

### 3 Numerische und analytische Berechnungsmethoden zu flexiblen Schutznetzen gegen Muren und oberflächige Rutschungen

C. Wendeler, E. Gröner und R. Brändle (Geobrug AG, Romanshorn, Schweiz)

#### Einleitung

Der Schutz vor Naturgefahren gewinnt immer mehr an Bedeutung. Zum einen scheinen sich Ereignisse wie Steinschlag und Rutschungen zu häufen. Zum anderen führen ungeplante Sperrungen von Verkehrswegen zu grossen Problemen durch das immer höher werdende Verkehrsaufkommen.

Um die Zuverlässigkeit von Steinschlagschutzsystemen zu erhöhen, wurde im Jahr 2001 die Schweizer Richtlinie über die Typenprüfung von Steinschlagschutznetzen (Gerber, 2001/2008) eingeführt, welche die erste ihrer Art war. Im Jahr 2008 folgte die Zulassungsrichtlinie für Steinschlagschutzsysteme ETAG 027 (EOTA, 2008) auf Europäischer Ebene. In beiden Richtlinien werden nun die Testabläufe klar und in ähnlicher Art und Weise geregelt. Unklarheiten entstehen, wenn es um Sonderlastfälle geht. Inwiefern sind die Schutzsysteme geeignet die Lasten von zusätzlichen / anderen Gefahren wie Schnee- und Erdrutschen oder Baumschlag aufzunehmen, um vor diesen zu schützen? Auch sind Anpassungen an das Gelände und Treffer im Schutzsystem abweichend von der Zulassung unklar. Durch numerische Simulationen mit der Finite Element Software FARO (Volkwein, 2004) die mit 1:1 Feldversuchen abgeglichen wurden, können entsprechende Schutzverbauungen gegen Steinschlag auf aussergewöhnliche Belastungen (Sonderlastfälle) nun zuverlässiger ausgelegt werden.

Was sind nun die Voraussetzungen für Ereignisse und deren Modellierung wie Murgang und Hangmuren? Als Grundlage wurden in den Jahren 2005 – 2008 Untersuchungen zum Prozessverständnis von Murgängen und Schutzsystemen mit Ringnetzen in einem Forschungsprojekt der Kommission für Technische Innovation in der Schweiz durchgeführt. Ein ähnliches Projekt zum Schutz vor Hangmuren wurde in den Jahren 2008 – 2012 bewilligt. Durch diese beiden Forschungsprojekte konnten die Ereignistypen Murgang und Hangmure näher erforscht werden und die Validierung von Simulationen mit der Finite Element Software FARO auf reale Felddaten erfolgen.

Aufgrund der grossen Variabilität von Murgängen und Hangmuren in Bezug auf Materialzusammensetzung und Fliessprozess können bisher nur Schutzmassnahmen für die getesteten Ereignisse vernünftig dimensioniert werden.

Im Folgenden werden die Unterschiede der Ereignistypen Murgang und Hangmure dargestellt, um aufgrund von numerischen und analytischen Berechnungsmethoden, die Nachweise für flexible Schutznetze darzustellen. In Zukunft sollen dadurch die Schutzsysteme besser auf die zu erwartenden Ereignisse, vor allem auch Sonderlastfälle, ausgelegt werden können.



Abb. 1: Künstlich ausgelöste oberflächige Rutschung mit einer Anrisstiefe von ca. 2 m ausgelöst durch Infiltration von Wasser (Eidgenössische Forschungsanstalt WSL) mit Hangmurenetz am Böschungsfuss.

#### Prozessverständnis Hangmure und Interaktion zum Schutzsystem

Ereignisse wie Hangrutschungen und Hangmuren sowie Murgänge sind nur spärlich dokumentiert und bisher wenig untersucht (Rickli, 2005). Grundsätzlich werden die Hangmuren durch geringe Anrisstiefen, bis zu 2 m (Abb. 1) und entsprechend kleinen Volumen, von in der Regel bis zu 200 m<sup>3</sup>, charakterisiert.

