

## **Felssturzinduzierte Flutwellen und Kaskadeneffekte in den Kanadischen Rocky Mountains – Fallbeispiel Cougar Creek**

Manfred Scheickl, David Powell

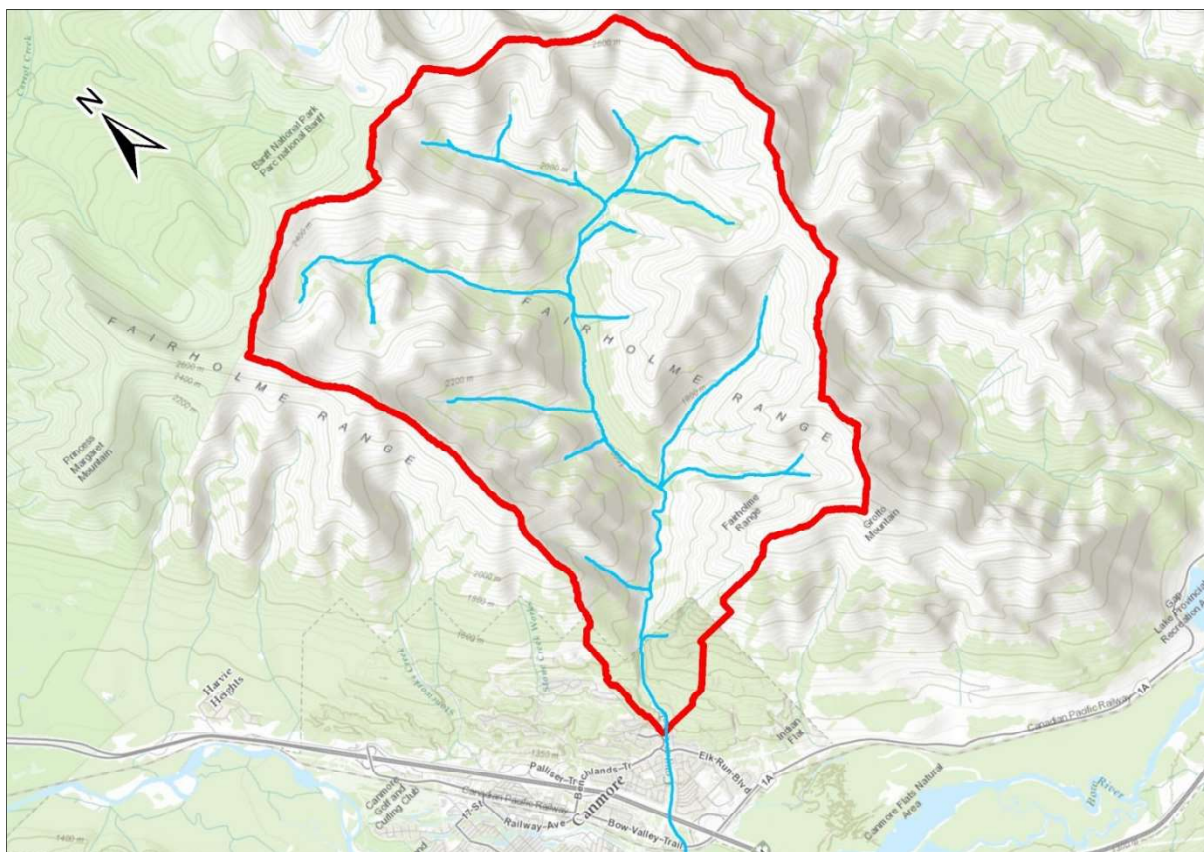
ALPINFRA Consulting + Engineering GmbH, Marktplatz 5, 5163 Mattsee

### **ABSTRACT**

At the Cougar Creek, a tributary of the Bow River in Alberta, Canada, a potential rock-slide was identified approximately 1.5km upstream of the apex of the alluvial fan. The investigation of historical flood events showed, that in the past, landslide dam outbreak floods (LDOFs) very likely lead to major impacts at the alluvial fan. During the Cougar Creek Debris Flood mitigation project, the potential rockslide was investigated by means of numerical run-out models based on the 3D topography and the physical approach of Voellmy (1955) which is implemented in the debris-flow software tool RAMMS::DBF. The run-out calculations were performed by using different parameter sets of well documented and well investigated rock-fall events for investigation parameter sensitivity. Based on the run-out modelling results, dam breach calculations were conducted with the dam erosion model BASEMENT of the ETH Zürich. The comparison of various parameter sets and contextualizing the results with local conditions provided a good insight into the mechanisms of LDOFs on the one hand and produced out-flow hydrographs could be used as basis for the design work of flood mitigation measures on the other hand.

