



Michael Kienzl, B.Sc.

**Geotechnisch-geologische Bestandsaufnahme einer partiell  
reaktivierten postglazialen Massenbewegung im hinteren  
Reitalmtal**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Geosciences

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Thomas Marcher

Hofrat Mag. Gerald Valentin

Thomas Geisler, B.Sc. M.Sc.

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, März 2024

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### **AFFIDAVIT**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Möglichkeit nutzen mich bei allen zu bedanken, die mein Studium ermöglicht, betreut und begleitet haben.

Besonderer Dank gilt dem Salzburger Landesgeologen Hofrat Mag. Gerald Valentin, der mir dieses spannende Thema zur Verfügung gestellt und die Ausarbeitung betreut und begleitet hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Thomas Geisler, B.Sc. M.Sc., und Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Thomas Marcher für die Betreuung meiner Arbeit und die für mich immer wieder interessanten und prägenden Erfahrungen und Lehrveranstaltungen im Bereich Felsmechanik und Tunnelbau. Vielen Dank für die Erreichbarkeit bei Nachfragen, die laufende Absprache und die zahlreichen Hilfestellungen, Anmerkungen, Vorschläge und Tipps bei der Erstellung dieser Arbeit.

Großer Dank gilt auch meinen Studienkollegen, die mich in meinem Studium begleitet haben und, egal ob als Motivation oder Ablenkung, immer für den passenden Ausgleich gesorgt haben. Hervorheben möchte ich hier besonders Georg. Vielen Dank für die ständige Motivation, die gute Unterhaltung und das erfolgreiche Zusammenarbeiten bei unserer gemeinsamen Bachelorarbeit und nun auch bei der Bearbeitung dieses Themas in unseren beiden Masterarbeiten. Ich wünsche dir nur das Allerbeste!

Besonders großer Dank gilt auch meinen Eltern, die mir dieses Studium erst ermöglicht haben und mir, wie auch mein Bruder Simon, immer eine Stütze waren.

Natürlich möchte ich mich auch bei meiner Partnerin Hannah bedanken, die mich stets motiviert hat und immer ein offenes Ohr für meine Sorgen hatte.

Danke!

## Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema „geotechnisch-geologische Bestandsaufnahme einer partiell reaktivierten postglazialen Massenbewegung im hinteren Reitalmtal“ untersucht die partielle Reaktivierung einer postglazialen Massenbewegung im hinteren Reitalmtal in Hüttschlag, im Salzburger Pongau (Österreich). Bei diesem am 9. Juni 2019 reaktivierten Bereich handelt es sich um die Hütteggalm. Das Ereignis führte zu Beschädigungen der Zufahrtsstraße und oberhalb der Hütteggalm verlaufenden Zerrissen. Dabei traten lediglich kleinere Deformationen auf, die Gebäude selbst blieben jedoch unbeschädigt. Die Relevanz der Untersuchung liegt im Gefährdungspotential reaktivierter, grenzstabiler Massenbewegungen. Durch die Auswertung hydrologischer, seismischer und meteorologischer Daten werden die Bedingungen zum Zeitpunkt der Aktivierung erfasst und die Entwicklung der Parameter Temperatur und Niederschlag über die Zeit betrachtet. Über eine geologische Kartierung, die Anfertigung einer geologischen Karte und entsprechenden Profilschnitten wird ein Einblick in den lithologischen und strukturellen Aufbau des hinteren Reitalmtals geboten und die Auswirkungen dieser Faktoren angesprochen. Ergänzt durch Standsicherheitsanalysen und die Implementierung von Ergebnissen aus Laboranalysen einer parallel von Kaml (2024) durchgeführten Arbeit gibt die vorliegende Masterarbeit einen Einblick in die auslösenden Faktoren und die Entwicklung der Reaktivierung der Hütteggalm. Um das Verständnis der Situation im hinteren Reitalmtal weiter zu vertiefen, fließen die Untersuchung der postglazialen Massenbewegung sowie des Zusammenwirkens beider Mobilisierungen in die vorliegende Arbeit ein. Dabei wird unter anderem die These des Aufbrandens der durch die postglaziale Massenbewegung mobilisierten Rutschmasse im Bereich der heutigen Hütteggalm behandelt. Für die große postglaziale Massenbewegung lässt sich ein Versagen entlang einer vorliegenden Deckengrenze feststellen. Dagegen zeigt sich für den reaktivierten Bereich der Hütteggalm ein Versagen innerhalb der dort lagernden Phyllite, das maßgeblich von Niederschlag und Schneeschmelze beeinflusst wird. Neben den getroffenen Schlussfolgerungen werden mögliche wirtschaftliche Gegenmaßnahmen zur Verminderung der Gefahr weiterer Mobilisierungen und zusätzliche gezielte Untersuchungen vorgeschlagen.



## Abstract

This master's thesis investigates the partial reactivation of a post-glacial mass movement in the rear Reitalm valley in Hüttschlag, in the Pongau region of Salzburg, Austria. It aims at investigating the influencing factors which facilitate the mass movement. The area, known as the Hütteggalm, experienced reactivation on June 9, 2019, resulting in damage of the access road and cracks forming above the Hütteggalm. Although only minor deformations occurred, the buildings themselves remained undamaged. The significance of this investigation lies in the hazard potential posed by reactivated, boundary-stable mass movements. By analysing hydrological, seismic, and meteorological data, the conditions at the time of activation are documented and the evolution of temperature and precipitation parameters over time is observed. Geological mapping, along with the production of a geological map and corresponding profile sections, provide insights into the lithological and structural composition of the rear Reitalm valley and addresses the effects of these factors. As a result, the triggering factors and the progression of the reactivation of the Hütteggalm are examined. Additionally, geotechnical models were created to calculate and illustrate the slope stability. To further evaluate the situation in the rear Reitalm valley, the investigation of the post-glacial mass movement and the interaction of both mobilizations are included in this thesis. Additionally, this master's thesis explores the ramping up of the landslide mass mobilized by the post-glacial mass movement in the area of today's Hütteggalm. The results of this thesis identify a failure of the postglacial mass movement along the detected tectonic fault. In contrast, the reactivated area of the Hütteggalm shows a failure within the phyllites deposited, which was significantly influenced by precipitation and snowmelt. Finally, potential economic countermeasures to reduce the risk of further mobilization and additional targeted investigations are proposed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2	Bestehende Vorarbeiten.....	2
1.3	Parallel durchgeführte Untersuchung .....	2
1.4	Struktur/Aufbau der Arbeit.....	3
1.5	Lokalität.....	3
1.6	Vorgeschichte und Ereignis.....	4
1.6.1	Vorgeschichte .....	4
1.6.2	Jüngstes Ereignis.....	6
1.7	Gravitative Massenbewegungen .....	8
1.7.1	Systematik von gravitativen Massenbewegungen .....	9
1.7.1.1	Fallen (Stürzen) .....	9
1.7.1.2	Kippen .....	9
1.7.1.3	Gleiten (translatorisch, rotatorisch) .....	10
1.7.1.4	Driften.....	12
1.7.1.5	Fließen (inklusive Kriechen).....	12
1.7.1.6	Komplexe Bewegungen .....	13
1.7.2	Typische Ursachen.....	13
1.7.2.1	Natürliche Faktoren .....	14
1.7.2.2	Natürliche externe Faktoren.....	14
1.7.2.3	Anthropogene Faktoren .....	14
<b>2</b>	<b>Beispiele von Massenbewegungen in der Umgebung des Arbeitsgebiets</b>	<b>16</b>
2.1	Felssturz in Karteis.....	17
2.2	Massenbewegung am Graukogel.....	19
2.3	Weitere Massenbewegungen in der Region .....	20
2.4	Ereignisdokumentation Reitalmbach .....	21
<b>3</b>	<b>Potenzielle Einfluss-Faktoren im Reitalmtal</b>	<b>23</b>
3.1	Geologie.....	23
3.1.1	Geologie des Tauernfensters .....	23
3.1.1.1	Penninikum.....	25
3.1.1.2	Subpenninikum.....	26

