

Rutschung Brienz/Brinzauls (GR): Geologisch-kinematisches und hydrogeologisches Modell

Daniel Figi¹, Reto Thöny¹, Thomas Breitenmoser¹, Flurina Brunold¹, Tobias Schwestermann¹

Summary

The Brienz/Brinzauls landslide, divided into a lower (Rutschung Dorf) and upper (Rutschung Berg) landslide, is one of the largest and most active large-scale slope movements in the Alps. A representative geologic-kinematic model has been developed that is based on extensive investigations of both the landslide and the underlying intact rock by conducting borehole tests, seismic and geoelectric as well as geological mapping, displacement measurements and deformation analyses. Built on that model and considering spring discharges, groundwater tracer tests, snow hydrological analyses, hydrochemical analyses and borehole investigations, a hydrogeologic conceptual model could be established.

The geologic-kinematic model shows that the Rutschung Dorf is partly composed of several smaller sliding masses, sliding into a body on an extremely flat (2 – 14°) inclined basal shear plane downslope. The sliding of Rutschung Dorf causes deep-seated toppling in the overlying unstable shists of the Allgäu-Formation within the Rutschung Berg. This process eventually results in subsidence and sliding of the cellular dolomite (Rauhwacke) and dolomite from the upper part of Rutschung Berg. Hence, the lower Rutschung Dorf and upper Rutschung Berg form a connected and synchronous large-scale slope movement with various interacting sliding masses and different ground movement mechanisms.

The hydrogeological model shows that groundwater inputs within the range of Rutschung Dorf and Rutschung Berg significantly influence the velocity of the slope movement, especially during snowmelts. These must therefore be taken into account for the hazard assessment. Within the Rutschung Dorf, the model further shows hydrostatic uplift caused by high water pressure in the intact rock underneath

the basal shear surface and shear-strength-reducing water pressures at the base of the sliding mass. The aim is to reduce the current high sliding velocity by means of a deep drainage system to diminish the groundwater pressures. This requires establishing a detailed and consistent geologic-kinematic and hydrogeologic conceptual model.

Zusammenfassung

Bei der Rutschung Brienz/Brinzauls, bestehend aus den sogenannten Rutschungen Dorf und Berg, handelt es sich um eine der grössten und aktivsten Grosshangbewegungen im Alpenraum. Auf der Grundlage von umfangreichen Tiefenerkundungen der Rutschmasse und des darunterliegenden, anstehenden Fels (Sondierbohrungen inkl. Bohrlochversuchen und Einbauten, Seismik, Geoelektrik) sowie basierend auf geologischen Oberflächenkartierungen, Verschiebungsmessungen und Deformationsanalysen wurde ein repräsentatives geologisch-kinematisches Modell erarbeitet. Zudem wurde basierend auf dem geologisch-kinematischen Modell unter Berücksichtigung von Quellmessungen, Markierversuchen, schnee-hydrologischen und hydrochemischen Analysen sowie Bohrlochuntersuchungen ein hydrogeologisches Konzeptmodell entwickelt.

Das geologisch-kinematische Modell zeigt im Bereich der Rutschung Dorf eine aus mehreren Rutschkörpern aufgebaute Rutschmasse, die über eine basale, äusserst flach (2 bis 14°) geneigte Gleitfläche als Gesamtheit talwärts gleitet. Das Weggleiten der Rutschung Dorf führt in den darüberliegenden instabilen Felsmassen der Rutschung Berg innerhalb der bergwärts einfallenden Schiefer der Allgäu-Formation zu tiefreichenden Kippbewegungen. Die Folge ist ein Nachsacken und -gleiten der darüberliegenden Rauwacken und Dolomite. Die Rutschung Dorf und die Rutschung Berg bilden dabei eine zusammenhängende Grosshangbewegung mit unterschiedlichen, mechanisch interagierenden Kompartimenten und Bewegungsmechanismen, welche ein synchrones Bewegungsverhalten zeigen.

Dabei haben die Wassereinträge, insbesondere jene der Schneeschmelze, in der Höhenlage der

¹ BTG Büro für Technische Geologie AG, Sargans

Rutschungen Dorf und Berg einen signifikanten Einfluss auf das Bewegungsverhalten und müssen daher für die Beurteilung von Entwicklungs- und Gefährdungsszenarien mitberücksichtigt werden. Das hydrogeologische Modell zeigt, dass im stabilen Fels unterhalb der Rutschung Dorf stabilitätsvermindernde Auftriebsdrücke und innerhalb der Rutschmasse an deren Basis scherfestigkeitsreduzierende Wasserdrücke vorhanden sind. Im Hinblick auf eine wirksame und damit erfolgreiche Sanierung der Rutschung Brienz mittels Tiefenentwässerungsmassnahmen, sind ein fundiertes geologisch-kinematisches Modell und ein darauf basierendes hydrogeologisches Modell, welche die vorhandenen Datengrundlagen widerspruchsfrei erklären und die hydromechanischen Zusammenhänge nachvollziehbar abbilden können, von grosser Wichtigkeit.

1 Geologisch-hydrogeologisches Untersuchungsgebiet

1.1 Rutschung Brienz

Die gesamte Südflanke des Piz Linard (2'767 m ü. M.) ist von geomorphologischen Phänomenen und Prozessen einer tiefgründigen Grosshangbewegung geprägt. Der Hangbereich unterhalb von ca. 1'800 m ü. M. bis zur Talsohle an der Albula weist seit Anfang dieses Jahrhunderts zunehmende Geländebewegungen auf und wird gemeinhin als Rutschung Brienz umschrieben. Der ausbauchende Hangbereich unterhalb von ca. 1'200 m ü. M., auf welchem das Dorf Brienz/ Brinzauls liegt, wird dabei als Rutschung Dorf bezeichnet und die instabilen Felsmassen oberhalb des Dorfes bis auf ca. 1'800 m ü. M. als Rutschung Berg.

1.2 Geologische Situation

Die tektonische Situation im Gebiet der Rutschung Brienz ist komplex und gekennzeichnet von mehreren, übereinander geschobenen und später wieder abgeschobenen Deckenelementen, welche lokal stark ausgedünnt resp. verschuppt wurden und im Gebiet östlich der Rutschung Brienz zur Talsohle hin teils vollständig auskeilen. Die Schichtgrenzen und Überschiebungsflächen dieser tektonischen Schuppen- und Deckeneinheiten fallen mehrheitlich in südöstlicher Richtung ein, zeigen in Bereichen der Rutschung Brienz jedoch auch namhafte Abweichungen von dieser Schichtorientierung. Tektonische Bruchstrukturen treten vorwiegend als NE-SW und NW-SE streichende Lineamente auf, welche insbesondere im derzeit inaktiven Anrissgebiet der Rutschung Brienz (Gebiet Propissi) Gesteinsformationen gegeneinander versetzen.

Die Ton- und (Sand-) Kalkschiefer des nordpenninischen Flysch (in der älteren Litera-

tur als Bündnerschiefer bezeichnet) und der Nivaigl-Serie bilden zusammen mit den Schiefen und untergeordnet den Ophiolith der Aroser-Schuppenzone die Basis des ostalpinen Deckenstapels (vgl. Fig. 1). Diese werden im Gebiet der Rutschung Brienz von den Tonschiefern der Allgäu-Formation überlagert. Im Gebiet Lenzer Horn – Piz Linard werden die nordpennischen Decken von einer mächtigen Schuppe der Vallatscha-Formation überlagert, welche zur Rutschung Brienz hin auskeilt. Die kompetenten Dolomite und Kalke bilden in der Westflanke des Lenzer Horn die markante Steilstufe oberhalb der Waldgrenze. Darüber folgen in ihrer Mächtigkeit räumlich stark variierende Rauwacken und Dolomite der Raibler-Formation. Die in der Westflanke des Lenzer Horn bevorzugt in der Raibler-Formation entspringenden Seitenbäche führen infolge der starken Verwitterungsanfälligkeit der Rauwacken zu morphologisch markanten Erosionsgebieten (Bacheinschnitte). Dasselbe Phänomen zeigt sich auch in der Ostflanke des Piz Linard im Gebiet Crappa Naira. Die Gesteine der Raibler-Formation hatten bei der alpinen Gebirgsbildung die Funktion als bevorzugte Abscherhorizonte resp. Deckentrenner und treten daher teils in unregelmässiger Mächtigkeit und unsystematischer Anordnung auf. Im Gebiet Lenzer Horn – Piz Linard folgen über den verkarstungsfähigen Gesteinen der Raibler-Formation Richtung SE-einfallende Kalk- und Tonschiefer der Allgäu-Formation, welche ihrerseits von Karbonatgesteinen der Silvretta-Decke, d.h. von Dolomiten und Kalken der Vallatscha-Formation (inkl. S-charl-Formation = Arlbergkalk in alten Karten) sowie in der Gipfelregion geringmächtig von Gesteinen der Ducan-Formation überlagert werden.