### **EINLEITUNG**

Im Jahre 2013 trat der der Cougar Creek, der die Stadt Canmore (1.500m) in Alberta durchfließt, in Folge eines schweren Unwetters über die Ufer, überflutete Teile der Stadt, erodierte und zerstörte den Trans Canada Highway, den Highway 1A sowie die Querung der Canadian Pacific Railway Line. Im Rahmen nachfolgender Untersuchungen wurde erkannt, dass große Verklausungen mit Ablagerungshöhen von bis zu 30m in der Vergangenheit wiederkehrend zu Flutwellenbildung führten. Diese Verklausungen werden zum einen durch Muren aus steilen seitlichen Zubringern aber auch durch Felsstürze bzw. Felsgleitungen hervorgerufen. Fossile Reste einer erodierten Felssturzablagerung wurden rund 1,5 km bachaufwärts der Murkegelwurzel vorgefunden. Im Rahmen der Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen in Form eines rund 30m hohen Hochwasserrückhaltedammes zur Retention von rund 800.000m<sup>3</sup> Hochwasser wurde eine potenzielle Felsgleitung dahingehend und hinsichtlich der Einwirkung auf die geplanten Maßnahmen näher untersucht. Canmore liegt in den Kanadischen Rocky Mountains und entwickelt sich seit der Winterolympiade 1988 von einer kleinen Kohlebergbausiedlung zu einer Stadt mit ausgeprägtem Winter- und Sommertourismus in gut erreichbarer Nähe zu Calgary. Die immobilien Werte die in den letzten 5 bis 10 Jahren geschaffen wurden, profitieren von der überwältigenden Gebirgslandschaft, der weitgehend unberührten Natur mit unerschlossener Landschaft, in der man unter anderem Bären, Berglöwen, Kojoten und Elchen begegnet und die natürliche Waldgrenze erkennen kann. Das Einzugsgebiet des Cougar Creek liegt in der Fairholme Mountain Range und fließt in den Bow River, liegt nordöstlich der Stadt und ist rund 42km<sup>2</sup> groß. Es wird vom Mt. Townsend (2.820 m) im Nordosten, dem Mt. Fable (2.702 m) im Osten, dem Grotto Mountain (2.730 m) im Süden sowie dem Mt. Lady MacDonald (2.606 m) und dem Mt. Charles Stewart (2.797 m) im Westen eingerahmt.



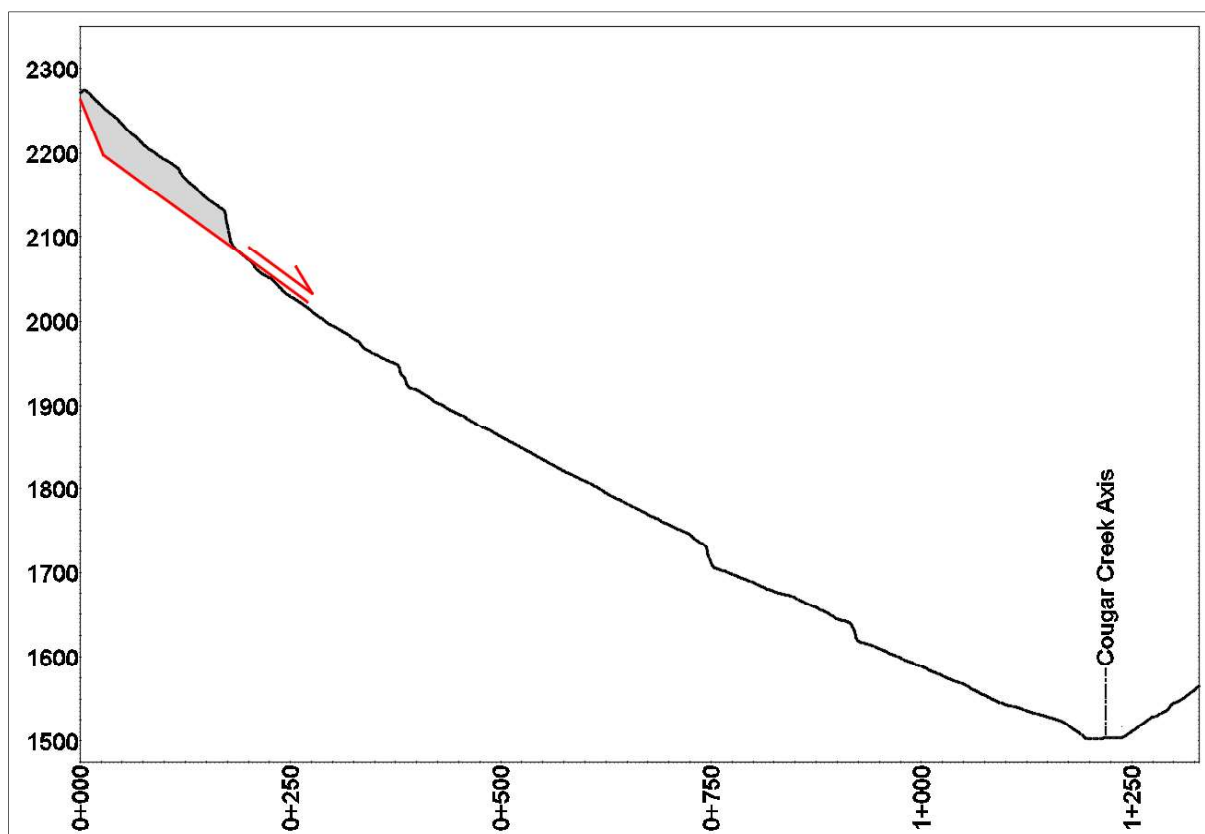
**Abb. 1.** Das Einzugsgebiet des Cougar Creek (source: ESRI)