3.1.2	Ausschnitt aus der geologischen Karte der Umgebung von Gastein .	28
3.1.3	Ausschnitt aus dem Geofast-Kartenblatt 155.....	29
3.1.4	Decken und Lithologien im Untersuchungsgebiet.....	30
3.1.4.1	Lithologien der Rauris-Decke.....	30
3.1.4.2	Lithologien der Flugkopf-Decke .....	33
3.1.4.3	Lithologien der Romate Decke .....	36
3.1.4.4	Lithologien des Quartärs.....	37
3.2	Strukturgeologie .....	37
3.3	Hydrogeologie .....	38
3.4	Seismik .....	39
3.4.1	Seismische Messstationen .....	39
3.5	Anthropogener Einfluss .....	40
3.6	Glaziale Überprägung und Gletscher-Rückgang .....	41
3.7	Klimatische Entwicklung.....	44
3.7.1	Temperatur.....	44
3.7.2	Niederschlag .....	45
<b>4</b>	<b>Methodik</b>	<b>47</b>
4.1	Erhaltene Daten .....	47
4.2	Geologische Karte.....	47
4.3	Geologische Profilschnitte .....	48
4.3.1	Profilschnitt Massenbewegung Rosskarkogel.....	48
4.3.2	Profilschnitt Massenbewegung Hütteggalm .....	48
4.3.3	Profilschnitt Massenbewegung Rosskarkogel-Hütteggalm .....	48
4.4	Seismik .....	49
4.5	Hydrologie und Meteorologie.....	49
4.6	Standortsicherheitsanalyse .....	50
4.7	Laboruntersuchungen .....	51
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung</b>	<b>53</b>
5.1	Geologische Karte.....	53
5.1.1	Romate-Decke .....	54
5.1.2	Flugkopf-Decke .....	55
5.1.3	Rauris-Decke .....	55
5.2	Geologische Profilschnitte .....	56
5.2.1	Profilschnitt A-A´ (postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel) .....	56
5.2.2	Profilschnitt B-B´ (reaktiver Bereich der Hütteggalm).....	58

---

5.2.3	Profilschnitt C-C' (Rosskarkogelsattel-Hüttegalm) .....	59
5.3	Strukturgeologie .....	60
5.3.1	Postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel .....	61
5.3.2	Reaktivierter Bereich der Hüttegalm .....	61
5.4	Seismische Daten .....	62
5.5	Hydrologische und meteorologische Daten .....	63
5.5.1	Hydrologische und meteorologische Bedingungen zum Zeitpunkt der Reaktivierung der Hüttegalm .....	65
5.5.2	Hydrologische und meteorologische Bedingungen im Zeitraum der Reaktivierung der 1960er Jahre .....	67
5.5.3	Betrachtung der historischen Entwicklung der hydrologischen und meteorologischen Bedingungen .....	69
5.5.3.1	Niederschlag .....	69
5.5.3.2	Temperatur .....	70
5.6	In-Situ-Versuche .....	72
5.6.1	Taschen-Penetrometer .....	72
5.6.2	Drehflügelsonde .....	73
5.7	Laboruntersuchungen .....	73
5.7.1	Glühverlust-Analyse .....	74
5.7.2	XRD-Analyse .....	74
5.7.3	Rahmenscherversuch .....	75
5.8	Stand sicherheitsanalyse .....	75
5.8.1	Modelle auf Grundlage angenommener Materialkennwerte .....	76
5.8.1.1	Zweidimensionales Modell der postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel .....	76
5.8.1.2	Zweidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm .....	77
5.8.1.3	Dreidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm .....	77
5.8.2	Modelle auf Basis der Laboruntersuchungen .....	78
5.8.2.1	Zweidimensionales Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel .....	78
5.8.2.2	Zweidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm .....	79
5.8.2.3	Dreidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm .....	80

<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>82</b>
6.1	Geologische Karte und Profilschnitte.....	82
6.1.1	Postglaziale Massenbewegung .....	82
6.1.2	Reaktivierter Bereich der Hüttegalm .....	83
6.2	Seismik .....	83
6.3	Hydrologie und Meteorologie.....	84
6.4	Anthropogener Einfluss .....	84
6.5	Stand sicherheitsanalyse .....	85
6.6	Fortschreitende Erosion .....	86
6.7	Mögliche Interpretation des Ablaufs postglazialer morphologischer Entwicklung im hinteren Reitalmtal .....	87
6.8	Zusammenfassung der Erkenntnisse .....	90
6.9	Methodenkritik.....	91
6.9.1	Geologische Karte .....	91
6.9.2	Profilschnitte.....	91
6.9.3	Stand sicherheitsanalyse.....	92
6.9.4	Hydrologische und meteorologische Daten .....	93
6.9.5	Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg .....	93
6.9.6	In-Situ-Versuche und Laboruntersuchungen .....	94
6.9.6.1	In-Situ-Versuche .....	94
6.9.6.2	Glühverlust .....	94
6.9.6.3	XRD-Analyse .....	94
6.9.6.4	Kleiner Rahmenscherversuch .....	95
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>96</b>
7.1	Mögliche Sicherungsmaßnahmen .....	96
7.1.1	Sicherung der Zufahrtsstraße .....	97
7.1.2	Sicherung des Reitalmbaches und Verminderung der Erosion .....	98
7.1.3	Maßnahmen zur Entwässerung.....	99
7.1.4	Sicherung der postglazialen Massenbewegung.....	99
7.2	Mögliche Überwachungsmaßnahmen .....	100
7.3	Weitere Untersuchungsmöglichkeiten .....	100
7.3.1	Laboruntersuchungen .....	101
7.3.2	Hydrologische, meteorologische und seismische Daten .....	101
7.3.3	Bohrkern-Analyse.....	101
7.3.4	TerraSAR-X.....	102

