

Gravitative Prozesse in der Bondasca – Von der Gefahrenbeurteilung zur Umsetzung der Schutzmassnahmen

Jeannette Gabbi, Christian Tognacca, Martin Keiser

Zusammenfassung

Die infolge des Bergsturzes am Piz Cengalo vom 23. August 2017 ausgelösten Murgänge haben innerhalb weniger Tage enorme Mengen an Geschiebe nach Bondo verfrachtet und grosse Zerstörung hinterlassen. Auslöser dieser gewaltigen Murgänge war eine unerwartete Prozessverkettung aus Bergsturz und unmittelbarem Schuttstrom. Bereits im Dezember 2011 ereignete sich ein Bergsturz am Piz Cengalo mit rund 1.5 Mio. m³. Eine wie 2017 beobachtete Prozessverkettung blieb jedoch aus, und es kam erst im darauffolgenden Sommer aufgrund von intensiven Niederschlägen zu Murgängen. Das damals grösste beobachtete Ereignis von Ende August 2012 führte zu massiven Auflandungen in Bondo und zu Schäden am Campingplatz. Um die Sicherheit zu gewähren, wurde im Jahr 2013 eine Murgang-Alarmanlage in Betrieb genommen und die Planung des Schutzbautenprojekts angegangen. Trotz anfänglichem Widerstand in der Bevölkerung wurde dem Bau eines Auffangbeckens zugestimmt, welches 2015 fertiggestellt wurde. Dank diesem Schutzbauwerk und der Alarmbereitschaft konnten die Schäden der Ereignisse 2017 in Grenzen gehalten werden. Angesichts der immer noch anhaltenden Gefährdung am Piz Cengalo sind neue Schutzmassnahmen in Planung, welche umfassenden Schutz vor grossen Murgangereignissen, wie sie 2017 beobachtet wurden, bieten sollen.

Gewitterniederschlägen zu Hochwassern mit intensivem Geschiebetrieb und Murgängen. Das grösste Murgangereignis vom 24./25. August 2012 hinterliess mächtige Auflandungen in Bondo und führte zu Schäden am Campingplatz (Bild 3). Menschen und Tiere kamen dabei nicht zu Schaden. Um die Sicherheit zu gewähren, wurde im Jahr 2013 eine Murgang-Alarmanlage in Betrieb genommen und die Planung des Schutzbautenprojekts angegangen. Trotz Widerstand in der Bevölkerung wurde in der Folge ein Auffangbecken rea-

lisiert, welches einerseits Schutz vor weiteren Murgängen bietet und andererseits auch das Landschafts- und Dorfbild möglichst berücksichtigt. Der Rückhalteraum wurde auf ein 100-jährliches Ereignis plus Freibord bzw. ein 300-jährliches Ereignis (bordvoll) dimensioniert und bietet Platz für rund 170 000 m³ Geschiebe. Im August 2017 folgten mit dem nächsten Bergsturz am Piz Cengalo mit 3 Mio. m³ (Bild 2) weitere Murgangereignisse, welche alles bisher Dagewesene übertroffen haben. Aus den durchfeuchteten Bergsturzab-

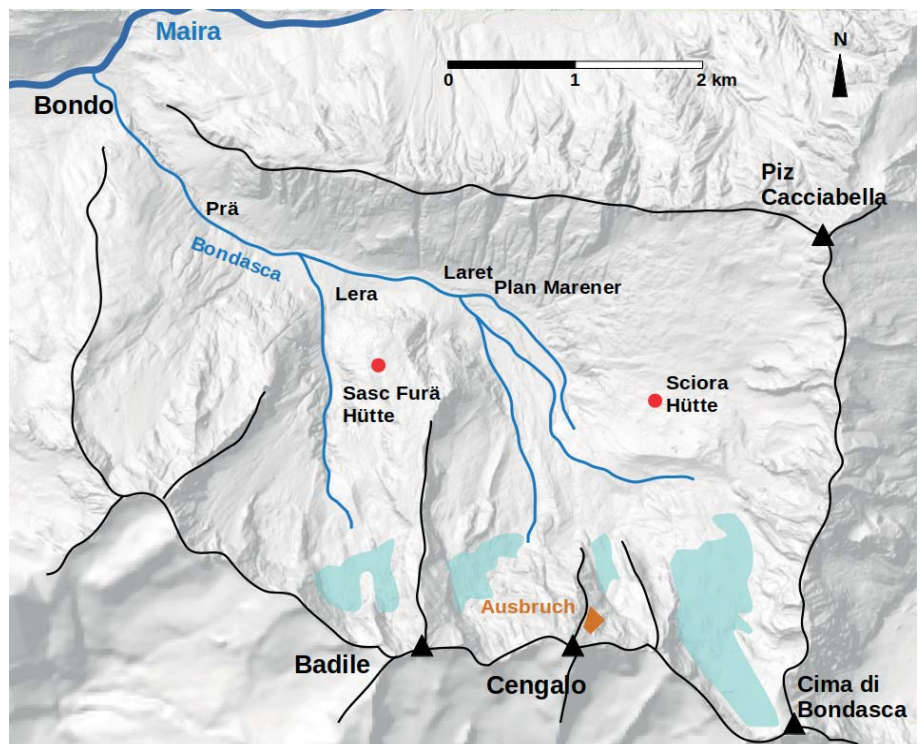


Bild 1. Lokalisierung der Naturereignisse Pizzo Cengalo – Bondo.



Bild 2. Ablagerungen der Bergsturzereignisse am Piz Cengalo von Dezember 2011 (links) und August 2017 (rechts) im Vergleich.

1. Einleitung

Ende Dezember 2011 ereignete sich ein Bergsturz mit ca. 1.5 Mio. m³ am Piz Cengalo und lagerte sich im hinteren Val Bondasca ab (Bild 2). Zum damaligen Zeitpunkt bestand keine akute Gefährdung, weder für das Siedlungsgebiet noch für die Verkehrsinfrastruktur. Erst im darauffolgenden Sommer kam es aufgrund von



Bild 3. Das Gerinne der Bondasca im Bereich Bondo vor (links) und nach den Murgangereignissen von Sommer 2012 (rechts).



Bild 4. Ablagerungen im Bereich des Auffangbeckens in Bondo nach den Murgängen vom August 2017.

	Ereignistyp	Datum	Volumen	Abfluss	Auslösemechanismus
2011/12	Bergsturz	27.11.2011	1.5 Mio. m ³	-	-
	Murgänge	Jul/Aug/Sep 2012	40'000 m ³	900 m ³ /s	infolge Niederschläge
2017	Bergsturz	23.08.2017	3.0 Mio. m ³	-	-
	Schuttstrom	23.08.2017	545'000 m ³	4'000 m ³ /s	ohne Niederschläge
	9 Murgänge	23.08.2017	220'000 m ³	-	ohne Niederschläge
	2 Murgänge	25.08.2017	55'000 m ³	1'000 m ³ /s	ohne Niederschläge
	1 Murgang	31.08.2017	225'000 m ³	1'500 m ³ /s	infolge Niederschläge
	Felssturz	15.09.2017	400'000 m ³	-	-

Tabelle 1. Die Bergstürze am Piz Cengalo von 2011 und 2017 und die entsprechenden Folgeprozesse (Quellen: [1], [3]).

lagerungen bildeten sich, zunächst ohne jegliche Beteiligung von Niederschlägen, grosse Murgänge, welche innerhalb von neun Tagen rund 500'000 m³ Geschiebe in den Rückhalteraum eingetragen haben (Bild 4). Diesmal verliefen die Ereignisse jedoch nicht so glimpflich ab wie in den Jahren zuvor. Es entstand erheblicher Sachschaden an Gebäuden und Infrastruktur mit einer Schadenssumme von insgesamt 41 Millionen Franken. Angesichts des Ausmasses der Ereignisse fielen die Schäden jedoch verhältnismässig gering aus. Dies dank dem robusten und überlastbaren System.