Ausgelöst werden sie an Hängen und Böschungen durch Starkniederschläge mit einer Steilheit im Bereich von 25 – 50°. Trotz der relativ geringen Volumen können sie sehr hohe Geschwindigkeiten von bis zu 11 m/s (ca. 40 km/h) erreichen. Das Versagen ist spontan und meist nicht vorhersehbar. Der Prozess von der Entstehung der Rutschung bis zur Ablagerung beträgt üblicherweise mehrere Sekunden was die Überwachung und Beobachtung des Fliessverhaltens sehr erschwert. Die Fliessstiefen betragen in der Regel nicht mehr als 1 m (Abb. 2 und 3).



Abb. 2: Testanlage Veltheim, Schweiz, für Hangmuren zur Untersuchung des Fließverhaltens und der Schutzverbauung.

Die Auslaufdistanz ist üblicherweise kleiner als 100 m, während sie bei Rutschungen in Gerinnen, die dort Material aufnehmen können, ein Vielfaches der Auslaufdistanz erreichen können und entsprechend als Murgänge klassifiziert werden (Bugnion et al. 2011).

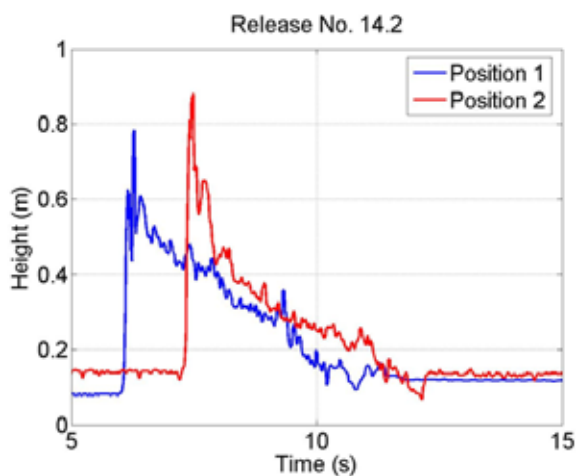


Abb. 3: Messungen der Fliesstiefen aus dem Grossfeldversuch Veltheim mit einem Peak bei ca. 60 cm.

Aufgrund ihrer hohen Dichte ( $1'500 - 2'100 \text{ kg/m}^3$ ) stellen Hangmuren eine ernsthafte Gefahr für Menschen, Gebäude und Infrastrukturen wie Strassen und Bahnlinien dar. Der mögliche Schaden wird durch den Druck, der auf ein Objekt wirkt, ermittelt. Der Druck resultiert durch das Abbremsen oder Ablenken des Materialstroms. In Abhängigkeit der Kinematik und der Materialeigenschaften sowie der Anordnung / Eigenschaften des Objekts verändern sich Grösse und Dauer der Einwirkung. Verhältnismässigkeiten, die den Flächendruck als Funktion der oben genannten Grössen darstellen, sind von wesentlicher Bedeutung bei der Erstellung von Gefahrenkarten und bei der Bemessung von Schutzmassnahmen wie z. B. die Verstärkung von Gebäuden, Stützwänden oder flexiblen Schutznetzen (Bugnion et al. 2011).

## Prozessverständnis Murgang

Murgänge werden ebenfalls meist durch starke Regenfälle initialisiert. Sie fließen in Wildbächen und alpinen Flüssen und führen meist grosse Blöcke und Geröll mit sich. Die Dichte der Murgänge liegt üblicherweise im Bereich von  $1'800 - 2'400 \text{ kg/m}^3$  mit Fließgeschwindigkeiten im Bereich von  $3 - 8 \text{ m/s}$ . In Regionen, wo Murgänge häufig auftreten, werden diese üblicherweise mit grossen Dämmen oder speziellen Rückhaltebecken gesammelt. Für kleinere Volumen sind flexible Ringnetzbarrieren geeignet (Abb. 4). Idealerweise überspannen die Ringnetzbarrieren den Querschnitt eines Flussbettes, um das zu erwartende Murgangvolumen zu stoppen und zu entwässern.