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>Anhang - Geologische Karte</b>	<b>108</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 : Luftbild mit der Staatsgrenze Österreichs (gelb markiert) und der Lokalität des Reitalmgrabens (orange markiert) im Salzburger Pongau. (Google 2023) .....	3
Abbildung 1-2 : Dreidimensionale Gesamtübersicht des Untersuchungsgebiets im hinteren Reitalmtal in südlicher Blickrichtung. (Kaml 2024).....	4
Abbildung 1-3 : Das hintere Reitalmtal in südlicher Blickrichtung. Die postglaziale Massenbewegung ist gelb und rot markiert und der reaktivierte Bereich um die Hütteggalm wird als rot umrahmtes Areal dargestellt. Zu erkennen ist auch der im höchsten Bereich der postglazialen Massenbewegung eingetragene Rosskarkogel mit dem links davon liegenden Rosskarkogelsattel. Erstellt von Valentin (2019) und bearbeitet von Tauber (2020). .....	5
Abbildung 1-4 : Das hintere Reitalmtal in Blickrichtung Süden. Die gesamte postglaziale Massenbewegung ist hier rot, und das reaktivierte Areal der Hütteggalm orange im rechten Teil der Abbildung markiert. (Valentin 2019) .....	6
Abbildung 1-5 : Der reaktivierte Bereich der Hütteggalm in Blickrichtung Westen. Der Verlauf der im Rahmen der Begehung am 19.06.2019 beobachteten, bei der Reaktivierung am 09.06.2019 entstandenen, Risse oberhalb der Hütteggalm wurde orange markiert. Zu erkennen sind auch der unterhalb liegende Reitalmgraben im Bereich der erodierten Böschung und ein zweiter begrenzender Graben nordwestlich der Gebäude. (Valentin 2019) .....	7
Abbildung 1-6 : Zufahrtsstraße zur Hütteggalm nach dem Ereignis im Juni 2019. Zu sehen sind frische Risse quer über die Straße. (Valentin 2019) .....	7
Abbildung 1-7 : In der Grasnarbe oberhalb der Hütteggalm entstandene frische Risse der Aktivierung vom 9. Juni 2019 mit einer Öffnung von mehreren Dezimetern. (Valentin 2019) .....	8
Abbildung 1-8 : Schematische Darstellung des Stürzens. Gezeigt werden stürzende, rollende und springende Bewegungen. (Zangerl et al. 2008) .....	9
Abbildung 1-9 : Schematische Darstellung des Prozesses Kippen. Gezeigt wird die Rotation von Gesteinspaketen mit Relativbewegungen an den Trennflächen. (Zangerl et al. 2008).....	10
Abbildung 1-10 : Schematische Darstellungen unterschiedlicher Arten des Gleitens.	

(Zangerl et al. 2008) .....	11
Abbildung 1-11 : Schematische Darstellung des Driftens. Gezeigt werden laterale Extensionsprozesse mit der Bildung von Zugrissen und Spalten. (Zangerl et al. 2008)....	12
Abbildung 1-12 : Schematische Darstellung des Prozesses Fließen. a) zeigt Fließen im Festgestein ohne die Ausbildung einer zusammenhängenden Bewegungszone und geringen Hangdeformationen bei niedriger Geschwindigkeit. b) zeigt Fließen im Lockergestein gekennzeichnet durch mitunter große Deformationen und hohe Geschwindigkeiten und wird in Abbruchgebiet, Transitbereich und Ablagerungsgebiet unterteilt. (Zangerl et al. 2008) .....	13
Abbildung 2-1 : Felssturz in Karteis am 24.10.2019 mit rund 15.000 Kubikmetern Sturzmaterial. (ORF Salzburg 2019b) .....	17
Abbildung 2-2 : Felssturz in Karteis im März 2019 mit rund 2500 Kubikmetern Sturzmaterial. (ORF Salzburg 2019a) .....	18
Abbildung 2-3 : Felssturz in Karteis im Juli 2019 mit rund 5000 Kubikmetern Sturzmaterial. (ORF Salzburg 2019c) .....	18
Abbildung 2-4 : Mögliches Ausmaß der Massenbewegung am Graukogel bei Bad Gastein. Die schraffierte Fläche deckt ca. 5,5 km <sup>2</sup> ab. (Ebner 2013).....	19
Abbildung 2-5 : Retentionssperre (28,4 Meter Höhe) von talauswärts betrachtet (links) und eingestaute Almfläche in Blickrichtung zur Sperre mit Resten von Lawinenschnee (rechts). (Hübl et al. 2009) .....	22
Abbildung 3-1 : Geologische Übersichtskarte des östlichen Tauernfensters. Entnommen von Pestal (2005) und zugeschnitten. Das Gebiet von Hüttschlag wurde gelb umrahmt eingetragen.....	24
Abbildung 3-2 : Ausschnitt aus der geologischen Karte der Umgebung von Gastein entnommen von Exner (1956) und zugeschnitten. ....	28
Abbildung 3-3 : Profilschnitt durch den Nordostkamm des Reitalmtals vom Kötschachtal zum Großarlal. Gezeigt wird der geologische Untergrund und der vom Schichtfallen geprägte asymmetrische Querschnitt des Großarler Taltrogs. Entnommen von Exner (1957) und zugeschnitten. ....	29
Abbildung 3-4 : Ausschnitt aus dem Geofast-Kartenblatt 155, entnommen von Kreuss (2021) und zugeschnitten. ....	29
Abbildung 3-5 : Ausschnitt aus der Strukturkarte der Hohen Tauern im Abschnitt von Gastein von Exner (1957). Die Darstellungen wurde zugeschnitten und der Bereich des	



