

15. Zonage du danger de chutes pierres à partir de simulations trajectographiques 3D: expérience du Canton du Valais

par

Jean-Bruno PASQUIER¹, Johann FLEURY¹, Olivier BESSON²
& Jean-Daniel ROUILLER³

Résumé.—PASQUIER J.-B., FLEURY J., BESSON O. & ROUILLER J.-D., 2013. Zonage du danger de chutes pierres à partir de simulations trajectographiques 3D: expérience du Canton du Valais. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 189-197.

Les bureaux d'études qui réalisent des cartes de danger de chutes de pierres dans le canton du Valais suivent un rapport-type basé sur la méthodologie «Matterock» et sur les recommandations fédérales en la matière. Les simulations trajectographiques constituent un outil incontournable pour l'analyse et la gestion du danger de chutes de pierres. Les trajectographies interviennent pour l'établissement des cartes de danger et pour le dimensionnement des ouvrages de protection.

La méthode de zonage utilisée jusqu'à récemment, basée sur des simulations trajectographiques 2D et certains développements effectués au cours des dernières années, est tout d'abord rappelée. Les apports des trajectographies 3D pour le zonage du danger de chute de pierres sont ensuite présentés. Un certain nombre de problèmes inhérents à l'acquisition des paramètres initiaux et aux méthodes de calcul des logiciels sont soulevés, ainsi que les difficultés à appliquer les techniques développées pour le zonage à partir des trajectographies 2D. La définition de certaines valeurs limites à considérer, telle la probabilité d'atteinte et le quantile d'énergie des blocs, nécessite des développements dans les méthodes de zonage basées sur des trajectographies 3D.

Mots clés: Dangers naturels, Chutes de pierres, Modélisations, Trajectographies 2D/3D, Zonage du danger.

INTRODUCTION

Les bureaux d'études qui établissent les cartes de danger «chute de pierres et éboulements» dans le canton du Valais suivent un rapport-type basé sur la méthodologie «Matterock» (ROUILLER *et al.* 1998) et sur les recommandations fédérales en la matière (OFAT, OFEE, OFEFP 1997).

¹Géoval Ingénieurs-Géologues SA, Majorie 8, CH-1950 Sion; tél.: +41 (0)27 322 91 70.

E-mail: info@geoval.ch

²Bureau d'ingénieurs et géologues Tissières SA, Rue des Prés-de-la-Scie 2, CH-1920 Martigny.

³Projet Interreg4 – RiskNat c/o CREALP CH-1951 Sion.

Les études trajectographiques interviennent à différentes étapes de la mise en œuvre de la méthode Mattercock:

- lors de l'établissement de la carte de danger pour préciser les limites d'atteinte et l'énergie des blocs,
- lors de l'implantation et du dimensionnement des ouvrages de protection.

Durant plus d'une décennie les simulations trajectographiques numériques ont été réalisées par les bureaux d'étude à l'aide de logiciels 2D monoblocs. Les codes de calcul ont évolué au gré de l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs (passage d'un point matériel à un volume pour modéliser les blocs, augmentation du nombre de blocs simulés, prise en compte de la forêt). Avec la généralisation des outils SIG et des modèles numériques de terrain de haute résolution au cours des dernières années, des logiciels 3D monoblocs sont apparus sur le marché (par exemple: DESCOEUDRES & ZIMMERMANN 1987, GUZZETTI *et al.* 2002, DORREN 2009). Parmi les programmes couramment utilisés dans la pratique, il faut citer: Rockfall (Spang), Zinggeler + Geotest, RocFall (Rocscience), CRSP (Colorado Rocfall Simulation Program), Rockyfor3D, STONE, EBOULEMENT (EPFL), PIR3D et RockFall Analyst. Des inventaires des principaux logiciels de trajectographies avec leurs caractéristiques ont été établis dans le cadre du programme Interreg IIc (2001) et plus récemment par l'AGN (ROVINA *et al.* 2011) et par VOLKWEIN *et al.* 2011.

Cet article a pour objectifs de présenter les avantages du passage des simulations 2D aux simulations 3D et de soulever quelques-unes des difficultés rencontrées par le praticien pour effectuer un zonage du danger de chutes de pierres à partir des résultats des modélisations 3D.

