

## Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор. Часть 5



Фото: [http://www.trumer.su/ru/ste\\_5.html](http://www.trumer.su/ru/ste_5.html)

Продолжаем публиковать немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Описание камнепадов и инженерная защита от них: обзор» [1], написанной группой ученых из Швейцарии, Италии и Франции. Эта большая работа была опубликована в 2011 году в рецензируемом международном интернет-журнале NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences – «Природные опасности и науки о Земле»), издаваемом под эгидой Европейского союза специалистов в области наук о Земле (EGU – European Geosciences Union).

Указанная статья находится в открытом доступе в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0), поэтому ее можно использовать в некоммерческих и коммерческих целях, переводить или изменять при условии ссылки на первоисточник и указания типа изменений.

Сегодня представляем пятую (заключительную) часть переведенной работы, посвященную таким мерам защиты от камнепадов, как гибкие противокамнепадные системы и леса. Отметим, что нумерация рисунков соответствует таковой в оригинальной статье.

В этой части также приведен полный список источников и литературы, использованный авторами оригинальной статьи.

Консультационную помощь редакции при подготовке перевода оказали специалисты российского представительства компании Trumer Shutzbauten, разрабатывающей и производящей одни из наиболее надежных в мире систем

**инженерной защиты от опасных геологических процессов, в том числе от камнепадов.**

**ФОЛЬКВАЙН АКСЕЛЬ (VOLKWEIN AXEL)**

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария, volkwein@wsl.ch

**ШЕЛЛЕНБЕРГ КРИСТИАН (SCHELLENBERG KRISTIAN)**

Компания Gruner+Wepf Ingenieure AG, г. Цюрих, Швейцария

**ЛАБИУЗ ВИНСЕНТ (LABIOUSE VINCENT)**

Лаборатория механики горных пород Швейцарского федерального технологического института Лозанны, г. Лозанна, Швейцария

**АЛЬЯРДИ ФЕДЕРИКО (AGLIARDI FEDERICO)**

Кафедра геологических наук и геотехнологий Миланского университета Бикокка, г. Милан, Италия

**БЕРГЕР ФРЕДЕРИК (BERGER FREDERIC)**

Отдел исследований горных экосистем и ландшафтов Национального исследовательского института в сферах наук и технологий по охране окружающей среды и сельскому хозяйству (IRSTEA, ранее Cemagref), г. Сен-Мартен-д'Эр, Франция

**БУРЬЕ ФРАНК (BOURRIER FRANCK)**

Группа исследований горных экосистем Национального исследовательского института в сферах наук и технологий по окружающей среде и сельскому хозяйству (IRSTEA, ранее Cemagref), г. Сен-Мартен-д'Эр, Франция

**ДОРРЕН ЛУУК (DORREN LUUK)**

Отдел оползней, лавин и защиты лесов Федерального управления по окружающей среде, г. Берн, Швейцария

**ГЕРБЕР ВЕРНЕР (GERBER WERNER)**

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария

**ЖАБОЕДОФФ МИШЕЛЬ (JABOYEDOFF MICHEL)**

Институт геоинформатики и анализа рисков Лозаннского университета, г. Лозанна, Швейцария

**Гибкие системы защиты от камнепадов**

В настоящее время одной из наиболее распространенных мер защиты от камнепадов является использование гибких систем – прежде всего камнеулавливающих ограждений (противокампнепадных барьеров). Такие барьеры обычно устанавливаются вдоль границ зданий или сооружений и действуют как системы пассивной защиты, то есть они предназначены для остановки падающих со склонов камней.

В последние годы перед выходом настоящей статьи было проведено много исследований в этой сфере. Сначала исследовательская работа была сосредоточена на общей способности гибких систем надежно удерживать падающие камни. Позже акцент стали делать на том, как улучшить знания о поведении таких конструкций, – например, путем систематических и обширных испытаний (Grassl, 2002), общих оценок (Spang, Bolliger, 2001) или численного моделирования. Полученная в результате информация легла в основу стандартизации.

Поскольку эти исследования были в основном прикладными и проводились в тесном сотрудничестве с производителями, то в каждой опубликованной работе, как правило, рассматривался только один тип противокаменных барьеров. Однако все же можно было сравнить различные испытанные системы с точки зрения их эффективности, «тормозного пути», энергетического баланса и т. д. (например, Gerber, Volkwein, 2007).

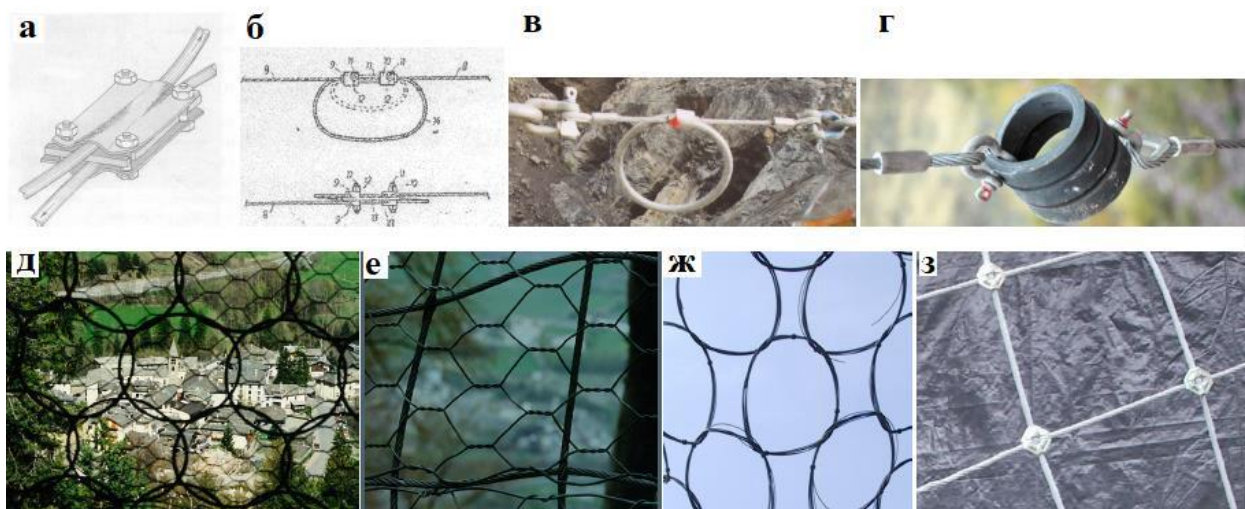
После нескольких десятилетий развития и совершенствования типичная к моменту публикации настоящей статьи гибкая система защиты от камнепадов состоит из стальной сетки (иногда двойной, всегда защищенной от коррозии – *Ред.*), продольно прикрепленной к несущим тросам. Сетки с размерами ячеек от 5 до 35 см обычно бывают плетеными (типа рабицы, с четырехугольными ячейками), двойного кручения (плетеными, с шестиугольными ячейками) или кольчужными (из вплетенных друг в друга колец) и изготавливаются либо из стальной проволоки, либо из тонких стальных тросов. Есть также ограниченная информация об использовании альтернативных материалов для изготовления сеток (Tajima et al., 2003). (Австрийская компания Trumer Schutzbauten, имеющая представительство и в России, предлагает также уникальную «омега-сетку» (см. фото на заставке) с ячейками, напоминающими по форме греческую букву «омега», которая сплетена из тонких прочных стальных тросов и предназначена для работы в условиях высокой степени натяжения ([geoinfo.ru/files/sistema-stabilizacii-sklonov-resheniya-kompanii-trumer-set-omega.pdf](http://geoinfo.ru/files/sistema-stabilizacii-sklonov-resheniya-kompanii-trumer-set-omega.pdf)). – *Ред.*)

Несущие сетку тросы (с диаметром сечения 12–22 мм) горизонтально натянуты между стальными стойками высотой обычно от 2 до 7 м, установленными с шагом от 5 до 12 м. Каждая стойка прикрепляется снизу к опорной пластине, соединяющей ее с фундаментом, либо неподвижно, либо через особый шарнир (тогда верхний конец стойки удерживают дополнительные тросы-оттяжки, закрепленные грунтовыми анкерами выше по склону, а в конкретных случаях могут использоваться и дополнительные оттяжки).

Опубликована подробная информация о фундаментах стоек, включая предложения по измерениям нагрузок на них (Turner et al., 2009).

Для достаточно высоких энергий удара большинство систем имеет на тросах и/или в местах их прикрепления к стойкам и анкерам дополнительные энергопоглощающие (тормозные, амортизирующие, демпфирующие) элементы, которые могут деформироваться без разрывов с большими перемещениями (до 2 м), повышая гибкость несущей конструкции. На рисунке 18 показаны некоторые типичные амортизирующие элементы. (Схемы и фотографии, демонстрирующие устройство некоторых противокаменных барьеров, хорошо представлены также в ряде публикаций журнала «Геоинфо», например по адресам: [geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/primery-adaptacii-standartnyh-kamneulavliyayushchih-barerov-k-konkretnym-usloviyam-chast-1-42684.shtml](http://geoinfo.ru/product/analiticheskaya-sluzhba-geoinfo/primery-adaptacii-standartnyh-kamneulavliyayushchih-barerov-k-konkretnym-usloviyam-chast-1-42684.shtml); [geoinfo.ru/product/trumer-shchutzbauten-rus-trumer-schutzbauten-gmbh/gibridnyj-protivokamnepadnyj-barer-novyj-podhod-k-proektirovaniyu-i-stroitelstvu-42842.shtml](http://geoinfo.ru/product/trumer-shchutzbauten-rus-trumer-schutzbauten-gmbh/gibridnyj-protivokamnepadnyj-barer-novyj-podhod-k-proektirovaniyu-i-stroitelstvu-42842.shtml). – *Ред.*)





**Рис. 18.** Некоторые распространенные типы тормозных элементов гибкого противокаменного барьера, работающих за счет: а – трения натянутого троса между фрикционными пластинами; б – трения между зажимами троса; в – уменьшения диаметра петли из гибкой стальной трубки; г – удлинения спиральной конструкции. Типы сеток гибких противокаменных барьеров: д – двойная система из кольчужной сетки с крупными круглыми ячейками и сетки двойного кручения с более мелкими шестиугольными ячейками; е – двойная система из сетки с крупными ячейками из сращенных тросов и сетки двойного кручения с более мелкими шестиугольными ячейками; ж – еще одна разновидность кольчужной сетки; з – сетка из тросов, скрепленных зажимами

Противокаменные барьеры обычно устанавливаются местными монтажными бригадами в соответствии с инструкциями от производителя (или бригадами от самих производителей. – *Ред.*).

Ряд преимуществ гибких камнеулавливающих ограждений способствует все более широкому их распространению. Они дешевле по сравнению с другими системами защиты (например, примерно в десять раз по сравнению с противокаменными галереями), быстро устанавливаются, требуя для этого мало оборудования. Их работа эффективна и надежна. Воздействие на ландшафт во время их строительства невелико. На стадии эксплуатации они не портят внешний вид местности. Благодаря способности выдерживать энергию ударов в широком диапазоне гибкие барьеры могут использоваться для защиты не только от камнепадов, но и от большинства других опасных склоновых процессов. И наконец, рост числа производителей приводит к здоровой конкуренции, гарантируя непрерывное развитие и усовершенствование конструкций этих систем с параллельным снижением цен на них.