Reitalmtals rot umrahmt markiert. ....	38
Abbildung 3-6 : Seismische Messstationen in der Umgebung von Hüttschlag. Die Station ZS-D117 befindet sich im Reitalmtal. (EIDA 2023).....	40
Abbildung 3-7 : Vergangene und simulierte Entwicklung der mittleren Lufttemperatur für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016).....	45
Abbildung 3-8 : Vergangene und simulierte Entwicklung des mittleren Niederschlages für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a).....	45
Abbildung 3-9 : Räumliche Verteilung der simulierten Niederschlagsänderung für das business-as-usual-Szenario für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a) .....	46
Abbildung 4-1 : Hydrologische und meteorologische Messtellen in der Umgebung von Hüttschlag. Dabei handelt es sich um eine Niederschlagsstation in Hüttschlag, eine Meteorologische Messstation in Bad Gastein und eine Pegelmessstation in Großarl. Die ebenfalls gezeigte Pegelmessstation der Gasteiner Ache wurde mangels Bedarfs nicht berücksichtigt. (eHyd 2024) .....	49
Abbildung 5-1 : Auf Basis der Kartierung mit Kaml (2024) und den erhaltenen geologischen Karten von Exner (1956) und Kreuss (2021) erstellte geologische Karte des hinteren Reitalmtals. Gezeigt wird die postglaziale Massenbewegung, der reaktivierte Bereich, die einzelnen Lithologien, entsprechende Orientierungen, Deckengrenzen und Fließgewässer. Zudem sind die Profillinien der drei erstellten geologischen Profilschnitte vermerkt.....	53
Abbildung 5-2 : Auf Basis der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals erstellter Profilschnitt A-A´ vom Rosskarkogelsattel über die Reitalm zum Reitalmbach (durch die postglaziale Massenbewegung) samt Legende.....	57
Abbildung 5-3 : Aus stark zerschertem Talkschiefer aufgebaute Störungszone im Bereich der Deckengrenze am Rosskarkogelsattel.....	57
Abbildung 5-4 : Auf Basis der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals erstellter Profilschnitt B-B´ durch den reaktivierten Bereich der Hütteggalm zum Reitalmgraben samt Legende.....	58
Abbildung 5-5 : Dunkler Phyllit der Fusch-Formation in der Böschung im Reitalmgraben unterhalb der Hütteggalm. ....	58
Abbildung 5-6 : Auf Basis der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals erstellter Profilschnitt C-C´ vom Rosskarkogelsattel über die Hütteggalm zur gegenüberliegenden Talflanke durch die postglaziale Massenbewegung und den reaktivierten Bereich der	

Hütteggalm samt Legende.....	59
Abbildung 5-7 : Plot der gesamten im Rahmen der Kartierung im Gebiet erhobenen Orientierungswerte der Schieferungsflächen. (Kaml 2024) .....	60
Abbildung 5-8 : Kompakte Gesteinseinheiten des dunklen Phyllits der Fusch-Formation in der Böschung unterhalb der Hütteggalm mit abweichender Orientierung untereinander und zur Lagerung am Rosskarkogel. ....	62
Abbildung 5-9 : Verspürte Erdbeben im Jahr 2019. Das Gebiet um Hüttschlag wurde rot umrahmt markiert. (ZAMG 2020) .....	63
Abbildung 5-10 : Hydrologische und meteorologische Daten der eHyd (2024). Ausgewertet für das hydrologische Jahr 2019 mit entsprechender Legende. ....	66
Abbildung 5-11 : Hydrologische und meteorologische Daten der eHyd (2024). Ausgewertet für das hydrologische Jahr 1964 mit entsprechender Legende. ....	67
Abbildung 5-12 : Hydrologische und meteorologische Daten der eHyd (2024). Ausgewertet für das hydrologische Jahr 1965 mit entsprechender Legende. ....	68
Abbildung 5-13 : Tägliche Niederschlagswerte (aufgenommen von der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 31.12.2020 und eine rot eingetragene Trendlinie.....	69
Abbildung 5-14 : Tägliche Niederschlagswerte (aufgenommen von der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 31.12.2020 und eine rot eingetragene Trendlinie. Die angepasste y-Achse und die Erhöhung der Transparenz der Niederschlagsdaten ermöglicht eine bessere Visualisierung der Trendlinie.....	70
Abbildung 5-15 : Tägliche Durchschnittstemperaturen (aufgenommen von der meteorologischen Messstation in Bad Gastein (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 30.06.2019 und eine grün eingetragene Trendlinie. ....	71
Abbildung 5-16 : Tägliche Durchschnittstemperaturen (aufgenommen von der meteorologischen Messstation in Bad Gastein (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 30.06.2019 und eine grün eingetragene Trendlinie. Die angepasste y-Achse und die Erhöhung der Transparenz der Temperaturdaten ermöglicht eine bessere Visualisierung der Trendlinie.....	71
Abbildung 5-17 : Zweidimensionales Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel in Bewegungsrichtung, erstellt in „Slide2“ mit angenommenen und angenäherten Kennwerten.....	76

---

Abbildung 5-18 : Zweidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm in Bewegungsrichtung, erstellt in „Slide2“ mit angenommenen und angenäherten Kennwerten. ....	77
Abbildung 5-19 : Dreidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm erstellt in „Slide3“ mit angenommenen und angenäherten Kennwerten.....	78
Abbildung 5-20 : Zweidimensionales Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel in Bewegungsrichtung erstellt in „Slide2“ mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024).....	79
Abbildung 5-21 : Zweidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm in Bewegungsrichtung, erstellt in „Slide2“ mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024). ....	80
Abbildung 5-22 : Dreidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm erstellt in „Slide3“ nach der Methode von Morgenstern-Price mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024).....	80
Abbildung 5-23 : Dreidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm erstellt in „Slide3“ nach der Methode von Janbu mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024). ....	81
Abbildung 6-1 : Mögliche Interpretation des ursprünglichen Hangverlaufs für den Fall der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel vom Rosskarkogelsattel (NNW) zum Reitalmgraben (SSO).....	88
Abbildung 6-2 : Mögliche Interpretation des durch das Aufbranden der im Verband abgerutschten Fuscher-Phyllite bedingten ursprünglichen Hangverlaufs im Bereich der Hüttegalm. ....	89

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 : Zusammenfassung der Ereignismeldungen der Wildbach- und Lawinenverbauung im Einzugsgebiet des Reitalmbaches von Sitter (2011a, 2011b, 2011c, 2011d, 2011e, 2011f, 2011g) und Gotthalseder (2011, 2012).	21
Tabelle 3-1 : Beobachtete Werte und simulierte Änderung der mittleren Lufttemperatur in °C für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a)	44
Tabelle 3-2 : Beobachtete Werte in Millimetern und simulierte Änderung der mittleren Niederschlagssummen in Prozent für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a)	46
Tabelle 5-1 : Auflistung makroseismischer Beobachtungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für den Zeitraum der Reaktivierung der Hüttegalm. (ZAMG 2020)	62
Tabelle 5-2 : Metadaten und Zeitraum des verfügbaren Datensatzes der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag. (eHyd 2024)	64
Tabelle 5-3 : Metadaten und Zeitraum des verfügbaren Datensatzes der Pegelmessstation in Großarl. (eHyd 2024)	64
Tabelle 5-4 - Metadaten und Zeitraum des verfügbaren Datensatzes der meteorologischen Messstation in Bad Gastein. (eHyd 2024)	65
Tabelle 5-5 : Ergebnisse der Untersuchung mit Hilfe des Taschen-Penetrometers im Rahmen der Probenentnahme und Darstellung der Ergebnisse im Box-Plot.	72
Tabelle 5-6 : Ergebnisse der Untersuchung mit Hilfe der Taschen-Drehflügelsonde im Rahmen der Probenentnahme und Darstellung der Ergebnisse im Box-Plot.	73
Tabelle 5-7 : Ergebnisse der Glühverlust-Analyse von Kaml (2024)	74