MÉTHODE D'ÉVALUATION DU DANGER

La démarche aboutissant à la détermination du degré de danger est celle préconisée par les recommandations fédérales (OFAT, OFEE, OFEFP 1997). Le degré de danger d'un site menacé par des chutes de pierres est proportionnel à l'intensité du choc et à la probabilité d'occurrence de l'impact. Le danger de chutes de pierres est ainsi évalué au moyen d'un diagramme à deux entrées «intensité – probabilité d'occurrence» (matrice I/P), (figure 1).

Probabilité d'occurrence

La probabilité d'occurrence est la probabilité qu'un bloc qui se détache d'une paroi atteigne l'objet ou le périmètre menacé (probabilité d'atteinte), pondérée par la probabilité de mobilisation du bloc (= dangerosité en Valais), (ROUILLER *et al.* 1998), (figure 2). La fréquence des événements observables est un autre critère qui, lorsqu'il peut être évalué, pondère également la probabilité d'occurrence.

La probabilité d'occurrence d'un événement, tout comme la probabilité de mobilisation d'un aléa, est qualifiée de (OFAT, OFEE, OFEFP 1997, ROUILLER *et al.* 1998):

- Elevée = période de retour entre 1 et 30 ans,
- Moyenne = période de retour entre 30 et 100 ans,
- Faible = période de retour entre 100 et 300 ans.

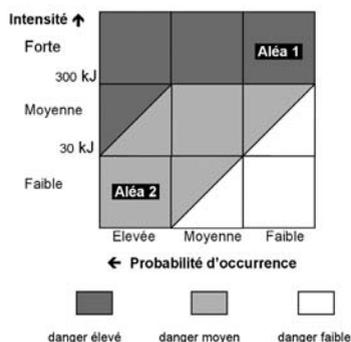


Figure 1.–Diagramme intensité – probabilité d’occurrence (I-P) caractérisant le danger de chutes de pierres (OFAT, OFEE, OFEFP 1997).

Intensity – probability of occurrence diagram (I-P) characterizing the danger of rockfall (OFAT, OFEE, OFEFP 1997).

		Probabilité de mobilisation (dangerosité de l'aléa)		
		Elevée	Moyenne	Faible
Probabilité d'atteinte	Elevée	Elevée	Moyenne	Faible
	Moyenne	Moyenne	Faible	-
	Faible	Faible	-	-

Figure 2.–Matrice d’évaluation de la probabilité d’occurrence en fonction des probabilités d’atteinte et de mobilisation (ROUILLER *et al.* 1998).

Evaluation matrix of the probability of occurrence based on probabilities of propagation and failure (ROUILLER *et al.* 1998).

La probabilité d’atteinte des blocs est obtenue à partir des trajectographies. Selon la méthodologie Matterrock, la probabilité d’atteinte est classée en 3 degrés (ROUILLER *et al.* 1998):

- Elevée: 1 – 100% d’atteinte des blocs,
- Moyenne: 1 – 10⁻²% d’atteinte des blocs,
- Faible: 10⁻² – 10⁻⁴% d’atteinte des blocs.

Intensité

L’intensité des blocs en un lieu est définie par leur énergie cinétique (de translation et de rotation) et est exprimée en kJ. L’intensité est habituellement calculée à l’aide de simulations trajectographiques. Selon les recommandations fédérales, trois classes d’intensité sont distinguées (OFAT, OFEE, OFEFP 1997):

- Elevée = énergie cinétique > 300 kJ
- Moyenne = énergie cinétique entre 30 et 300 kJ
- Faible = énergie cinétique < 30 kJ

ZONAGE À PARTIR DES SIMULATIONS 2D

Jusqu’à récemment la méthodologie de zonage du danger de chute de pierres appliquée dans le canton du Valais était basée sur des simulations réalisées à l’aide de logiciels 2D monoblocs.

Pour réaliser des simulations 2D, il est nécessaire de choisir et paramétrer des profils caractéristiques de la zone d’étude passant par les objets menacés (par exemple des

habitations), des couloirs préférentiels de chute de blocs ou des ouvrages de protections existants ou planifiés. En fonction des objectifs de l'étude, on peut être amené à effectuer plusieurs simulations sur un même profil, avec différentes tailles de blocs et différentes zones de départ.

