Verbauungen anbrachte. Einzelne grosse Gesteinsbrocken, die diese hohen Energien verursachen, wurden von Abseilern mit Hilfe von Hebeln und Sprengwerkzeugen über die Klippen hinuntergestossen.

Auf dem durch Schutzzäune geschützten Teil der Strasse, kommt es nach wie vor zu Steinschlag-Ereignissen mit hoher Energie. Diese kommen jedoch höchst selten vor. Die oben beschriebene manuelle Erfassung mehrerer tausend potenzieller Steinschläge führte zu einer statistischen Verteilung der Steinschlag-Ereignisse. Daraus ist ersichtlich, dass energiereiche Steinschlag-Ereignisse mit schnellen und schweren Felsbrocken wesentlich seltener vorkommen als Ereignisse mit kleineren Felsbrocken der selben Geschwindigkeit. Daher können die Steinschlag-Ereignisse, abhängig vom Volumen der Gesteinsbrocken, in verschiedene Kategorien eingeteilt werden:

0,001 – 0,03 m^3
0,03–0,1 m^3
0,1 - 0,5 m^3
0,5–1,0 m^3 und 1,0–3,5 m^3.

Da Steinschlag-Ereignisse der letzten beiden Kategorien nur sehr selten (<2%) vorkommen, wurden diese bei der Dimensionierung der Steinschlag-Barrieren nicht berücksichtigt, da die Versicherungspolice fordert, dass die Schutzmassnahmen in der Lage sein müssen, mindestens 95% aller Steinschlag-Ereignisse abzufangen. Darauf bezogen zählt jedes einzelne Ereignis, unabhängig von der Grösse des Gesteinsbrockens, gleich. Daher ist es akzeptabel, dass die wenigen verbleibenden, mit hoher Energie auftreffenden



Abb. 6: Beispiel einer flexiblen Ringnetz-Barriere während der Montage.

Ereignisse die Barrieren durchbrechen und entsprechende Reparaturen erforderlich machen, da dies von der Versicherungspolice abgedeckt wird.

Simulation und Ausführung der flexiblen Schutzzäune

Die am CPD verwendeten Steinschlag-Verbauungen (siehe Abb. 6) bestehen aus Stahlstützen, die von rückhaltenden und seitlich abgehenden Drahtseilen an Ort und Stelle gehalten werden. Zwischen den Stützen sind Aufhängeseile gespannt, die zur Spannung der Ringnetze dienen. Das Netz selbst besteht aus lose miteinander verbundenen Ringen, mit einem Durchmesser von 300 mm, die aus einem 5- bis 19-mal gewickelten, 3 mm starken, hochfestem Stahldraht bestehen. In die Seile sind spezielle Bremselemente integriert, um die eindeutige Festlegung des Bereichs der Energieaufnahme zu gewährleisten. Das beschriebene System reagiert sehr flexibel und weist, angepasst an die Grösse der Barriere, eine hohe Verformbarkeit auf. Dies gewährleistet eine erweiterte Bremszeit des Steinschlags und verringert so die Höchstbelastung der beteiligten Komponenten. Nach Abschluss der Bohr- und Verankerungsarbeiten können die Barrieren leicht mit Hilfe von Kränen oder Hubschraubern montiert werden. Die Barrieren wirken auch gegen Erdrutsche. Die Abmessungen der Barrieren sind für diese Massen für gewöhnlich stark genug, da deren Maximalgeschwindigkeiten weit hinter den von Steinschlägen erreichten zurückbleiben. Dies und die Tatsache, dass ein Erdrutsch nicht punktförmig, sondern als Flächenlast auf das Netz auftrifft, verringert – im Vergleich zu Steinschlägen – die maximale Ausnutzung der Komponenten.