### **GEOLOGISCHER RAHMEN**

Grob kann die regionale Geologie wie folgt zusammengefasst werden: Die Kanadischen Rocky Mountains (CRM) liegen als verfaltete Aufschiebungsstruktur vor, in der mächtige Einheiten erosionsresistenter paläozoischer Karbonate über stärker erodierbare, mesozoische Sandsteine und Schiefer nach Nordwesten geschoben wurden. Um Canmore liegen vier maßgebliche Gesteinseinheiten vor. An der Basis der CRM liegen die Gesteine der Nordamerikanischen kratonischen Platte mit einer Mächtigkeit von rund 30 – 50 km. Darüber liegen präkambrische und unterkambrischen Klastika und Karbonate mit einer Mächtigkeit von rund 10 km, bestehend aus verwitterten Gesteinen des kanadischen Schildes. Die rund 6,5 km mächtige "middle carbonate unit", die im mittleren Kambrium bis späten Jura gebildet wurde, besteht aus marinen Kalken und Dolomiten sowie Schiefen. Die obersten Einheiten, mit einer Mächtigkeit von rund 5 km setzen sich aus jungen jurassischen bis tertiären Sandsteinen, Schiefen, Konglomeraten sowie Kohleablagerungen zusammen.



Die Gesamtmächtigkeit beträgt rund 50m und die Felsmassen befinden sich zwischen 2060 m and 2260 m Seehöhe. Die Lage und der Längenschnitt entlang der Sturzbahn gehen aus Abb. bzw. Abb. hervor. Die Analyse der Trennflächen wurde auf Grundlage eines hochauflösenden ALS Datensatzes vorgenommen. Fotos wurden im Zuge einer Befliegung aufgenommen, die durch das Ingenieurbüro BGC Engineering Inc. dokumentiert wurde. Eine Stabilitätsanalyse zeigt, dass sich die vorliegende Situation aufgrund der vorliegenden Verzahnung und aufgrund von Materialbrücken stabil darstellt. Jedoch können Trennflächenwasserdrücke zur Überwindung der kohäsiv wirkenden Kräfte und zur niederschlagsinduzierten Ablösung der Felsmasse führen.



**Abb.4:** Längenschnitt durch die potenzielle Sturzbahn samt Ablöseform



**Abb.5:** Ansicht der potenziellen Felsgleitung (Foto von M. Jakob, BGC, 2014)

## NUMERISCHE ANALYSE DER FELSGLEITUNG

Die numerische Analyse der Felsgleitung wurde unter Verwendung der Software RAMMS-DBF durchgeführt und auf Grundlage von Kalibrierungsdatensätze aus Laborversuchen und von Rückrechnungen bekannter Felsstürze. Der physikalische Ansatz folgt der Formulierung von Voellmy (1955) die in den fließdynamischen Ansatz von Saint Venant bzw. die Flachwassergleichung implementiert wurde. Das Reibungsmodell von Voellmy (1955) beinhaltet den trockenen Reibungsbeiwert  $\mu$ , der zur Zunahme des Widerstandes mit steigender Normalspannung entsprechend  $\rho gh$  nach dem Reibungsgesetz von Mohr-Coulomb führt, sowie einen Turbulenzparameter  $\xi$ , der den Gesamtwiderstand des bewegten Volumens wie folgt reduziert:

$$S = \mu \rho H g \cos \phi + \frac{\rho g U^2}{\xi}$$

S = Gesamtwiderstand [Pa]