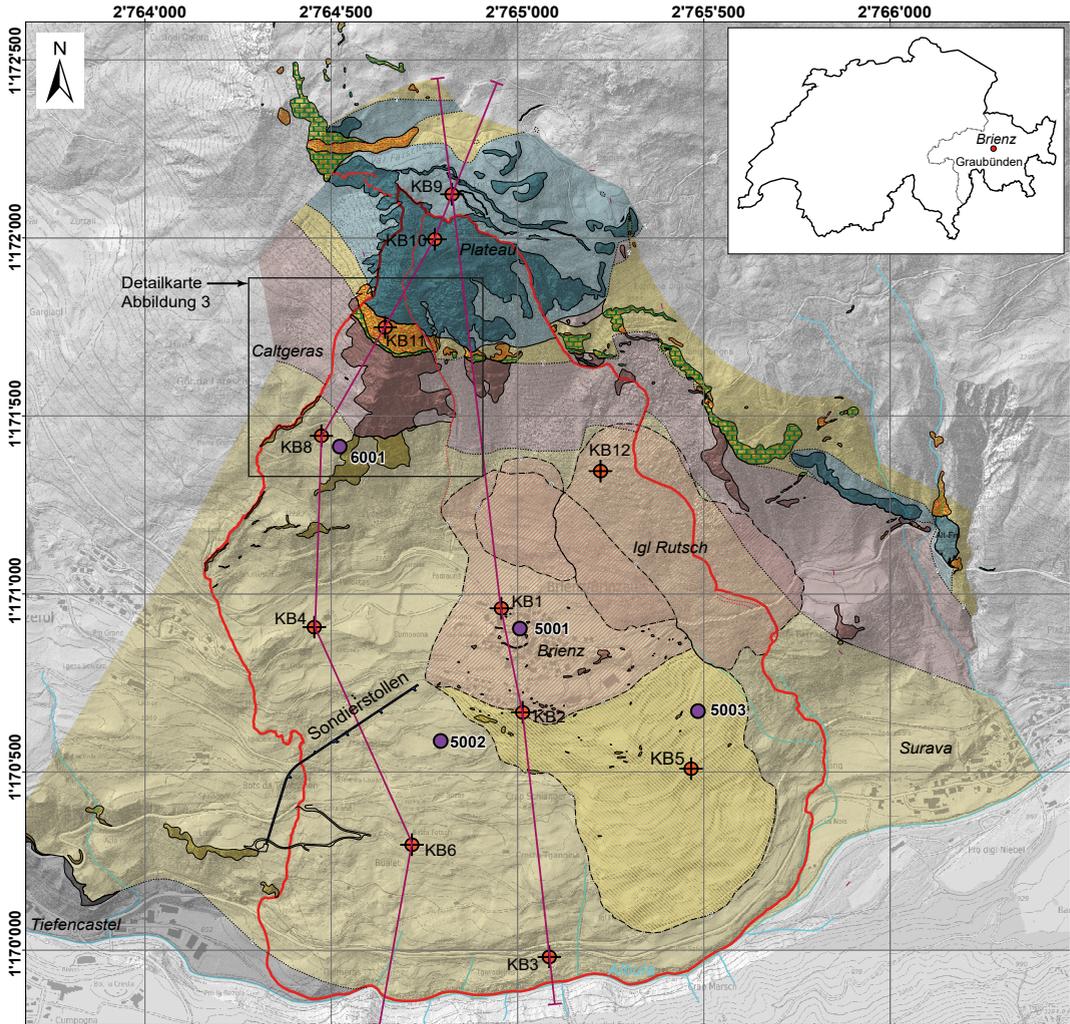
1.3 Hydrogeologische Situation

Das hydrogeologische Untersuchungsgebiet der Rutschung Brienz erstreckt sich auf

grund des generell nach Südosten gerichteten Schichteinfallens des tektonischen Deckenstapels von der Albula im Süden bis zum Aroser Rothorn im Norden (vgl. Fig. 7). Daraus ergibt sich eine Gesamtfläche von ca. 48 km², und das Gebiet umfasst neben der Südflanke des Piz Linard, die Westflanke des Lenzer Horn sowie die hochgelegenen Taleinschnitte der Alp Manuir, der Alp Sanaspans und der Val digl Guert.

Oberhalb von ca. 1'500 m ü. M. ist der geologische Untergrund aus gut durchlässigen, geklüfteten Kalken und Dolomiten der Vallatscha-Formation sowie verkarstungsfähigen Gesteinen der Raibler-Formation (Rauwacke, Dolomit, Gips) aufgebaut. Diese überlagern gering durchlässige Ton- und Kalkschiefer (Allgäu-Formation, Flysch) an der Basis des Deckenstapels. Im Bereich der Rutschung selbst sind die hydrogeologischen Verhältnisse infolge der grossen Gelandedeformationen und der sich dadurch stetig ändernden Oberflächenbeschaffenheit und Fliesswege äusserst komplex ausgebildet.

In der Südflanke des Piz Linard wird einzig das Gebiet östlich der Rutschung Brienz bis in mittlere Höhenlagen (Pigni) durch permanent wasserführende Fliessgewässer entwässert. In den Gebieten oberhalb (Propissi bis La Motta) und westlich (Got da Laresch) der Rutschung Brienz findet keine oberflächliche Entwässerung statt. Quellaustritte finden sich vorwiegend in tiefen Höhenlagen unterhalb von 1'200 m ü. M. in den Gebieten Valettas, Armauns und Cursogns sowie weiter östlich oberhalb von Surava. Vereinzelt Quellaustritte sind zudem in den Brienzer Maiensässgebieten Propissi und Pigni vorhanden. Die zwischen Surava und Tiefencastel durch die Rutschung Brienz gegen Süden weggedrängte Albula bildet den Vorfluter für alle unter- und oberirdischen Gewässer.



Legende

- | | | |
|---|--|---|
|  Nivaigl-Serie |  Raibler-Formation (Rauwacke, Gips/Anhydrit, Dolomit, Schiefer) |  Umrandung Rutschung Brienz |
|  Flysch |  Altein-Formation |  Lithologische Grenze, gesichert |
|  Ophiolith |  Vallätscha-Formation |  Lithologische Grenze, vermutet |
|  Allgäu-Formation |  Bellaluna-Member (Rhyolith, Rhyodazit) |  Lithologische Grenze, unsicher |
|  sekundäre Rutschmasse bestehend aus Allgäu-Formation / Flysch |  Sondierbohrung 2018-2021 |  Oberflächengewässer |
| |  GNSS-Messpunkt |  Profililine |

Fig. 1: Geologische Situation Rutschung Brienz mit Standorten der Sondierbohrungen und des Sondierstollens. Das Profil West (vgl. Fig. 4) verläuft von oben nach unten durch die Sondierbohrungen KB9, KB10, KB11, K8, KB4 und K6. Das Profil Mitte (vgl. Fig. 5) durchquert die Sondierbohrungen KB9, KB1, KB2 und KB3. Beide Profile verlaufen annähernd parallel zu den Bewegungsrichtungen. Der Lageplan des Untersuchungsgebiets ist oben rechts abgebildet.

2 Geologisch-kinematisches Modell

2.1 Modell- und Datengrundlagen

Die Datengrundlagen für das geologisch-kinematische Modell der Rutschung Brienz wurden grösstenteils im Rahmen der geologischen Detailuntersuchungen zwischen 2018 bis 2021 erhoben [8]. Die umfangreichen Tiefenerkundungen (12 Sondierbohrungen inklusive Bohrlochversuche und Einbauten, Seismik sowie Geoelektrik) bilden die Basis des geologisch-kinematischen Modells (vgl. Fig. 2). Zusätzlich wurden geologische und strukturelle sowie phänomenologische und geomorphologische Oberflächenkartierungen durchgeführt (vgl. Fig. 3). Die Feldkartierungen wurden mit Auswertungen von digitalen Höhenmodellen, Orthofotos und Drohnephotos kombiniert. Des Weiteren konnte auf bestehende, geologische Strukturkartierungen und Gefügemessungen aus früheren Untersuchungen zurückgegriffen werden ([4], [5]).

Zur Konstruktion der Gleitflächenverläufe wurden tachymetrisch und mittels GPS gemessene 3D-Verschiebungsvektoren ausgewertet. Unter der Annahme einer volumenkonstanten Scherung, können die Neigungen der Gleitflächen in der Tiefe parallel zu den Neigungswinkeln der Verschiebungsvektoren an der Geländeoberfläche angenommen werden [3]. Im Bereich der Rutschung Dorf implizieren Neigungswinkel der 3D-Verschiebungsvektoren zwischen 2 bis 14° ein äusserst flaches Einfallen der Gleitfläche in Richtung SSE bis S (vgl. Fig. 4 und Fig. 5). Im Übergangsbereich zur Rutschung Berg zeigen die GPS- und Reflektor-Messpunkte oberhalb der Geländeterrasse von Brienz eine abrupte Zunahme der Neigungswinkel auf $\geq 35^\circ$. Dies deutet auf einen bilinearen Verlauf (Knick) der Gleitfläche in diesem Gebiet hin. Bei der Rutschung Berg sind die Neigungswinkel grösstenteils parallel zum Gelände oder steiler und betragen im Anrissgebiet der Rutschung Brienz (Vallatscha-Formation) durchschnittlich 45-55°.

Auf der Basis von terrestrischen und luftgestützten Laserscans wurden zur Ermittlung von 2D-Verschiebungsvektorfeldern vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Deformationsanalysen durchgeführt [6]. In Übereinstimmung mit den Verschiebungsmessungen (Tachymetrie, GPS-Messnetz, Georadar) zeigen die Deformationsvektorfelder eine generelle Abnahme der Verschiebungsgeschwindigkeiten von oben (Rutschung Berg) nach unten (Rutschung Dorf). Gebietspezifische Geschwindigkeitsverteilungen sind auch lateral vorhanden, wobei die Verschiebungsraten im Westen signifikant höher sind als im zentralen und östlichen Teil der Rutschmasse.