Der vorliegende Artikel präsentiert neben einem umfassenden Beschrieb und der Analyse der im Val Bondasca abgelaufenen Ereignisse der vergangenen Jahre, die daraus abgeleiteten Szenarien und Gefahrenkarten für (1) die Situation nach den Ereignissen 2011/12 und (2) nach den Ereignissen 2017. Des Weiteren werden die 2015 ausgeführten sowie die neu projektierten Schutzmassnahmen vorgestellt

und schliesslich die Lehren aus den Ereignissen gezogen.

2. Bergstürze am Piz Cengalo und Folgeprozesse

2.1 Ereignisse 2011/2012

Am Abend des 27. Dezember 2011 ereignete sich ein grosser Bergsturz am Piz Cengalo (Tabelle 1). Rund 1.5 Mio. m³ Fels haben sich aus der Nordostflanke des Piz Cengalo gelöst und mächtige Ablagerungen im oberen Val Bondasca hinterlassen. Die Bergsturzaflagerungen erstreckten sich vom Fusse des Piz Cengalo (2200 m ü. M.) bis etwas oberhalb von Plan Marener (1450 m ü. M.) und erreichten Mächtigkeiten von bis zu 20 m (Bild 1).

Im Verlauf des Sommers 2012 ereigneten sich mehrere Murgänge im Val Bondasca (Quelle: [1]). Heftige Gewitterniederschläge in den Monaten Juli, August und September führten zu intensivem Geschiebetrieb und Murgängen im Val Bondasca, welche teilweise bis nach Bondo

vordrangen. Der Ursprung dieser Phänomene ist auf die frischen und mächtigen Bergsturzaflagerungen zurückzuführen.

Die Niederschläge vom 5./6. Juli haben durch progressive Erosion in den Sturzaflagerungen Murgänge ausgelöst, welche sich im oberen Bereich der Sturzaflagerungen entwickelt haben. Die Murgänge haben im unteren Bereich der Sturzaflagerungen tiefgründige Erosionen in der Grössenordnung von 10 m hinterlassen. Die Niederschläge waren bezüglich Dauer und Intensität jedoch nicht ausserordentlich gross, und die Murgänge haben Bondo nicht erreicht. Der Hauptteil der Ablagerungen blieb zwischen dem Fusse der Sturzaflagerungen und der Wasserfassung in Prä (1080 m ü. M.) liegen, während das feinere Material bis in die Maira transportiert wurde (Bild 1). Eine Analyse der Niederschläge vom 5./6. Juli hat ergeben, dass die maximale 1-Stunden-Intensität 5 mm/h betragen hat, wobei maximale Intensitäten von 1 mm in 5 Minuten registriert wurden. Die Niederschlagssumme des Ereignisses betrug insgesamt 16 mm.

Das darauffolgende Unwetter vom 13./14. Juli hat zu weiteren Erosionen in den Bergsturzaflagerungen und den neuen Ablagerungen entlang der Bondasca geführt. Auch in diesem Fall blieb der Hauptteil des Materials im Val Bondasca zwischen der Sturzfront und Prä liegen. Die 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten waren vergleichbar mit dem Ereignis vom 5./6. Juli (6–7 mm/h) mit maximalen Intensitäten von 5 mm in 5 Minuten. Die Summe der Niederschläge betrug ca. 38 mm für das gesamte Ereignis.

Beim Ereignis vom 24./25. August wurden hingegen deutlich höhere 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten (maximal 30 mm/h) und -summen (insgesamt 95 mm in 42 Stunden) gemessen als bei den bei-

den Ereignissen im Juli. Das Ereignis vom August hat grosse Murgänge ausgelöst, die bis zur Maira vorgedrungen sind, und sehr intensiven Geschiebetransport mit sich gebracht. Es war das deutlich grösste Ereignis im Jahre 2012.

Das nächste Ereignis vom 24./25. September, das letzte Ereignis im Sommer 2012, ist durch ähnliche Niederschlagsverhältnisse wie beim zweiten Ereignis im Juli gekennzeichnet. Die maximalen 1-Stunden-Niederschlagsintensitäten waren nur wenig höher als am 13./14. Juli mit einer maximalen 1-Stunden-Intensität von 4 mm in 5 Minuten. Die Niederschlagssumme des Ereignisses betrug rund 35 mm. Auch bei diesem Ereignis waren die meisten Ablagerungen im oberen Bereich des Bondasca-Tals, zwischen der Bergsturzfront und Prä zu finden (Bild 1). Wie auch bei den beiden Ereignissen im Juli waren die Niederschläge zu wenig intensiv, um relevante Geschiebemengen bis nach Bondo zu transportieren.

2.2 Ereignisse 2017

Am Morgen des 23. August 2017 lösten sich aus der Nordostflanke des Piz Cengalo auf ca. 3000 m ü. M. rund 3 Mio. m³ Fels (Tabelle 1). Die Felsmassen stürzten zunächst auf den sich darunter befindenden Gletscher, flossen dann über moderat geneigte Schutthänge, über eine Felsstufe (1800–1900 m ü. M.) hinweg in Richtung Talboden und lagerten sich im Raum Laret (1380 m ü. M.) ab (Bild 1). Die Ablagerungen türmten sich bis 35 m hoch. Rund ein Drittel des Ausbruchmaterials hat sich oberhalb der Felsstufe, zwei Drittel haben sich unterhalb der Felsstufe abgelagert (Bild 5). Durch die Einwirkung des Sturzes wurden 600 000 m³ Eis des Cengalo-Gletschers sowie 480 000 m³ Lockermaterial aus den alten Bergsturzablagern von 2011 unterhalb der Felsstufe erodiert (Quelle: [3]).

Durch die Aufnahme von Gletschereis wurde die Bergsturzmasse so weit gesättigt, dass sich in der Folge ein Schuttstrom mit einer Kubatur von 545 000 m³ entwickelt hat, der enorme Ablagerungen im Val Bondasca mit Mächtigkeiten von bis zu 10 m hinterlassen hat. Der Schuttstrom kam in Bondo kurz unterhalb der alten Brücke am Kegelhals zum Stillstand.