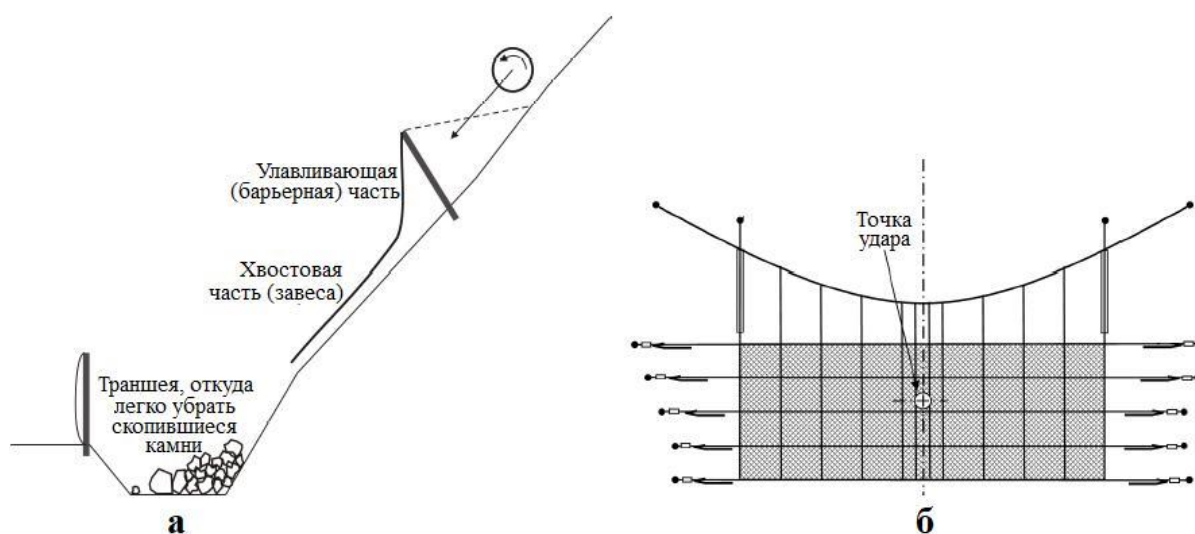
Однако для гибких барьеров существуют и некоторые ограничивающие факторы:

- должна быть гарантирована долгосрочная защита от коррозии;
- срок службы таких систем ограничен 25 годами (ЕОТА, 2008) или даже меньше в случае агрессивных условий окружающей среды;
- если барьер даже успешно смог противостоять хотя бы одному камнепаду средней величины (не говоря уже о крупных событиях), он обычно деформируется, что приводит к уменьшению его высоты; а после крупного

камнепада удерживающая способность системы может стать меньше, что потребует немедленного технического обслуживания;

- необходимо регулярно проверять все установленные барьеры, чтобы предотвратить снижение их эффективности, – устранять их заполнение камнями, ветками и т. д., ремонтировать деформированные участки и исправлять другие нарушения;
- гибкое камнеулавливающее ограждение нельзя использовать, если ожидаемая энергия удара слишком высока или если рассчитанные траектории падающих со склона камней превзойдут по высоте барьер и достигнут защищаемого объекта;
- если место установки противокаменепадного барьера подвержено также сходам лавин зимой, то надо иметь в виду, что динамическая снежная нагрузка обычно бывает выше энергии ударов при камнепадах (Margreth, 1995; Nicot et al., 2002b,a), и в таком случае альтернативными решениями могут быть либо частичное удаление и повторная установка гибкой системы после каждого зимнего сезона, либо выбор другой меры защиты, например противокаменепадной и одновременно лавинозащитной галереи.

В последние перед публикацией данного обзора годы все большее внимание уделялось новым мерам по противодействию камнепадам. Так называемые аттенуаторные (ослабляющие) системы не пытаются остановить падающий со склона камень, а улавливают его и направляют вниз по склону контролируемым образом, параллельно уменьшая его энергию (рис. 19). Это могут быть противокаменепадные завесы, барьеры-аттенуаторы или гибридные противокаменепадные барьеры (Glover et al., 2010; Dhakal et al., 2011a) (см. также публикацию в журнале «Геоинфо», где представлены понятные рисунки, по адресу: [geoinfo.ru/product/trumer-shchutcbauten-rus-trumer-schutzbauten-gmbh/gibridnyj-protivokamnepadnyj-barer-novyj-podhod-k-proektirovaniyu-i-stroitelstvu-42842.shtml](http://geoinfo.ru/product/trumer-shchutcbauten-rus-trumer-schutzbauten-gmbh/gibridnyj-protivokamnepadnyj-barer-novyj-podhod-k-proektirovaniyu-i-stroitelstvu-42842.shtml). – *Ред.*).



**Рис. 19.** Принципы устройства и работы гибридного противокаменепадного барьера (Glover et al., 2010) (а) и противокаменепадной завесы (б)

## *История развития гибких противокамнепадных систем и современные исследования в этой области*

Барьеры старого типа в основном выдерживали лишь небольшие камнепады. Только в начале 1990-х годов, когда были проведены исследования в отношении того, как эффективно остановить падающие со склонов камни, была учтена динамика процесса замедления и использована для разработки новых гибких защитных систем (Hearn et al., 1992). На основе подходов динамического проектирования также были разработаны барьеры, способные выдержать энергию удара до 50 кДж (Duffy, 1992; Duffy, Haller, 1993). С тех пор непрерывные исследования и инженерные разработки увеличили их удерживающую способность примерно до 5 000 кДж (в настоящее время – до 10 000 кДж. – *Ред.*).

Однако следует отметить, что исследования, связанные с гибкими камнеулавливающими системами, как правило, основаны на сотрудничестве между научно-исследовательским институтом и конкретным производителем таких систем, ориентированным только на свои собственные продукты (Grassl, 2002; Volkwein, 2004; Nicot, 1999; Wienberg et al., 2008; Peila et al., 1998). К моменту выхода настоящей статьи было опубликовано лишь несколько исследований, в которых сравнивались различные сеточные системы. Например, была проанализирована эффективность разных систем для мягких и жестких динамических процессов замедления (Gerber, Volkwein, 2007).

Растущее понимание устройства и динамического поведения гибких противокамнепадных систем также позволяет использовать различные их типы для противодействия ударным силам, вызванным другими опасными склоновыми процессами, такими как лавины (Margreth, 1995), упавшие и скользящие вниз по склонам деревья (Volkwein et al., 2009; Hamberge, Stelzer, 2007), потоки обломочного материала, сели (Wendeler, 2008) или мелкие оползни (Bugnion et al., 2008).

### *Стандартизация*

Для планирования и проектирования эффективных систем защиты от камнепадов важно, чтобы их поведение было хорошо понято и тщательно верифицировано. Это также обеспечивает эффективное использование государственных инвестиций. Из-за сложного, динамичного и трудно описываемого процесса замедления типичная конструкция противокамнепадного барьера основана на испытаниях его прототипа (интересно отметить, что эта процедура также была адаптирована и для разработки нормативных документов, определяющих пределы эффективной работы сплошных барьеров).

Первое руководство по гибким противокамнепадным системам, которое использовалось по всему миру, было разработано в Швейцарии в 2000 году (Gerber, 2001a). Оно определило процедуры испытаний, позволяющие давать основанные на опыте оценки барьеров в отношении максимальной способности выдерживать энергию удара, фактических усилий в тросах, тормозного пути, остаточной (после камнепада) высоты барьера, эффективности защиты от небольших и средних камнепадов и соответствующего технического обслуживания.

В 2008 году было опубликовано европейское руководство ETAG 027 (ЕОТА, 2008; Peila, Ronco, 2009). В соответствии с письмом Европейской Комиссии государствам-членам датой начала его применения считалось 1 февраля 2008 года. ETAG 027 определяет процедуру тестирования (аналогичную таковой по швейцарскому руководству). После успешных испытаний системы и ее основных компонентов, а также проверки заводского

производства в соответствии с ETAG 027 производители могут маркировать свою продукцию знаком CE на основании соответствующего сертификата Европейской Комиссии и декларации о соответствии производства. Основанием для выдачи указанного сертификата является «Европейское техническое одобрение» (подтверждение успешного прохождения технического контроля, выдаваемое по производству продуктов, для которых не существует единого европейского стандарта; наличие такого подтверждения позволяет свободно распространять соответствующие товары в странах Европейского Союза и Европейской ассоциации свободной торговли. – *Ред.*).

Поскольку руководство ETAG 027 является очень широким, необходимо объединить и сформулировать множество различных интересов. Стоит отметить, что обычно такой документ становится квазиминимальным стандартом, требующим национальных заявочных документов для отдельных государств-членов.

Следует также иметь в виду, что всегда будут случаи, выходящие за рамки руководства ETAG 027, например при нецентральных ударах по сетке, ударах по стойке или тросу, при падении камней с высокой или низкой скоростью, но с одинаковой энергией удара и т. д. (Wienberg et al., 2008; Volkwein et al., 2009).

### *Выбор размеров и устройство гибких противокампнепадных барьеров в полевых условиях*

Если гибкий противокампнепадный барьер подходит для конкретного участка, он должен быть расположен там таким образом, чтобы охватить большинство траекторий и чтобы падающие камни не попадали, например, на защищаемую автомобильную или железную дорогу и даже не достигали ее в процессе замедления, находясь внутри сетки.

Подходящая система выбирается в соответствии с ожидаемой максимальной энергией удара, оцененной при геологической экспертизе.

Устройство барьера в полевых условиях должно осуществляться в соответствии с инструкцией по его монтажу, прилагаемой к купленному продукту.

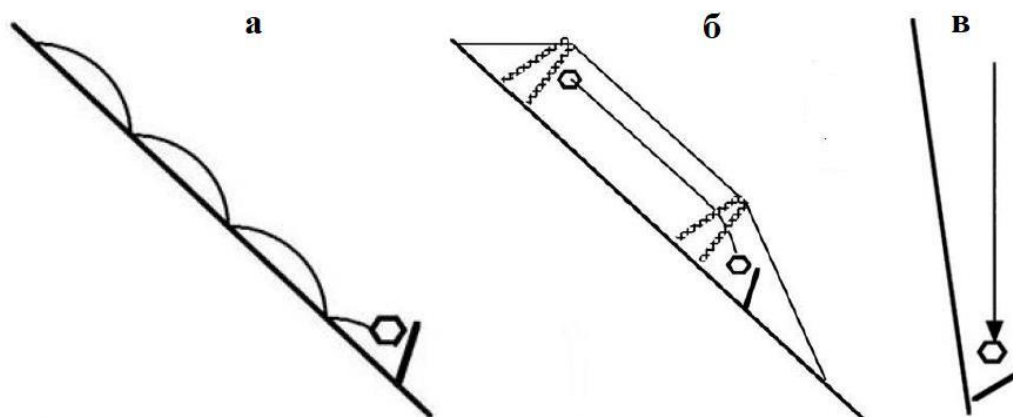
Проектные нагрузки для анкеров в соответствии с усилиями в тросах, измеренными во время испытаний прототипа системы, иногда можно узнать в интернете (BAFU Bundesamt fur Umwelt, 2011). В Швейцарии должен применяться частный коэффициент безопасности, равный 1,3 со стороны приложения нагрузки (SIA261, 2003). Безопасность заанкеривания (например, с помощью микросвай, болтов, анкеров) должна быть гарантирована в соответствии со стандартом Европейского комитета по стандартизации CEN (2010). Известна публикация с описанием результатов испытаний таких креплений (Shu et al., 2005).

### *Полевые испытания*

Для верификации и валидации установки недавно разработанных противокампнепадных барьеров необходимы полномасштабные полевые испытания. Они проводятся с самого начала разработки таких систем (Hearn et al., 1992; Даффи, 1992; Thommen, 2008; Zaitsev et al., 2010 и др.). С тех пор методы тестирования существенно не изменились. Но благодаря более совершенным методам измерений можно получить более детальные результаты (Gottardi, Govoni, 2010 и др.).