Abb. 4: Ringnetzbarriere in einem Gerinne. Testanlage Illgraben im Wallis, Schweiz

Erste Tests mit Ringnetzbarrieren wurden 1996 (DeNatale et al., 1999) an der United States Geological Survey (USGS) Murgang Kanal durchgeführt, in dem die Spitzenbelastungen in den Seilen mit  $40 \text{ kN}$  für ein Volumen von  $10 \text{ m}^3$  gemessen wurden. Aufgrund dieser Tests bauten die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL eine umfassende Testanlage in einem sehr aktiven Murgangerinne in der Schweiz (Abb. 4). Die maximalen Aufprallkräfte werden im Vergleich zu Betonkonstruktionen durch lange Bremswege und das flexible Verhalten der Strukturen reduziert. Der Abbremsvorgang wurde in der Vergangenheit ähnlich angenommen wie für Barrieren zum Schutz vor Steinschlag, Schwemmholz in Flüssen und Schneerutschungen. Die Lastverteilung über die Barriere zum Schutz vor Murgängen ist jedoch anders, weshalb dies in einem Forschungsprojekt mit 1:1 Feldversuchen, Laborversuchen und numerischen Simulationen kombiniert erforscht wurde. So konnte das Strömungsverhalten und die Interaktion der Barriere während und nach einem Murgang und dessen Auswirkungen umfänglich untersucht werden. Murgänge treten in Wellen auf (Wendeler, 2008). Das zurückgehaltene Material einer ersten Welle stellt eine Vorbelastung für das Netz dar und wirkt andererseits als Hindernis für nachfolgende Murgangwellen.



## Modellierung von Hangmurenbarrieren

Als besonders wichtig erachtet wird, die Kopplung zwischen Fluid und Struktur flexibel auszugestalten (Bötticher, 2012), wobei das Fluid Murgang oder Hangmure darstellen und die Struktur das Schutzbauwerk aus Ring- oder Chain-Link Netzen. Damit soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Berechnungen von Fluid- und Strukturverhalten einfacher anzupassen. Hierzu zählt die Weiterentwicklung der Software FARO (Volkwein, 2004) auf Seiten der Struktur (Abb. 5), sowie der komplexen Chain-Link Elemente (Bötticher, 2012), die für die Modellierung der Hangmurenbarrieren nötig sind. Bötticher hat ein von der Struktur unabhängiges Rheologiemodell, Turbulenzansätze und Solver entwickelt, um das dynamische Gitterverhalten abzubilden. Zusätzlich sollten Eigenschaften des Rückstauraums wie z. B. die Hangneigung einfach anpassbar sein und die Simulation sollte für verschiedene Barrieren einsetzbar sein.

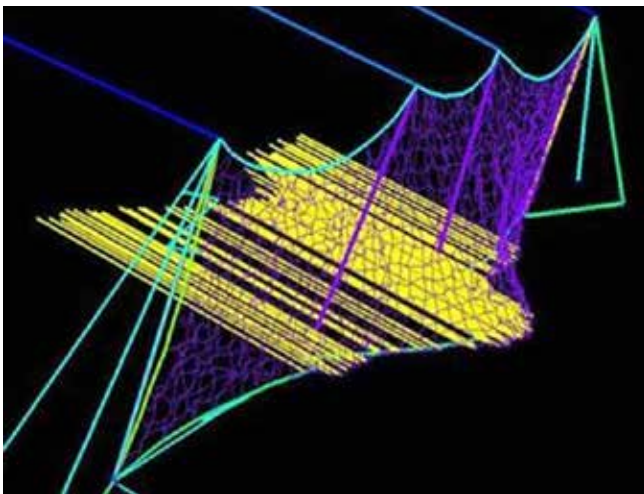


Abb. 5: Simulation des Ersteinschlages in eine Hangmurenbarriere mit FARO.