Daraufhin hat sich aus den durchfeuchteten Bergsturz- und Schuttstromablagern eine Serie von Murgängen entwickelt, die massive Geschiebemengen in den Rückhalteraum in Bondo eingetragen haben. Am Kegelhals wurden durch den Schuttstrom und den ersten Murgang

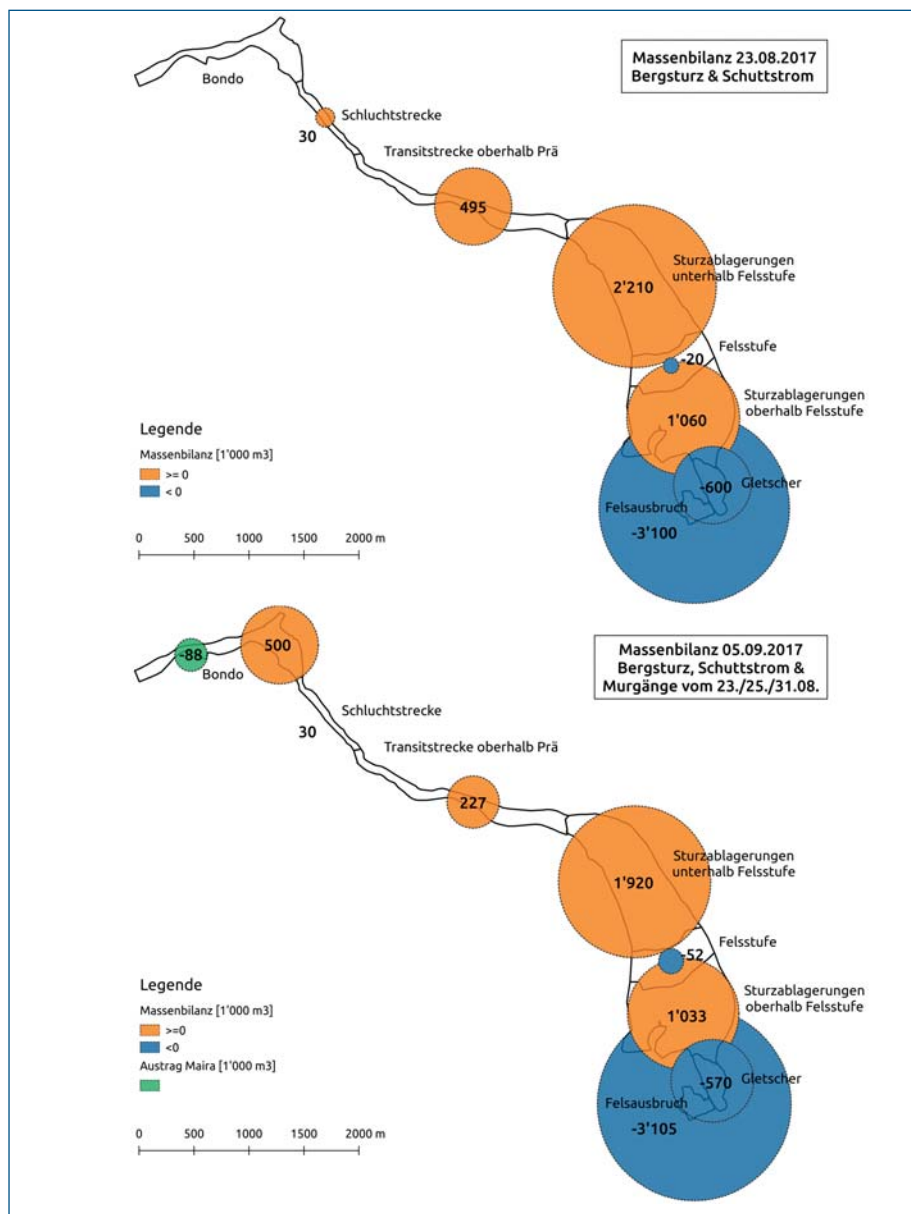


Bild 5. Massenbilanz vom 23. August 2017 nach dem Bergsturz (oben) und die Gesamtbilanz aller Ereignisse von August 2017 (unten, Quelle: [3]).

mehrere Gebäude zerstört. Gegen Abend des 23. August wurde die Kapazität des Auffangbeckens überschritten, und in der Folge kam es zu Übermürungen bei der Kantonsstrassenbrücke sowie am unteren Dorfrand oberhalb der Kantonsstrasse, wodurch mehrere Gebäude erfasst wurden. Insgesamt kamen im Verlaufe des 23. August rund 220 000 m³ Material im Bereich des Geschiebesammlers zur Ablagerung. Aus Sicherheitsgründen musste das Dorf Bondo vollständig evakuiert werden.

Am Nachmittag des 25. August löste sich aus den labilen Massen ohne Beteiligung von Niederschlägen ein weiterer grosser Murgang mit rund 70 000–85 000 m³ aus. Zum grössten, beobachteten Murgang kam es jedoch erst einige Tage später, am Abend des 31. August 2017. Heftige Gewitterniederschläge vermochten rund 260 000–285 000 m³ Mate-

rial aus den Bergsturzablagern zu mobilisieren, welche sich im Bereich der Einmündung der Bondasca in die Maira sowie in der Maira selbst abgelagert haben. Infolgedessen kam es zu einem Rückstau der Maira, welcher zu Überschwemmungen bis Mulin führte. Aber auch in Spino, unterhalb der Einmündung der Bondasca, kam es zu Überflutungen, wodurch mehrere Personen evakuiert werden mussten. Insgesamt haben die Murgänge vom 23., 25. und 31. August innerhalb von neun Tagen rund 500 000 m³ Material nach Bondo verfrachtet (Bild 5).

Am 15. September 2017 wurden durch einen Nachsturz weitere 400 000 m³ Fels aus der Nordostwand des Piz Cengalo mobilisiert. Dank der ausgesprochen trockenen Verhältnisse seit Anfang September blieben weitere Murgangereignisse aus, was eine schnelle und effiziente Räu-

Wiederkehrperiode	Szenarien 2012/13		Szenarien 2017/18	
	Abfluss	Kubatur	Abfluss	Kubatur
100 Jahre	650 m ³ /s	140'000 m ³	200-1'200 m ³ /s	250'000 m ³
300 Jahre	950 m ³ /s	200'000 m ³	300-1'200 m ³ /s	300'000 m ³
Extremereignis	1'100 m ³ /s	265-330'000 m ³	500-1'450 m ³ /s	475-575'000 m ³

Tabelle 2. Der Gefahrenkarte zugrunde liegende Murgangsszenarien, welche nach den Ereignissen 2011/12 definiert und infolge der Ereignisse 2017 überarbeitet wurden.

mung des Rückhalteriums ermöglichte. Ein Grossaufgebot an Maschinen und die neu angelegten Deponien in der Nähe erlaubten die Aufräumarbeiten bereits Ende Oktober weitestgehend abzuschliessen, sodass auch die Bewohner der gesperrten Zone wieder in ihre Häuser zurückkehren konnten.

3. Analyse und Szenarien 2012/13

3.1 Szenarien 2012/13

Basierend auf den Erkenntnissen der Ereignisse 2012/13 wurden drei relevante Phänomene, welche massgebend für die Gefährdung am Kegelhals sind, definiert:

- (1) Granulare Murgänge infolge progressiver Erosion,
- (2) Hochwasser mit starker Geschiebeführung sowie
- (3) eine Kombination von Murgängen mit Hochwasserereignissen.

Für alle drei Prozesse wurden in der Folge Szenarien definiert (Quelle: [1]). Die Hochwasserszenarien für die Bondasca wurden mittels Niederschlags-Abfluss-Simulationen bestimmt, während die Geschiebefrachten am Kegelhals anhand eindimensionaler Simulationen hergeleitet wurden. Mittels der Methode nach Tognacca (Quelle: [7]) wurden die Murgangabflüsse für das obere Ende der Schluchtstrecke bei Prä berechnet. Die Murgangkubaturen

wurden ermittelt indem das Wasservolumen, welches von der Murwelle auf dem Weg vom Auslöseort bis zur Schlucht aufgenommen wird, mit der mittleren Konzentration des Murganges multipliziert wurde.

Der für die Gefährdung am Kegelhals massgebende Prozess ist eine Kombination aus intensivem Geschiebetrieb und einem Murgang (Tabelle 2). Die Kubaturen liegen zwischen 140 000 und 330 000 m³, die Abflüsse zwischen 650 und 1100 m³/s, je nach Auftretenswahrscheinlichkeit.