Pour le zonage du danger, des développements ont été réalisés dans le traitement des résultats des simulations trajectographiques 2D. Les modifications apportées à la méthode de zonage concernent l'intensité (énergie) et la probabilité d'atteinte des blocs.

Intensité

Les analyses trajectographiques montrent que l'énergie des blocs varie dans une large gamme de valeurs. Comme le montre la figure 3a, pour différentes sections de contrôle d'un même profil, les valeurs d'énergie ne suivent pas nécessairement la même loi de distribution statistique et il devient difficile d'effectuer des calculs probabilistes.

Afin d'associer une valeur unique d'énergie au bloc considéré, le quantile d'énergie cinétique E90 (valeur lue à 90% sur la courbe cumulative de la distribution des valeurs) est retenu afin d'éliminer les cas exceptionnels et les valeurs aberrantes (figure 3b).

Cette méthode est appliquée pour l'élaboration des cartes de danger et pour le dimensionnement des ouvrages de protection, où les mêmes considérations sont faites pour les hauteurs de vols des blocs.

Probabilité d'atteinte

Les probabilités d'atteinte sont en général déterminées à partir des points d'arrêt des blocs calculés lors des simulations. Les limites d'atteinte élevée (1%), moyenne ($10^{-2}\%$) et faible ($10^{-4}\%$) peuvent être évaluées par un calcul probabiliste fixant leur position en fonction d'une loi normale dont la moyenne et l'écart-type sont donnés par l'analyse statistique des distances d'arrêts modélisées. L'expérience a montré que cette approche probabiliste pouvait conduire à des résultats erronés, en particuliers lorsque plusieurs zones de dépôt discontinues existent le long du profil modélisé et que les caractéristiques géomorphologiques du terrain le long du profil ne sont pas homogènes.

Les limites d'atteinte sont dans la mesure du possible déterminées à partir des résultats bruts des simulations numériques effectuées avec un grand nombre de blocs (10'000 ou plus).

APPORT DES TRAJECTOGRAPHIES 3D

Evolution du 2D au 3D

Les progrès substantiels apportés par les simulations trajectographiques 3D résident dans les points suivants:

- la prise en compte spatiale de la géomorphologie de la zone d'étude, incluant les caractéristiques des terrains et le couvert forestier;