Для испытаний в основном возможны две различные установки в зависимости от того, как ускоряется падающий железобетонный снаряд – наклонно вдоль направляющего троса или при вертикальном падении (рис. 20, Gerber, 2001a). Затем барьер обычно устанавливается с таким наклоном, чтобы угол ударов был примерно

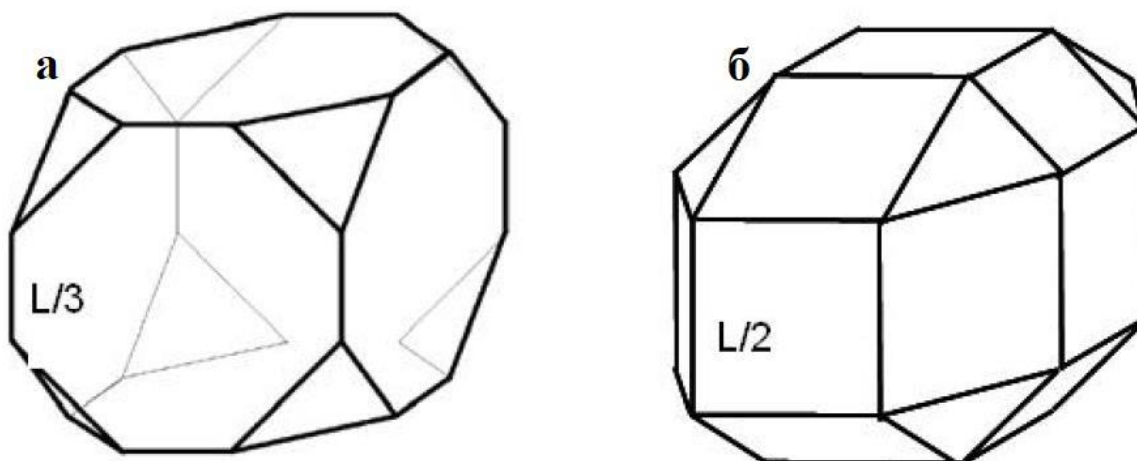
равен 60 град. (Gerber, 2001a) или чтобы угол между барьером и склоном составлял  $60 \pm 20$  град. (ЕОТА, 2008), поскольку это типичная ситуация для попадания камней в барьер в полевых условиях.



**Рис. 20.** Различные методы испытаний гибких систем защиты от камнепадов: а – свободная траектория железобетонного снаряда с ударом, включающим также вращение, при неопределенном месте столкновения; б – наклонная траектория вдоль направляющего троса с определенным местом удара; в – вертикальное падение вдоль направляющего троса с определенным местом удара

Результаты испытаний получают с использованием различных измерительных систем. Геометрия барьера до и после испытания проверяется с использованием нивелиров или тахеометров и дополнительного ручного измерения удлинений тормозных элементов, наклонов стоек и т. д. Процесс торможения падающего камня может быть рассмотрен либо с помощью покадрового анализа высокоскоростных видеозаписей (рекомендуемая скорость записи – не менее 100 кадров в секунду), либо путем численного интегрирования ускорений железобетонного снаряда, измеренных установленными в нем датчиками (рекомендуемая частота дискретизации – более 1–2 кГц).

Используемые для испытаний железобетонные снаряды (рис. 21) имеют разную массу в соответствии с рекомендуемыми в руководствах энергетическими классами, характеризующимися скоростью удара не менее 25 м/с (считается, что эта величина находится в верхнем диапазоне скоростей при камнепадах).





**Рис. 21.** Стандартизированные бетонные элементы для тестирования гибких противокаменпадных систем с длиной ребра  $L/2$  и  $L/3$  по отношению к обычному кубу с длиной ребра  $L$  в соответствии: а – со швейцарским руководством (до 2008 года, Gerber, 2001a); б – с руководством Европейского Союза (ЕОТА, 2008)

В последние перед выходом данной статьи годы исследования были больше сосредоточены на испытаниях аттенуаторных систем (Glover et al., 2010 и др.). В этих случаях обязательным является косой удар, а не вертикальное падение бетонного элемента, поскольку целью таких систем является не остановка падающего камня, а отклонение и дальнейший контроль его траектории.

### *Численное моделирование*

Гибкие противокаменпадные барьеры достигли стадии разработки, на которой требуются значительные усилия для увеличения их удерживающей способности. Соответствующее численное моделирование позволяет разрабатывать или оптимизировать новые типы этих систем более эффективно благодаря сокращению числа дорогостоящих полевых испытаний их прототипов. Кроме того, использование программного обеспечения позволяет моделировать проектируемые барьеры с учетом особых случаев нагрузок, которые не могут быть воспроизведены при полевых испытаниях (например, при высокоскоростных камнепадах, ударах по стойкам или тросам и т. д.), а также с учетом особых геометрических граничных условий для конкретных топографических ситуаций или с учетом влияния изменений в конструкциях на работу системы (Fornaro et al., 1990; Mustoe, Huttelmaier, 1993; Akkaraju, 1994; Nicot et al., 1999, 2001; Cazzani et al., 2002; Anderheggen et al., 2002; Volkwein, 2004; Sasiharana et al., 2006). С помощью численного моделирования может быть оценено поведение не только полных защитных систем, но и их отдельных компонентов, например амортизирующих элементов (del Coz Diaz et al., 2010; Studer, 2001; Dhakal et al., 2011b) или колец кольчужных сеток (Nicot et al., 1999; Volkwein, 2004).

Большие деформации, вызывающие геометрическую нелинейность, короткий период моделирования и нелинейное поведение материала явно требуют анализа на основе метода конечных элементов, например с использованием метода центральных (конечных) разностей (Bathe, 2001; Anderheggen et al., 1986 и др.). Этот метод обеспечивает детальное представление динамического ответа системы. Он также может предоставлять информацию по приложению нагрузки и по степени использования любой моделируемой конфигурации барьера.

Моделирование падения камня должно учитывать большие трехмерные перемещения и вращательные движения. При моделировании удара о стальную сетку в любом месте специальные алгоритмы контакта предотвращают проникновение узлов сетки в камень, допуская только касательные перемещения. Скольжение при моделировании обычно происходит на большом протяжении, а также вызывает трение между различными компонентами.

До момента публикации настоящей статьи применялись различные стратегии моделирования гибких противокаменпадных барьеров. Разработка специализированного программного обеспечения позволяет сосредоточиться на необходимых деталях и пренебречь ненужными и, следовательно, ускорить вычисления (Nicot et al., 1999; Volkwein, 2004). Такой подход также облегчает создание различных моделей барьеров,

поскольку все программные элементы уже оптимизированы для моделируемых компонентов. Но для получения полезных результатов этим методом требуется большое количество времени. Поэтому также рекомендуется использование общих многоцелевых конечноэлементных программ, поскольку они экономят время, которое не надо тратить на разработку рутинных функций (Fornaro et al., 1990). К тому же более абстрактные модели позволяют анализировать работу систем, которые еще не были полностью изучены. Однако использование многоцелевых программ связано с риском получения неидеальных свойств отдельных элементов или неидеальной эффективности их работы.

В любом случае независимо от подхода, принятого для моделирования гибкого барьера, полученные результаты должны пройти валидацию путем полномасштабных полевых испытаний с измерением усилий в тросах и стойках при ударах, а также ускорений и траекторий железобетонных снарядов.

(Сертифицированные гибкие системы защиты от камнепадов и других опасных склоновых процессов, которые являются одними из наиболее эффективных в мире сеточных систем, предлагает австрийская компания Trumer Shutzbauten, имеющая представительство и в России ([trumer.su/ru/index.html](http://trumer.su/ru/index.html)). – *Ред.*)

## **Леса как защита от камнепадов**

Наиболее естественным видом противодействия камнепадам является лес. Его защитная функция в основном обусловлена барьерным эффектом стоящих и лежащих деревьев (рассеиванием ими энергии). Является ли такая защита эффективной или нет, определяется размером и кинетической энергией падающего со склона камня, суммой площадей поперечного сечения деревьев (на высоте груди) на 1 га зоны, охваченной камнепадом, а также видами деревьев (Berger, Dorren, 2007).

Очень важна концепция вышеупомянутой общей площади поперечного сечения деревьев, поскольку она включает как плотность стояния деревьев, или полноту древостоя (количество стволов деревьев на 1 га), так и распределение диаметров стволов. Измеряется этот параметр в м<sup>2</sup>/га. Его нижний предел для леса, эффективно защищающего от камнепадов, составляет около 10 м<sup>2</sup>/га, а значительный уровень защиты может обеспечить величина 25 м<sup>2</sup>/га. Однако это зависит и от других упомянутых ранее факторов (кинетической энергии камня, видов деревьев, длины покрытого лесом склона и т. д.).

Быстрая оценка способности леса противодействовать камнепадам может быть проведена с использованием специальных инструментов для этого и руководств по защитным лесам (Frehner et al., 2005; Berger, Dorren, 2007 и др.) или с помощью более сложных моделей траекторий камнепадов, учитывающих барьерные эффекты отдельных деревьев (Dorren, 2010; Rammer et al., 2010).

Для получения детальных знаний о способности лесов останавливать камнепады были проведены различные научные исследования. На эту тему был опубликован фундаментальный обзор (Dorren et al., 2007).

Является общепризнанным, что в лесу, лучше всего защищающем от камнепадов, должны быть не только большие деревья, но и хорошо структурированный древостой с широким распределением диаметров и мозаикой различных фаз развития. Эксперименты ясно показали, что небольшие деревья способны останавливать большие камни при условии, что значительная часть их кинетической энергии уже была рассеяна во время предыдущих ударов о большие деревья.

Распределение больших и малых деревьев, которое обычно также соответствует их высоте, называется *вертикальной структурой леса*. Кроме того, чем больше полнота

древостоя, тем выше вероятность контакта с падающим со склона камнем, но это также зависит от размера последнего (более мелкие камни имеют меньшую вероятность столкновения, чем крупные). Проблема в управлении защитными лесами заключается в том, что высокая плотность стояния деревьев не может сохраняться в течение долгого времени при наличии толстых деревьев и их большой устойчивости. Поэтому необходимо найти компромисс между оптимальной защитной функцией и обеспечением стабильности и возобновления лесов (Brang, 2001).

Количество стволов деревьев и их пространственное распределение составляют *горизонтальную структуру леса*. Ее важными характеристиками, определяющими защиту от камнепадов, являются размеры и количество просветов между деревьями и лощин в лесу.

За последнее перед выходом данной статьи десятилетие активизировались исследования по взаимодействиям между камнепадами и защитными лесами. Например, изучалась механическая устойчивость и поглощение кинетической энергии камней отдельными деревьями (Lundstrom, 2010; Jonsson, 2007). Была установлена связь между защитной способностью отдельного дерева и эффективностью полноты древостоя (Kalberer, 2007). Исследовались защитные эффекты различных низкоствольных лесов (Jancke et al., 2009). Были предложены новые подходы для включения лесов в модели траекторий камнепадов (Le Hir et al., 2006; Rammer et al., 2010; Dorren, 2010). В качестве примера было показано, как могут быть использованы данные лазерного сканирования для автоматической характеристики возможности противодействия леса камнепадам (Monnet et al., 2010). Достижения в области дендрогеморфологии дают возможность проводить усовершенствованный пространственно-временной анализ «молчаливых свидетелей камнепадов» (Schneuwly, Stoffel, 2008 и др.).

Важные оставшиеся вопросы в этой области:

- влияние лежащих стволов на траектории камнепадов;
- разложение лежащих и стоящих погибших деревьев;
- оптимальные характеристики древостоя защитного леса для разных условий (низкоствольного леса, однородного букового леса, максимального просвета между деревьями и т. д.).

## Резюме и перспективы

Необходимость решения современных проблем, связанных с опасностью камнепадов и оценкой их рисков по-прежнему актуальна, несмотря на очевидные достижения в этих сферах. Кроме того, практический интерес также представляют меры инженерной защиты, основанные на моделях неопределенности.

В настоящее время рассчитывать траектории канепадов с очень высоким уровнем точности позволяет численное моделирование, например с использованием метода дискретных элементов на основе результатов лазерного сканирования с высоким разрешением в качестве входных данных и т. д. Однако такой детальный уровень также требует учета формы падающего со склона камня, его точного положения перед началом движения и т. д. Поэтому обоснован также альтернативный подход: для оценки скорости падающего камня нет особой необходимости в сложной компьютерной модели. Для расчета его траектории достаточно нескольких четко видимых мест ударов и некоторых базовых математических выкладок. Расположение мест ударов на земле, углы наклона поверхности грунта между ними и (если таковые имеются) следы над землей на ветвях и стволах деревьев позволяют определить начальную скорость камня при отскоке

(скорость отрыва от земли) и скорость удара. Для этого есть специальные формулы и возможность графического представления результатов.