Die Ergebnisse von fels- und bodenmechanischen Laboruntersuchungen wurden für Stabilitätsbetrachtungen sowie für die geomechanischen Modellierung der Versagens- und Deformationsmechanismen verwendet. Die schiefrig-plattigen Lithologien mit stark anisotropem Gebirgs- und Gesteinsgefüge (Flysch und Allgäu-Formation) zeigen eine ausgeprägte Festigkeitsanisotropie mit tiefen bis mittleren Festigkeiten und einem generell zähen Bruchverhalten, welches u.a. durch einen hohen Anteil an plastischer Verformung vor dem Bruch und einem ausgeprägten Nachbruch-Verhalten (post-failure) charakterisiert ist. Die Dolomite der Raibler- und Vallatscha-Formation sind durch ein sprödes Bruchverhalten und mittlere Festigkeiten charakterisiert. Die tiefsten Festigkeiten wurden bei den stark porösen, richtungslosen Rauwacken der Raibler-Formation ermittelt.

2.2 Modellvorstellung

Das geologisch-kinematische Modell der Rutschung Brienz ist anhand der Profile West (vgl. Fig. 4) und Mitte (vgl. Fig. 5) dargestellt.

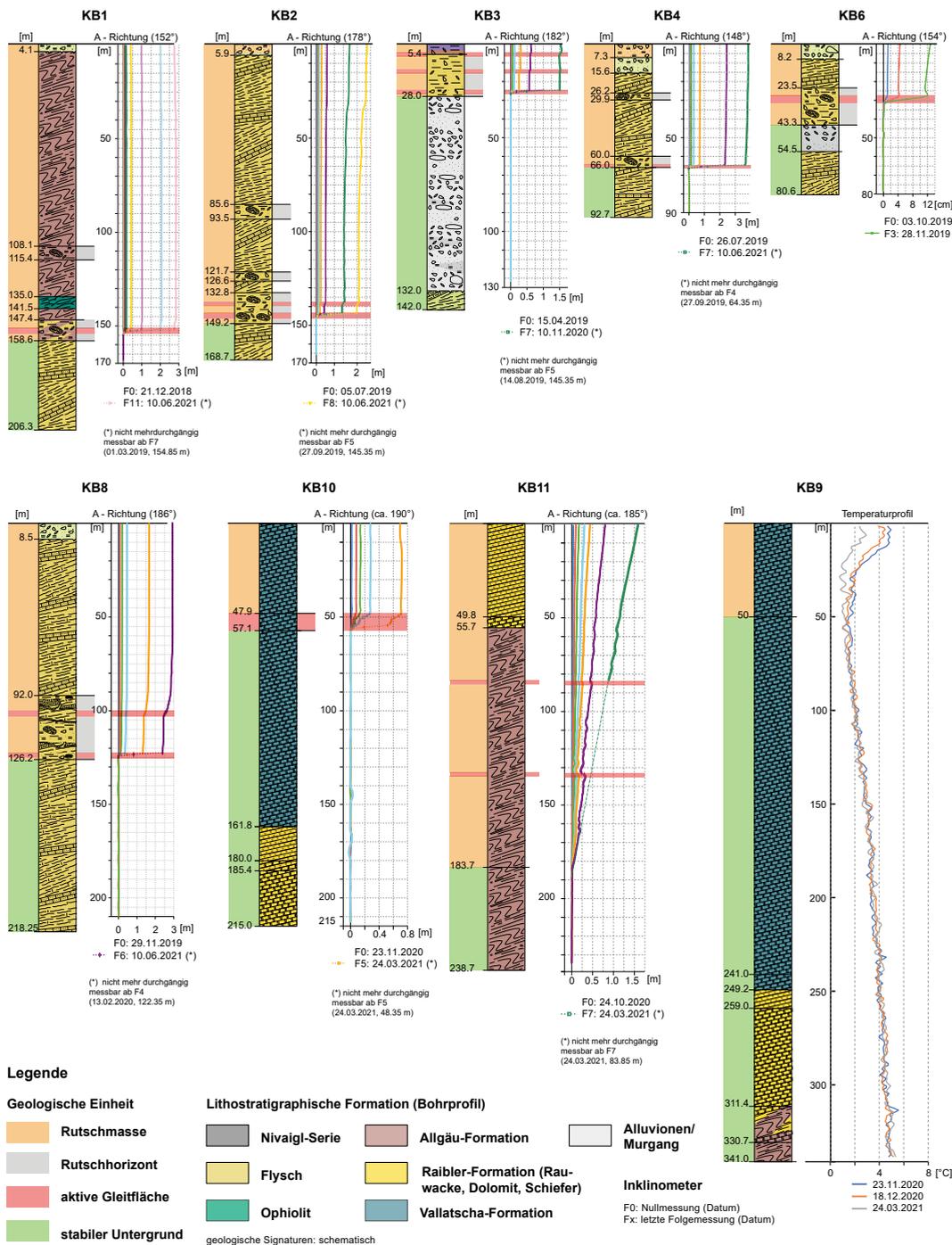
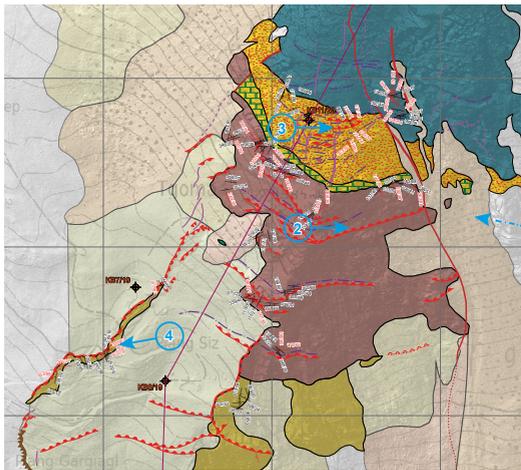


Fig. 2: Geologische Bohrprofile und Inclinometermessungen der Kernbohrungen KB1, KB2, KB3, KB4 und KB6 (Rutschung Dorf, oben), sowie der Kernbohrung KB8, KB10 und KB11 (Übergangsbereich / Rutschung Berg). Geologisches Bohrprofil mit Temperaturprofil der Kernbohrung KB9 (rechts unten). Die Inclinometermessungen, die nicht mehr durchgängig messbar waren, wurden mittels geodätischer Vermessungen des Bohrkopfs korrigiert.



Legende

Bewegungsinduzierte Phänomene

aktiv / wenig aktiv / vermutet

- Sekundärarriss, talwärts, tiefgründig
- Sekundärarriss, bergwärts, tiefgründig
- Sekundärarriss, talwärts, flach- bis mittelgründig
- Sekundärarriss, bergwärts, flach- bis mittelgründig
- Scherriss
- Zugriss/-spalte, gesichert / vermutet
- Nackental

Fels

- Flysch
- Ophiolit
- Allgäu-Formation
- Raibler-Formation (Rauwacke, Gips/Anhydrit, Dolomit, Schiefer)
- Vallatscha-Formation

Lockergestein

- Hangschutt
- Blockschutt
- Felssturzablagerung
- Moräne

- Einfallen Schichtung/Schieferung (Azimut/Fallwinkel)
- Einfallen Klüfte (Azimut/Fallwinkel)

→ Fotostandort, Blickrichtung



Fig. 3: Strukturgeologische und geomorphologische Detailkarte, Caltgeras (oben links, Ausschnitt vgl. Fig. 1); Fotos 1 und 2: aktive Kippflächen innerhalb der Schiefer der Allgäu-Formation (Fm); Foto 3: steil bergwärts einfallende Zugspalten in den Rauwacken der Raibler-Formation. Foto 4: aktiver Anriss im Bereich des Flyschs (Westrand).