$\rho$  = Dichte

g = Erdbeschleunigung

$\Phi$  = Winkel der Sturzbahn

H = Fließhöhe

U = Fließgeschwindigkeit

***Numerische Annäherungen an Sturzprozesse laufen am Ende des Tages auf die Diskussion bzw. die Rechtfertigung der gewählten Parameter hinaus. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen wurden zur Untersuchung von Parametersätzen unter Verwendung des Reibungsterms von Voellmy für die Modellierung von Lawinen, Muren und Felsstürzen durchgeführt. Einige der Arbeiten, die sich auf Felsstürze beziehen, werden in Tabelle 3 angeführt. Im Vorfeld der Untersuchung der Felsgleitung wurden Nachrechnungen dokumentierter Ereignisse und von Laborversuchen unter Verwendung der Parameter der in Tabelle 3 angeführten Autoren durchgeführt. Eine Sensitivitätsanalyse wurde anhand der in***

Tabelle 4 angeführten Parameter durchgeführt.

**Tabelle 3:** Referenzen für Berechnungsparameter

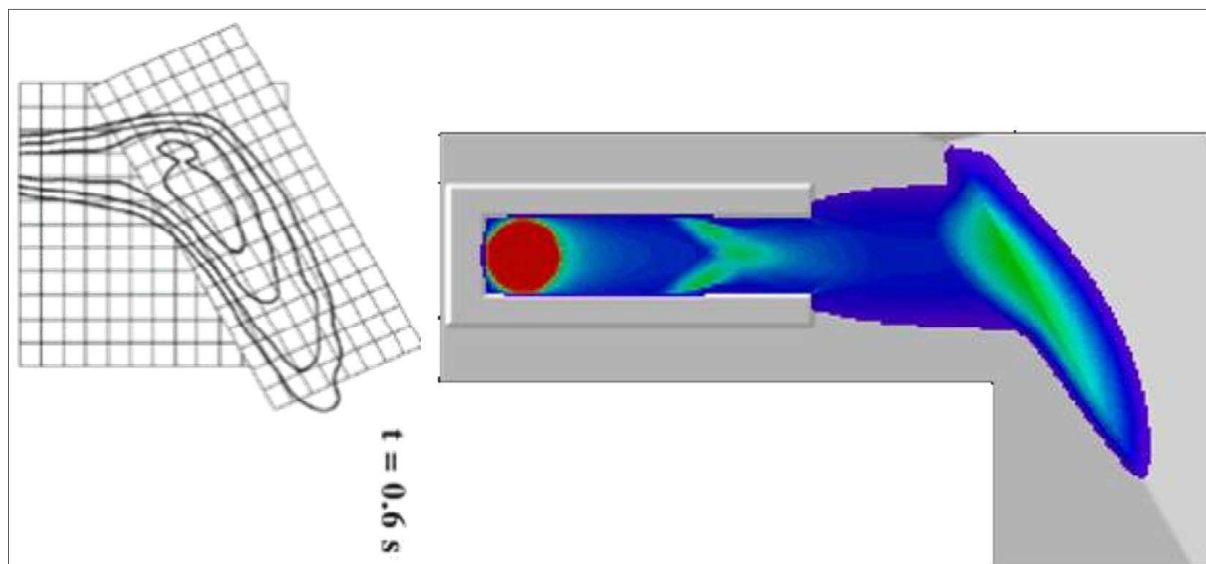
ID	Bezeichnung	Quelle
[1]	Trial and Error	Trial and Error basierend auf den lokalen Felsparametern
[2]	Hochmais	Rückrechnung des Felssturzes Hochmais (2015).
[3]	Hungr & Evans (1996)	Best-Fit Parameter Frank Slide
[4]	Hungr & Evans (2004)	Best-Fit
[5]	McDougall & Hungr (2004)	Laborversuche

**Tabelle 4:** Berechnungsparametersätze für Kalibrierberechnungen

Parameter Set	$\mu$	$\xi$
---------------	-------	-------

[1] Trial and Error	0.36 ( $\pm 20^\circ$ )	600
[2] Hochmais	0.65 ( $\pm 33^\circ$ )	225
[3] Hungr/Evans (1996)	0.10 ( $\pm 5.7^\circ$ )	700
[4] Hungr/Evans (2004)	0.05 ( $\pm 2.9^\circ$ )	400
[5] McDougall/Hungr (2004)	0.58 ( $\pm 30^\circ$ )	750