Какие вопросы требуют внимания в ближайшем будущем? Приведем некоторые предложения.

1. Имеется определенная необходимость в совершенствовании прогнозирования вероятностей камнепадов. Кроме того, следует обсудить подверженность территорий камнепадам и опасность этих явлений. Также важно досконально знать экстремальные вариации траекторий камнепадов в пределах определенной зоны. Однако все это бесполезно, если надежность моделей с надлежащей физической основой должным образом не проверяется.

2. Для выбора мер защиты от камнепадов должен быть единообразно определен конкретный уровень проектирования. Это может быть достигнуто путем количественной оценки уровней риска, уязвимости защитных мер и соответствующих затрат. Конечно, требуется определить стандартизированные процедуры оценки и верификации мер защиты.

3. Необходимо продолжить обсуждение того, как лучше всего классифицировать отдельный камнепад. Его можно было бы удовлетворительно описать, используя либо энергию в кДж, либо импульс в Н\*с. Первое является более распространенным и современным, но второе иногда бывает более точным при рассмотрении эффектов удара и отскока.

4. Современные требования к применимости и эффективности мер защиты от камнепадов исключают изолированные исследования, и все более важным становится налаживание тесного сотрудничества между исследователями из разных научных дисциплин. Такое взаимодействие может привести к получению ценных результатов и появлению важных публикаций, например таких, как книга о камнепадах (Lambert, Nicot, 2011) или настоящая статья. Причем следует отметить, что без работы множества исследователей по всему миру представленный обзор не содержал бы так много информации.

### **Источник для перевода**

1. Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M. Rockfall characterisation and structural protection – a review // Natural Hazards and Earth System Sciences. European Geosciences Union, Copernicus Publications, 2011. Vol. 11. P. 2617–2651. URL: [nhess.copernicus.org/articles/11/2617/2011/](http://nhess.copernicus.org/articles/11/2617/2011/).

### **Список литературы, использованной авторами переведенного обзора [1]**

- Acosta, E., Agliardi, F., Crosta, G. B., and Rios Aragues, S.: Regional rockfall hazard assessment in the Benasque Valley (Central Pyrenees) using a 3-D numerical approach, in: 4th EGS Plinius Conference – Mediterranean Storms, 555–563, Universitat des Illes Balears, Mallorca, Spain, 2003.
- Agliardi, F. and Crosta, G.: High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls, *Int. J. Rock. Mech. Min.*, 40, 455–471, 2003.



- Agliardi, F., Crosta, G. B., and Frattini, P.: Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1059–1073, doi:10.5194/nhess-9-1059-2009, 2009.
- Akkaraju, L.: Dynamic Analysis of Cable Structures, Master's thesis, University of Colorado, Boulder, masterthesis, University of Colorado at Boulder, 1994.
- Aksoy, H. and Ercanoglu, M.: Determination of the rockfall source in an urban settlement area by using a rule-based fuzzy evaluation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 941–954, doi:10.5194/nhess-6-941-2006, 2006.
- Anderheggen, E., Elmer, H., and Maag, H.: *Nichtlineare FiniteElement-Methoden: Eine Einfuhrung fur Ingenieure*, Institut fur Informatik, Zurich, 1986."
- Anderheggen, E., Volkwein, A., and Grassl, H.: Computational Simulation of Highly Flexible Rockfall Protection Systems, in: *Proc. Fifth World Congress on Computational Mechanics (WCCM V)*, edited by: Mang, H., Rammerstorfer, F., and Eberhardsteiner, J., Vienna University of Technology, 2002.
- ASTRA: Steinschlag – Naturgefahr fur die Nationalstrassen, Schlussbericht der ASTRA Expertengruppe, Tech. rep., Bundesamt fur Strassen, 2003.
- ASTRA and SBB: Einwirkungen auf Steinschlagschutzgalerien, Richtlinie, Tech. rep., Bundesamt fur Baudirektion SBB, 18" pages, Bern, 1998.
- ASTRA: Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien, Tech. rep., Bundesamt fur Strassen, Baudirektion SBB, Eidgenossische Drucksachen- und Materialzentrale, 2008.
- Azimi, C. and Desvarreux, P.: Calcul de chutes de blocs et verification sur modele reduit, Association pour le developpement des recherches sur les glissements de terrain, Grenoble, 1977.
- Azimi, C. and Desvarreux, P.: Les chutes de pierres: Exemple No2 (Galerie de protection), Stage paravalanches, E.N.P.C., Paris, 1988.
- Azimi, C., Desvarreux, P., Giraud, A., and Martin-Cocher, J.: Methode de calcul de la dynamique des chutes de blocs – Application a letude du versant de la montagne de La Pale (Vercors), *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussees*, 122, 93–102, 1982.
- Azzoni, A. and De Freitas, M.: Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis, *Rock Mech. Rock Eng.*, 28, 111– 124, 1995.
- Azzoni, A., La Barbera, G., and Zaninetti, A.: Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 32, 709–724, 1995.
- Azzoni, A., Rossi, P. P., Drigo, E., Giani, G. P., and Zaninetti, A.: In situ observation of rockfall analysis parameters, in: *Sixth International Symposium of Landslides*, 307–314, Rotterdam, The Netherlands, 1992.
- BAFU Bundesamt fur Umwelt: Zugelassene Steinschlagschutzsysteme, Tech. rep., Swiss Federal Office for the Environment, Berne, <http://www.umwelt-schweiz.ch/typenpruefung>, 2011.
- Baillifard, F.: Detection par SIG des zones rocheuses a fortessusceptibilites deboulement, Ph.D. thesis, University of Lausanne, 2005.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., and Sartori, M.: Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GISbased parameter rating approach, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 435–442, doi:10.5194/nhess-3-435-2003, 2003.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Rouiller, J. D., Couture, R., Locat, J., Robichaud, G., and Gamel, G.: Towards a GIS-based hazard assessment along the Quebec City Promontory, in: *Landslides*

- Evaluation and stabilization, edited by: Lacerda, W., Ehrlich, A., Fontoura, M., and Sayao, A., 207–213, Taylor & Francis, Quebec, Canada, 2004.
- Bathe, K.-J.: Finite Element Methoden, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- Baumann, P.: Lastfalle und Bemessungsansatz bei Sturzprozessen, in: FAN – Herstkurs 2008, Fachleute Naturgefahren Schweiz, Bellinzona, 2008.
- Berger, F. and Dorren, L.: Objective comparison of rockfall models using real size experimental data, in: Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides, 245–252, Universal Academy Press, Inc, Tokyo, Japan, 2006.
- Berger, F. and Dorren, L. K. A.: Principles of the tool Rockfor.NET for quantifying the rockfall hazard below a protection forest, Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen, 158, 157–165, 2007.
- Berthet-Rambaud, P.: Structures rigides soumises aux avalanches et chutes de blocs: modelisation du comportement mecanique et caracterisation de l'interaction phenomene-ouvrage, Ph.D. thesis, Universite Grenoble, 2004.
- Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., and Lambert, S.: Modelling a geo-composite cell using discrete analysis, Comput. Geotech., 32, 564–577, 2006.
- Bieniawski, Z. T.: Engineering classification of jointed rock masses, Trans. S. Afr. Inst. Civ. Engrs, 15, 335–344, 1973.
- Bieniawski, Z. T.: Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends, Comprehensive Rock Eng., 3, 553–573, 1993.
- Blais-Stevens, A.: Landslide Hazards and their mitigation along the sea to sky corridor, British Columbia, in: 4th Canadian Conference on Geohazards: from causes to management, edited by Locat, J., Perret, D., Turmel, D., Demers, D., and Leroueil, S., Quebec, Canada, 2008.
- Blovsky, S.: Model tests on protective barriers against rockfall, in: 15th EYGEC – European Young Geotechnical Engineers Conference, 2002.
- Bourrier, F.: Modelisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel, application a la trajectographie des chutes de blocs, Ph.D. thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2008.
- Bourrier, F., Nicot, F., and Darve, F.: Physical processes within a 2D granular layer during an impact, Granular Matter, 10, 415–437, 2008.
- Bourrier, F., Dorren, L., Nicot, F., Berger, F., and Darve, F.: Towards objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model, Geomorphology, 110, 68–79, 2009a.
- Bourrier, F., Eckert, N., Nicot, F., and Darve, F.: Bayesian stochastic modeling of a spherical rock bouncing on a coarse soil, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 831–846, doi:10.5194/nhess-9-8312009, 2009b.
- Bozzolo, D. and Pamini, R.: Simulation of rock falls down a valley side, Acta Mech., 63, 113–130, 1986.
- Bozzolo, D., Pamini, R., and Hutter, K.: Rockfall analysis – A mathematical model and its test with field data, in: 5th International Symposium on Landslides, 555–563, Balkema, Rotterdam, Lausanne, Switzerland, 1988.
- Brabb, E.: Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping, 4th International Symposium on Landslides, 1, 307–323, 1984.

- Brang, P.: Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the European Alps, *Forest Ecol. Manage.*, 145, 107–119, doi:10.1016/S03781127(00)00578-8, 2001.
- Brideau, M.-A., Stead, D., Roots, C., and Orwin, J.: Geomorphology and engineering geology of a landslide in ultramafic rocks, Dawson City, Yukon, *Eng. Geol.*, 89, 171–194, 2007.
- Broili, L.: In situ tests for the study of rockfall, *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 8, 105–111, 1973.
- Broili, L.: Relations between scree slope morphometry and dynamics of accumulation processes, in: *Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, 11–23, Bergamo, Italy, 1977.
- Budetta, P.: Assessment of rockfall risk along roads, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 71–81, doi:10.5194/nhess-4-71-2004, 2004.
- Budetta, P. and Santo, A.: Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (southern Italy): A case study, *Eng. Geol.*, 36, 197–210, 1994.
- Bugnion, L., Denk, M., Shimojo, K., Roth, A., and Volkwein, A.: Full-scale experiments on shallow landslides in combination with flexible protection barriers, in: *First World Landslide Forum*, 99–102, United Nations University, Tokyo, 2008.
- Bunce, C. M., Cruden, D., and Morgenstern, N.: Assessment of the hazard from rock fall on a highway, *Can. Geotech. J.*, 34, 344–356, 1997.
- Burroughs, D., Henson, H. H., and Jiang, S.: Full scale geotextile rock barrier wall testing, analysis and prediction, *Geosynthetics' 93*, 1993.
- Calvetti, F.: Distinct Element evaluation of the rock-fall design load for shelters, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 3, 63–83, 1998.
- Calvetti, F. and Di Prisco, C.: An uncoupled approach for the design of rockfall protection tunnels, *Struct. Eng. Int.*, 19, 342–347, 2009.
- Calvetti, F., Di Prisco, C., and Vecchiotti, M.: Experimental and numerical study of rock-fall impacts on granular soils, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4, 95–109, 2005.
- Camponuovo, G.: ISMES experience on the model of St. Martino, in: *Meeting on Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, 25–38, Bergamo, Italy, 1977.
- Cancelli, A. and Crosta, G.: Hazard and risk assessment in rockfall prone areas, *Risk Reliability in Ground Engineering*, Thomas Telford, 1993.
- Carere, K., Ratto, S., and Zanolini, F., eds.: *Prevention des mouvements de versants et des instabilites de falaises*, Programme Interreg IIC – Falaises, Mediterran ee occidentale et Alpes latines, confrontation des methodes d'etude des eboulements dans l'arc alpin, 2001.
- Casanovas, M.: Dimensionamiento de galerias de proteccion frente a desprendimientos de rocas, Master's thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, 2006.
- Cazzani, A., Mongiovi, L., and Frenez, T.: Dynamic Finite Element Analysis of Interceptive Devices for Falling Rocks, *Int. J. Rock Mech.*, 39, 303–321, 2002.
- CEN: EN 1997-1 – Eurocode 7 – Geotechnical Design, Tech. rep., European Committee for Standardization, Brussels, 2010.
- Chau, K. T., Chan, L. C. P., Wu, J. J., Liu, J., Wong, R. H. C., and Lee, C. F.: Experimental studies on rockfall and debris flow, in: *One Day Seminar on Planning, Design and Implementation of Debris Flow and Rockfall Hazards Mitigation Measures*, 115–128, Hongkong, China, 1998a.