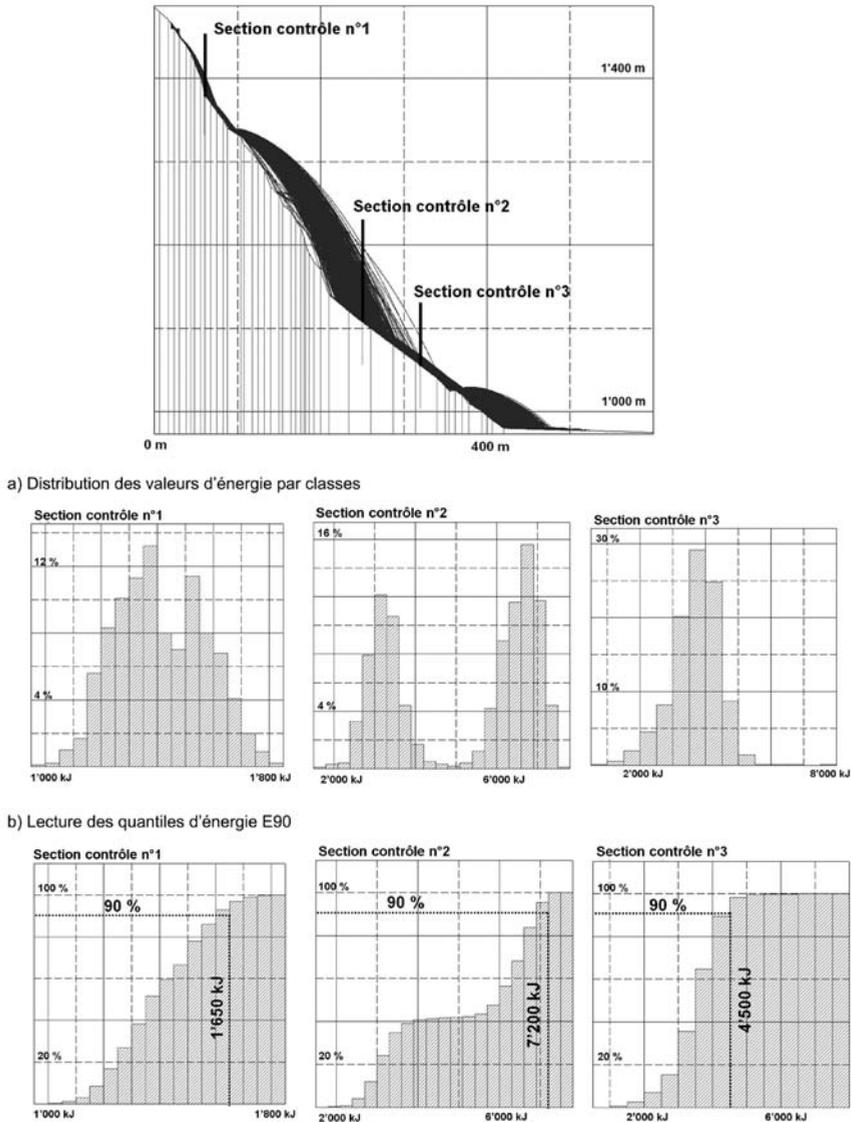


Figure 3.—Exemples de résultats statistiques de l'énergie cinétique des blocs le long d'un profil trajectographique 2D pour 3 sections de contrôle. (a) Variation du type de distribution des valeurs par classes et (b) lecture du quantile d'énergie E90.

Examples of statistical results of the kinetic energy of blocks along a 2D trajectory profile for 3 sampling sections. (a) Variation in the type of distribution of values by classes and (b) reading of the quantile of energy E90.

- une visualisation en plan de la dispersion des trajectoires de chute de blocs. Les logiciels 2D ne permettent pas l'estimation de la propagation latérale des blocs simulés le long d'un profil trajectographique;

- la déviation possible des trajectoires de blocs lors d'impacts avec le sol, ainsi qu'en cas de contact avec un arbre dans les modélisations avec forêt.

Les logiciels 3D actuels permettent également la simulation adéquate de différents types d'aléas et de scénarios globaux:

- aléa diffus: chutes de blocs ou de compartiments rocheux correspondant à une falaise ou un pan de falaise.

- aléa ponctuel: volume instable bien localisé pouvant générer une chute de blocs ou un éboulement.

- scénario global: modélisation comprenant différentes zones de départ correspondant à différents aléas de même dangerosité et pouvant contenir différentes tailles de blocs.

Exemple: Gondobücke (Gondo, VS)

Le tronçon dit «Gondobücke» de la route nationale A9 est situé à l'est du village de Gondo (Commune de Zwischbergen, VS, figure 4). Un piège à blocs protège la route au-dessus de la place de la douane (Zollhaus sur la figure 4). Il ressort sur le MNT utilisé (grille 2 m) et a donc pu être modélisé. Les aléas présentés dans cet exemple sont GB1 et GB11, respectivement de type:

- diffus: blocs isolés dispersés sur un pan de falaise (surface 1.7 ha, 250 m en dessus de la route); taille des blocs 1 m³.

- ponctuel: compartiment rocheux instable situé 450 m au-dessus de la route (volume total estimé à 100 m³, taille des blocs 3-5 m³).

Les trajectographies 3D ont été effectuées avec le logiciel Rockyfor3D (DORREN 2009). La forêt a été modélisée dans la simulation liée à GB11. Les figures 4a et 4b représentent respectivement le nombre de trajectoires des deux simulations et le nombre de blocs arrêtés (nombres de blocs simulés: GB1 = environ 12'000; GB11 = environ 100'000).

La figure 4b montre la répartition des zones d'arrêt préférentielles des blocs. L'efficacité des mesures de protection existantes, pour le cas de l'aléa diffus GB1 (piège à blocs), est mise en évidence, mais est considérée dans ce cas comme partielle, étant donné la présence de nombreux blocs au-delà de l'ouvrage.

Dans le cas de GB11, l'effet de protection du couvert forestier est important. On peut remarquer que la majeure partie des blocs se sont arrêtés au niveau de la forêt (figure 4b).