Die Steinschläge am CPD wurden hinsichtlich ihrer maximalen kinetischen Energie beim Auftreffen auf die Strasse bzw. auf die Schutzzäune eingeteilt. Die geeignete Zaunverbauung wurde ihrer maximalen Energiekapazität entsprechend ausgewählt. Verschiedenartige Steinschlag-Ereignisse werden für gewöhnlich durch den Inhalt ihrer kinetischen Translationsenergie unterschieden, der sich aus Masse und Geschwindigkeit, $E_k = \frac{1}{2} mv^2$, ergibt. Vorangegangene Untersuchungen in den Alpen haben ergeben, dass die meisten Steinschläge eine maximale Geschwindigkeit von v = 25 m/s erreichen. Dies ist auch in den schweizerischen Richtlinien beschrieben. Dies entspricht der Grenzgeschwindigkeit, auf die alle Barrieren getestet werden. Die Steinschlag-Ereignisse am CPD weisen jedoch eine andere Masse-Geschwindigkeits-Verteilung auf.

Aufgrund der Landschaftsbeschaffenheit, mit Freifallhöhen von bis zu etwa 240 m direkt über dem CPD, können die Steinschläge Geschwindigkeiten von bis zu v = 68 m/s (= 245 km/h) erreichen. Bei einer angenommenen Fallmasse von maximal 1300 kg errechnet sich eine Steinschlag-Energie von 3000 kJ. Der entsprechende Probekörper in der Schweiz wiegt 9640 kg und fällt mit der oben beschriebenen Geschwindigkeit von 25 m/s. Um eine einwandfreie Nutzung der Barrieren zu gewährleisten, müssen diese daher entsprechend diesen mit hoher Geschwindigkeit auftretenden Steinschlag-Ereignissen getestet werden, die die Barriere anders belasten könnten. Im Gegensatz zu den für die Schweizer Alpen typischen Steinschlag-Ereignissen, die experimentell getestet werden können, ist ein Versuch im Massstab 1:1, mit einer Endgeschwindigkeit von 68m/s, hier nicht möglich. Dies würde eine Freifallhöhe von rund 236 m (unter Vernachlässigung des Luftwiderstands) voraussetzen und man würde aus dieser Höhe nicht genau eine Barriere treffen. Daher müssen die Auswirkungen von Hochgeschwindigkeits-Ereignissen auf Schutzzäune numerisch be-

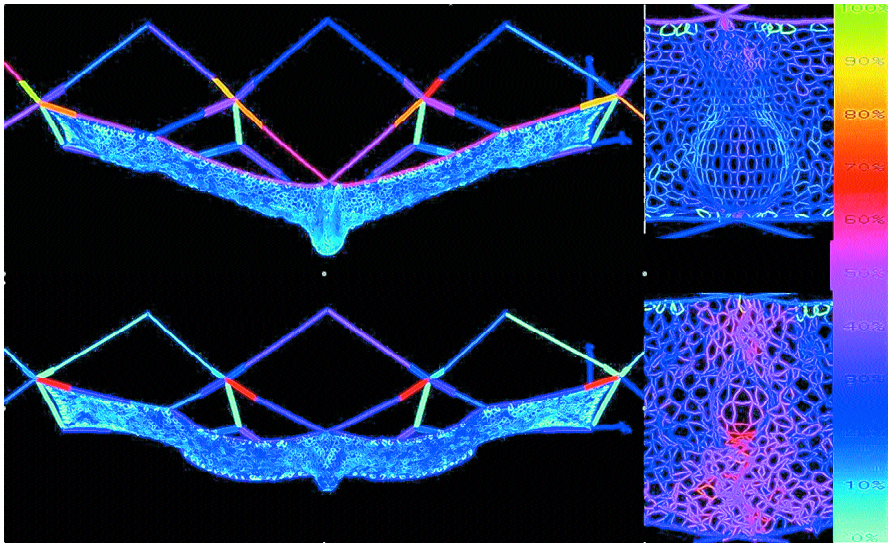


Abb. 7: Unterschiedliche Belastung (in %) einer Steinschlag-Barriere durch einen «langsamen» und grossen schweizerischen Standard-Probekörper (oben) und ein kleines, mit hoher Geschwindigkeit auftreffendes Steinschlag-Ereignis (unten). Rechts findet man Einzelheiten bezüglich der Ausnutzung des Aufprallbereichs. Das schnelle Ereignis belastet den Aufprallbereich stärker, die Barriere als Ganzes jedoch weniger.

rechnet werden. Dies geschieht mittels der Finite-Elemente-Software Faro, die speziell für die Simulation flexibler Ringnetz-Barrieren entwickelt wurde. Die Ergebnisse der Software stellen hauptsächlich die Gesteinskinetik und die Verteilung der Last (in %) auf die einzelnen Barrieren-Komponenten im Vergleich zu deren maximaler Belastbarkeit dar.