3.2 Simulationen 2012/13

Um die Gefährdung ausgehend von Hochwasser- und Murgangereignissen aus der Bondasca zu ermitteln, kam ein zweidimensionales numerisches Modell zur Anwendung, welches den gesamten Kegel der Bondasca abdeckt. Das Modell umfasst das Gebiet vom Ausgang der Schlucht bis zur Einmündung in die Maira sowie einen Abschnitt der Maira zwischen Sot Punt und Spino. Das Terrainmodell, mit einer Auflösung von 10 m², basiert auf den Daten der amtlichen Vermessung. Für die Hochwassersimulationen wurde ein Strickler-Beiwert von 22 m^{1/3}/s für Bereiche mit starken Geschiebablagerungen gewählt, während für alle anderen Bereiche ein Wert von 28 m^{1/3}/s verwendet wurde. Die 2-D-Simulationen wurden ohne Geschiebetransport durchgeführt, da dies einen unverhältnismässig grossen

Rechenaufwand mit sich bringen würde. Basierend auf den Ergebnissen der 1-D-Simulationen wurden jedoch die Koten für Bereich mit starken Aufladungen entsprechend angepasst.

Für die Simulationen der Murgänge kam dasselbe zweidimensionale Modell wie für die Hochwassersimulationen zum Einsatz. Zur Beschreibung der Murgangrheologie wurde ein turbulentes Modell mit einer Grenzschubspannung verwendet, mit welchem das hydrodynamische Verhalten von Murgängen infolge von progressiver Erosion gut beschrieben werden kann. Die Grenzschubspannung wurde zwischen 1000, 1500 und 3000 N/m² variiert, um die natürliche Streubreite der rheologischen Parameter zu berücksichtigen. Die Murgang- und Hochwassersimulationen wurden mit dem Programm FLUMEN durchgeführt (vgl. www.fluvial.ch). Die rheologischen Parameter für die Murgänge wurden anhand der Nachrechnungen der beobachteten Ereignisse (sowohl 2012 wie auch 2017) validiert. Eine ausführliche Beschreibung der numerischen Methoden und der Resultate der Nachrechnungen ist in Vorbereitung (Quelle: [8]).

3.3 Gefahrenkarte 2013 und Schutzdefizite

Die aus den Simulationen abgeleitete Gefahrenkarte zeigt erhebliche Gefährdung (rot) für einen grösseren Bereich der Gewerbezone am linken Ufer gegenüber der Mehrzweckhalle, für einen grossen Teil des Campingareals, für das Wohngebiet auf der linken Uferseite oberhalb der Kantonsstrasse sowie für die Gebäude bei der alten Brücke am Kegelhals (Bild 6). Mittlere Gefährdung (blau) umfasst den Campingplatz, den Bereich Sot Punt sowie einen

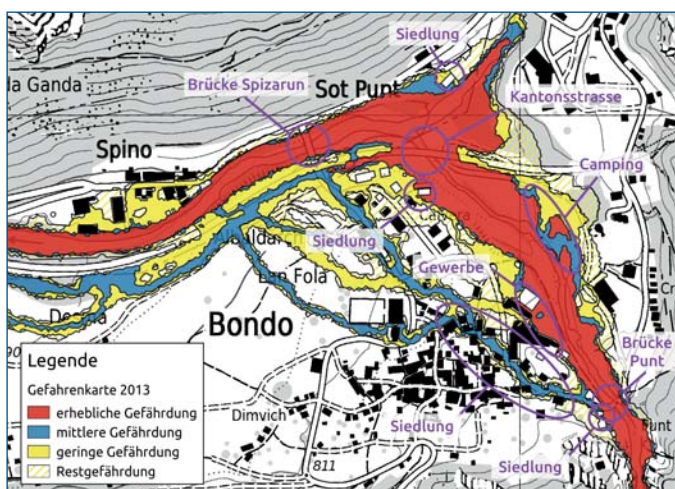


Bild 6. Gefahrenkarte Wasser 2012/2013 und Schutzdefizite (vor Schutzmassnahmen Bondo I, Quelle: [1]).

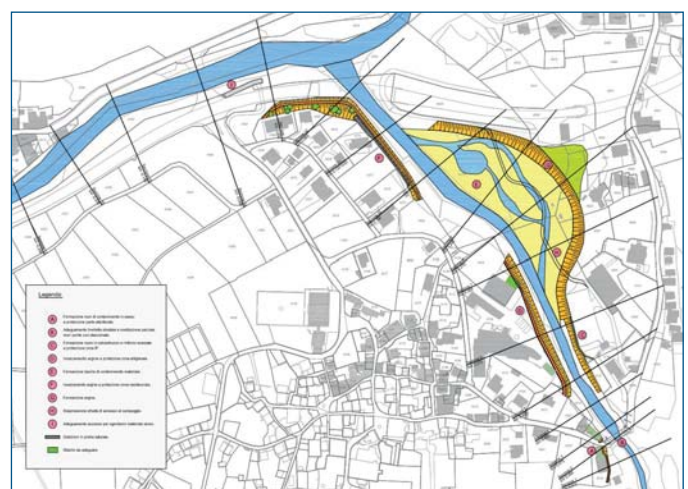


Bild 7. Schutzmassnahmen Bondo I, welche im Zuge der Ereignisse 2011/12 erarbeitet und in den Jahren 2014/15 realisiert wurden (Quelle: [2]).

Abschnitt entlang der Gemeindestrasse durch das Dorf Bondo hindurch. Die übrigen gefährdeten Bereiche weisen geringe Gefährdung (gelb) oder Restgefährdung (gelb gestreift) auf.

Ausgehend von der Gefahrenkarte haben sich mehrere Schutzdefizite ergeben, welche einerseits die Gewerbezone auf der orographisch linken Seite und andererseits den Campingplatz auf der orographisch rechten Seite betreffen. Im Einzelnen haben sich für folgende Zonen Schutzdefizite ergeben (Bild 6):

- Gewerbezone auf der linken Uferseite (vorwiegend erhebliche Gefährdung)
- Campingplatz auf der rechten Uferseite oberhalb der Kantonsstrasse (erhebliche und mittlere Gefährdung)
- Gebiet Sot Punt (mittlere Gefährdung)
- Wohngebiet in der Mitte von Bondo (mittlere Gefährdung)
- Wohngebiet auf der linken Uferseite oberhalb der Kantonsstrasse (erhebliche Gefährdung)
- Gebäude bei der alten Brücke am Kegelhals (erhebliche und mittlere Gefährdung)

Weitere wichtige Schutzdefizite ergeben sich für die Brücke der Kantonsstrasse, die Brücke am Kegelhals sowie die Brücke Spizarun, welche in der roten Gefahrenzone zu liegen kommen.

3.4 Frühwarnsystem 2013–2017

Aufgrund der Dringlichkeit einer Alarmanlage für mögliche Murgänge im Sommer 2013 wurde Ende Mai 2013 eine vorzeitige Baubewilligung für das Frühwarnsystem Bondo erteilt. Der Frühwarndienst konnte dadurch bereits im Juni 2013 in Betrieb genommen werden. Das Alarmsystem 2013 besteht aus einer Detektionsanlage in Prä, Lichtsignalanlagen in Bondo und

den entsprechenden Schaltzentralen. Die Murgänge in Prä werden durch drei Reissleinen und einen Pegelradar detektiert. Ergänzt wurde die Anlage Prä durch zwei Kameras und eine Wetterstation.