Für die Zweiphasenströmung wurde InterDyMFoam verwendet. Die Struktur liefert dabei die Verformungen am gemeinsamen Rand, und der Solver der Fluidmechanik berechnet die Kräfte.

Grundlage für die Modellierungen waren die eingangs beschriebenen 1:1 Versuche mit Hangmuren in Veltheim mit Einzelvolumen bis 50 m<sup>3</sup> und Gesamtvolumen bis 200 m<sup>3</sup>. Fliesstiefen-, Dichte-, Geschwindigkeits- und Fließdruckmessungen waren Bestandteil dieser Versuche. Zusätzlich wurde der Einschlag in das Schutzbauwerk mit 4 Kraftmesszellen in den Trag- und Rückhalteseilen dokumentiert.

Die ersten Vergleiche zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Drücke des Modells liegen unter den gemessenen an den Druckplatten mit 90'000 Pa. Dies stimmt mit der Erkenntnis überein, dass flexible Barrieren geringeren Drücken ausgesetzt sind als starre Konstruktionen (Abb. 6).

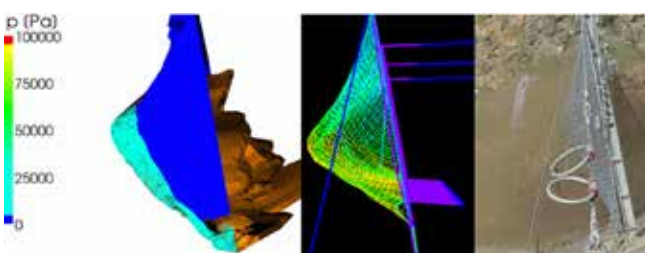


Abb. 6: Die Maximalbelastung des Bauwerks führt zu einer auflaufenden Höhe in OpenFOAM wie sie auch bei den Feldversuchen beobachtet wurde.

Die Kräfte in den oberen Tragseilen und den Rückhalteseilen stimmen sehr gut mit den gemessenen Maxima und dem Zeitverlauf überein (Abb. 7). Nach dem Einschlag fließt das Wasser – Feststoffgemisch langsam zur Seite der Barriere.

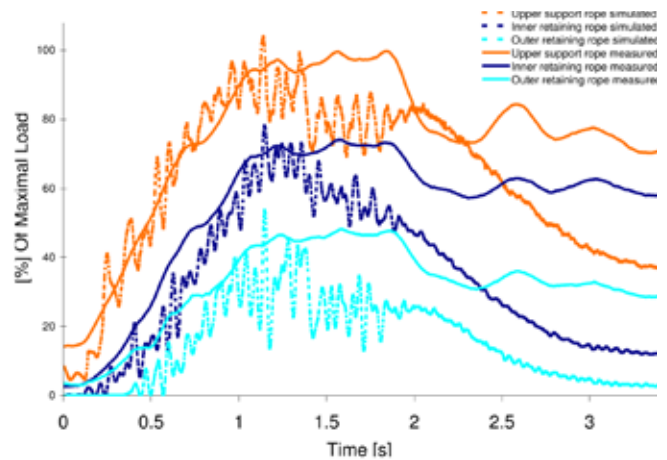


Abb. 7: Gemessene und simulierte Seilkräfte von Test 7 durchgeführt in der Testanlage Veltheim, Schweiz

Dieser Effekt wurde überschätzt bei der Modellierung und führt zu einer effektiv schnelleren Entlastung der Barriere (Abb. 7 und 8).



Abb. 8: Hangmurenbarriere nach der Belastung durch vier Wellen / Einschläge (Testanlage Veltheim, Schweiz). Der Entmischungsprozess Kies / Feinmaterial und die seitliche Ausbreitung sind gut zu erkennen.