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Postglaziale, relikte und grenzstabile Massenbewegungen sind im Alpenraum keine Seltenheit, werden jedoch oftmals nicht als Gefahr wahrgenommen. Dennoch kann es, aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren, zu Reaktivierungen einzelner Bereiche dieser Massenbewegungen kommen. Derartige Aktivierungen können dabei ein erhebliches Gefährdungspotential aufweisen. Aufgrund des Einflusses des Klimawandels und den daraus resultierenden veränderten Niederschlagsverhältnissen, extremen Witterungsereignissen, aber auch dem Auftauen ehemals durch Permafrost stabilisierter Gebiete, muss das Gefahrenpotential von Felsstürzen, Massenbewegungen und auch der Reaktivierung ehemaliger Massenbewegungen neu bewertet und untersucht werden. Auch in Österreich gibt es derartige Massenbewegungen, die ein mögliches Potential zur Reaktivierung aufweisen. Die vorliegende Arbeit behandelt die Reaktivierung eines Teils einer postglazialen Massenbewegung, die im Jahr 2019 im Bereich der Hütteggalm in Hüttschlag im Salzburger Pongau erfolgte. Da es sich dabei nicht um die erste Reaktivierung dieser Massenbewegung handelte und die generelle Relevanz ausgeprägter und anhaltender Niederschlagsereignisse im gesamten Großarlal durch eine Vielzahl medialer Erscheinungen bestätigt wird, soll die Ursache der Reaktivierung näher ergründet werden. Hierzu soll eine Bestimmung des geologischen Untergrundes anhand einer geologischen Kartierung und der Erstellung von Profilschnitten ermöglicht werden. Eine Auswertung von hydrologischen, meteorologischen und seismischen Daten soll die Bedingungen zum Zeitpunkt der Aktivierung sowie die Entwicklung über die Zeit zeigen. Eine Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse in geotechnischen Modellen mit entsprechenden Gesteinskennwerten soll eine Überprüfung der Ergebnisse und Analyse der Hangstabilität ermöglichen. Diese Untersuchungsergebnisse, in Kombination mit der parallel von Kaml (2024) durchgeführten Arbeit, sollen dabei helfen, ein detailliertes Verständnis für die spezifischen Bedingungen und geologischen Prozesse zu entwickeln, die zu der Reaktivierung der Massenbewegung im Reitalmtal führten. Durch die Bestimmung möglicher Ursachen wird es zudem möglich das zukünftige Verhalten der Massenbewegung sowie das Erosionsverhalten des Reitalmbaches zu bewerten. Auch klimatische Veränderungen und Veränderungen der Morphologie spielen bei der Beurteilung der weiteren Entwicklung derartiger Massenbewegungen eine wichtige Rolle und sollen daher betrachtet und beurteilt werden. Die so erarbeiteten Erkenntnisse zur

Situation im gesamten hinteren Reitalmtal und getroffenen Empfehlungen zu möglichen weiteren Untersuchungen, Möglichkeiten zur Überwachung und präventiven Maßnahmen sollen einen Beitrag zum Sicherheitsmanagement der Hüttegalm und dem Hochwasserschutz der Gemeinde Hüttschlag leisten.

## **1.2 Bestehende Vorarbeiten**

Zusätzlich zu den Mitteilungen einer ersten Begehung und Befliegung durch den Landesgeologen Hofrat Mag. Gerald Valentin (2019), der geologischen Kartierung und entsprechenden Erläuterungen von Exner (1957, 1956) steht eine bereits 2019 von Tauber (2020) am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau begonnene Masterarbeit zur Reaktivierung der postglazialen Massenbewegung im Reitalmtal zur Verfügung. Die entsprechende Arbeit wurde (2020) nicht vollendet und der damalige Fortschritt der Arbeiten dem Institut übergeben. Dabei handelt es sich, neben ersten Verschriftlichungen und Literaturquellen, um Informationen zu hydrologischen, meteorologischen und seismischen Stationen in der Umgebung von Hüttschlag. Enthalten sind zudem Bildaufnahmen einer begonnenen Kartierung und erste Laborergebnisse felsmechanischer Untersuchungen. Eine Fortführung der Arbeit von Tauber (2020) ist aufbauend auf die vorliegende Arbeit und jene von Kaml (2024) mit speziellen Fragestellungen möglich.

## **1.3 Parallel durchgeführte Untersuchung**

Neben der hier vorliegenden Arbeit, wurde von Georg Kaml (2024) eine weitere Untersuchung zur Reaktivierung der postglazialen Massenbewegung im Reitalmtal erarbeitet. Diese konzentriert sich vorrangig auf die Genese des fossilen Bergsturzes und die Untersuchung der Bewegungsmechanismen der aktiven Rutschung. Dazu wurden Laborversuche durchgeführt, die zum einen der Bestimmung boden- und felsmechanischer Kennwerte dienten und zum anderen darauf abzielten, die lithologischen Eigenschaften der Gesteinseinheiten im Untersuchungsgebiet zu charakterisieren. Seine gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse werden in dieser Arbeit ebenfalls herangezogen und angesprochen. Die beiden zeitgleich erstellten Arbeiten ergänzen sich gegenseitig und bieten dadurch einen holistischen Überblick der Situation im hinteren Reitalmtal. Bei den zusammen mit Kaml (2024) erarbeiteten Kapiteln handelt es sich um die Kartierung des Arbeitsgebiets, die Durchführung der In-Situ-

Versuche und die Anfertigung der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals.

## 1.4 Struktur/Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit wird in Einleitung, Methodik, Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick gegliedert. Die Einleitung in Kapitel 1 setzt sich hierbei aus einer allgemeinen Einleitung in den Kapiteln 1.1 bis 1.7, Fallbeispielen aus der Umgebung des Arbeitsgebiets in Kapitel 2 und einem Überblick einzelner Faktoren im Untersuchungsgebiet in Kapiteln 3 zusammen. Die Zielsetzung, die Vorgeschichte und die Lokalität des Untersuchungsgebiets in Kapitel 1 bilden den Einstieg in die vorliegende Arbeit. Auf die Beschreibungen einzelner Faktoren mit Ortsbezug folgt in Kapitel 4 die Thematisierung der angewandten Methodik, um die in der Einleitung gesetzten Ziele zu erreichen. Die erhaltenen Ergebnisse und die entsprechenden Auswertungen können dem darauffolgenden Kapitel 5 entnommen werden. In den Schlussfolgerungen in Kapitel 6 werden die Ergebnisse und Auswertungen unter dem Aspekt der Zielsetzung diskutiert und mögliche Fehlerquellen angesprochen. Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bildet der Ausblick in Kapitel 7. Dort wird auf noch offene Fragen und mögliche weitere Untersuchungen, aber auch auf mögliche Maßnahmen zur Sicherung und Überwachung eingegangen.