Die Detektion wurde so programmiert, dass bei einer gerissenen Reissleine oder einem Überschreiten gewisser Niederschlagsschwellenwerte ein Voralarm ausgelöst wird. Sollten zwei oder drei Reissleinen durch einen Murgang gerissen werden, wird direkt ein Alarm ausgelöst. Voralarm und Alarm werden einer definierten Benutzergruppe per Swisscom eAlarm auf das Mobiltelefon übertragen. Bei einem Alarm werden gleichzeitig die sieben Rotlichter auf der Gemeinde- und Kantonsstrasse automatisch auf Rot gesetzt, sodass der gefährdete Bereich nicht mehr befahren wird.

Die Alarmanlage in Prä bringt für Bondo eine Vorwarnzeit von ca. 2 Minuten. Zusammen mit der Gemeinde wurde ein entsprechendes Sicherheitskonzept für den Ereignisfall erarbeitet. Neben der gemeindeinternen Organisation (Sicherheitskommission und Gemeindeführungsstab), wurden auch die Schnittstellen zu den diversen Partnern festgelegt.

Den Kern des Sicherheitskonzepts bildeten eine Checkliste und die Einsatzkarten mit den vorsorglich definierten Massnahmen. Neben der Beurteilung der Gefahrensituation wurden im Sicherheitskonzept Beobachtungs- und Informationsposten, Absperrungen und Wasserableitungen festgelegt.

3.5 Schutzmassnahmen Bondo I

In der Zone zwischen der Mehrzweckhalle/Schreinerei und der Kantonsstrasse wurde ein grosses Auffangbecken für Geschiebe mit einem Rückhaltevolumen von rund

170 000 m³ realisiert. Oberhalb der Kantonsstrasse wurde eine möglichst grosse Aufweitung angestrebt, die einen angemessenen Schutz der Siedlung bietet. Die Schutzziele der Kantonsstrassenbrücke wurden hingegen aufgrund von zu geringem Freibord nicht erreicht. Wegen der Breite der Aufweitung konnte der Campingplatz am damaligen Standort in der bisherigen Ausdehnung nicht mehr erhalten werden. Es wurden drei Dämme auf der linken Seite der Bondasca (bei der alten Brücke am Ausgang der Schlucht, entlang der Gewerbezone im mittleren Teil des Unterlaufs und entlang der Wohnzone unmittelbar oberhalb der Kantonsstrasse) erstellt und der Flussraum oberhalb der Kantonsstrassenbrücke aufgeweitet (Bild 7, Quelle: [2]).

Dank den neuen Schutzbauten wurden die gewünschten Schutzziele für die Siedlung erreicht. Ausserhalb des Gerinnes existierte nach Realisierung der Massnahmen höchstens eine geringe Gefährdung (gelber Gefahrenbereich), meistens allerdings nur eine Restgefährdung (Bild 8).

Basierend auf dem abgeschlossenen Schutzbautenprojekt und dem weiterhin bestehenden Alarmierungssystem, wurde zusammen mit der Gemeinde Bregaglia die Notfallplanung/Interventionskarte angepasst. Im Fall eines Murgangalarms wurden verschiedene Absperrungen und Beobachtungspunkte in Bondo vorgesehen. In der Interventionskarte wurde auch das Val Bondasca mit den Maiensässen und SAC-Hütten integriert. Evakuationen wurden in Bondo aufgrund der zugrunde gelegten Szenarien in den ersten Phasen der Interventionskarte keine vorgesehen.

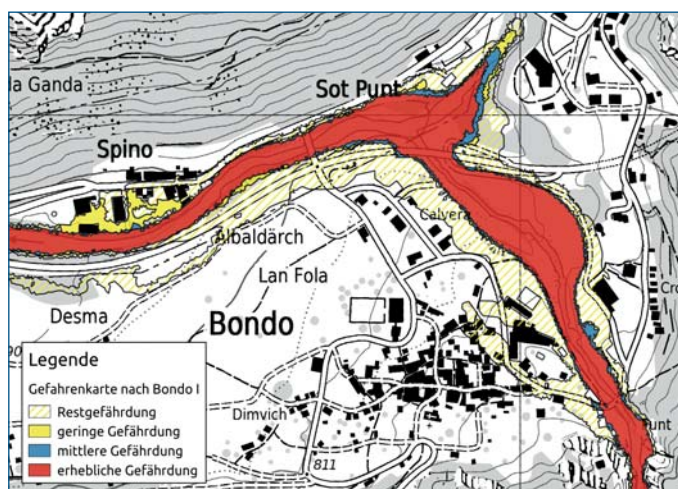


Bild 8. Gefahrenkarte Wasser 2016 nach Schutzmassnahmen Bondo I 2014/15.

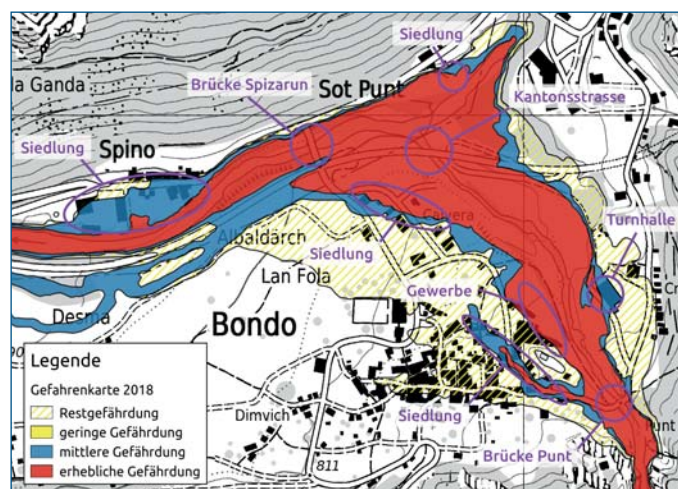


Bild 9. Gefahrenkarte Wasser 2017/18, basierend auf den seit den Ereignissen 2017 neu definierten Szenarien (Quelle: [4]).

4. Analyse und Szenarien 2017/18

Durch die Prozessverkettung von Bergsturz und unmittelbarem Schuttstrom haben die Ereignisse vom Sommer 2017 ein weitaus grösseres Ausmass angenommen als bisher vorstellbar und haben das Extremereignis der bisher definierten Szenarien deutlich überstiegen (vgl. *Tabelle 2*).

Gegenwärtig hat sich die Lage im Val Bondasca wieder etwas beruhigt, doch Bewegungsmessungen zeigen, dass die Nordwestflanke des Piz Cengalo weiterhin in Bewegung ist. Gemäss Experten muss in den nächsten Jahren mit einem weiteren Bergsturz in der Grössenordnung von mehreren Mio. m³ gerechnet werden. Dies könnte die Gefahrensituation entscheidend verschärfen und zu einem weiteren Schuttstrom und Murgängen wie 2017 führen.

Basierend auf den neuen Prozesskenntnissen und der veränderten Grunddisposition im Val Bondasca mit rund 1.4 Mio. m³ unmittelbar entlang der Gerinne mobilisierbaren Lockermaterialablagerungen, wurden die der Gefahrenkarte zugrundeliegenden Szenarien überarbeitet.