## Fallstudie Hangmure: Projekt Balisberg – Multiple Belastung Hangmure - Steinschlag

Das Projekt Balisberg wurde von der Schweizer Bundesbahn (SBB) in Auftrag gegeben. Die ermittelten Gefahren für den Bahnbetrieb entstehen durch oberflächennahe Rutschungen (Hangmuren) und Steinschlägen. Die Daten wurden von einem, von der SBB beauftragten, Ingenieurbüro zur Verfügung gestellt mit der Aufgabe zur Entwicklung eines flexiblen Schutzsystems, das beiden Lastfällen standhalten kann. Gemäss der Gefahrenkarte müssen Flächendrücke bis zu 60 kN/m<sup>2</sup> (mittlere Intensität) betrachtet werden. Die Steinschlag-Gefahrenkarte gibt Energien mit einer Intensität größer 300 kJ vor. 1:1 Feldtests mit einer Hangmurenbarriere (500 kJ) (Abb. 9) und Simulationen zeigen die Möglichkeit der Anpassung auf die beiden Lastfälle.



Abb. 9: Steinschlagtest in eine Hangmurenbarriere MEL 500 kJ gem. ETAG 027.

### Numerische Simulation und Anpassung der Barriere

Das erforderliche System für den entsprechenden Hangmurendruck von  $60 \text{ kN/m}^2$  war eine Kombination aus einem Standard SL-100 System (design Druck von  $100 \text{ kN/m}^2$ ) und einer Steinschlagbarriere für Energien bis  $2'000 \text{ kJ}$ . Das Barrieren-Design musste speziell mit Simulationen geprüft werden, da es keine Typenprüfung für so einen Spezialfall gibt. Die numerischen Modelle, kalibriert auf Basis der erwähnten Feldtests, erleichtern die Überprüfung und Anpassung des Barrieren-Designs. Der Ansatz war eine Standard RXI-200 Steinschlagbarriere, getestet nach der Schweizer Richtlinie über die Typenprüfung von Steinschlagschutznetzen (Gerber, 2001/2008) für eine Einwirkung von  $2'000 \text{ kJ}$ . Zusätzlich wurde im Simulationsmodell in FARO der massgebende Hangmurendruck von  $60 \text{ kN/m}^2$  simuliert. Abbildung 10 zeigt den ersten Aufpralldruck der Rutschung mit  $60 \text{ kN/m}^2$  dynamischer Aufpralldruck über eine Strömungshöhe von  $1 \text{ m}$  entsprechend der Gefahrenkarte. Die Last wird gleichmässig über den betroffenen Netzbereich verteilt und wirkt auf die Netzknoten. Zusätzlich wurde der hydrostatische Druck für die vollständig gefüllte Barriere über eine Höhe von  $4 \text{ m}$  gerechnet. Die wichtigsten Anpassungen an der Steinschlagbarriere für flächige Erdrutschbelastung von  $60 \text{ kN/m}^2$  sind die verstärkten Rückhalteseile / Verankerung und zusätzlich zu den seitlich und vertikal verstärkten Seilen war ein stärkeres Stützenprofil und entsprechend grösser dimensionierte Fundamente notwendig.

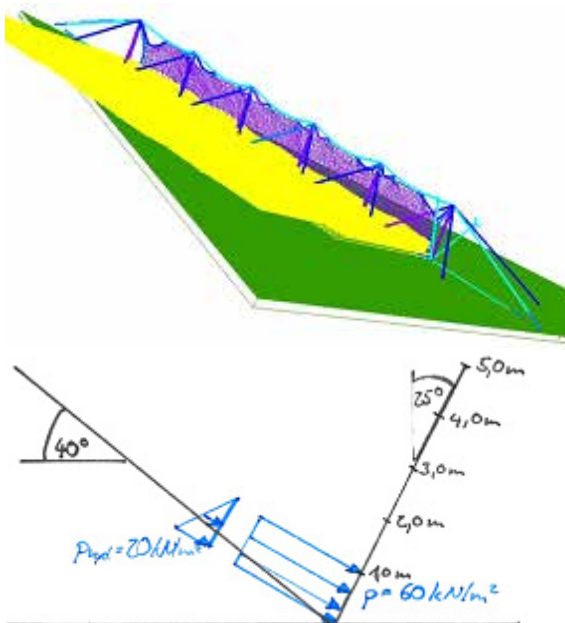


Abb. 10: Oben: FARO Simulation einer angepassten Steinschlagschutzverbauung. Unten: Darstellung der Belastung durch eine Hangmure mit einer Fliesstiefe von  $1 \text{ m}$ .