## 1.5 Lokalität

Das Arbeitsgebiet befindet sich im hinteren Reitalmtal in der Gemeinde Hüttschlag, im Salzburger Pongau. Die entsprechende Lokalität ist in Abbildung 1-1 markiert.

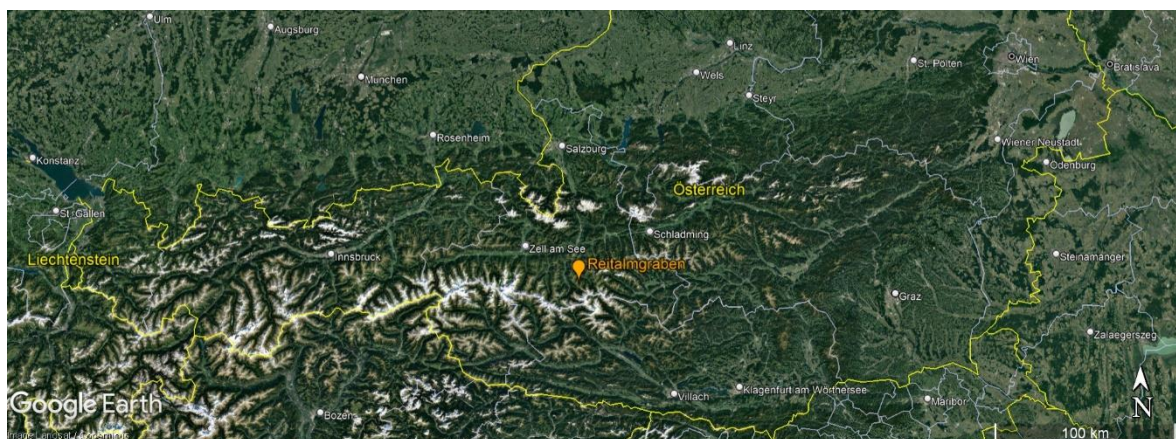


Abbildung 1-1 : Luftbild mit der Staatsgrenze Österreichs (gelb markiert) und der Lokalität des Reitalmgrabens (orange markiert) im Salzburger Pongau. (Google 2023)



Die Gemeinde Hüttschlag liegt im Talschluss des Großarlts, einem der östlichsten Salzburger Tauerntäler. Das Tal weist eine Länge von etwa 27 Kilometern Luftlinie und eine Mündungsstufe von rund 200 Metern zur Salzach auf (Alpenverein 2016). Direkt bei der Ortschaft Hüttschlag eröffnet sich in der westlichen Talflanke des Großarlts der Reitalmgraben. Diesem Graben beziehungsweise Tal folgend, erreicht man im hinteren Reitalmtal über eine Forststraße die Reitalm und anschließend die Hütteggalm. Diese beiden Almen sind jeweils direkt auf dem Areal der postglazialen und zum Teil reaktivierten Massenbewegung des Rosskarkogels errichtet. Die von Kaml (2024) erstellte dreidimensionale Ansicht in Abbildung 1-2 gibt einen Überblick der Lokaltäten im hinteren Reitalmtal.

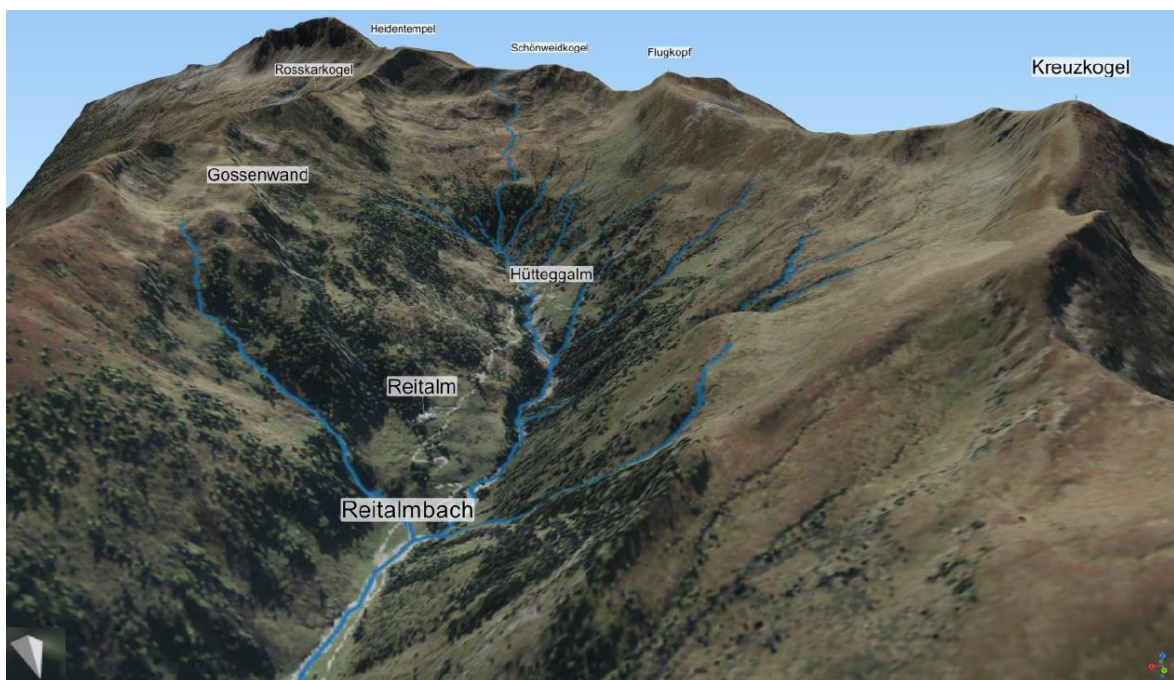


Abbildung 1-2 : Dreidimensionale Gesamtübersicht des Untersuchungsgebiets im hinteren Reitalmtal in südlicher Blickrichtung. (Kaml 2024)

Zu erkennen sind hier in südlicher Blickrichtung, von Westen nach Osten, die Gossenwand, der Rosskarkogel, die Reitalm und der Reitalmbach, der Heidentempel, der Schönweidkogel, die Hütteggalm, der Flugkopf und der Kreuzkogel.

## 1.6 Vorgeschichte und Ereignis

### 1.6.1 Vorgeschichte

Exner (1957) klassifizierte im Zuge seiner Kartierung des hinteren Reitalmtals die zu untersuchende postglaziale Massenbewegung bereits als abgerutschten dunklen Phyllit



im Verband. Es ist anzunehmen, dass es sich um ein am West-Hang des Rosskarkogels schlagartig mobilisiertes Massenvolumen von mehreren Millionen Kubikmetern handelt (Valentin 2019). Der Rosskarkogel weist eine Meereshöhe von 2.209 Metern auf. Im untersten Bereich der Massenbewegung steht, wie in Abbildung 1-3 dargestellt, die Reitalm.