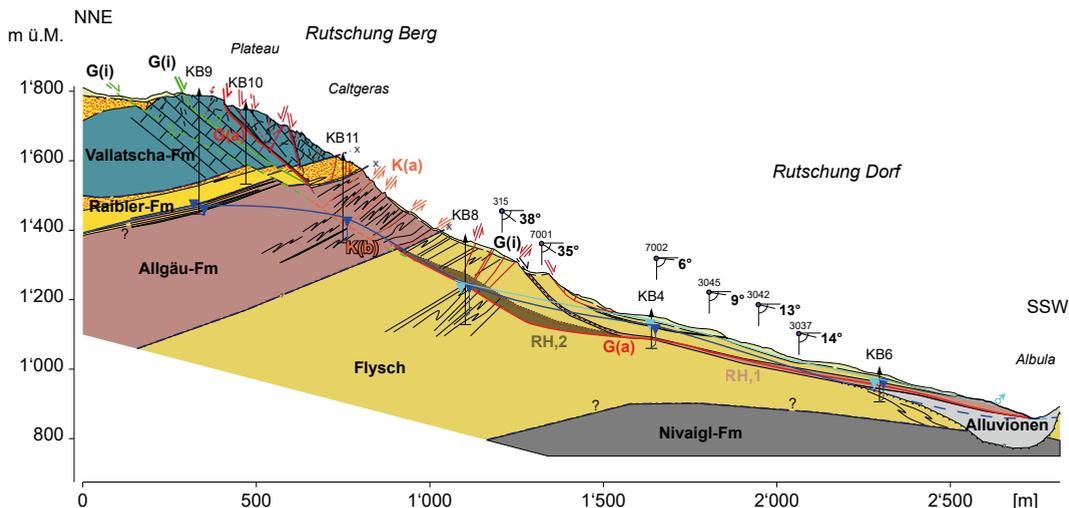


Fig. 4: Geologisch-kinematisches/-hydrogeologisches Längsprofil West: **G(a)**: aktive Basisgleitfläche, nachgewiesen; **G(i)** inaktive Gleitfläche, nachgewiesen oder vermutet; **K(a)**: aktive Kippfläche (counter scarp), **K(b)**: aktive Kippbasis, nachgewiesen; **RH1**: Rutschhorizont, stark bis sehr stark kakiritisiert (matrixgestützte Rutschbrekzie), hydraulisch undurchlässig; **RH2**: Rutschhorizont, schwach bis mässig kakiritisiert (vorwiegend komponenten-gestützte Rutschbrekzie), hydraulisch durchlässig; **Verschiebungsmessungen**: 315: Neigungswinkel Reflektor; 7001, 7002, 3045, 3042, 3037: Neigungswinkel GPS / GNSS-Messpunkt; **Grundwasser**: Bergwasserspiegel stabiler Fels (dunkelblau), Wasserspiegel Rutschmasse (hellblau), Grundwasserspiegel Talgrundwasserträger (dunkelblau gestrichelt).

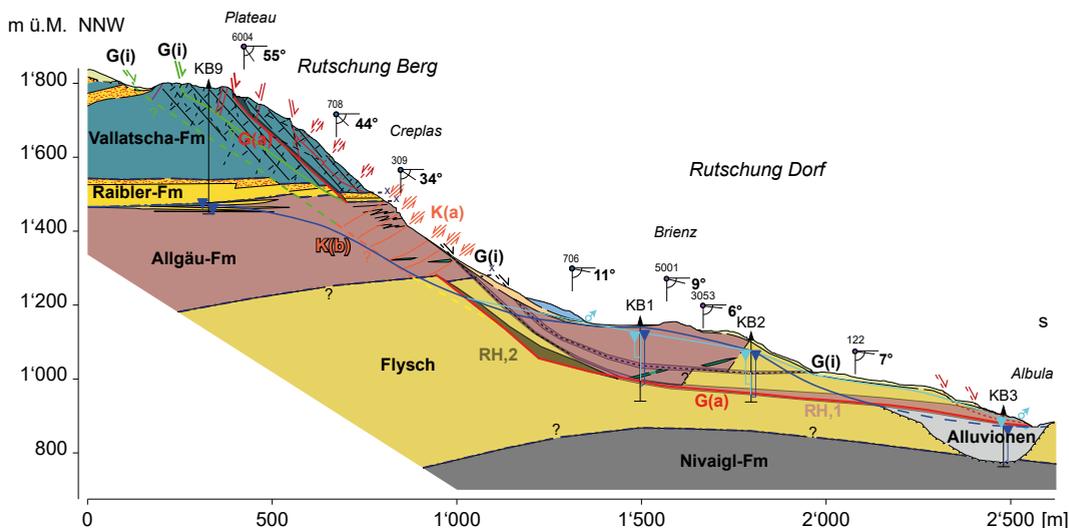


Fig. 5: Geologisch-kinematisches/-hydrogeologisches Längsprofil Mitte: **G(a)**: aktive Basisgleitfläche, nachgewiesen oder vermutet **G(i)** inaktive Gleitfläche, nachgewiesen **K(a)**: aktive Kippfläche (counter scarp), **K(b)**: aktive Kippbasis, vermutet; **RH1**: Rutschhorizont, stark bis sehr stark kakiritisiert (matrixgestützte Rutschbrekzie), hydraulisch undurchlässig; **RH2**: Rutschhorizont, schwach bis mässig kakiritisiert (vorwiegend komponenten-gestützte Rutschbrekzie), hydraulisch durchlässig. **Verschiebungsmessungen**: 708, 309, 706: Neigungswinkel Reflektor; 6004, 5001, 3053, 122: Neigungswinkel GPS / GNSS-Messpunkt; **Grundwasser**: Bergwasserspiegel stabiler Fels (dunkelblau), Wasserspiegel Rutschmasse (hellblau), Grundwasserspiegel Talgrundwasserträger (dunkelblau gestrichelt).

Die Rutschmasse besteht aus generell von oben (Rutschung Berg) nach unten (Rutschung Dorf) zunehmend mechanisch stark zerrüttetem und zerbrochenem Festgestein, der im Rutschgebiet vorliegenden geologischen Einheiten.

Die instabilen Felsmassen im Gebiet der Rutschung Berg bestehen, abgesehen von den tektonisch stark beanspruchten und verwitterten Rauwacken der Raibler-Formation, grösstenteils aus kompakten, geklüfteten Felspaketen der Vallatscha-Formation und der Allgäu-Formation.

Die Rutschmasse im Gebiet Dorf besteht grösstenteils aus Ton- und (Sand-) Kalkschiefern des Flysch und untergeordnet der Allgäu-Formation. Im Übergangsbereich zur Rutschung Berg liegen noch vorwiegend kompakte Felspakete vor, ähnlich der Rutschmasse Berg. Im Bereich des Dorfes sind die Gesteine der Rutschmasse lokal mässig bis stark kakiritisiert und infolge der zunehmenden mechanischen Beanspruchung zerbrochen. Im Fussbereich der Rutschung ist der Flysch komplett entfestigt und in ein Lockergestein umgewandelt.

Die detaillierte phänomenologische Kartierung (Fig. 3) bildet die Basis für das Verständnis der gemessenen Geländedeformationen und Bewegungsmechanismen und erlaubt damit neben den Inklinometermessungen in den Sondierbohrungen wichtige Rückschlüsse auf die derzeit ablaufenden geomechanischen und kinematischen Prozesse innerhalb der instabilen Fels- resp. Rutschmasse.

Bei der Rutschung Berg spielen das Trennflächengefüge sowie präexistierende Bruchstrukturen infolge sprödetektonischer Überprägung eine zentrale Rolle. Die Lage und Beschaffenheit der Felstrennflächen bestimmen sowohl die Kinematik innerhalb der verschiedenen geologischen Einheiten als auch die interne (Kompartimentierung) und laterale (Rutschungsränder) Begrenzung der

instabilen Felsmassen. Die stark geklüfteten Dolomite der Vallatscha-Formation im Anrissgebiet zeigen ein südwärts gerichtetes Gleiten parallel zum Schichteinfallen, welches im Bereich der steilen Felsabbrüche infolge zunehmender Kippbewegungen die höchsten Verschiebungsbeträge aufweist. Die Bewegungsbasis der instabilen Felsmasse ist im Gebiet Berg als schwach bis mässig kakiritisierte, vorwiegend komponentengestützte, hydraulisch durchlässige Rutschbrekzie ausgebildet (vgl. Fig. 5).

Die im Gebiet Caltgeras (Fig. 4) und Creplas (Fig. 5) anstehenden Schiefer der Allgäu-Formation zeigen tiefreichende Kippbewegungen entlang steil bergwärts einfallenden Kippflächen mit einem Nachsacken der darüberliegenden Rauwacken der Raibler-Formation. Im Übergang zum darunterliegenden Flysch gehen die Kippbewegungen zunehmend in ein Gleiten über. Der (ursprüngliche) Übergang des Bewegungsmechanismus vom Gleiten zum Kippen wird im Bereich des lithologischen Übergangs vom Flysch zu den Allgäu-Schiefern vermutet. Aufgrund lateral hochdurchtrennender, steilstehender tektonischer Bruchstrukturen und der annähernd senkrecht zur Bewegungsrichtung ausgeprägten, schieferungsbedingten Anisotropie, wird ein Gleiten in der Allgäu-Formation generell stärker behindert als im darunterliegenden, flacher einfallenden Flysch. Unterstützt wird dies durch Oberflächenbeobachtungen westlich des Felsrückens Caltgeras. Der laterale Anriss der Rutschung Dorf ist innerhalb des Flysches stark ausgeprägt und wird im Übergang zur Allgäu-Formation zunehmend diffuser (vgl. Fig. 3).

Im Übergangsbereich zwischen der Rutschung Berg und der Rutschung Dorf findet im Flysch ein basales Gleiten quer zum Schichteinfallen statt. Der Rutschhorizont besteht vorwiegend aus einer schwach bis mässig kakiritisierten, komponentengestützten Rutschbrekzie. Der Bewegungshorizont ist vergleichsweise jung und hat, entspre-

chend zum derzeit aktiven Anriss einen bescheidenen Verschiebungsweg von einigen 10er Metern erfahren.