Eine maximale Auslastung von  $72 \%$  aller Komponenten zeigt ein angemessenes Sicherheitsniveau. Alle diese notwendigen Anpassungen gemäss den Simulationsergebnissen hatten keinen Einfluss auf die Aufnahmefähigkeit von  $2'000 \text{ kJ}$  für die getestete Steinschlagbarriere (WSL, Prüfbericht 07.04.2004). Das war ein wichtiges Konstruktionskriterium, welches ebenfalls durch Simulationen nachgewiesen wurde.

### Zusammenfassung

Durch die Häufung der Ereignisse bekommt der Schutz vor Naturgefahren einen immer höher Stellenwert. Wichtig ist die Einschätzung des Risikos, Schadensausmass und Eintretenswahrscheinlichkeit. Daraus ergeben sich oft komplexe Belastungen, für welche die Systeme nicht ausgelegt sind, da die Zulassungen nur bestimmte Lastfälle abdecken. Um die Schutzsysteme auf entsprechende besondere bzw. Multiple Belastungen auszulegen, zeigen sich Modellierungen bzw. analytische Berechnungen als gute Methoden. Wichtig ist die Validierung der Methoden mit 1:1 Feldversuchen und ggf. auch Modellversuchen. In den letzten 15 Jahren wurden entsprechende Erfahrungen im Bereich Steinschlagschutzsysteme mit FARO und seit etwa 10 Jahren im Bereich Murgang / Hangmure z.B. mit InterDyMFoam und OpenFoam gesammelt. Die angewendeten Methoden zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus 1:1 Feldversuchen. Wichtig ist auch die Verwendung verschiedener Modellierungssoftware bzw. Berechnungsmethoden, um die Ergebnisse zu kontrollieren und zu vergleichen. Gute Ergebnisse konnten jetzt mit dem Programm ABAQUS erzielt werden. Dies scheint am besten geeignet zu sein, um entsprechende Prozesse abzubilden. Die Forschung in diesem Bereich wird weiter gehen, um in Zukunft die Schutzsysteme besser auf komplexe Belastungen auslegen zu können.

### Literatur

- Bötticher A. (2012): Flexible Hangmurenbarrieren: Eine numerische Modellierung des Tragwerks, der Hangmure und der Fluid Struktur Interaktion. Dissertation TU-München, Deutschland.
- Bugnion L. und Wendeler C. (2011): Impact pressure measurements in shallow landslides. Proceedings of the Second World Landslide Forum. Rome, 3-7 October 2011.
- DeNatale J. S., Iverson R. M., Major J. J., LaHusen R.G., Fliegel G. L., Duffy J. D. (1999): Experimental Testing of flexible barriers for containment of debris flows, open-file report 99-205.
- EOTA 2008: ETAG 027, Falling Rock Protection Kits, Edition 2008-02-01, Brüssel, downloadbar unter [www.eota.eu](http://www.eota.eu)
- Gerber W. (2001 / 2008): Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern Schweiz.
- Rickli C. und Bücher H. 2005. Hangmuren ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.07.2002 im Napfgebiet und vom 31.08-1.09.2002 im Gebiet Appenzell – Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG.
- Volkwein A. (2004): Numerische Simulation von flexiblen Steinschlagbarrieren, Diss ETH- r. 15641, Zürich, Schweiz.
- Wendeler C. (2008): Murgangrückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Murgangbarrieren.
- WSL Eidg. Forschungsanstalt (2004): Prüfbericht 07.04 Bericht über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Schweiz.