Ein für den untersuchten Fall sehr interessanter Parametersatz stammt aus Laborgroßversuchen von McDougall & Hungr (2004). Der experimentelle Ansatz besteht aus seiner  $33^\circ$  geneigten Rutsche, die am unteren Ende der Sturzbahn um  $60^\circ$  in der Horizontalen abgelenkt wurde, ähnlich wie die Situation am Cougar Creek vorliegt. Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurde aus dem experimentellen Setup ein synthetisches Höhenmodell generiert und die Versuche wurden für Kalibrierungszwecke nachgerechnet. Die "best-fit" Parameter für den maßgeblichen Zeitschritt 0,6s sind 0,58 für den Reibbeiwert  $\mu$  and 750 für den Turbulenzparameter  $\xi$ . Diese Werte ergeben zudem eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die seitens der Autoren mit dem Berechnungscodes DAN3D errechnet wurden. Aus Abb. geht der Vergleich zwischen den gemessenen und den berechneten Ablagerungsformen hervor.



**Abb. 6:** Links: Laborversuch von McDougall & Hungr (2004); Rechts: Nachrechnung mit RAMMS:DBF

## BERECHNUNGSERGEBNISSE

**Die numerische Abschätzung der Dammbildung, die aus der potenziellen Felsgleitung hervorgehen kann, ist für die Berechnung eines Verkläuerungsbruches und des resultierenden Ausgangshydrographen bzw. der resultierenden Flutwelle von hoher Relevanz. Aus Abb. gehen die Ablagerungsformen unter Verwendung der unterschiedlichen und oben diskutierten Parametersätze im Graben-Querprofil hervor. Abb. zeigt das Relief der resultierenden Felssturzaflagerung samt Stauseebildung für den Parametersatz [1]. Generell zeigen die Parametersätze [1] und [5] gemäß**

Tabelle 4 plausible Geometrien für einen granularen, blockigen Felssturz mit verhältnismäßig kurzen Sturzlängen.

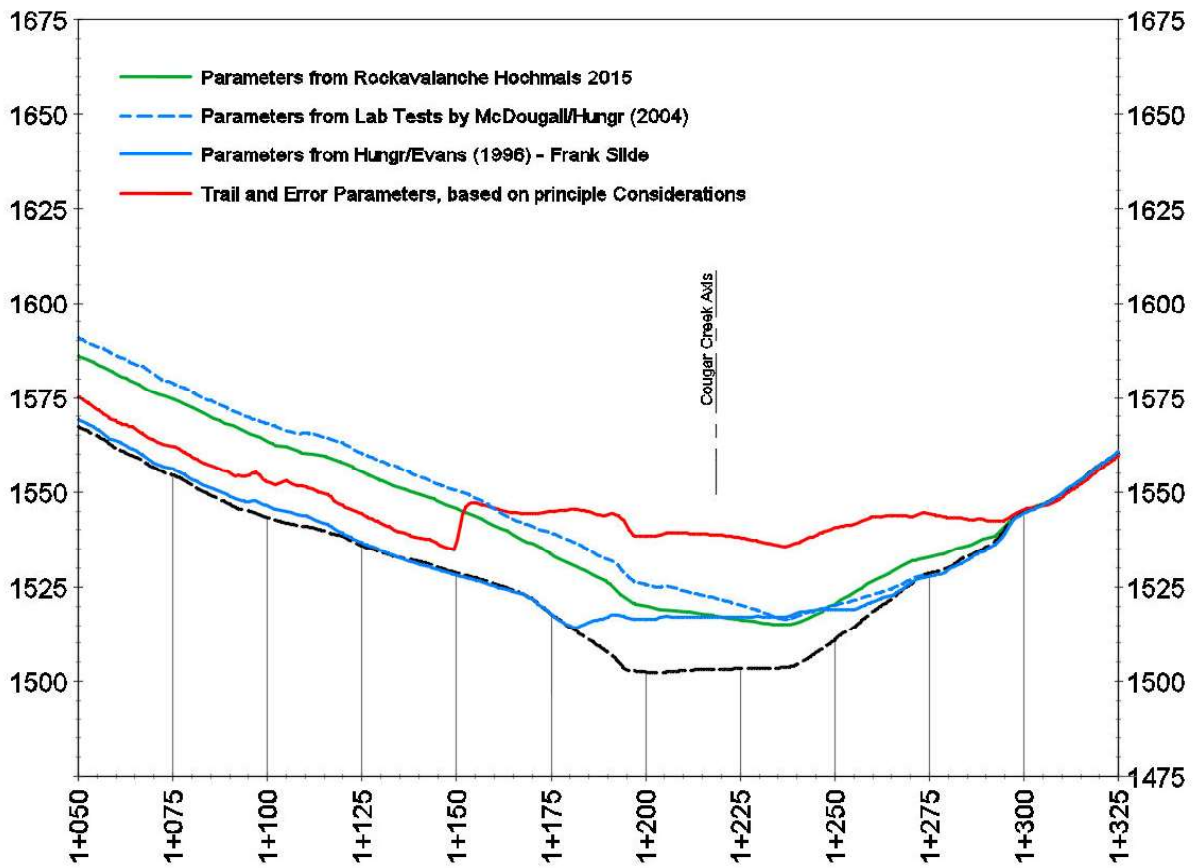


Abb. 7: Ablagerungsformen unter Verwendung von Parametersätzen aus dokumentierten Ereignissen