Bei der Rutschung Dorf begünstigt das flach bis mittelsteil nach SE-orientierte Einfallen der Schieferung die generell nach SSE-orientierte Rutschbewegung. Die Gleitbewegungen finden an einer (einzigen) basalen Gleitfläche statt. Der durchschnittlich 5 bis 10 m mächtige Rutschhorizont, bestehend aus einer stark bis sehr stark kakiritisierten, matrixgestützten Rutschbrekzie, ist bei einer Gesamtverschiebung von einigen 100er Meter vermutlich seit mehreren 1000 Jahren aktiv. Der minimale Verschiebungsbetrag ist im Fussbereich der Rutschung Dorf erkennbar, in welchem die Rutschmasse die rund 100 m mächtigen Alluvionen der Albula auf einer Länge von mittlerweile mindestens 400 m überfahren hat (vgl. Fig. 5).

Die Rutschmasse weist im zentralen Gebiet Dorf eine maximale Mächtigkeit von rund 150 m auf (Fig. 5). Aufgrund der Beobachtung von inaktiven Rutschhorizonten in den beiden Sondierbohrungen KB1 und KB2, lithologischen (Allgäu-Formation liegt auf Flysch) und morphologischen Merkmalen (Stauchwulst) sowie Überlegungen zur Genese wird angenommen, dass die grosse Mächtigkeit einer zweiten, über der unteren Rutschmasse liegenden, heute inaktiven Rutschmasse geschuldet ist. Diese Rutschmasse besteht volumenmässig grösstenteils aus der Allgäu-Formation, nur im Bereich der Stirn ist Flysch an der Geländeoberfläche anzutreffen (vgl. Fig. 5). Insbesondere im oberen Teil der überlagernden Rutschmasse sind häufig intakte, zusammenhängende Felspakete vorhanden.

2.3 Modellvalidierung

Das geologisch-kinematische Modell wird durch Bewegungs- und Deformationsmessungen in den Bohrungen und an der Gelän-

doberfläche gestützt. Mittels periodischer Inklinometermessungen wurden in insgesamt zehn Sondierbohrungen sowohl die zeitliche Entwicklung der Verschiebungsbeträge wie auch deren räumliche Verteilung in der Tiefe entlang dem Bohrloch gemessen (Fig. 2). Ergänzend zu den Inklinometern wurden bei sämtlichen Bohrungen Bohrlochkopfvermessungen durchgeführt und als Redundanz in einzelnen Bohrungen zusätzliche Bohrlochdeformationsmesssysteme (Glasfaser-/TDR-Kabel) resp. faseroptische Temperaturmesskabel eingebaut. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Messmethoden, zeigen sämtliche Messungen übereinstimmende Ergebnisse. Im Bereich der Rutschung Dorf kumuliert sich 80 bis 100% der Gesamtverschiebung der Rutschmasse auf die in unterschiedlicher Tiefe befindliche Basisgleitfläche. Einzig bei der Sondierbohrung KB3 im Fussbereich der Rutschung können mehrere sekundäre Gleitflächen detektiert werden. Auch im Übergangsbereich zwischen Rutschung Dorf und Berg (Bohrung KB8 und KB12) sowie im Gebiet der Rutschung Berg (Bohrung KB10) zeigen die Inklinometer ein Gleiten. Zwischen KB8 und KB11 geht die basale Gleitfläche der Rutschung Dorf innerhalb der Allgäu-Formation in ein Kippen (Toppling, Hakenwurf) über, an dessen Bewegungsbasis nachweislich (Inklinometermessungen in der Bohrung KB11) keine talwärts gerichteten Scherbewegungen auftreten.

Die detaillierten, petrographischen und geotechnischen Kernaufnahmen der Rutschmasse und des Rutschhorizonts mit Bestimmung des Zerlegungsgrades und der Kakiritisierung erlaubte eine systematische Klassifikation der Bohrkerne. Dabei lassen der interne Aufbau der Rutschmasse und des Rutschhorizonts Rückschlüsse auf die Genese der Rutschung Brienz zu. Die Entstehung der Rutschung Brienz als Bergsturz kann ausgeschlossen werden. Vielmehr hat die heutige Rutschung Brienz als ursprüngliche Felsrutschung vermutlich eine lang an-

dauernde Entstehungsgeschichte mit unterschiedlich aktiven Bewegungsphasen und ist höchstwahrscheinlich das Ergebnis mehrerer Rutschereignisse mit sich überlagernden Rutschkörpern. Anhand von Volumenberechnungen wurden zur Plausibilisierung der verschiedenen Rutschereignisse und unter der Annahme eines ursprünglichen Verlaufs der Geländeoberfläche Abschätzungen der Massenbilanz durchgeführt.

Die Ausdehnung der mit den Bohrungen KB3 und KB6 erbohrten Alluvionen und der Verlauf der Felsoberfläche im Talgrund konnten zusätzlich mittels hybridseismischen Untersuchungen validiert werden.

Mittels numerischer Modellierungen konnte das Toppling im Bereich der Allgäu-Schiefer,

trotz zahlreicher Vereinfachungen, mit dem geologischen Modell (Profil West) wirklichkeitsnah reproduziert werden (vgl. Fig. 6). Zudem konnten weitere Erkenntnisse über die zeitliche und räumliche Entwicklung der Rutschmasse in der Kompressionszone im Übergangsbereich der Rutschung Berg zur Rutschung Dorf gewonnen werden, welche insbesondere hinsichtlich der Beurteilung von grossvolumigen Gefährdungsszenarien aus der Rutschung Berg von Relevanz sind. Des Weiteren deuten die bisherigen numerischen Modellrechnungen darauf hin, dass die progressiv bergwärts fortpflanzende Basisgleitfläche der Rutschung Dorf nicht an die in grösserer Tiefe liegende Kippbasis in den Allgäu-Schiefen gebunden ist.

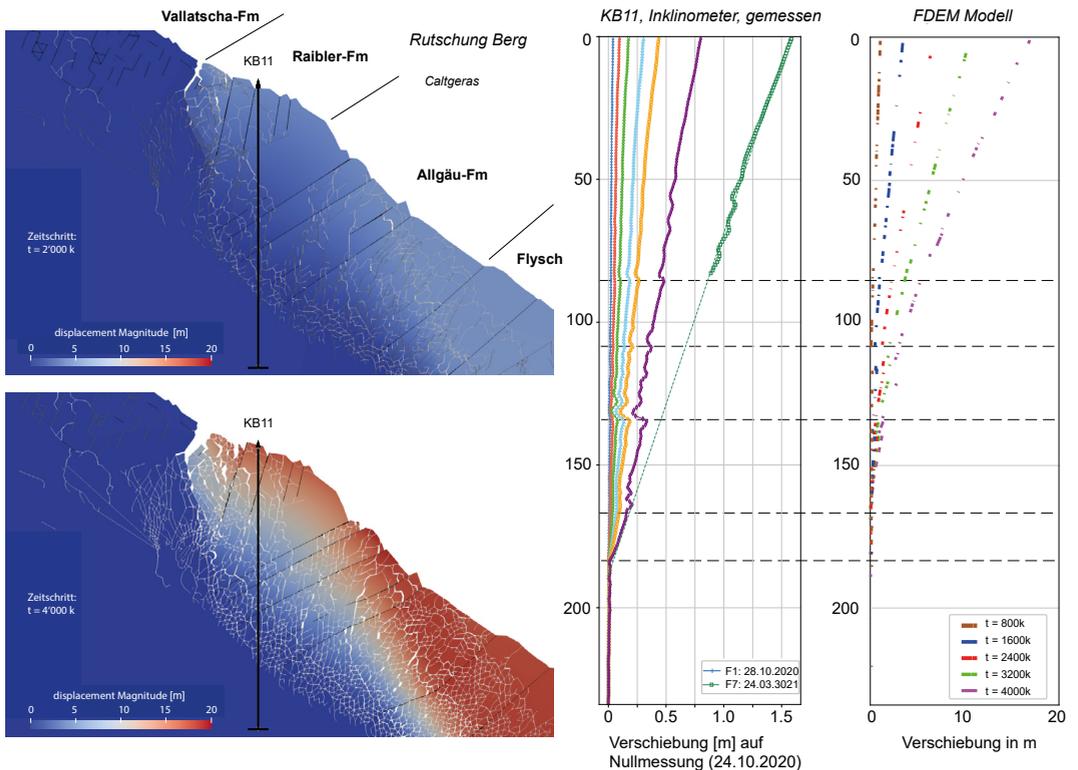


Fig. 6: Zeitliche und räumliche Entwicklung von Extensions- und Topplingstrukturen (Kippflächen) im Gebiet Caltgeras entlang dem Profil West (vgl. Fig. 3) für $t = 2000k$ (links oben) und $t = 4000k$ (links unten). Rechts sind die in der KB11/20 durchgeführten Inklinometermessungen den modellierten Verschiebungen des FDEM-Modells gegenübergestellt.

3 Hydrogeologisches Modell

3.1 Daten- und Modellgrundlagen

Die Datengrundlagen für das hydrogeologische Modell der Rutschung Brienz wurden im Rahmen der geologischen Detailuntersuchungen zwischen 2018 bis 2021 erhoben [9]. Bereits frühere Untersuchungen [1] vermuteten, dass in die Rutschung gelangendes Wasser, insbesondere aus höherliegenden Gebieten, einen negativen Einfluss auf die Rutschaktivität in Brienz hat. Darauf basierend wurden Ende des 19. resp. zu Beginn des 20. Jahrhunderts erste Sanierungsmassnahmen in Form von Oberflächenentwässerungssystemen im Gebiet der Brienser Maiensäse oberhalb der Rutschung Berg sowie zu einem späteren Zeitpunkt auf der gesamten Rutschung Dorf ausgeführt. Einen Einfluss dieser Sanierungsmassnahmen auf die Rutschaktivität konnte nie nachgewiesen werden.