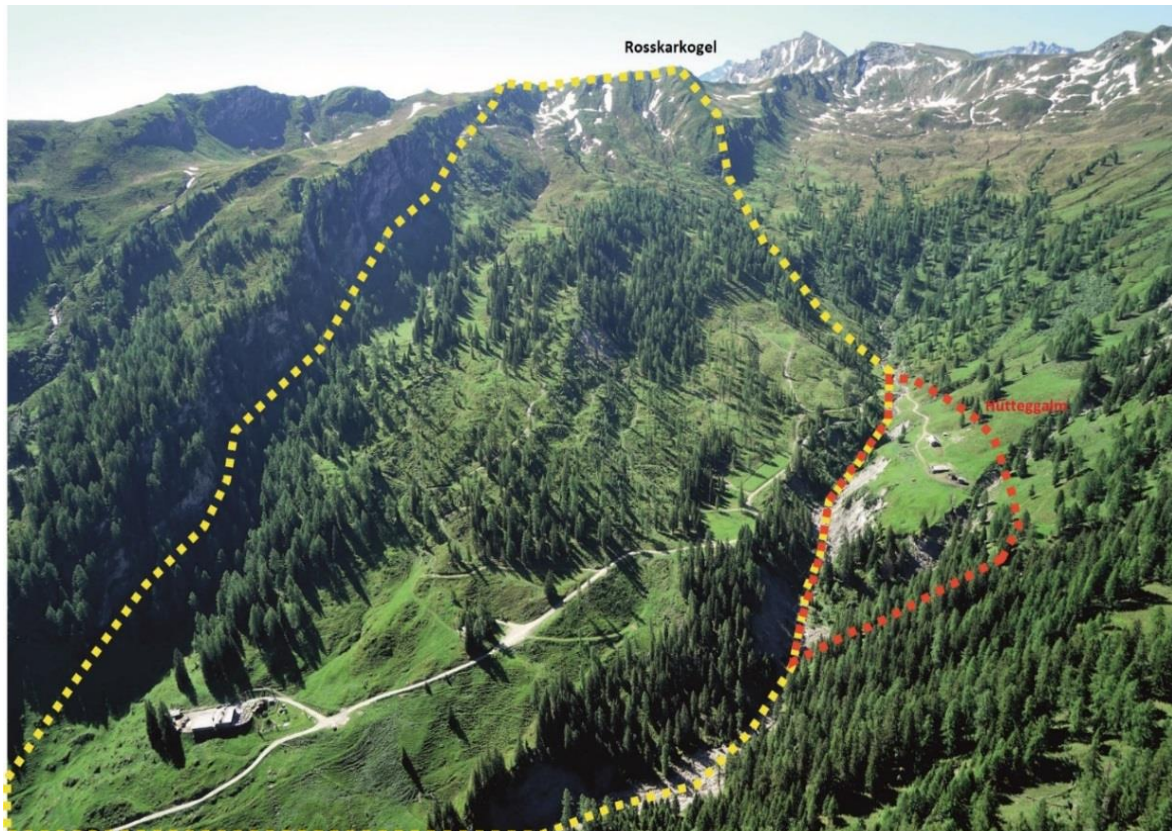


Abbildung 1-3 : Das hintere Reitalmtal in südlicher Blickrichtung. Die postglaziale Massenbewegung ist gelb und rot markiert und der reaktivierte Bereich um die Hüttegalm wird als rot umrahmtes Areal dargestellt. Zu erkennen ist auch der im höchsten Bereich der postglazialen Massenbewegung eingetragene Rosskarkogel mit dem links davon liegenden Rosskarkogelsattel. Erstellt von Valentin (2019) und bearbeitet von Tauber (2020).

Berichten von Einheimischen und Hüttenwirte\*innen zufolge wurde die bewirtschaftete Almhütte, aufgrund der Erosion durch den Reitalmbach, bereits vor einiger Zeit auf der Bachseite der Forststraße abgebaut und anschließend auf der dem Hang zugewandten Seite neu errichtet. Bei der ursprünglichen Position handelt es sich um den Bereich kurz nach der Abzweigung zur heutigen Reitalm. Eine ähnliche Verlegung erfolgte auch bei der Hüttegalm, im rot umrahmten Bereich in Abbildung 1-3. Zudem wird, auch von (Tauber 2020), von einer weiteren Reaktivierung des Bereiches der Hüttegalm bereits in der Mitte der 1960er Jahre berichtet. Ein genaues Datum hierzu ist nicht bekannt. Die Entwicklung über den Zeitraum von 1953 bis 2021, den die vom Land Salzburg erhaltenen Orthofotos abdecken, wird von Kaml (2024) in seiner Arbeit näher behandelt.

### 1.6.2 Jüngstes Ereignis

Am 9. Juni 2019 wurde das Areal der auf 1690 Metern ü. A. liegenden Hütteggalm als Rutschung aktiviert. Dabei setzte sich ein Massenvolumen in Bewegung, dem eine bei einer ersten Begehung am 19.06.2019 geschätzte Fläche von rund 70.000 m<sup>2</sup> zugrunde liegt. Diese Reaktivierung führte jedoch zu keiner Beschädigung der hier errichteten Hütten. Lediglich kleinere Deformationen der Holzbauwerke konnten beobachtet werden (Valentin 2019). Abbildung 1-4 zeigt, wie auch Abbildung 1-3 das hintere Reitalmtal in südlicher Blickrichtung.