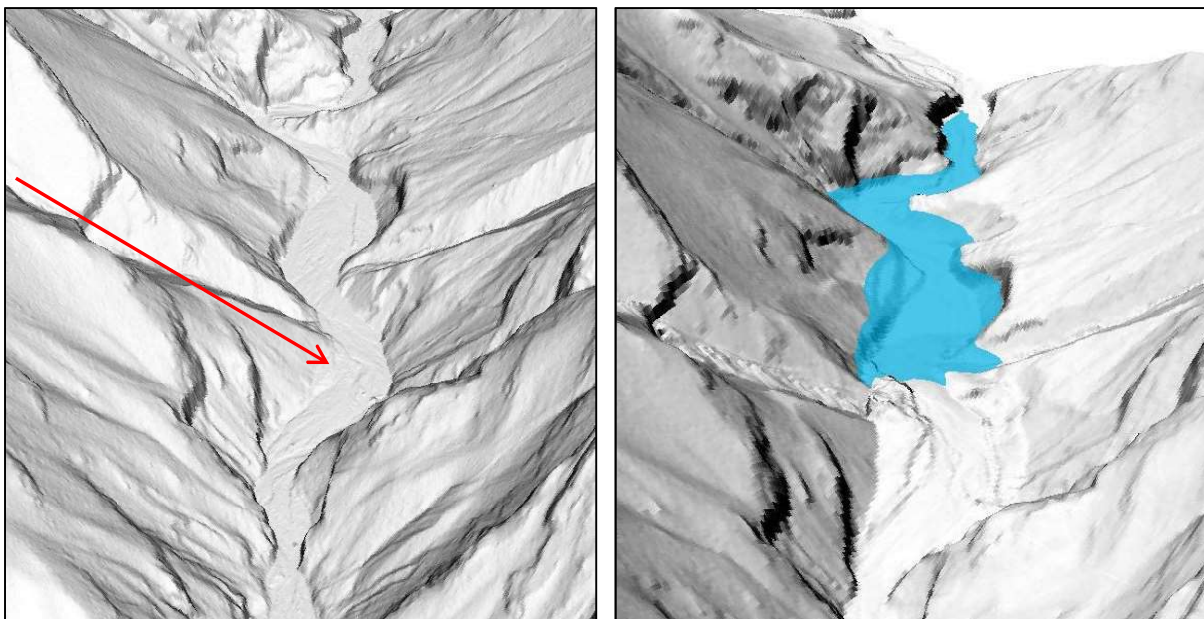


Abb. 8: Aktuelles Relief (links) und berechnete Ablagerung sowie Stauseebildung (rechts)