Die im Jahr 2018 gestartete Überwachung von Oberflächenquellen lieferte grundlegende Informationen über die Exfiltrationsgebiete in der Südflanke des Piz Linard. So konnte anhand des Schüttungsverhaltens der ertragreichsten Quellen innerhalb und ausserhalb der Rutschmasse gezeigt werden, dass die Quellschüttungen während den saisonalen Beschleunigungsphasen über die Wintermonate (November bis März/April) deutlich ansteigen, mit Höchstwerten bei Wärmeeinbrüchen und der Schneeschmelze in den tiefen Höhenlagen ($< 2'000$ m ü. M.). Mittels permanenter Aufzeichnung der Schüttmengen konnte zudem gezeigt werden, dass die Quellen innert wenigen Tagen auf die Schmelzwassereinträge reagieren. Anhand von zusätzlichen Isotopenanalysen (Sauerstoff-18 und Deuterium) am Quellwasser konnten die mittleren Infiltrationshöhen (Grundwasserneubildungsgebiete) ermittelt werden. Für die ertragreichsten Quellgruppen inner- und ausserhalb der Rutschung im Gebiet Dorf ergaben sich mittlere Infiltrationshöhen zwischen $1'600$ und $2'000$ m ü. M.,

was in guter Übereinstimmung mit dem beobachteten Quellschüttungsverhalten steht. Höhergelegene Quellen ($> 1'500$ m ü. M.) sowie eine sehr ertragreiche Karstquelle im Talgrund westlich der Rutschung Dorf zeigen mittlere Infiltrationshöhen zwischen $2'400$ bis $2'800$ m ü. M. und entsprechende Schüttungsmaxima in den Monaten Mai bis Juni während der Schneeschmelze in höheren Lagen ($> 2'000$ m ü. M.). Die Quellwässer können aufgrund der Wasserchemie und der elektrischen Leitfähigkeitsmessungen in verschiedene Wassertypen mit unterschiedlicher Herkunft eingeteilt werden. Oberhalb der Rutschung Brienz sowie westlich davon treten Magnesium-Bicarbonat Wässer mit geringer Leitfähigkeit auf, im zentralen Bereich Mischwässer mit mittlerer Leitfähigkeit und im Westen Kalzium-Sulfat Wässer mit hohen elektrischen Leitfähigkeiten. Dieser hydrochemische Befund lässt sich gut mit der Petrographie der durchflossenen Gesteinsformationen erklären. So geben sulfathaltige Wässer einen klaren Hinweis für das Durchfliessen der gipshaltigen Raibler-Formation, welche sich Richtung Westen zunehmend talwärts neigen und bei der ertragreichen Karstquelle westlich der Rutschung Brienz den Talgrund erreichen. Die ebenfalls im Rahmen der geologischen Detailuntersuchungen im gesamten Untersuchungsperimeter eingegebenen Markierstoffe ergaben anfänglich kein grossräumiges Bild, da einzig direkt auf der Rutschung Dorf und westlich davon eingegebene fluoreszierenden Farbstoffe wieder angetroffen wurden. Es konnte damit aber nachgewiesen werden, dass im westlichen Übergangsbereich der Rutschung Dorf zur Rutschung Berg Wasser von ausserhalb der aktiven Rutschmasse in die Rutschung hineingelangt und sich innerhalb der Rutschmasse generell in südöstlicher Richtung ausbreitet (entspricht dem generellen Einfallen der Schieferung im Flysch).

3.2 Modellvorstellung

Das aus den hydrogeologischen und hydrochemischen Datengrundlagen abgeleitete hydrogeologische Modell der Rutschung Brienz ist in Figur 7 dargestellt. Aufgrund der komplexen hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse handelt es sich dabei um ein Konzeptmodell und nicht um ein Grundwassermodell, welches die effektiven Fließwege im geologischen Untergrund im Detail abzubilden vermag. Nichtsdestotrotz vermag das auf dem geologischen Modell basierende, vereinfachte Modell die Gesamtheit der hydrogeologischen Untersuchungsergebnisse zwischen 2018 bis 2021 zu erklären. Aus dem Modell ist ersichtlich, dass in der Gipfelregion des Piz Linard und des Lenzer Horn infiltrierendes Wasser aufgrund des SE-gerichteten Schichteinfallens im Untergrund grossräumig Richtung der Rutschung Brienz fliesst, dieses oberhalb des Anrissgebietes der Rutschung Berg (Propissi/Schautschen) aufgrund des lokal bergwärtigen Einfallens der stauenden Allgäu-Schiefer zu einem grossen Teil Richtung Osten und nur zu einem kleinen Teil Richtung Westen um die Rutschung Brienz herumgeleitet wird (vgl. Fig. 7). Dies gilt auch für infiltrierendes

Wasser in den stark geklüfteten Dolomiten der Vallatscha-Formation der Rutschung Berg. Gemäss Modellvorstellung gelangt einzig Niederschlags- und Schmelzwasser aus der Rutschung Dorf und dem Übergangsbereich zur Rutschung Berg in die Rutschmasse, sowie im Westen zufließendes Wasser von ausserhalb der aktiven Rutschung. Das in die Rutschmasse infiltrierende Wasser führt dann zu den in den Sondierbohrungen auf der Rutschung Dorf beobachteten Wasserspiegelanstiegen, welche mit dem saisonalen Bewegungsverhalten der gesamten Rutschung Brienz korrelieren. Aufgrund der hydraulisch abdichtenden Wirkung des basalen Gleit-horizontes der Rutschung Dorf tritt das in der Rutschmasse zirkulierende Hangwasser im gesamten Fussbereich der Rutschung Dorf in Form von zahlreichen diffusen Quellaustritten wieder zu Tage.

Alle im Gebiet Dorf und Berg abgeteufte Sondierbohrungen mussten aus bohrtechnischen und Stabilitätsgründen innerhalb der Rutschmasse mit einer Stahlverrohrung ausgebaut werden, was die Erhebung von hydraulischen Parametern innerhalb der Rutsch-

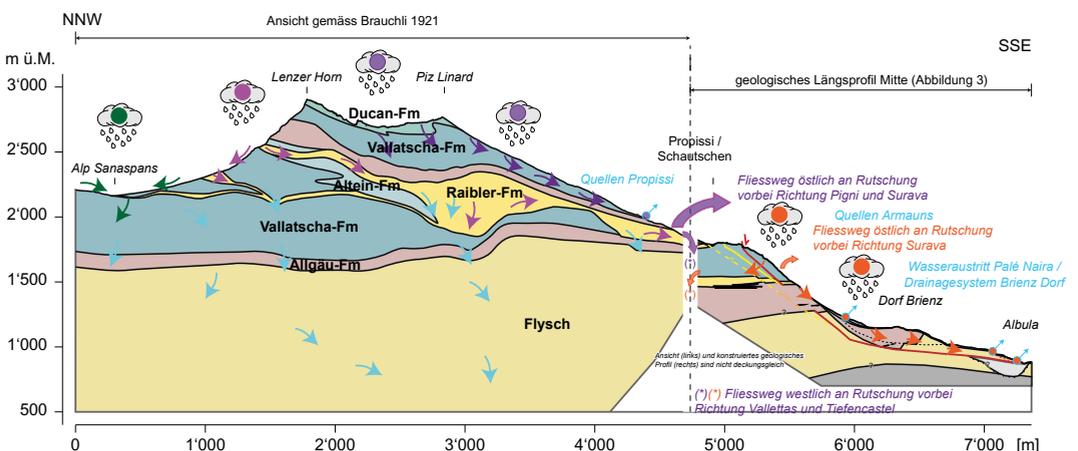


Fig. 7: Geologisch-hydrogeologisches Längsprofil von der Albula über den Piz Linard und das Lenzer Horn bis ins nördlich davon gelegene Hochtal der Alp Sanaspans mit schematischer Darstellung der verschiedenen Fließwege (Pfeile). Die unterschiedlichen Farben und Fließwegen widerspiegeln die isotopische Varietät des Niederschlags/Wassers.

masse während dem Bohren bereits stark einschränkte und nach Abschluss der Bohrungen verunmöglichte. Nichtsdestotrotz wurde beim Durchbohren der Rutschmasse und des basalen Rutschhorizontes im Gebiet Dorf subartesische bis artesische Druckverhältnisse sowohl innerhalb der Rutschmasse wie auch im anstehenden Fels unterhalb der Rutschmasse angetroffen. Im Gegensatz dazu wurden bei den Bohrungen in den stark zerklüfteten Dolomiten der Vallatscha-Formation im Gebiet Berg weder permanente Hangwasserspiegel innerhalb der instabilen Felsmassen noch im darunterliegenden anstehenden Fels angetroffen. Die daraus abgeleiteten Hangwasserspiegel (innerhalb der Rutschmasse) und Bergwasserspiegel (im darunterliegenden anstehenden Fels) sind in den geologischen Profilen Mitte (Fig. 5) und West (Fig. 4) dargestellt und werden in den Modellen als hydraulisch voneinander getrennte Systeme betrachtet. Diese Modellvorstellung ist insbesondere im Hinblick auf eine Sanierung der Rutschung Brienz mittels Tiefenentwässerungsmassnahmen von Relevanz, da gemäss Modellvorstellung sowohl unterhalb der Rutschung Brienz stabilitätsvermindernde Auftriebsdrücke als auch innerhalb der Rutschmasse an deren Basis scherfestigkeitsreduzierende Wasserdrücke prognostiziert werden.