Ergebnisse der Simulation

In Abb. 7 werden einige ausgewählte Simulations-Ergebnisse dargestellt, wobei der Ausnutzungsgrad einer Barriere durch ein mit hoher Geschwindigkeit auftreffendes Steinschlag-Ereignis und ein mit äquivalenter Energie auftreffendes Standard-Steinschlag-Ereignis veranschaulicht wird. Die einzelnen Komponenten sind, entsprechend ihrer Belastung in Bezug auf ihre maximale Belastbarkeit, farblich gekennzeichnet.

Die wichtigsten, durch die Simulationen gewonnenen Ergebnisse, können folgendermassen zusammengefasst werden:

a. Die Barriere als Ganzes wird durch ein Hochgeschwindigkeits-Ereignis weniger belastet als durch ein normales, mit äquivalenter Energie auftreffendes Ereignis. Dies lässt sich durch die Unterschiede im Steinschlag-Impuls I = mv erklären. (Das Energieverhältnis beinhaltet auch die Geschwindigkeit, jedoch im Quadrat). Daher ist der Hochgeschwindigkeits-Impuls um den Faktor $v_{high\ speed} / v_{normal\ speed}$ verringert.

b. Der Hochgeschwindigkeits-Fallkörper ist kleiner als der Standard-Probekörper. Dies führt zu einer höheren Energiedichte beim Auftreffen auf das Netz und folglich erhöht sich die Netzbelastung an der Einschlagstelle.

Die Ergebnisse der Simulation können nun dazu verwendet werden, eine Barriere für die Hochgeschwindigkeits-Anwendung zu empfehlen oder nötige Barrieren-Verstärkungen vorzuschlagen. So ist z.B. die Barriere RX-300 mit einer zusätzlichen Ringnetzschicht ausgestattet, um der durch Hochgeschwindigkeits-Steinschläge entstehenden, punktförmigen Belastung standzuhalten. An der

Oberseite der Ringnetz-Barrieren wird für gewöhnlich ein normales Drahtgeflecht verwendet, um zu verhindern, dass kleine Gesteinsbrocken das Ringnetz durchdringen. Die hohen Geschwindigkeiten erfordern des Weiteren eine Verstärkung des Netzes. Zu diesem Zweck wird stattdessen das aus hochfestem Stahldraht hergestellte, so genannte Spezialdrahtgeflecht Tecco® montiert.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Beitrag zeigt, wie auch aussergewöhnliche Naturgefahren mit innovativen Lösungsansätzen und entsprechenden Hilfsmitteln wie der Geotest 3-D-Steinschlag oder der Finite-Elemente Simulation besser erfasst und entsprechend gelöst werden können. Abgeleitet werden kann auch ein Bedarf nach Steinschlag-Barrieren, welche Einschlag-Ereignisse grösser als 3000 kJ erfolgreich stoppen können. Fatzer AG, Geobrugg-Schutzsysteme, hat jetzt eine 5000-kJ-Hochenergie-Steinschlag-Barriere zur Marktreife gebracht. Nach erfolgreichen Vortests wird am 25.10.06 unter der Aufsicht der Eidg. Expertenkommission Lawinen und Steinschlag (EKLS) der Zertifizierungstest mit dem für die 5000 kJ Test erforderlichen 16 Tonnen schweren Wurfkörper stattfinden.

Axel Volkwein WSL, Birmensdorf; Louis Melis, Melis & Du Plessis, Kapstadt; Bruno Haller Fatzer AG, Romanshorn; Robert Pfeifer Geotest, Zollikofen



Abb. 8: Zurückgehaltene Steine: mehrere, von einer Barriere aufgefangene Gesteinsbrocken.