## DAMMBRUCH UND FLUTWELLENBERECHNUNG

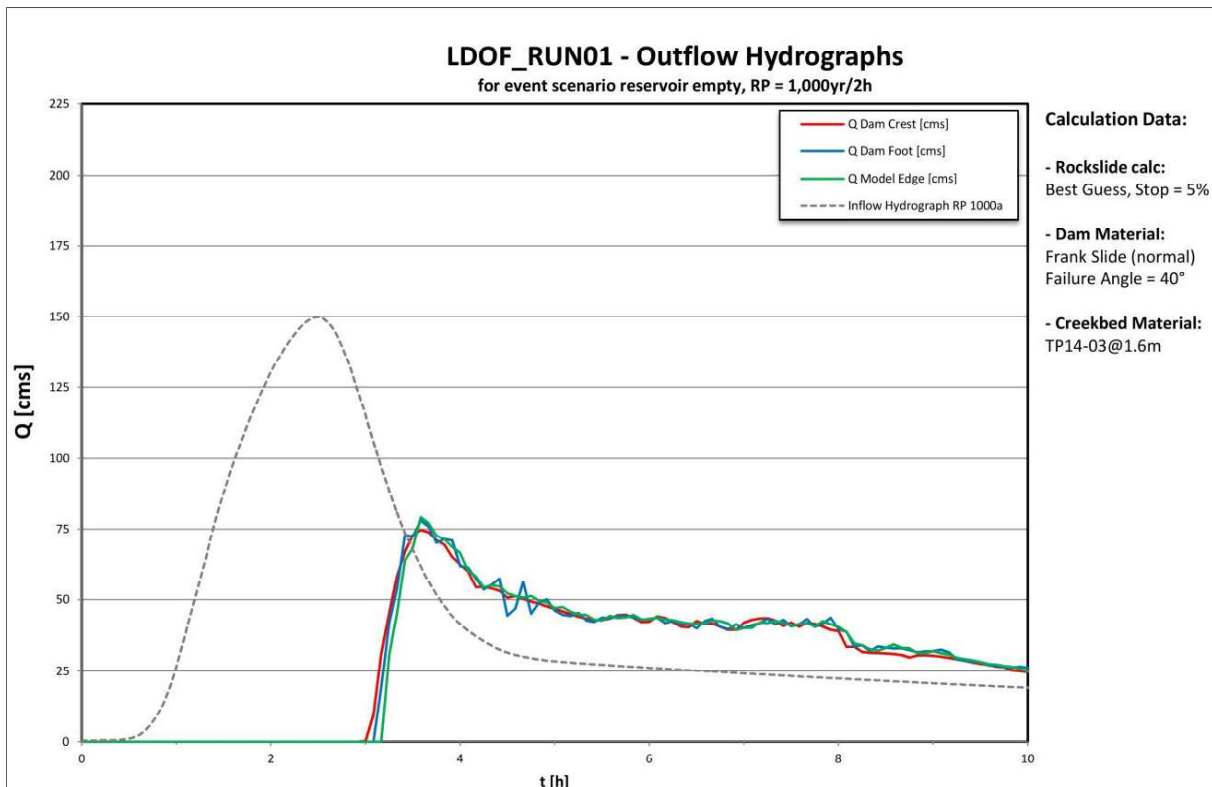
**Eine vergleichende Dammbrechberechnung wurde mit dem Analysecode BASEMENT (ETH) unter Zugrundelegung der unterschiedlichen berechneten Ablagerungsformen in 3D und von unterschiedlichen Materialparametern entsprechend**

Tabelle 5 durchgeführt. Als hydrologische Ausgangssituation wurde dem Felssturzereignis ein Hochwasser überlagert, das aus einem 2h Niederschlag mit einer Wiederkehrperiode von 1000 Jahren hervorgeht. Die Niederschlags-Abflussberechnungen wurden mittels HEC-HMS durchgeführt. Die Berechnungen zeigen, dass die Verwendung der Parameter aus dem Frank-Slide, der sich durch eine verhältnismäßig große Reichweite und eine sehr starke Zertrümmerung der Komponenten auszeichnet, eine verhältnismäßig flache Ablagerungsform mit großer Reichweite und geringen Stauvolumina sowie kleinen Bruch-Hydrographen ergibt. Hingegen zeigen die Berechnungen unter Verwendung der Parameter von McDougall/Hungr (2004) sowie die Trail and Error Parameter höhere Dammhöhen und folglich höhere Stauvolumen und Spitzenabflüsse. Vergleichende Bruchhydrographen für das Szenario 01 und 08 gehen aus Abb. und Abb. hervor.