3.3 Modellvalidierung

Die nach Abschluss der geologischen Detailuntersuchungen fortgesetzten und im Rahmen der Folgeuntersuchungen zusätzlich gestarteten hydrogeologischen Messreihen dienen, zusammen mit den hydrogeologischen Untersuchungen aus dem Sondierstollen [7], als Basis für die laufende Überprüfung resp. Validierung des hydrogeologischen Modells.

Mit schneehydrologischen Analysen wurden mittels prozessbasierten numerischen Modellrechnungen (durchgeführt durch das

SLF) zeitlich und räumlich hochaufgelöst die Wassereinträge durch Niederschlag und Schneeschmelze im grossräumigen Einzugsgebiet der Rutschung Brienz ermittelt. Mittels Zeitreihenanalysen und -korrelationen der Wassereinträge mit Wasserdruckmessungen, Quellschüttungen und Bewegungsgeschwindigkeiten konnten sowohl die für die Rutschung Brienz relevanten Infiltrationsgebiete ermittelt als auch der kausale Zusammenhang der Wassereinträge mit dem saisonalen Bewegungsverhalten der Rutschung Brienz aufgezeigt werden. So konnte mit den schneehydrologischen Analysen nachgewiesen werden, dass Wassereinträge in Höhenlagen > 2'000 m ü. M. nicht mit den Beschleunigungsphasen der Rutschung Brienz korrelieren, Wassereinträge auf der derzeit aktiven Rutschung jedoch in hohem Masse. Die Entwicklung der Geschwindigkeitszunahme während den Wintermonaten ist dabei stark abhängig von den Schneemengen und den Schneeschmelzeereignissen in den Höhenlagen der Gebiete Dorf und Berg (vgl. Fig. 8). So führen schneearme Winter (2019/20) ohne markante Schneeschmelze zwar zu einem Anstieg der Rutschgeschwindigkeiten, diese erholen sich jedoch bis zum erneuten Anstieg im nächsten Spätherbst grösstenteils vollständig. In schneereichen Wintern (2018/19 und 2020/21) mit markanter Schneeschmelze kommt es mit deren Einsetzen zu einem deutlichen Anstieg der Rutschgeschwindigkeiten im Gebiet Dorf und im Gebiet Berg. Die verschiedenen Kompartimente der Rutschung Brienz zeigen zwar unterschiedliche absolute Geschwindigkeiten und teils unterschiedliche oder sich überlagernde Bewegungsmechanismen, präsentieren in ihrer Gesamtheit seit dem Winter 2017/18 aber ein einheitliches Bewegungsverhalten, welches durch die schneehydrologischen Verhältnisse gesteuert wird.

Die schneehydrologischen Analysen (Wassereinträge ins hydrogeologische System) zusammen mit den Quellschüttungsmessungen (Wasserausträge aus dem hydrogeolo-

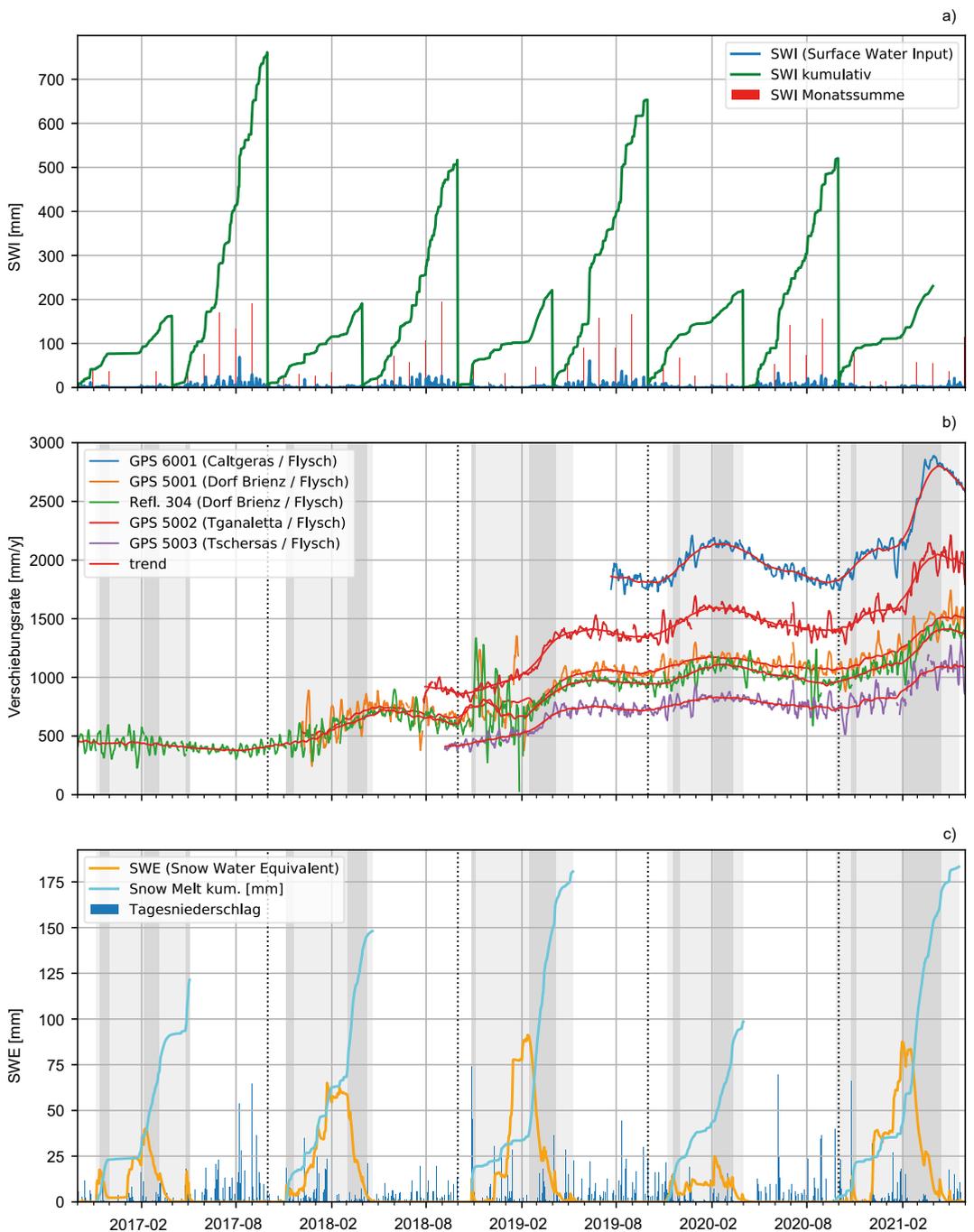


Fig. 8: Grafische Darstellung a) des akkumulierten Wassereintrages (SWI: Surface Water Input) als Tages-, Monats- und Halbjahreswerte (Sommer-/Winterhalbjahr) im Gebiet der Rutschung Dorf und Berg in [mm]; b) zeitliche Entwicklung der Verschiebungsgeschwindigkeiten in [mm/Jahr] ausgewählter GPS-Messpunkte und Reflektoren im Gebiet der **Rutschung Dorf**; Die Standorte der GPS/GNSS-Messpunkte sind in Fig. 1 ersichtlich.; c) zeitliche Entwicklung des Wasserspeichers in Form von Schnee angegeben als Schneewasseräquivalent (SWE: Snow Water Equivalent) im Gebiet der Rutschung Dorf und Berg in [mm] zusammen mit dem Tagesniederschlag gemessen an der MeteoSchweiz-Station in Tiefencastel in [mm]. Die grauen Schattierungen zeigen die Schneeperiode (hellgrau) und die Schneeschmelze (dunkelgrau) im Gebiet der Rutschung Dorf und Berg.

gischen System) erlaubten eine quantitativ gut abgestützte Wasserbilanz zu erstellen, welche die hydrogeologischen Modellvorstellungen mit den entsprechenden Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten bestätigten.

Die durch die Rutschmasse gegen Süden abgedrängte Albula kann, basierend auf den durchgeführten Untersuchungen, als primäre treibende Kraft der grossräumigen Rutschbewegungen, zumindest seit dem Sommer 2017, ausgeschlossen werden. Zum einen vermögen die durch den Pegel der Albula kontrollierten Grundwasserstände in den Alluvionen selbst bei Hochwasserständen der Albula den Fuss der Rutschung nicht unter Auftrieb zu setzen. Zum anderen steht das seit 2017 wirkende saisonale Bewegungsverhalten der Rutschung Brienz nicht im Einklang mit den Abflussmessungen.