- Chau, K. T., Wong, R., Liu, J., Wu, J. J., and Lee, C. F.: Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts, in: 9th International Congress on Rock Mechanics, 541–544, Paris, France, 1999a.
- Chau, K. T., Wu, J., Wong, R., and Lee, C.: The coefficient of restitution for boulders falling onto soil slopes with various values of dry density and water content, in: International Symposium on Slope Stability Engineering: Geotechnical and Geoenvironmental Aspects, 1355–1360, Matsuyama, Japan, 1999b.
- Chau, K. T., Wong, R., and Wu, J.: Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 39, 69–77, 2002.
- Chau, K. T., Wong, R., Liu, J., and Lee, C.: Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory, *Rock Mech. Rock Eng.*, 36, 383–408, 2003.
- Chau, K. T., Wong, R., and Lee, C. F.: Rockfall Problems in Hong Kong and some new Experimental Results for Coefficients of Restitution, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 35, 662–663, 1998b.
- Chikatamarla, R.: Optimisation of cushion materials for rockfall protection galleries, Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology ETHZ, Zurich, 2006.
- Christen, M., Bartelt, P., and Gruber, U.: RAMMS – a modelling system for snow avalanches, debris flows and rockfalls based on IDL., *PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 4, 289–292, 2007.
- Coe, J. A. and Harp, E. L.: Influence of tectonic folding on rockfall susceptibility, American Fork Canyon, Utah, USA, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 1–14, doi:10.5194/nhess-7-1-2007, 2007.
- Comite-Euro-International du Beton, C.: Concrete Structures under Impact and Impulsive Load, Lausanne, 1988.
- Copons, R. and Vilaplana, J.: Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning, *Eng. Geol.*, 102, 142–151, 2008.
- Corominas, J., Copons, R. J. M., Vilaplana, J., Altimir, J., and Amigo, J.: Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area, *Landslides*, 2, 343–357, 2005.
- Crosta, G. B. and Agliardi, F.: A methodology for physically based rockfall hazard assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 407–422, doi:10.5194/nhess-3-407-2003, 2003.
- Crosta, G. B. and Agliardi, F.: Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 583–598, doi:10.5194/nhess-4-583-2004, 2004.
- Crosta, G., Agliardi, F., Frattini, P., and Imposato, S.: A three-dimensional hybrid numerical model for rockfall simulation, *Geophys. Res. Abstr.*, 6, 2004.
- Cundall, P.: A computer model for simulating progressive, largescale movements in blocky rock systems, in: *Symp. Int. Soc. Rock Mech.*, 1, Paper № II–8, Nancy, France, 1971.
- del Coz Diaz, J., Nieto, P. G., Castro-Fresno, D., and Rodriguez-Hernandez, J.: Nonlinear explicit analysis and study of the behaviour of a new ring-type brake energy dissipator by FEM and experimental comparison, *Appl. Math. Comput.*, 216, 1571–1582, 2010.
- Derron, M.-H., Jaboyedoff, M., and Blikra, L. H.: Preliminary assessment of rockslide and rockfall hazards using a DEM (Oppstadhornet, Norway), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 285–292, doi:10.5194/nhess-5-285-2005, 2005.
- Descoeurdes, F.: Aspects geomecaniques des instabilites de falaises rocheuses et des chutes de blocs, *Publications de la societe suisse de mecanique des sols et des roches*, 135, 3–11, 1997.



- Descoedres, F. and Zimmermann, T.: Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls, in: Sixth International Congress on Rock Mechanics, pp. 337–342, International Society for Rock Mechanics, Montreal, Canada, 1987.
- Dhakal, S., Bhandary, N. P., Yatabe, R., and Kinoshita, N.: Numerical investigation of the effects of idealized rock-block shapes and impact points on the performance of Long-span Pocket-type Rock-net, in: 46th National Conference on Geotechnical Engineering, pp. 1185–1186, Japanese Geotechnical Society JGS, Kobe, Japan, 2011a.
- Dhakal, S., Bhandary, N. P., Yatabe, R., and Kinoshita, N.: Constitutive modeling of friction damper for numerical simulation of Long-span Pocket-type Rock-net, in: Annual Conference of Japan Society of Civil Engineers JSCE, pp. 1185–1186, Shikoku Branch, Kagawa, Japan, 2011b.
- Dimnet, E.: Mouvement et collisions de solides rigides ou deformables, Ph.D. thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 2002.
- Dimnet, E. and Fremond, M.: Instantaneous collisions of solids, in: European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 11–17, Barcelona, Spain, 2000.
- Dorren, L. and Berger, F.: Stem breakage of trees and energy dissipation at rockfall impacts, *Tree Physiol.*, 26, 63–71, 2006.
- Dorren, L. and Seijmonsbergen, A.: Comparison of three GISbased models for predicting rockfall runout zones at a regional scale, *Geomorphology*, 56, 49–64, 2003.
- Dorren, L. K. A., Berger, F., and Putters, U. S.: Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and nonforested slopes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 145–153, doi:10.5194/nhess-6-145-2006, 2006.
- Dorren, L., Berger, F., Jonnson, M., Krautblatter, M., Moelk, M., Stoffel, M., and Wehrli, A.: State of the art in rockfall-forest interactions, *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen*, 158, 128–141, 2007.
- Dorren, L. K. A.: Rockyfor3D revealed – description of the complete 3D rockfall model, Tech. rep., EcorisQ, <http://www.ecorisq.org>, 2010.
- Dorren, L. K. A., Maier, B., Putters, U. S., and Seijmonsbergen, A.C.: Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps, *Geomorphology*, 57, 151–167, 2004.
- Dudt, J. and Heidenreich, B.: Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls, in: International Conference on Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures, 507–514, Davos, Switzerland, 2001.
- Duffy, J. D.: Flexible Wire Rope Rockfall Nets, in: Soils, Geology, and Foundations – Rockfall prediction and Control and landslide case histories (Transportation Research Record No 1343), 30–35, Trans. Res. B., 1992.
- Duffy, J. D. and Haller, B.: Field Tests of Flexible Rockfall Barriers, in: Proc. Transportation Facilities through Difficult Terrain, edited by: Wu, J. T. and Barrett, R. K., 465–473, Balkema, 1993.
- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., and Giraud, A.: Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2, 15–26, doi:10.5194/nhess-2-15-2002, 2002.
- Dussauge-Peisser, C., Grasso, J.-R., and Helmstetter, A.: Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics, *J. Geophys. Res. Sol. Ea.*, 108, 1–11, 2003.

- Einstein, H. H.: Landslide risk assessment procedure, in: 5th International Symposium on Landslides, 2, 1075–1090, Balkema, Rotterdam, Lausanne, Switzerland, 1988.
- EOTA: ETAG 027 – guideline for the European technical approval of falling rock protection kits, Tech. rep., European Organization for Technical Approvals, Brussels, 2008.
- Evans, S. and Hungr, O.: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes, *Can. Geotech. J.*, 30, 620–636, 1993.
- Falcetta, J.: Un nouveau modele de calcul de trajectoires de blocs rocheux, *Revue Francaise de Geotechnique*, 30, 11–17, 1985.
- Fell, R., Ho, K., Lacasse, S., and Leroi, E.: A framework for landslide risk assessment and management, in: *Landslide Risk Management*, edited by: Hungr, O. and E., F. R. C. R. E., 3–26, Taylor and Francis, London, 2005.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W.: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, *Eng. Geol.*, 102, 85–98, 2008.
- Fornaro, M., Peila, D., and Nebbia, M.: Block falls on rock slopes – application of a numerical simulation program to some real cases, in: 6th International Congress IAEG, Rotterdam, The Netherlands, 1990.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., and Agliardi, F.: Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically based approaches, *Geomorphology*, 94, 419–437, 2008.
- Frayssines, M.: Contribution a l'evaluation de l'alea eboulement rocheux (rupture), Ph.D. thesis, Universite Josef Fourier, 2005.
- Frehner, M., Wasser, B., and Schwitter, R.: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald – Wegleitung fur Pflegemassnahmen in Waldern mit Schutzfunktion, Tech. rep., Swiss Federal Office for the Environment FOEN, Bern, 2005.
- Fremond, M.: Rigid bodies collisions, *Phys. Lett. A.*, 204, 33–41, 1995.
- GEO: Landslides and boulder falls from natural terrains: interim risk guidelines, GEO Report 75, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, Hong Kong, 1998.
- Gerber, W.: Richtlinie uber die Typenprufung von Schutznetzen gegen Steinschlag, Tech. rep., Bundesamt fur Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidgenossische Forschungsanstalt WSL, Bern, 2001a.
- Gerber, W.: Vergleich zwischen Vertikal- und Schragwurfanlagen zur Typenprufung von flexiblen Steinschlagschutzverbauungen, Tech. rep., Eidg. Forschungsanstalt fur Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 2001b.
- Gerber, W.: Einwirkungen bei Steinschlag, in: FAN – Herstkurs 2008, Fachleute Naturgefahren Schweiz, Bellinzona, 2008.
- Gerber, W. and Volkwein, A.: Different flexible Rockfall Barriers – comparative Results from Type Testing, *Geophys. Res. Abstr.*, 9, 2007.
- Ghadimi-Khasraghy, S., Kishi, N., and Vogel, T.: Numerical simulation of consecutive rockfall impacts on reinforced concrete slabs, Tech. rep., 33rd IABSE Symposium, Sustainable Infrastructure, Environment Friendly, Safe and Resource Efficient, Bangkok, Thailand, 2009.
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B., and Giani, G.: Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 46, 708–715, 2009.
- Giani, G. P.: *Rock Slope Stability Analysis*, Taylor & Francis, Balkema, 1992.

- Glover, J., Volkwein, A., Dufour, F., Denk, M., and Roth, A.: Rockfall attenuator and hybrid drape systems – design and testing considerations, in: *Third Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures*, edited by: Darve, F., Doghri, I., El Fatmi, R., Hassis, H., and Zenzri, H., 379–384, Djerba, 2010.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., and Ercanoglu, M.: Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey, *Eng. Geol.*, 55, 277–296, 2000.
- Goldsmith, W.: *Impact, The theory and physical behaviour of colliding solids*, Edward Arnold Publishers, Dover, 1960.
- Gottardi, G. and Govoni, L.: Full-scale Modelling of Falling Rock Protection Barriers, *Rock Mech. Rock Eng.*, 43, 261–274, doi:10.1007/s00603-009-0046-0, 2010.
- Govi, M.: Photo-interpretation and mapping of the landslides triggered by the Friuli earthquake (1976), *Bulletin of the International Association of Eng. Geol.*, 15, 67–72, 1977.
- Grassl, H. G.: *Experimentelle und numerische Modellierung des dynamischen Trag- und Verformungsverhaltens von hochflexiblen Schutzsystemen gegen Steinschlag*, Ph.D. thesis, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, 2002.
- Grenon, M. and Hadjigeorgiou, J.: A design methodology for rock slopes susceptible to wedge failure using fracture system modelling, *Eng. Geol.*, 96, 78–93, 2008.
- Gruner, U.: Climatic and meteorological influences on rockfall and rockslides (“Bergsturz”), in: *Protection of populated territories from floods, debris flow, mass movements and avalanches*, 26–30 May, 2008, 147–158, 2008.
- Guenther, A., Carstensen, A., and Pohl, W.: Automated sliding susceptibility mapping of rock slopes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 95–102, doi:10.5194/nhess-4-95-2004, 2004.
- Gunther, A.: SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes, *Comput. Geosci.*, 29, 865–875, 2003.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P.: Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, 31, 181–216, 1999.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., and Agliardi, F.: STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rockfalls, *Comput. Geosci.*, 28, 1079–1093, 2002.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Wieczorek, G. F.: Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 491–503, doi:10.5194/nhess-3491-2003, 2003.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Ghigi, S.: Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, central Italy, *Environ. Manage.*, 34, 191–208, 2004.
- Habib, P.: Note sur le rebondissement des blocs rocheux, in: *Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, ISMES publication № 90, 123–125, Bergamo, Italy, 1976.
- Hamberger, M. and Stelzer, G.: *Neue Erkenntnisse aus Tests von dynamischen Seilsperren – Auswirkungen auf die Baupraxis*, Tech. rep., Trumer Schutzbauten, Kuchl, 2007.
- Hearn, G., Barrett, R. K., and McMullen, M. L.: CDOT Flexpost Rockfall Fence Development, Testing and Analysis, in: *Soils, Geology, and Foundations – Rockfall prediction and Control and landslide case histories (Transportation Research Record № 1343)*, pp. 23–29, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C., 1992.