4.1 Szenarien 2017/18

Für die Gefahrenbeurteilung werden neben (1) granularen Murgängen infolge progressiver Erosion von Lockermaterialablagerungen noch zwei weitere, seit 2017 im Val Bondasca erstmals aufgetretene Prozesse berücksichtigt. Dies ist zum einen (2) die Entstehung eines Schuttstroms unmittelbar nach dem bzw. gleichzeitig mit einem Bergsturz und zum anderen (3) die Entstehung von Murgängen infolge progressiver Verflüssigung der abgelagerten Murgänge (Quelle: [3]).

Murgänge durch progressive Erosion von Lockermaterialablagerungen entstehen aufgrund von Oberflächenabfluss nach Niederschlägen. Die Magnitude der Murgänge hängt dabei primär von der Intensität und der Summe der Niederschläge ab. Eine grosse Vorfeuchte in den Ablagerungen (wie dies am 31. August 2017 beobachtet wurde) erhöht die Magnitude stark. Im Gegensatz zu Murgängen infolge progressiver Erosion können die beiden anderen Prozesse ohne jegliche Beteiligung von Niederschlägen ablaufen. Bei einer progressiven Verflüssigung der abgelagerten Murgänge führen kleine Hanginstabilitäten (2017 im Val Bondasca beispielsweise auch durch Schmelzwassereintrag der umliegenden Gletscher ausgelöst) zu einer progressiven Verflüssigung von stark durchfeuchteten Bergsturz- und Schuttstromablagerungen. Dies ist nur bei einer ausserordentlich hohen Vorfeuchte in den Ablagerungen möglich. Ist die Disposition aber gegeben (grosse Feuchte in den Ablagerungen, wie nach dem Bergsturz vom 23. August), ist die Wahrscheinlichkeit einer solchen Murgangentstehung sehr hoch. Bei einer Verkettung eines Bergsturzes und einer Gletscherverflüssigung können extrem grosse Murgänge in einem einzigen Schub entstehen. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Prozessverkettung kann jedoch als sehr klein eingestuft werden und stellt ein sehr seltenes Ereignis dar.

Für jeden der oben beschriebenen Prozesse wurden Szenarien definiert. Des Weiteren wurden Szenarien für mögliche Kubaturen pro Saison bei sehr hoher Verfügbarkeit ohne erneuten Bergsturz abgeschätzt. Aus all diesen Szenarien sowie den bisherigen Szenarien der Gefahrenkarte 2013, die ohne erneuten Bergsturz immer noch gültig sind, wurde das massgebende Szenario pro Wiederkehrperiode bestimmt. Die so erhaltenen Szenarien werden in *Tabelle 2* präsentiert. Die maximal zu erwartenden Murgangkubaturen liegen bei 250 000 bis maximal 575 000 m³ und die Abflüsse bei 200 bis 1450 m³/s abhängig von der jeweiligen Jährlichkeit.

4.2 Simulationen 2017/2018

Für die neuen Simulationen wurde dasselbe zweidimensionale Berechnungsmodell verwendet wie bereits für die Gefahrenkarte 2012/13. Das zugrunde liegende Terrainmodell mit einer räumlichen Auflösung von 3 m² deckt den gesamten Kegelbereich ab und basiert auf den Vermessungsdaten des Wasserbauprojekts aus dem Jahre 2015 (Quelle: [4]). Dies

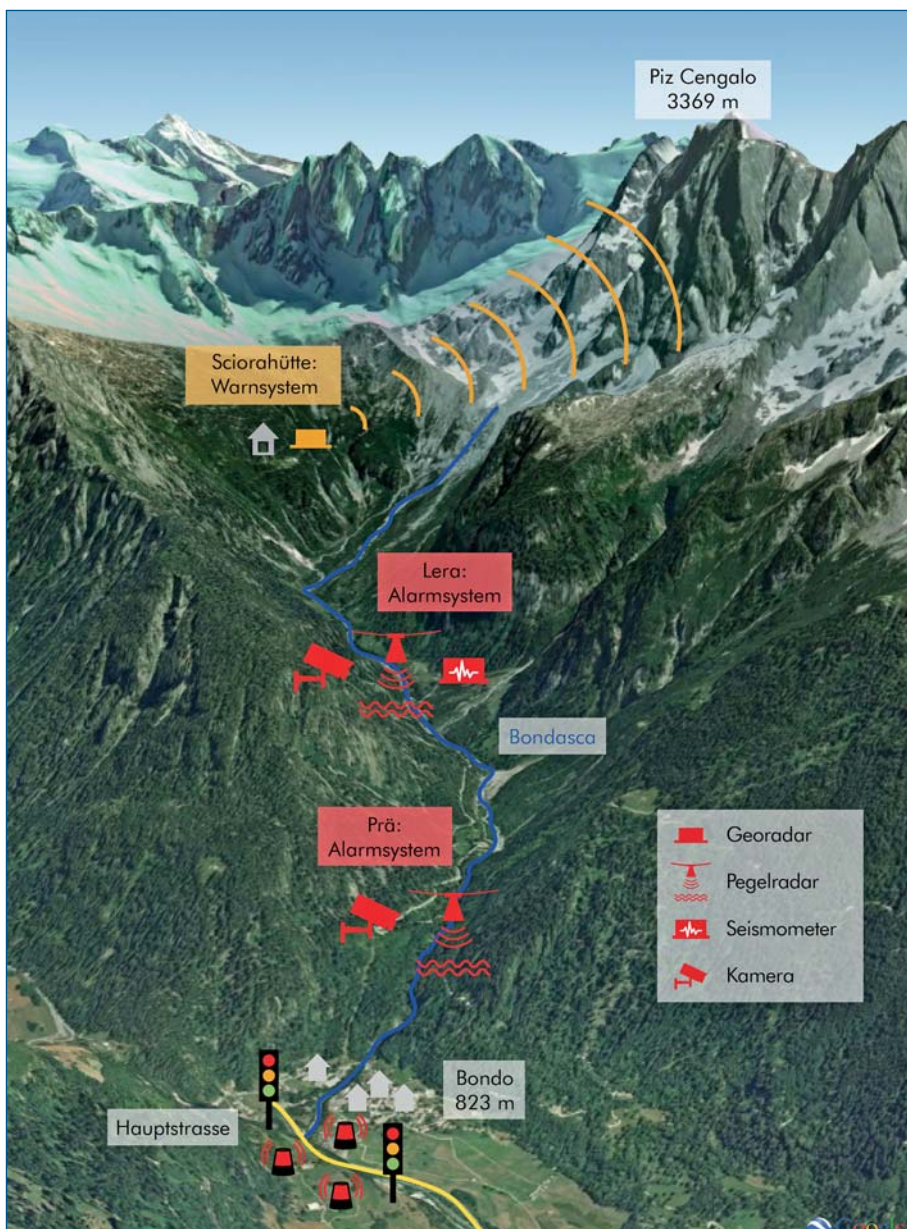


Bild 10. Frühwarnsystem Val Bondasca mit aktuellem Ausbaustand seit September 2017 (Quelle: Geopraevent AG).

wurde als massgebendes Terrainmodell herangezogen, da das Auffangbecken wieder geleert wurde und die provisorischen Schutzbauten in der Gefahrenkarte methodisch nicht berücksichtigt werden sollen.

Die Rheologie der Murgänge wurde wiederum mit einem turbulenten Modell mit einer Grenzschubspannung und zusätzlich einem basalen Reibungsterm beschrieben (vgl. Quelle [6]). Die rheologischen Parameter wurden vorgängig anhand der vergangenen Ereignisse kalibriert, wobei die Nachrechnungen einen Reibungsbeiwert nach Strickler von $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ein Reibungsgefälle von 3 % und Grenzschubspannungen zwischen 1000 und 8000 N/m^2 ergeben haben (vgl. [8]). Die Murgänge wurden als eine Serie von Schüben simuliert, wobei die Kubaturen auf zwei bis sechs Schübe in unterschiedlicher Reihenfolge verteilt wurden.