Grâce à une analyse géostatistique de la grille générant les zones de dépôt des blocs, il est possible de quantifier le nombre de blocs atteignant l'objet menacé, ici la route, afin d'apprécier la probabilité d'atteinte de celle-ci.

La concentration des trajectoires sur la carte du nombre de passages permet de mettre en évidence les couloirs préférentiels de transit (par exemple partie Est de GB1, figure 4a).

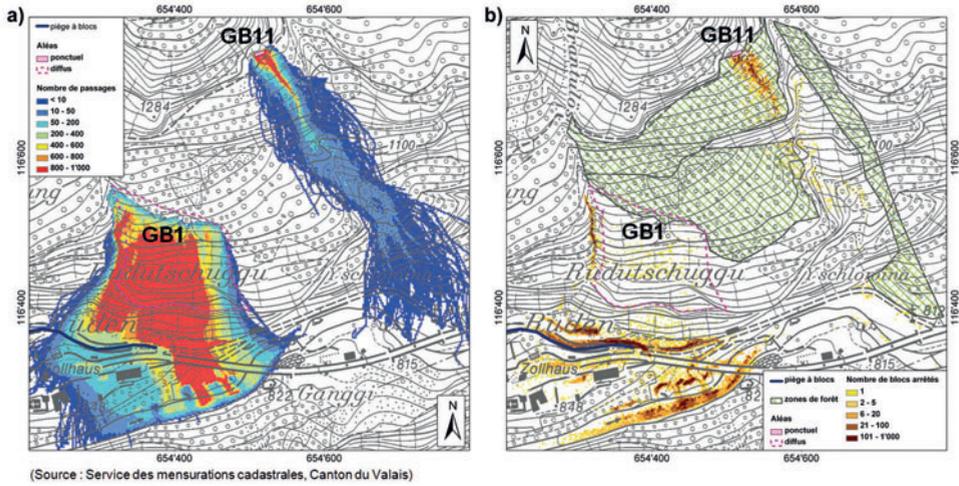


Figure 4.– Gondobrück (Zwischbergen, VS): a) Carte du nombre de passages de blocs par cellule; b) Carte du nombre de blocs arrêtés par cellule.

Gondobrück (Zwischbergen, VS): a) Map of the number of blocks passed through each cell; b) Map of the number of rocks stopped in each cell.

PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DU PASSAGE EN 3D

Le passage des simulations 2D aux simulations 3D nécessite de nouvelles données de départ et surtout une adaptation des méthodes d'interprétation des résultats qui avaient été développées pour les simulations 2D.

Acquisition des paramètres de modélisation

Le choix des paramètres de départ nécessaires à une modélisation 3D est plus complexe et plus long à récolter que pour des simulations 2D.

En pratique, une cartographie complète de la zone à modéliser devrait être réalisée pour définir des périmètres de terrain aux propriétés homogènes.

La modélisation de la forêt implique l'acquisition de nombreuses données (densité, essences, diamètre des troncs).

Les algorithmes spécifiques de chaque logiciel intègrent de manière différente la nature des terrains, la forme et les dimensions des blocs simulés. Le choix des valeurs des coefficients de rebond et de rugosité des terrains est un problème récurrent aussi bien en 2D qu'en 3D.

La délimitation adéquate du périmètre de simulation est également cruciale. Les trajectoires simulées s'étendent souvent au-delà de la zone d'étude initiale.

Modèles numériques de terrain

L'imprécision des MNT en reliefs escarpés et/ou un maillage des grilles trop fin ou trop lâche présentent les inconvénients suivants lors de la simulation:

- apparition d'artéfacts numériques;
- lissage des surfaces et perte de la rugosité de dimension métrique du MNT;
- incohérences de la topographie liées à l'interpolation des grilles MNT (maille régulière) à partir de fichiers d'acquisition des données brutes (maille souvent irrégulière);
- augmentation du temps de calcul.

Energie et hauteur de passage

L'analyse des résultats des trajectographies 2D a montré que la distribution des valeurs d'énergie ou des hauteurs de passage des blocs le long d'un profil ne peut pas être décrite par une loi de distribution unique (Chapitre 3).

Certains logiciels 3D actuels permettent de calculer des quantiles (p. ex. 95% des blocs avec Rockyfor3D). La plupart des programmes définissent ces quantiles au moyen d'une loi unique afin de simplifier la méthode et de conserver la rapidité du calcul. Cette démarche peut conduire à des résultats erronés impliquant une surestimation ou une sous-estimation notoire des valeurs.