- Heidenreich, B.: Small and half scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 2004.
- Heierli, W.: Viadotto Bosco di Bedrina No2 – Steinschlagschutz: Verhalten von Kies – Sand – Dampfungsschichten, Tech. rep., Dipartimento Pubbliche Costruzioni, Ufficio Strade Nazionali, Bellinzona, 1984.
- Herrmann, N.: Experimentelle Erfassung des Betonverhaltens unter Schockwellen, Ph.D. thesis, TH Karlsruhe, 2002.
- Hoek, E.: Rockfall: a computer program for prediction rockfall trajectories, *ISRM News J.*, 2, 4–16, 1987.
- Hoek, E.: Strength of rock and rock masses, *ISRM News*, 2, 4–16, 1994.
- Hoek, E. and Bray, J.: *Rock Slope Engineering*, E & FN Spon, London, 3rd edn., 1981.
- Hopkins, M.: Eiger loses face in massive rockfall, <http://www.nature.com/news/2006/060717/full/news060717-3.html>, 2006.
- Hudson, J. A.: *Rock Engineering systems: Theory and Practice*, Ellis Horwood, Chichester, 1992.
- Hungr, O. and Evans, S.: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards, in: 5th International Symposium on Landslides, 1, 685–690, Balkema, Rotterdam, Lausanne, Switzerland, 1988.
- Hungr, O., Evans, S., and Hazzard, J.: Magnitude and frequency of rockfalls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia, *Can. Geotech. J.*, 36, 224–238, 1999.
- Hungr, O., Fell, R., Couture, R., and Eberhardt, E.: *Landslide Risk Management*, Taylor and Francis, 2005.
- Ishikawa, N.: Recent progress on rock-shed studies in Japan, in: Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures, 1–6, Kanazawa, Japan, 1999.
- Jaboyedoff, M. and Derron, M.-H.: Integrated risk assessment process for landslides, in: *Landslide risk management*, edited by Hungr, O., Fell, R., Couture, R. R., and Eberhardt, E., 776, Taylor and Francis, 2005.
- Jaboyedoff, M. and Labiouse, V.: Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data, in: 10th International Congress on Rock Mechanics ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, 575–578, Johannesburg, South Africa, 2003.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Hantz, D., Heidenreich, B., and Mazzoccola, D.: Terminologie, in: *Prevention des mouvements de versants et des instabilites de falaises*, edited by Carere, K., Ratto, S., and Zanolini, F. E., 48–57, 2001.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philipposian, F., and Rouiller, J.-D.: Assessing fracture occurrence using "weighted fracturing density": a step towards estimating rock instability hazard, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 83–93, doi:10.5194/nhess-4-83-2004, 2004.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Couture, R., Locat, J., and Locat, P.: New insight of geomorphology and landslide prone area detection using DEM, in: *Landslides: Evaluation and Stabilization*, edited by Lacerda, W. A., Ehrlich, M., Fontoura, S. A. B., and Sayo, A., 191–198, Taylor & Francis, London, 2004b.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Derron, M.-H., Couture, R., Locat, J., and Locat, P.: Switzerland modular and evolving rock slope hazard assessment methods, in: *Landslide and avalanches*, edited by: Senneset, K., Flaate, K. A., and Larsen, J., ICFL, 2005a.



- Jaboyedoff, M., Dudt, J. P., and Labiouse, V.: An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 621–632, doi:10.5194/nhess-5-621-2005, 2005b.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M.-H., Locat, J., and Turmel, D.: New insight techniques to analyze rock-slope relief using Dem and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D, in: *Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and demands*. 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, edited by: Eberhardt, E., Stead, D., and Morrison, T., 1, Taylor and Francis, Vancouver, Canada, 2007.
- Jacquemoud, J.: Swiss guideline for the design of protection galleries: background, safety concept and case histories, in: *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures*, 95–102, Kanazawa, Japan, 1999.
- Jancke, O., Dorren, L., Berger, F., Fuhr, M., and Kohl, M.: Implications of coppice stand characteristics on the rockfall protection function, *Forest Ecol. Manag.*, 259, 124–131, 2009.
- Japan Road Association: *Rockfall Handbook*, Tokyo, Japan, 1983.
- Japan Road Association: *Manual for anti-impact structures against falling rocks*, Tokyo, Japan, 2000.
- Japanese highway public corporation: *Research report on rock falling tests*, 1973.
- Jones, C. L., Higgins, J., and Andrew, R.: *Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0*, Tech. rep., Colorado Department of Transportation, Denver, <http://dnr.state.co.us/geostore/ProductInfo.aspx?productid=MI-66>, 2000.
- Jonsson, M.: *Energy absorption of trees in a rockfall protection forest*, Ph.D. thesis, ETH Zurich, Zurich, 2007.
- Kalberer, M.: *Quantifizierung und Optimierung der Schutzwaldleistung gegenüber Steinschlag*, Ph.D. thesis, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 2007.
- Kamijo, A., Onda, S., Masuya, H., and Tanaka, Y.: Fundamental test on restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall, in: *5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering*, 83–86, 2000.
- Kawahara, S. and Muro, T.: Effect of soil slope gradient on motion of rockfall, in: *International Symposium on Slope Stability Engineering*, 2, 1343–1348, Matsuyama, Japan, 1999.
- Kemeny, J., Turner, K., and Norton, B.: *LIDAR for Rock Mass Characterization: Hardware, Software, Accuracy and BestPractices*, in: *Workshop on Laser and Photogrammetric Methods for Rock Mass Characterization: Exploring New Opportunities*, Golden, Colorado, USA, 2006.
- Kirkby, M. and Statham, I.: Surface stone movement and scree formation, *J. Geol.*, 83, 349–362, 1975.
- Kishi, N., Nakano, O., Matsuoka, K., and Nishi, H.: Field test on absorbing capacity of a sand cushion, *J. Struct. Eng.*, 39A, 1587–1597, 1993 (in Japanese).
- Kishi, N., Okada, S., and Konno, N.: Numerical Impact Response Analysis of Rockfall Protection Galleries, *Struct. Eng. Int.*, 19, 313–320, 2009.
- Kobayashi, Y., Harp, E., and Kagawa, T.: Simulation of Rockfalls triggered by earthquakes, *Rock Mech. Rock Eng.*, 23, 1–20, 1990.
- Konno, H., Ishikawa, H., Okada, S., and Kishi, N.: Prototype impact test of steel-concrete composite type rock-sheds, in: *Interdisciplinary workshop on rockfall protection*, edited by Volkwein, A., Labiouse, V., and Schellenberg, K., 46–48, Swiss Fed. Research Inst. WSL, Morschach, Switzerland, 2008.

- Krummenacher, B. and Keusen, H.: Rockfall simulation and hazard mapping based on Digital Terrain Modell (DTM), *European Geologist*, 12, 33–35, 1996.
- Krummenacher, B., Schwab, S., and Dolf, F.: Assessment of natural hazards by three calculations of rockfall behaviour, in: *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*, edited by: Volkwein, A., Labiouse, V., and Schellenberg, K., 49–51, Swiss Fed. Research Inst. WSL, Morschach, Switzerland, 2008.
- Labiouse, V.: Fragmental rockfall paths: comparison of simulations on Alpine sites and experimental investigation of boulder impacts, in: *9th International Symposium on Landslides*, 1, 457–466, Balkema, 2004.
- Labiouse, V., Descoeurdes, F., and Montani, S.: Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks, *Struct. Eng. Int.*, 6, 171–176, 1996.
- Labiouse, V. and Heidenreich, B.: Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1981–1993, doi:10.5194/nhess-9-1981-2009, 2009.
- Labiouse, V., Heidenreich, B., Desvarreux, P., Viktorovitch, M., and Guillemain, P.: Etudes trajectographiques, in: *Prevention des mouvements de versants et des instabilites de falaises*, edited by: Carere, K., Ratto, S., and Zanolini, F., 155–211, Aosta, Italy, 2001.
- Lambert, S. and Bourrier, F.: Design of rockfall protection embankments: a critical review, *Earth Surf. Proc. Land.*, in press, 2011.
- Lambert, S. and Nicot, F., eds.: *Rockfall engineering*, ISBN 9781-84821-26-5, 464 pages, John Wiley & Sons, ISTE Ltd., New York, London, 2011.
- Lambert, S., Gotteland, P., and Nicot, F.: Experimental study of the impact response of geocells as components of rockfall protection embankments, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 459–467, doi:10.5194/nhess-9-459-2009, 2009.
- Lan, H., Martin, D., and Lim, C.: RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling, *Comput. Geosci.*, 33, 262–279, 2007.
- Lang, H.-J.: *Erdgasleitungen in der Gemeinde Innertkirchen*, Transitgas AG, Zurich, 1974.
- Lato, M., Diederichs, M. S., Hutchinson, D. J., and Harrap, R.: Optimization of LIDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 46, 194–199, 2009.
- Le Hir, C., Dimnet, E., and Berger, F.: Etude de la trajectographie des chutes de blocs en forets de montagne, *Bull. Lab. Ponts Chaussees*, 263/264, 85–101, 2006.
- Lepert, P. and Corte, J.: Etude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection, in: *Centrifuge '88*, 1988.
- Leroueil, S. and Locat, J.: Slope Movements – Geotechnical Characterization, Risk Assessment and Mitigation, in: *XI Danube-European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, edited by: Lisac and Szavits-Nossan, Balkema, Porec, Croatia, 1998.
- Lied, K.: Rockfall problems in Norway, *ISMES Publication*, 90, 51–53, 1977.
- Liniger, M. and Bieri, D.: A2, Gotthardautobahn, Felssturz Gurnellen vom 31 Mai 2006, Beurteilung und Massnahmen, in: *Pub. Soc. Suisse Mecanique Soles Roches*, 153, 81–86, 2006.
- Lorentz, J., Donze, F., Perrotin, P., and Plotto, P.: Experimental study of the dissipative efficiency of multylayered protective structure against rockfall impact, *Revue europeenne de genie civil*, 10, 295–308, 2006.