4.3 Gefahrenkarte 2017/18 und Schutzdefizite

Gemäss der Gefahrenkarte 2017/18 sind das Gewerbeareal auf der linken Uferseite, das Gelände um die Mehrzweckhalle sowie das Wohngebiet am linken Ufer oberhalb der Kantonsstrasse von erheblicher Gefährdung (rot) betroffen (Bild 9). Des Weiteren befinden sich die Gemeindestrasse im Dorfkern von Bondo und die Kantonsstrasse im roten Gefahrenbereich. Mittlere Gefährdung (blau) umfasst einen Abschnitt der Gemeindestrasse im Dorfzentrum von Bondo und die angrenzenden Gebäude, die Mehrzweckhalle sowie die Wohnzone linkerhand oberhalb der Kantonsstrasse. Ebenfalls ein Grossteil der Ortschaft Spino fällt in den blauen Gefährdungsbereich. In den übrigen gefährdeten Gebieten ist von Restgefährdung auszugehen.

Die Schutzdefizite liegen demnach bei (Bild 9):

- Gewerbezone auf der linken Uferseite (erhebliche Gefährdung)
- Wohngebiet auf der linken Uferseite oberhalb der Kantonsstrasse (erhebliche und mittlere Gefährdung)
- Wohngebiet in der Mitte von Bondo (vorwiegend mittlere Gefährdung)
- Mehrzweckhalle auf der rechten Uferseite (mittlere Gefährdung)
- Gebiet Sot Punt (erhebliche und mittlere Gefährdung)
- Gebiet Spino (vorwiegend mittlere Gefährdung)
- Gebiet bei der alten Brücke am Kegelhals (erhebliche Gefährdung)

Des Weiteren bestehen ebenfalls Schutzdefizite für die drei Brücken (Brücke am Kegelhals, Brücke der Kantonsstrasse, Brücke Spizarun).

4.4 Frühwarnsystem nach Ereignissen 2017

Beim Ereignis vom 23. August 2017 hat die Murgangalarmanlage in Prä aufgrund des Schuttstroms einen Alarm ausgelöst, wurde im Anschluss aber teilweise zerstört. Für die Ereignisbewältigung wurde die Anlage unmittelbar wieder instand gestellt und ausgebaut. Aufgrund der Tatsache, dass mit der Ereignisbewältigung auch im ganzen Val Bondasca ein 3G-Empfang eingerichtet wurde, konnte eine zusätzliche Detektionsanlage in Lera mit ca. 4 Minuten Vorwarnzeit erstellt werden. Anstatt der Reisleinen werden für die Detektion neu je zwei redundante Pegelradare in Lera und Prä eingesetzt. Die Anlage wurde zudem mit weiteren Kameras, Seismometern in Lera und einem Georadar auf der Sciora-Hütte ergänzt (vgl. Bild 10). Ebenfalls wurde eine redundante Alarm-/

Datenübertragung eingerichtet und damit das System für den längerfristigen Betrieb ausgelegt.

4.5 Zustand Schutzbauten Bondo I nach Ereignissen 2017

Die unerwartet grossen Kubaturen an Lockermaterial, welche im Zuge der Ereignisse 2017 nach Bondo und in die Maira verfrachtet wurden, haben die nach dem Bergsturz von 2011 realisierten Massnahmen an ihre Grenzen gebracht und grosse Sachschäden verursacht.

Die vor Ort gemachten Beobachtungen erlaubten, wichtige Rückschlüsse für die Projektierung der neuen Verbauungsmassnahmen zu ziehen. Die mit Blöcken stabilisierten Ufer (Bild 7) haben die Beanspruchung der Murgänge gut ertragen und befinden sich in einem intakten Zustand (Quelle: [5]). Auch an den Stahlbetonmauern im oberen Teil sind keine strukturellen Schäden zu erkennen. Die flussaufwärts der Kantonsstrasse, am linken Ufer, zum Schutze des angrenzenden Wohngebietes, realisierte Mauer ist hingegen völlig durch die Ablagerungen und den provisorischen Damm bedeckt und konnte somit nicht beurteilt werden.

Die alte Brücke am Kegelhals wurde durch die Ereignisse vom 23. August stark beschädigt und wurde in den darauffolgenden Tagen als Hochwasserschutzmassnahme maschinell komplett entfernt. Die Bondascabrücke längs der Kantonsstrasse hat hingegen keine wesentliche strukturelle Schäden erlitten, obwohl ihr Abflussquerschnitt durch Ablagerungen vollständig verstopft und sie zum Teil durch sukzessive Murgänge überflossen wurde. Auch die Brücke Spizarun konnte die Ereignisse gut überstehen und befindet sich in einem guten Zustand.

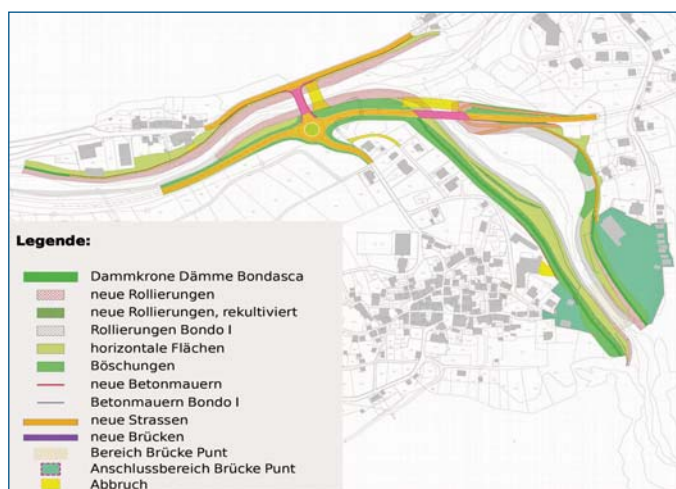


Bild 11. Provisorisch geplante Schutzmassnahmen Bondo II, welche infolge der Ereignisse 2017 erarbeitet wurden (Quelle: [5]).

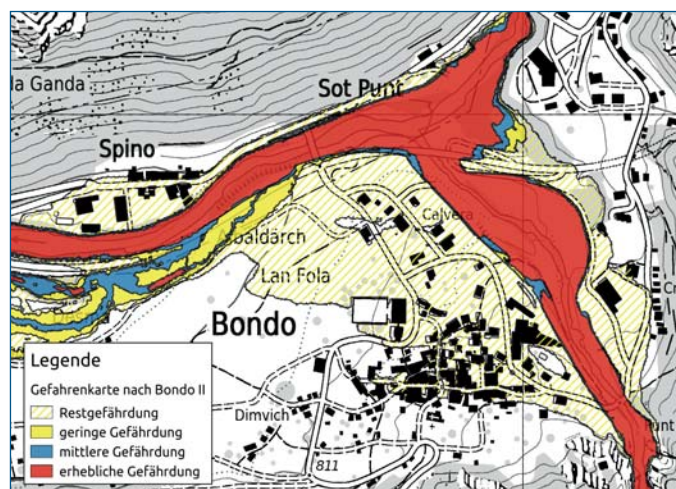


Bild 12. Voraussichtliche Gefahrenkarte Wasser nach Schutzmassnahmen Bondo II (Quelle: [5]).