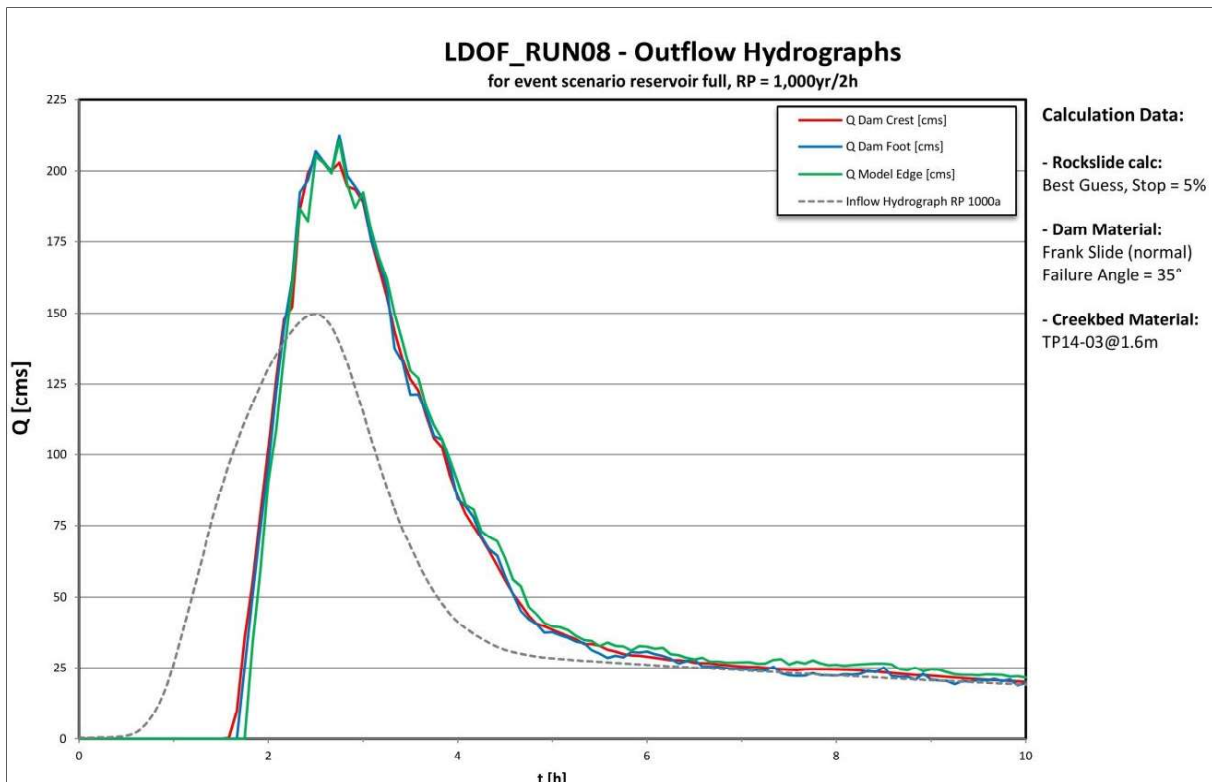
**Tabelle 5: Berechnungsvarianten für den Verklauungsbruch und resultierende Spitzenabflüsse**

Szenario	Zusammensetzung des Materials	Grenzreibungswinkel des Dammmaterials	Ausgangssituation	10h Abfluss [m <sup>3</sup> ]	Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]
01	Frank Slide	40°	Leer	1.061.892	75
02	Frank Slide Max. Korndurchmesser x 1,5	40°	Leer	830.609	70
03	Frank Slide Max. Korndurchmesser x 0,5	40°	Leer	1.106.187	85
04	Frank Slide	40°	Stauspiegel bei 1.535m	1.884.268	200
05	Frank Slide	40°	Leer	1.597.086	165
06	Frank Slide	40°	Stauspiegel bei 1.516m	1.679.453	160
07	Frank Slide	35°	Leer	809.276	75
08	Frank Slide	35°	Stauspiegel bei 1.535m	1.864.242	215
09	Frank Slide	37.5°	Leer	928.027	75
10	Frank Slide	37.5°	Stauspiegel bei 1.535m	1.843.289	205
11	Frank Slide	35°	Leer	1.603.041	165
12	Frank Slide	35°	Stauspiegel bei 1.516m	1.685.071	170
13	Frank Slide	37.5°	Leer	1.594.775	165
14	Frank Slide	37.5°	Stauspiegel bei 1.516m	1.687.359	160





**Abb.9:** Dambruchhydrograph – Parametersatz 01



**Abb. 10:** Dambruchhydrograph – Parametersatz 08

## LITERATUR

ALPINFRA 2015: Report on the Rockslide Mitigation Measures Hochmais – TIWAG Kraftwerk Gepatsch/Kaunertal.

BGC Engineering Inc. (BGC). 2014. Town of Canmore. Cougar Creek Debris Flood Hazard Assessment - Final. Report prepared for the Town of Canmore. Vancouver. British Columbia. March 7. 2014

Cruden. D.M. and O. Hungr (1986): The debris of the Frank Slide and theories of rockslide–avalanche mobility. In: Canadian Journal of Earth Sciences. 1986. 23(3): 425-432. 10.1139/e86-044

Hungr. O. and Evans. S.G. (1996): Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. Procs.. 7th. International Symposium on Landslides. Trondheim. Norway. 1:233-238.

Hungr. O. and Evans. S.G. (2004): Entrainment of debris in rock avalanches: An analysis of a long run-out mechanism. GSA Bulletin; Sept./Oct. 2004. v.116. p9/10.

McDougall. S. and Hungr. O. (2004): A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. Can. Geotech. J. 41. 1084-1097.

Voellmy. A. 1955. Ober die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung. Jahrg. 73. Ht. 12. p. 159-62; Ht. 15. p. 212-17; Ht. [7. p. 246- 49; Ht. 19. p. 280-85·Volz C.. Rousselot P.. Vetsch D.. Mueller R.. Faeh R. and Boes R. 2010: Numerical Modeling of Dam Breaching Processes Due to Overtopping Flow. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW). ETH-Zurich. CH-8092 Zurich. Switzerland.