- Lorentz, J., Perrotin, P., and Donze, F.: A new sandwich design structure for protection against rockfalls, in: *Interdisciplinary workshop on rockfall protection*, edited by Volkwein, A., Labiouse, V., and Schellenberg, K., Swiss Fed. Research Inst. WSL, Morschach, Switzerland, 2008.
- Loye, A., Jaboyedoff, M., and Pedrazzini, A.: Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEMbased geomorphometric analysis, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1643–1653, doi:10.5194/nhess-9-1643-2009, 2009.
- Luckman, B. H.: Rockfalls and Rockfall inventory data: some observations from Surprise Valley, Jasper National Park, Canada, *Earth Surf. Proc.*, 1, 287–298, 1976.
- Lundstrom, T.: Mechanical stability and growth performance of trees, Ph.D. thesis, University of Bern, Bern, 2010.
- Maegawa, K., Yoshida, H., Fujii, T., Shiomi, M., and Ohmori, K.: Weight falling tests on the rock-shed composed of CFTmembers, in: *Tubular Structures X*, edited by: Jaurrieta, A. C., Alonso, A., and Alonso, A., 533–540, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003.
- Maerz, N., Youssef, A., and Fennessey, T. W.: New RiskConsequence Rockfall Hazard Rating System for Missouri Highways using Digital Image Analysis, *Environ. Eng. Geosci.*, 11, 229–249, 2005.
- Magnier, S.-A. and Donze, F.: Numerical simulations of impacts' using a discrete element method, *Mech. Cohes.-Frict. Mat.*, 3, 257–276, 1998.
- Malamud, B., Turcotte, D., Guzzetti, F., and P., R.: Landslide inventories and their statistical properties, *Earth Surf. Proc. Land.*, 29, 687–711, 2004.
- Margreth, S.: Snow Pressure Measurements on Snow Net Systems, in: *Acte de colloque*, 241–248, Chamonix, 1995.
- Masuya, H.: Design Method of Structures under Impact Action by Concept of Performance Based Design, Japan Society of Civil Engineers, Committee of Structural Engineering, Subcommittee concerning Performance Based Design of Structures against Impact Action, 2007.
- Masuya, H. and Kajikawa, Y.: Numerical analysis of the collision between a falling rock and a cushion by distinct element method, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 493–498, 1991.
- Masuya, H. and Nakata, Y.: Development of numerical model combining distinct element and finite element methods and application to rock shed analysis, in: *Proc. Japan Soc. Civil Eng.*, 710-I, 113–128, Japan, 2001.
- Masuya, H., Tanaka, Y., Onda, S., and Ihara, T.: Evaluation of Rock falls on slopes and Simulation of the Motion of Rock Falls in Japan, in: *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures*, 21–28, Kanazawa, Japan, 1999.
- Masuya, H., Ihara, T., Onda, S., and Kamijo, A.: Experimental Study on Some Parameters for Simulation of Rock Fall on Slope, in: *Fourth Asia-Pacific Conf. on Shock and Impact Loads on Structures*, 63–69, Japan, 2001.
- Masuya, H., Amanuma, K., Nishikawa, Y., and Tsuji, T.: Basic rockfall simulation with consideration of vegetation and application to protection measure, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1835–1843, doi:10.5194/nhess-9-1835-2009, 2009.
- Matsuoka, N.: Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994-2006) observations, *Geomorphology*, 99, 353–368, 2008.

- Matsuoka, N. and Sakai, H.: Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods, *Geomorphology*, 28, 309–328, 1999.
- Mavrouli, O. and Corominas, J.: Vulnerability of simple reinforced concrete buildings to damage by rockfalls, *Landslides*, 7, 169–180, <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-010-0200-5>, 10.1007/s10346-010-0200-5, 2010.
- Mazzoccola, D. and Sciesa, E.: Implementation and comparison of different methods for rockfall hazard assessment in the Italian Alps, in: 8th International Symposium on Landslides, 2, 1035–1040, Balkema, Rotterdam, Cardiff, UK, 2000.
- Mazzoccola, D. F. and Hudson, J. A.: A comprehensive method of rock mass characterisation for indicating natural slope instability, *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 29, 37–56, 1996.
- Meissl, G.: Modellierung der Reichweite von Felsstürzen: Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung, Ph.D. thesis, Institut für Geographie. Univ. Innsbruck, 1998.
- Meissl, G.: Modelling the runout distances of rockfall using a geographic information system, *Z. Geomorphol.*, 125, 129–137, 2001.
- Monnet, J., Mermin, E., Chanussot, J., and Berger, F.: Tree top detection using local maxima filtering: a parameter sensitivity analysis, in: *Silvira-ser 2010*, 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, 1–9, Freiburg, Germany, 2010.
- Montani-Stoffel, S.: Sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors de chutes de blocs, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1998.
- Murata, S. and Shibuya, H.: Measurement of impact loads on the rockfall prevention walls and speed of falling rocks using a middle size slope model, in: 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 383–393, Melbourne, Australia, 1997.
- Mustoe, G. G. W. and Huttelmaier, H.: Dynamic Simulation of a Rockfall Fence by the Discrete Element Method, *Microcomputer in Civil Engineering*, 8, 423–437, 1993.
- Nakano, O., Sato, M., Kishi, N., Matsuoka, K., and Nomachi, S.: Full scale impact tests of PC multi-girder with three-layered absorbing system, in: 13th International Conference on SMiRT, IV, 201–206, 1995.
- Nakata, Y., Masuya, H., Kajikawa, Y., and Okada, T.: The Analysis of Impact Behaviour of Rock-Shed by Combination of Distinct Element Method and Finite Element Method, in: 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 403–410, Melbourne, Australia, 1997.
- Nicot, F.: Etude du comportement mécanique des ouvrages souples de protection contre les éboulements rocheux, Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Lyon, 1999.
- Nicot, F., Nouvel, P., Cambou, B., Rochet, L., and Mazzoleni, G.: Etude du comportement mécanique des ouvrages souples de protection contre les éboulements rocheux, *Revue française de génie civil*, 3, 295–319, 1999.
- Nicot, F., Cambou, B., and Mazzoleni, G.: Design of Rockfall Restraining Nets from a Discrete Element Modelling, *Rock Mech. Rock Eng.*, 34, 99–118, 2001.
- Nicot, F., Gay, M., Boutillier, B., and Darve, F.: Modelling of Interaction between a Snow Mantel and a Flexible Structure using a Discrete Element Method, in: *Proc. Num. Models in Geomechanics NUMOG VIII*, edited by: Pande, G. N. and Pietruszczak, S., 699–703, Swets & Zeitlinger, 2002a.
- Nicot, F., Gay, M., and Tacnet, J.: Interaction between a Snow Mantel and a Flexible Structure: A new Method to Design Avalanche Nets, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 34, 67–84, 2002b.



- Nicot, F., Gotteland, P., Bertrand, D., and Lambert, S.: Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to impact, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31, 1477–1515, 2007.
- Norrish, N. and Wyllie, D.: Landslides – Investigation and mitigation, in: *Rock slope stability analysis*, edited by: Turner, A. and Schuster, R. L., Transportation Research Board, special report 247, 673, National Academy Press, Washington, DC, 1996.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., and Coe, J. A.: Rockfall hazard at Little Mill Campground, Uinta National 150 Forest: Part 2. DEM analysis, in: *1st North American Landslide Conference*, edited by: Schaefer, V. R., Schuster, R. L., and Turner, A. K., AEG Special Publication № 23, 1351–1361, Vail, Colorado, USA, 2007.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., and Keusen, H.-R.: Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps, *Nat. Geosci.*, 1, 531–535, 2008.
- Paronuzzi, P.: Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers, *Q. J. Eng. Geol.*, 22, 175–183, 1989.
- Peila, D. and Ronco, C.: Technical Note: Design of rockfall net fences and the new ETAG 027 European guideline, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1291–1298, doi:10.5194/nhess-9-1291-2009, 2009.
- Peila, D., Pelizza, S., and Sassudelli, F.: Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests, *Rock Mech. Rock Eng.*, 31, 1–24, 1998.
- Peila, D., Castiglia, C., Oggeri, C., Guasti, G., Recalcati, P., and Rimoldi, P.: Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments subject to high energy rock impacts, in: *7th International conference on geosynthetics*, 2002.
- Peila, D., Oggeri, C., and Castiglia, C.: Ground reinforced embankments for rockfall protection, design and evaluation of full scale tests, *Landslides*, 4, 255–265, 2007.
- Perret, S., Stoffel, M., and Kienholz, H.: Spatial and temporal rock fall activity in a forest stand in the Swiss Prealps – a dendrogeomorphological case study, *Geomorphology*, 74, 219–231, 2006.
- Pfeiffer, T. and Bowen, T.: Computer Simulation of Rockfalls, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26, 135–146, 1989.
- Pichler, B., Hellmich, C., and Mang, H.: Impact of rocks onto gravel – Design and evaluation experiments, *Int. J. Impact Eng.*, 31, 559–578, 2005.
- Pierson, L. A., Davis, S. A., and Van Vickie, R.: *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*, Oregon, 1990.
- Piteau, D. and Clayton, R.: Computer Rockfall Model, in: *Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*, № 90 in ISMES Publication, 123–125, Bergamo, Italy, 1976.
- Piteau, D. and Clayton, R.: Discussion of paper Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data by Cundall, P., in: *Proceedings of the 16th Symposium on Rock Mechanics*, Minneapolis, USA, 62–63, 1977
- Plassiard, J., Donze, F., and Plotto, P.: High energy impact on embankments – a numerical discrete approach, in: *9th International Congress on Numerical Models in Geomechanics NUMOG*, 609–614, Ottawa, Canada, 2004.
- Plassiard, J.-P. and Donze, F.-V.: Rockfall Impact Parameters on Embankments: A Discrete Element Method Analysis, *Struct. Eng. Int.*, 19, 333–341, 2009.
- Raetzo, H., Lateltin, O., Bollinger, D., and Tripet, J.: Hazard assessment in Switzerland – Code of practice for mass movements, *B. Eng. Geol. Environ.*, 61, 263–268, 2002.

- Rammer, W., Brauner, M., Dorren, L., Berger, F., and Lexer, M.: Validation of an integrated 3D forest-rockfall model, *Geophys. Res. Abstr.*, Vol. 9, 04634, Vienna, 2007.
- Rammer, W., Brauner, M., Dorren, L. K. A., Berger, F., and Lexer, M. J.: Evaluation of a 3-D rockfall module within a forest patch model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 699–711, doi:10.5194/nhess-10-699-2010, 2010.
- Rapp, A.: Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia, *Geogr. Ann.*, 42, 65–200, 1960.
- Ritchie, A.: Evaluation of rockfall and its control, *Highway research record*, 17, 13–28, 1963.
- Rochet, L.: Development of numerical models for the analysis of propagation of rockfalls, 6th Int. Congress on Rock Mech, 1, 479–484, 1987a.
- Rochet, L.: Application des modeles numeriques de propagation a l'etude des eboulements rocheux, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussees*, 150–151, 84–95, 1987b.
- Romana, M.: Practice of SMR classification for slope appraisal, in: 5th International Symposium on Landslides, Balkema, Rotterdam, Lausanne, Switzerland, 1988.
- Romana, M.: A geomechanical classification for slopes: slope mass rating, *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon, Oxford, 1993.
- Rouiller, J.-D. and Marro, C.: Application de la methodologie MATTEROCK a levaluation du danger lie aux falaises, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90, 393–399, 1997.
- Rouiller, J. D., Jaboyedoff, M., Marro, C., Phlipposian, F., and Mamin, M.: Pentest instables dans le Pennique valaisan. Matterock: une methodologie d'auscultation des falaises et de detection des eboulements majeurs potentiels, *Rapport final du PNR31*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 1998.
- Santi, M. P., Russel, C. P., Higgins, J. D., and Spriet, J. I.: Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System, *Eng. Geol.*, 104, 55–65, 2008.
- Sasiharan, N., Muhunthan, B., Badger, T., Shu, S., and Carradine, D.: Numerical analysis of the performance of wire mesh and cable net rockfall protection systems, *Eng. Geol.*, 88, 121–132, doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.005, <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V63-4M69JSG-1/2/74d8147926832f9eb71fcc4859396f4>, 2006.
- Sato, M., Kishi, N., Iwabuchi, T., Tanimoto, T., and Shimada, T.: Shock Absorbing Performance of Sand Cushion, in: 1st AsiaPacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 393–400, Singapore, 1996.
- Schellenberg, K.: On the design of rockfall protection galleries, № 17924, ETHZ, Institute of Structural Engineering, Zurich, 2008.
- Schellenberg, K.: On the design of rockfall protection galleries – An analytical approach for a performance based design, SVH Verlag, 2009.
- Schellenberg, K. and Vogel, T.: Swiss Rockfall Galleries – Impact Load, in: Structures and Extreme Events, 302–303 and CD-ROM file LIS099.PDF, 1–8, IABSE Symposium Lisbon 2005, IABSE, Zurich, 2005.
- Schellenberg, K. and Vogel, T.: A Dynamic Design Method for Rockfall Protection Galleries, *Struct. Eng. Int.*, 19 (3), 321–326, 2009.
- Schellenberg, K., Volkwein, A., Roth, A., and Vogel, T.: Largescale impact tests on rockfall galleries, in: 7th Int. Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 17–19 October 2007, 497–504, Beijing, 2007.