Die aus dem Sondierstollen gewonnenen Erkenntnisse stützen resp. erhärten die hydraulischen und hydrogeologischen Modellvorstellungen im Bereich der Rutschung Dorf. Mittels hydraulischer Bohrlochversuche in verschiedenen Drainagebohrungen des Sondierstollens konnten die im Modell prognostizierten hydraulischen Wasserüberdrücke im anstehenden Fels unterhalb der Rutschmasse quantitativ ermittelt und damit nachgewiesen werden. Zusätzlich konnte mit diesen Versuchen gezeigt werden, dass die Gebirgsdurchlässigkeiten im anstehenden Fels in einem Bereich von mehreren Zehnermetern direkt unterhalb der Rutschmasse gegenüber dem tieferliegenden Fels deutlich erhöht sind und dieser Bereich eine gute hydraulische Konnektivität aufweist (hydraulische Interferenzen in Beobachtungsbohrungen). Dies ist insbesondere hinsichtlich der Drainierbarkeit des anstehenden Flyschs unterhalb der Rutschmasse mittels Tiefenentwässerungsmassnahmen von grosser Bedeutung. Hydrochemische Wasseranalysen haben zudem ergeben, dass es sich bei den Wasserzutritten aus den Drainagebohrungen im Sondierstollen im Gegensatz zu den Wäs-

sern innerhalb der Rutschmasse und an der Geländeoberfläche um alte Wässer mit sehr geringen Tritium-Gehalten handelt. Der Sondierstollen mit den daraus erstellten Drainagebohrungen im anstehenden Fels vermag bis anhin trotz bescheidenen Wasserzuflüssen von maximal 20 l/min die Wasserüberdrücke unter der Rutschmasse signifikant abzusenken und dadurch die Rutschgeschwindigkeiten im Einflussbereich über dem Stollen bis um die Hälfte zu reduzieren.

Insgesamt gesehen, können die Datengrundlagen, die hydrogeologischen und hydraulischen Zusammenhänge sowie deren Auswirkungen auf das mechanische Verhalten der Rutschung Brienz mit dem vorliegenden hydrogeologischen Modell nachvollziehbar erklärt und konzeptuell abgebildet werden.

4 Diskussion, Entwicklungs- und Gefährdungsszenarien

Die im Rahmen der geologischen Detailuntersuchungen 2018 bis 2021 erhobenen Grundlagendaten sowie die darauf basierenden geologisch-kinematischen und hydrogeologischen Modelle haben grundlegend zum Verständnis der Rutschung Brienz und deren Einflussfaktoren beigetragen. Aufgrund der erheblichen Komplexität und des äusserst dynamischen Bewegungsverhaltens der Rutschung Brienz erlauben solche statischen (Konzept-) Modelle (Darstellungen des Ist-Zustandes) keine verlässlichen Prognosen bezüglich zukünftiger Entwicklungsszenarien. Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Rutschung Brienz hängt stark vom mechanischen Zusammenspiel der beiden Teilgebiete Rutschung Dorf und Rutschung Berg ab und spielt sowohl für die Beurteilung von Gefährdungsszenarien (insbesondere Ausbruch- und Sturzereignisse aus dem Gebiet Berg) als auch für die Planung und Projektierung von Sanierungsmassnahmen (insbesondere allfällige Erweiterung Sondierstollen zu Entwässerungstollen im Gebiet Dorf) eine wesentliche Rolle.

Die für die Bewohner, die Entscheidungsträger von Gemeinde, Kanton und Bund sowie die Versorgungs-, Verkehrs- und Infrastrukturbetreiber relevanten Fragestellungen bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Rutschung Brienz, verlangen nach dynamischen Berechnungsmodellen, welche in der Lage sind, komplexe Bruch- und Deformationsprozesse räumlich und zeitlich abzubilden, äussere hydrologische Einflüsse (Schneeschnmelze und Niederschlag) zu berücksichtigen und zusätzlich den kinematischen, geomechanischen und hydrogeologischen Verhältnissen Rechnung zu tragen. Sowohl für geomechanische wie auch hydromechanische Modellierungen müssen die dem Bewegungsverhalten der Rutschung Brienz in den Gebieten Dorf und Berg zugrunde liegenden mechanischen und hydraulischen Prozesse ausreichend bekannt und verstanden sein. Diesbezügliche Kenntnis- und Datenlücken sollen im Rahmen weiterführender geologischer Folgeuntersuchungen zur Rutschung Brienz mit einer gezielten Erhebung (messtechnisch und mittels numerischer Modelle), Auswertung, Interpretation und Synthese einer fundierten Daten- und Modellgrundlage geschlossen resp. erheblich minimiert werden.

Da das geologische Modell die Basis für das kinematische, hydrogeologische und gegebenenfalls weiterführende numerische Modelle darstellt, führen massgebende Anpassungen im geologischen Modell generell auch zu Anpassungen in den darauf basierenden Modellen. Das geologische Modell hat deshalb höchste Priorität. Es muss robust sein und sowohl Beobachtungen und Messungen an der Oberfläche als auch aus der Tiefe möglichst widerspruchsfrei erklären können. Andererseits können neue hydrogeologische Erkenntnisse aufgrund von geologischen und hydrogeologischen Zusammenhängen auch zur Bestätigung oder Anpassung des geologischen Modells führen.

5 Schlussfolgerungen

Bei der Rutschung Brienz handelt es sich um ein geologisch und hydrogeologisch komplexes und äusserst dynamisches System, welches durch externe, sich zeitlich ändernden Einflussfaktoren geprägt resp. kontrolliert wird. Die Wassereinträge, insbesondere jene der Schneeschnmelze, in der Höhenlage der Rutschung Dorf und Berg haben einen signifikanten Einfluss auf das Bewegungsverhalten und müssen daher für die Beurteilung von Entwicklungs- und Gefährdungsszenarien mitberücksichtigt werden. Die Rutschung Dorf und die Rutschung Berg bilden dabei eine zusammenhängende Grosshangbewegung mit unterschiedlichen, mechanisch interagierenden Kompartimenten und Bewegungsmechanismen, welche ein synchrones Bewegungsverhalten zeigen. Sowohl das geologisch-kinematische Modell als auch das darauf basierende hydrogeologische Modell vermögen die Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Bedingungen im hydrologischen Einzugsgebiet der Rutschung Brienz, den hydraulischen und hydrogeologischen Verhältnissen innerhalb und unterhalb der Rutschmasse sowie den unterschiedlichen Bewegungsraten in den verschiedenen Kompartimenten der Rutschung plausibel zu erklären und konzeptuell abzubilden. Die Resultate und Erkenntnisse aus den Tiefenerkundungen, insbesondere der Sondierbohrungen, sowie der hydrologischen und hydrogeologischen Langzeitmessreihen waren für das Verständnis der komplexen Grosshangbewegung von Brienz von grundlegender Bedeutung.

Die aktuellen Resultate und Erkenntnisse aus dem Sondierstollen und den im Sommer 2022 gestarteten Folgeuntersuchungen bestätigen bisher weitgehend das auf den Ergebnissen der Detailuntersuchungen basierende, geologisch-kinematische Modell der Rutschung Brienz und das darauf basierende hydrogeologische Konzeptmodell oder wurden bei neuen Erkenntnissen dahingehend angepasst.

Danksagung

Die durchgeführten Untersuchungen wurden durch die Gemeinde Albula/Alvra beauftragt und sind zu 90% durch Bund und Kanton subventioniert. Die Restkosten werden durch Gemeinde Albula/Alvra, Tiefbauamt Graubünden und Rhätische Bahn übernommen. Wir danken der Gesamtprojektleitung (Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden) der Fachgruppe Geologie und Naturgefahren (Andreas Huwiler, Andri Largiadèr, Christoph Nänni) und der Gemeinde Albula/Alvra für ihre Zusammenarbeit, die Bereitstellung von Daten und den uneingeschränkten Zugang zum Gelände.

Literaturverzeichnis

- [1] Heim A., 1881: An die hohe Regierung des eidg. Standes Graubünden: Gutachten betreffend Rutschung bei Brienz.
- [2] Brauchli R., 1921: Geologie von Mittelbünden, Geologie der Lenzerhorngruppe, Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz.
- [3] Wyllie D.C. & Mah C.W., 2004: Rock slope engineering, civil and mining 4th edition.
- [4] Ludwig A., August 2011: Kinematische Analyse der Hanginstabilität von Brienz/Brinzauls GR, Masterarbeit ETH Zürich.
- [5] Krähenbühl R. & Nänni C., 2017: Ist das Dorf Brienz-Brinzauls Bergsturz gefährdet, Swiss Bulletin für angewandte Geologie Vol 22/2, 2017
- [6] SLF, Deformationsanalyse der Rutschung von Brienz/Brinzauls, GR, auf Basis terrestrischer und luftgestützter Laserscans, Aktualisierung, August 2020.
- [7] Thöny et. al., 2021 Rutschung Brienz/Brinzauls (GR): Sondierstollen zur Prüfung der Wirksamkeit einer Tiefendrainage, FAN-Agenda 1/2021
- [8] BTG Büro für Technische Geologie AG, Bericht Nr. 5897-19 vom 1. Februar 2022: Rutschung Brienz/Brinzauls GR, Geologische Detailuntersuchungen 2018 bis 2021, Geologisch-Kinematisches Modell, Geologischer Synthesebericht.
- [9] BTG Büro für Technische Geologie AG, Bericht Nr. 5897-20 vom 1. Februar 2022: Rutschung Brienz/Brinzauls GR, Geologische Detailuntersuchungen 2018 bis 2021, Hydrogeologisches Modell, Hydrogeologischer Synthesebericht.