4.6 Schutzmassnahmen Bondo II

a) Verbauungsmassnahmen Bondasca

Die provisorisch geplanten Schutzbauten sind auf HQ₁₀₀ plus Freibord oder auf HQ₃₀₀ bordvoll bemessen und umfassen eine Erhöhung der Dämme (Quelle: [5]). Aufgrund der höheren Dammkronenkote und für eine bessere Landschaftseinpassung wird der rechtsseitige Damm nach aussen verschoben (*Bild 11*). Die Linienführung des linken Dammes im Bereich der Gewerbezone wird angepasst und entspricht dem Dammverlauf der aktuellen provisorischen Schutzdämme, wodurch zwar die Ausdehnung der Gewerbezone eingeschränkt, jedoch das Rückhaltevermögen deutlich erhöht wird. Der Abflussquerschnitt ist als mehrstufiges Profil konzipiert. Im unteren Bereich liegen die in den Jahren 2014 und 2015 realisierten Schutzbauten, welche teilweise ergänzt und durch neue zurückversetzte Dämme überlagert werden. Bei der Dimensionierung der neuen Brücke am Kegelhalss sowie der Dämme im Kegelhalssbereich wurde zum Schutze von Bondo ein Sicherheitszuschlag berücksichtigt. Die Flussstrecke am Kegelhalss ist nämlich für die Sicherheit des Dorfes von zentraler Bedeutung, und es ist deshalb angemessen, in diesem Bereich die Schutzziele höher anzusetzen. Die Kote der Dämme in diesem Abschnitt entspricht ungefähr den Ablagerungshöhen der Ereignisse von August 2017, während die Brückenunterkante auf 3 m höher als die projektierten Dammhöhen festgelegt wurde.

Die Sicherheit der Bondascabrücke und der Kantonsstrasse soll mittels Anhebung um ca. 3.5 m, neuer Linienführung und einer stützenfreien Konstruktion bis zum Bemessungsereignis gewährleistet werden. Beim Anschluss Bondo wird ein Kreisel realisiert, welcher einerseits zu einer höheren Verkehrssicherheit beiträgt und andererseits eine schmalere Strassenbreite zulässt, welche eine schmalere, kostensparende neue Brücke über die Bondasca ermöglicht.

b) Verbauungsmassnahmen Maira

Zum Schutze der Ortschaft Spino und der Verbindungsstrasse zwischen Promontogno und Soglio ist eine Erhöhung des rechten Ufers der Maira vorgesehen (*Bild 11*, Quelle: [5]). Die Koten der Dämme werden so dimensioniert, dass im Überlastfall das Hochwasser (oder die Murgänge) linksseitig überfluten und somit Spino verschont

bleibt. Die Brücke Spizarun wird durch eine neue, um ca. 2 m angehobene, hochwassersichere Brücke ersetzt. Die neue Brücke wird auf einen 300-jährlichen Abfluss ausgelegt, wobei bei selteneren Ereignissen das Wasser linksseitig über die Ufer tritt und so Spino geschützt wird.

4.7 Voraussichtliche Gefahrenkarte nach Schutzmassnahmen Bondo II

Durch die projektierten Schutzmassnahmen werden die Siedlungs-, Gewerbe- und Landwirtschaftsgebiete, die Kantons- und Verbindungsstrassen sowie die drei Brücken bis zum Bemessungsereignis geschützt. Für das Siedlungsgebiet und die Verkehrslinien besteht voraussichtlich nur noch Restgefährdung (*Bild 12*, Quelle: [5]).

5. Fazit

Die Ereignisse von August 2017 haben gezeigt, dass das Unerwartbare eintreten kann. Durch die Teilverflüssigung der Bergsturzmasse konnte sich ein gewaltiger Schuttstrom ausbilden, der im Val Bondasca rund 545 000 m³ Material hinterlassen hat und erst am Kegelhalss zum Stillstand gekommen ist. Durch die enorme Durchfeuchtung der Bergsturz- und Schuttstromablagerungen haben sich in der Folge Murgänge ausgebildet, die rund 500 000 m³ Geschiebe in den Rückhalteraum eingetragen haben.

Insgesamt erlitten im Dorf rund 13 Gebäude Totalschaden. Angesichts der enormen verfrachteten Geschiebemengen waren die Schäden im Dorf jedoch verhältnismässig gering. Dies dank der Alarmbereitschaft, welche erlaubte, rasch und angepasst zu reagieren, sowie einem robusten und überlastbaren System. Durch die granularen Murgänge wurde die Wirkung der Schutzdämme gar verstärkt, indem sich in den randlichen Bereichen des Rückhalterausms natürliche Dämme (sogenannte Levées) gebildet und weitere Übermürungen eingegrenzt haben. Entlang dieser Levées wurden im Zuge der Aufräumarbeiten provisorische Schutzdämme errichtet. Dank der Robustheit des Systems lassen sich nun die alten Bauwerke vollständig in die neuen Schutzbauten integrieren. Die neu projektierten Massnahmen bieten dem Dorf Schutz vor weiteren grossen Murgangereignissen, was im Hinblick auf die fortwährende Bergsturzgefahr am Piz Cengalo von grosser Bedeutung ist.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Gemeinde Bregaglia, dem Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden und dem Tiefbauamt Graubünden für die gute und sehr angenehme Zusammenarbeit, die vielen aufschlussreichen Gespräche und den wertvollen fachlichen Austausch.

Literatur

- [1] *beffa tognacca gmbh* (2013): Riale Bondasca – Bondo – Valutazione dei pericoli a seguito di eventi alluvionali e di colate detritiche. Bericht im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren, Südbünden.
- [2] *beffa tognacca gmbh* (2015): Riale Bondasca e Fiume Maira, Bondo – Opere di premunizione – Progetto di massima e valutazione costi-benefici. Bericht im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.
- [3] *beffa tognacca gmbh* (2018): Val Bondasca – Ereignisanalyse 2017 und Szenariendefinition. Bericht im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren, Südbünden.
- [4] *beffa tognacca gmbh* (2018): Val Bondasca/Maira – Gefahrenbeurteilung Murgang und Hochwasser. Bericht im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren, Südbünden.
- [5] *beffa tognacca gmbh* (2018): Folgeprojekt Bergsturz Piz Cengalo 2017 – Verbauungen Bondasca und Maira. Vorstudie im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.
- [6] *Naef D., Rickenmann D., Rutschmann P., Mc Ardell, B.W.* (2006). Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 155165.
- [7] *Christian Tognacca*, Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen, Mitteilung Nr. 164 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. H.-E. Minor (1999).
- [8] *Christian Tognacca, Jeannette Gabbi*, Gravitative Prozesse in der Bondasca – Nachrechnung der beobachteten Phänomene anhand von numerischen Simulationen mit FLUMEN, Artikel für «Wasser Energie Luft», in Vorbereitung.

Anschrift der Verfasser

Dr., Msc. Erdw. ETH *Jeannette Gabbi*,
beffa tognacca gmbh, In Carè Ventivi 27,
CH-6702 Claro, jgabbi@fluvial.ch
Dr., dipl. Ing. ETH *Christian Tognacca*,
beffa tognacca gmbh, In Carè Ventivi 27,
CH-6702 Claro, ctognacca@fluvial.ch
MSc Umwelt-Natw. ETH *Martin Keiser*, Amt
für Wald und Naturgefahren Graubünden, Islas
244, CH-7524 Zuoz, martin.keiser@awn.gr.ch