- Schellenberg, K., Volkwein, A., Denk, M., and Vogel, T.: Falling weight tests on rock fall protection galleries with cushion layers, in: *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*, edited by: Volkwein, A., Labiouse, V., and Schellenberg, K., Swiss Fed. Research Inst. WSL, Morschach, Switzerland, 2008.
- Schneuwly, D. M. and Stoffel, M.: Changes in spatio-temporal patterns of rockfall activity on a forested slope – a case study using dendrogeomorphology, *Geomorphology*, 102, 522–531, 2008.
- Scioldo, G.: Slope instability recognition, analysis, and zonation, in: *Rotomap: analisi statistica del rotolamento dei massi*, 81–84, Milano, 1991.
- Scioldo, G.: User guide ISOMAP & ROTOMAP – 3D surface modelling and rockfall analysis, <http://www.geoandsoft.com/manuali/english/rotomap.pdf>, 2006.
- Selby, M. J.: A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand, *Z. Geomorphologie*, 24, 31–51, 1980.
- Selby, M. J.: Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock, *Earth Surf. Proc. Land.*, 7, 449–467, 1982.
- Shu, S., Muhunthan, B., Badger, T. C., and Grandorff, R.: Load testing of anchors for wire mesh and cable net rockfall slope protection systems, *Eng. Geol.*, 79, 162–176, doi:10.1016/j.enggeo.2005.01.008, <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V63-4FWKDWV-1/2/24d31d12a77ea868edf8184abb781f6d>, 2005.
- SIA261: Einwirkungen auf Tragwerke, Tech. rep., Schweizerische Ingenieure und Architekten, Bern, 2003.
- Soeters, R. and Van Westen, C.: Slope instability recognition, analysis, and zonation, in: *Landslides – Investigation and Mitigation – Special Report 247*, edited by Turner, A. and Schuster, R., 129–177, Trans. Res. B., National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., USA, 1996.
- Sonoda, Y.: A study on the simple estimation method of impact load by the one dimensional stress wave analysis, in: *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures*, 43–50, Kanazawa, Japan, 1999.
- Spang, R. and Bolliger, R.: Vom Holzzaun zum Hochenergienetz – die Entwicklung des Steinschlagschutzes von den Anfängen bis zur Gegenwart, *Geobrugg Schutzsysteme*, Romanshorn, 2001.
- Spang, R. and Rautenstrauch, R.: Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications, in: *5th International Symposium on Landslides*, 1237–1243, Balkema, Rotterdam, Lausanne, Switzerland, 1988.
- Spang, R. and Sonser, T.: Optimized rockfall protection by “Rockfall”, in: *8th Int. Congr. Rock Mech.*, 3, 1233–1242, Tokyo, 1995.
- Statham, I.: A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and model and field experiments, in: *ISMES: International Colloquium on Physical and Geomechanical Models*, 237–258, Bergamo, Italy, 1979.
- Statham, I. and Francis, S.: Hillslope processes, in: *Influence of scree accumulation and weathering on the development of steep mountain slopes*, edited by: Abrahams, A., Allen and Unwin, Winchester, 1986.

- Stevens, W. D.: Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, Master's thesis, University of Toronto, <http://www.rocscience.com/library/pdf/rf3.pdf>, 1998.
- Strahler, A. N.: Quantitative geomorphology of erosional landscapes, in: *Compt. Rend. 19th Intern. Geol. Cong.*, 13, 341–354, 1954.
- Straub, D. and Schubert, M.: Modelling and managing uncertainties in rock-fall hazards, *Georisk*, 2, 1–15, 2008. Stronge, W. J.: *Impacts mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- Studer, C.: Simulation eines Bremsrings im Steinschlagschutzsystem, Master's thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich, diplomarbeit am Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zurich, 2001."
- Sturzenegger, M., Stead, D., Froese, C., Moreno, F., and Jaboyedoff, M.: Mapping the geological structure of Turtle Mountain, Alberta: A critical interpretation of field, Dem and LIDAR based techniques, in: *Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and demand. 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium*, edited by: Eberhardt, E., Stead, D., and Morrison, T., 2, Taylor & Francis Ltd, Vancouver, Canada, 2007a.
- Sturzenegger, M., Yan, M., Stead, D., and Elmo, D.: Application and limitations of ground-based laser scanning in rock slope characterisation, in: *Rock mechanics: Meeting Society's challenges and demands. 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium*, edited by: Eberhardt, E., Stead, D., and Morrison, T., 1, 29–36, Taylor & Francis, London, Vancouver, Canada, 2007b.
- Tajima, T., Maegawa, K., Iwasaki, M., Shinohara, K., and Kawakami, K.: Evaluation of Pocket-type Rock Net by Full Scale Tests, in: *IABSE Symposium Bangkok 2009: Sustainable Infrastructure. Environment Friendly Safe and Resource Efficient*, 96, IABSE reports, International Association for Bridge and Structural Engineering, 2003.
- Teraoka, M., Iguchi, H., Ichikawa, T., Nishigaki, Y., and Sakurai, S.: Analysis of motion for rock falling on a natural slope by using digital video image, in: *5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering*, 87–90, Japan, 2000.
- Thommen, R. A.: Testing of various types of rockfall flexible wire rope mitigation barrier: an overview of testing to date, in: *59th Highway Geology Symposium*, Santa Fe, 2008.
- Tonello, J.: Generalites et approche de modeles simples, in: *Stage paravalanches*, E.N.P.C., Paris, 1988.
- Tonello, J. Couverture pare-blocs structurellement dissipante, Tech. rep., METL/DRAST, Label IVOR 01.1. Mission Genie Civil, <http://www.equipement.gouv.fr/recherche/incitatif/ivor>, 2001.
- Toppe, R.: Terrain models – A tool for natural hazard mapping, *IAHS, Publication*, 162, 1987a.
- Toppe, R.: Avalanche formation, movement and effects, chapitre Terrain models – a tool for natural hazard mapping, *IAHS Publication*, 162, 629–638, 1987b.
- Turner, R., Duffy, J. D., and Turner, J. P.: Post Foundations for Flexible Rockfall Fences, in: *Proc. 60th Highway Geology Symposium*, 2009.
- Ujihira, M., Takagai, N., and Iwasa, T.: An experimental study on the characteristics of the impact load of falling rock, *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 7, 81–89, 1993.
- Urciuoli, G.: Sperimentazione sulla caduta di blocchi lungo un pendio nella formazione calcareo-dolomitica della Penisola Sorrentina: Convengo sul tema, in: *Convengo sul tema: Cartografia e monitoraggio dei movimenti franosi*, 35–54, Bologna, Italy, 1988.

- Urciuoli, G.: Giornata di Studio su La protezione contro la caduta massi dai versanti rocciosi, 29–36, Torino, Italy, 1996.
- Ushiro, T., Shinohara, S., Tanida, K., and Yagi, N.: A study on the motion of rockfalls on Slopes, in: 5th Symposium on Impact Problems in Civil Engineering, 91–96, Japan, 2000.
- Van Dijke, J. and van Westen, C.: Rockfall hazard: a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS, *ITC Journal*, 1, 40–44, 1990.
- Van Westen, C.: Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments, in: 9th International Symposium on Landslides, Balkema, 2004.
- Vangeon, J.-M., Hantz, D., and Dussauge, C.: Rockfall predictability: a probabilistic approach combining historical and geomechanical studies, *Revue Francaise de Geotechnique*, 95/96, 143–154, 2001.
- Varnes, D. J.: IAEG Commission on Landslides & other Mass Movements, in: *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*, 63, UNESCO Press, Paris, 1984.
- Vogel, T., Labiouse, V., and Masuya, H.: Rockfall Protection as an Integral Task, *Struct. Eng. Int.*, 19 (3), 321–326, 2009.
- Volkwein, A.: Numerische Simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen, Ph.D. thesis, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, 2004.
- Volkwein, A., Roth, A., Gerber, W., and Vogel, A.: Flexible rockfall barriers subjected to extreme loads, *Struct. Eng. Int.*, 19, 327–331, 2009.
- Voyat, I., Roncella, R., Forlani, G., and Ferrero, A. M.: Advanced techniques for geo structural surveys in modelling fractured rock masses: application to two Alpine sites, in: *Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, American Rock Mechanics Association ARMA, 2006.
- Wagner, A., Leite, E., and Olivier, R.: Rock and debris-slides risk mapping in Nepal – A user-friendly PC system for risk mapping, in: 5th International Symposium on Landslides, edited by Bonnard, C., 2, 1251–1258, A. A. Balkema, Rotterdam, Lausanne, Switzerland, 1988.
- Wendeler, C.: Murgangrueckhalt in Wildbachen. Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren, Ph.D. thesis, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, diss ETH № 17916, 2008.
- Wentworth, C. M., Ellen, S. D., and Mark, S. D.: Improved analysis of regional engineering geology using GIS, in: *GIS'87*, San Francisco, California, 1987.
- Wieczorek, G. F., Morrissey, M. M., Iovine, G., and Godt, J.: Rockfall potential in the Yosemite Valley, California, Tech. rep., U.S. Geological Survey, 1999.
- Wienberg, N., Weber, H., and Toniolo, M.: Testing of flexible barriers – behind the guideline, in: *Interdisciplinary workshop on rockfall protection*, edited by Volkwein, A., Labiouse, V., and Schellenberg, K., 114–116, Swiss Fed. Research Inst. WSL, Morschach, Switzerland, 2008.
- Woltjer, M., Rammer, W., Brauner, M., Seidl, R., Mohren, G., and Lexer, M.: Coupling a 3D patch model and a rockfall module to assess rockfall protection in mountain forests, *J. Environ. Manag.*, 87, 373–388, 2008.
- Wong, R., Ho, K., and Chau, K. T.: Shape and mechanical properties of slope material effects on the coefficient of restitution on rockfall study, in: 4th North American Rock Mechanics Symposium, 507–514, Seattle, Washington, USA, 2000.
- Wong, R. H., Ho, K., and Chau, K. T.: Experimental study for rockfall simulation, in: *Construction challenges into the next century*, 92–97, Hong-Kong, China, 1999.

- Wu, S.: Rockfall evaluation by computer simulation, *Transportation Research Record*, 1031, 1–5, 1985.
- Wu, T. H., Wilson, H. T., and Einstein, H. H.: *Landslides – Investigation and mitigation*, 1996.
- Wyllie, D. C. and Mah, C. W.: *Rock slope engineering: Civil and Mining*, Spon Press, 4 edn., 2004.
- Yang, M., Fukawa, T., Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Miki, S., Hirakawa, Y., and Mori, S.: The application of 3-dimensional DDA with a spherical rigid block for rockfall simulation, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 41, 1–6, 2004.
- Yoshida, H.: Movement of boulders on slope and its simulation, *Recent studies on rockfall control in Japan*, Tech. rep., 1998.
- Yoshida, H.: Recent experimental studies on rockfall control in Japan, in: *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures*, Kanazawa, Japan, 1999.
- Yoshida, H., Masuya, H., and Ihara, T.: Experimental Study of Impulsive Design Load for Rock Sheds, *Struct. Eng. Int.*, P-127/88, 61–74, 1988.
- Zaitsev, A., Sokovikh, M., and Gugushvily, T.: Field testing of net structures for railway track protection in rocky regions, in: *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010)*, Zurich, 2010.
- Zinggeler, A., Krummenacher, B., and Kienholz, H.: Steinschlagsimulation in Gebirgswaldern, *Berichte und Forschungen der Geographisches Institut der Universitat Freiburg*, 3, 61–70, 1990.