Probabilité d'atteinte

La définition des limites d'atteinte 1%, 10⁻²% et 10⁻⁴% selon la méthode Matterock (Chapitre 2) n'est pas applicable sensu stricto aux simulations trajectographiques 3D. L'extension latérale hétérogène des trajectoires ne permet pas une analyse simple des probabilités d'atteinte.

Des logiciels tels que Rockyfor3D permettent d'obtenir des cartes indiquant les points d'arrêt et le nombre de passage de blocs par cellule de la grille du MNT. La définition des probabilités d'atteinte élevé-moyen-faible s'effectue dans ce cas par une analyse qualitative de ces deux cartes.

Il n'existe pour l'instant pas de méthode rigoureuse et systématique pour quantifier les probabilités d'atteinte en 3D.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le zonage du danger de chutes de pierres en Valais est encore en grande partie basée sur des trajectographies 2D, avec des développements qui sont 1) la prise en compte du quantile E90 (valeur lue à 90% sur la courbe cumulée de la distribution des valeurs de d'énergie cinétique) comme valeur représentant l'intensité des blocs pour l'élaboration des cartes de danger (la même démarche est adoptée pour la hauteur de vol des blocs dans le cadre du dimensionnement des ouvrages de protection); 2) la modélisation d'un grand nombre de blocs (10⁷000 ou plus) et 3) l'utilisation des résultats bruts des simulations au détriment

de méthodes de calcul probabilistes pour la détermination des limites d'atteinte des blocs.

L'apport des simulations trajectographiques 3D constitue une avancée importante pour l'établissement des zones de danger de chutes de pierres en permettant:

- la visualisation en plan des trajectoires de chute de blocs;
- la modélisation de zones de départ de blocs traduisant mieux l'extension latérale des instabilités rocheuses.

La quantification des résultats des simulations 3D soulève certains problèmes et nécessite de nouveaux développements. En particulier:

- la méthode de calcul des quantiles d'énergie ou des hauteurs de passage des blocs (par exemple E95: quantile 95% des énergies ou H95: quantile 95% des hauteurs de passage) doit être affinée.
- une méthode rigoureuse doit être développée pour définir les probabilités d'atteinte des blocs.

Les énergies et les probabilités d'atteinte sont les éléments indispensables pour l'application des recommandations fédérales et cantonales en matière de zonage du danger de chute de pierres. Il est donc indispensable de développer une méthodologie globale intégrant les résultats des trajectographies 3D.

REMERCIEMENTS

Canton du Valais, Projet Interreg4 – RiskNat, deux reviewers anonymes.

RÉFÉRENCES

- DESCOEUDRES F. & ZIMMERMANN T. 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. ISRM 6. Congr. Montreal Vol 1: 327-342.
- DORREN L., 2009. Rockyfor3D revealed – Description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ (www.ecorisq.org): 20 p.
- GUZZETTI F., CROSTA G., DETTI R., & AGLIARDI F., 2002. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-fall., *Comput. Geosci.* 28: 1079–1093.
- LABIOUSE V., HEIDENREICH B., DESVARREUX P., VIKTOROVITCH M. & GUILLEMIN P., 2001. Etudes trajectographiques. In Programme Interreg II C – Falaises: Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises. Confrontation des méthodes d'études des éboulements rocheux dans l'arc alpin. Interreg Communauté européenne, 239 p.
- OFAT, OFEE, OFEFP, 1997. Prise en compte des dangers naturels dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations. 42 p.
- ROULLER J.-D., JABOYEDOFF M., MARRO C., PHILIPPOSIAN F. & MAMIN M., 1998. Pentas instables dans le Pennique valaisan, MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final PNR 31. Zürich, vdf. 239 p.
- ROVINA H., LINIGER M. JORDAN P., GRUNER U. & BOLLINGER D., 2011. Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen. *Swiss Bull. Angew. Geol.* 16/1: 57-79.
- VOLKWEIN A., SCHELLENBERG K., LABIOUSE V., AGLIARDI F., BERGER F., BOURRIER F., DORREN L. K. A., GERBER W. & JABOYEDOFF M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11: 2617–2651.