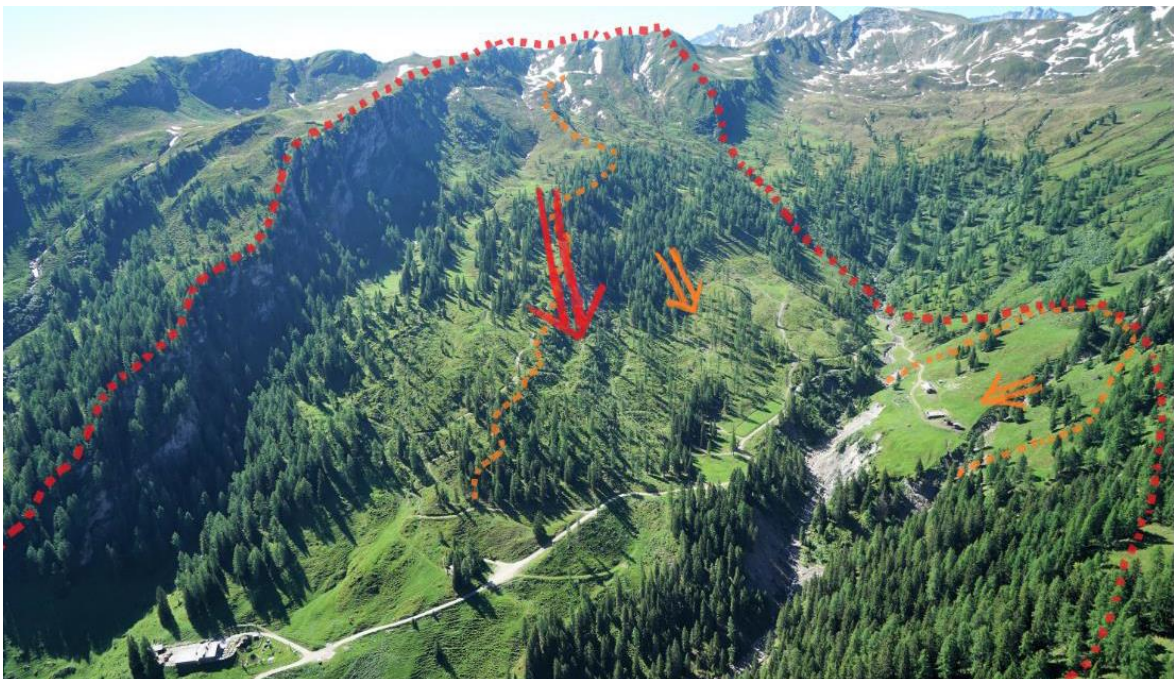


Abbildung 1-4 : Das hintere Reitalmtal in Blickrichtung Süden. Die gesamte postglaziale Massenbewegung ist hier rot, und das reaktivierte Areal der Hütteggalm orange im rechten Teil der Abbildung markiert. (Valentin 2019)

Eingetragen wurden durch Valentin (2019) in Rot die Begrenzung und geschätzte Bewegungsrichtung der postglazialen Massenbewegung und in Orange die möglicherweise immer wieder reaktivierten Bereiche der postglazialen Massenbewegung mit der jeweiligen vermuteten Bewegungsrichtung. Wie in Abbildung 1-5 zu erkennen ist, befinden sich auf der Hütteggalm mehrere Gebäude. Diese werden hier vom orange markierten Verlauf, der durch die Reaktivierung geöffneten, frischen Risse umrahmt. Abbildung 1-6 zeigt die Zufahrtsstraße zur Hütteggalm während der Begehung durch Valentin (2019), kurz nach der jüngsten Reaktivierung im Jahr 2019. Sie führte aufgrund der Bildung der in Abbildung 1-6 gezeigten Risse und einem Versatz von mehreren Dezimetern zu einer kurzzeitigen Unpassierbarkeit der Zufahrtsstraße. (Valentin 2019)





Abbildung 1-5 : Der reaktivierte Bereich der Hüttegalm in Blickrichtung Westen. Der Verlauf der im Rahmen der Begehung am 19.06.2019 beobachteten, bei der Reaktivierung am 09.06.2019 entstandenen, Risse oberhalb der Hüttegalm wurde orange markiert. Zu erkennen sind auch der unterhalb liegende Reitalmgraben im Bereich der erodierten Böschung und ein zweiter begrenzender Graben nordwestlich der Gebäude. (Valentin 2019)



Abbildung 1-6 : Zufahrtsstraße zur Hüttegalm nach dem Ereignis im Juni 2019. Zu sehen sind frische Risse quer über die Straße. (Valentin 2019)

Abbildung 1-7 zeigt die durch die Aktivierung in der Grasnarbe entstandenen Risse oberhalb der Hüttegalm. Diese weisen eine Öffnung von mehreren Dezimetern auf (Valentin 2019).



Abbildung 1-7 : In der Grasnarbe oberhalb der Hütteggalm entstandene frische Risse der Aktivierung vom 9. Juni 2019 mit einer Öffnung von mehreren Dezimetern. (Valentin 2019)

Die Beobachtungen bei der Begehung durch Valentin (2019) ließen zudem, wie die Gesamtübersichten in Abbildung 1-3 und Abbildung 1-4 vermuten, dass sich der Untergrund der Hütteggalm aus aufgebrandetem beziehungsweise aufgefahretem Bergsturzmaterial der postglazialen Massenbewegung zusammensetzt, das durch Erosion des unterhalb der erodierten Böschung fließenden Reitalmbaches seine Stabilität verlor. Diese Erosion führte durch das fortschreitende Einschneiden des Reitalmbachs zur Schwächung des Widerlagers. Zusätzlich wurde im Frühjahr 2019 ein sehr hohes Wasserangebot in Form von Schneeschmelze und nasser Witterung im Mai beobachtet. Dieser Wassereintrag könnte eine Aktivierung durch eine Herabsetzung des Scherwiderstandes zusätzlich begünstigt haben. (Valentin 2019)

## 1.7 Gravitative Massenbewegungen

Gravitative Massenbewegungen werden als hangabwärts gerichtete, bruchhafte oder bruchlose Verlagerungen von Fels- und/oder Lockergestein unter Einwirkung der Schwerkraft definiert (Glade 2002). „Ein fehlender Transport durch Wasser, Eis oder Luft wird dabei in der Regel durch eine fehlende Sortierung des verlagerten Materials belegt“ (Bernet 2006). Unter dem Begriff gravitativer Massenbewegungen werden Sturzdenudationen wie Felssturz, Bergsturz und Steinschlag, Gleitungen wie Blockrutschung, Bergrutsch und Erdrutsch und Fließ- und Kriechdenudation wie Muren und Erdfließen gesammelt (Bernet 2006). Das alpine Relief und die dadurch bedingten Landschaftsentwicklungen sind die wichtigsten Grundvoraussetzungen einer hohen

Disposition für geogene Naturgefahren. Dabei spielen erdgeschichtlich überwiegend junge und weiter fortlaufende Reliefentwicklungen eine wesentliche Rolle. Die damit zusammenhängenden klimatischen Entwicklungen im Quartär durch glaziale und postglaziale Überprägungen sind ebenfalls ein entscheidender Faktor. (Lotter & Haberler 2013)

### 1.7.1 Systematik von gravitativen Massenbewegungen

Die von Lotter & Haberler (2013) beschriebene, prozessorientierte Klassifikation von Massenbewegungen unterscheidet nach Art des Materials und nach Art des Bewegungstyps. Dabei wird im geotechnischen Sinne von Fels oder Boden gesprochen. Auf dieser Grundlage wird, wie zusätzlich in Abbildung 1-8 bis Abbildung 1-12 ersichtlich, nach den nachfolgenden Bewegungsarten differenziert.

#### 1.7.1.1 Fallen (Stürzen)

Fall- oder auch Sturzprozesse werden durch Ablösen von Fest und/oder Lockergestein ohne oder mit geringer Scherbewegung definiert. Markant hierbei ist der vorwiegend auftretende freie Fall, kombiniert mit Springen und Rollen des Sturzmaterials mit hoher Geschwindigkeit. Der Ablösevorgang erfolgt aus dem Gesteinsverband und ist oftmals durch gleitende oder kippende Versagensmechanismen gekennzeichnet (Lotter & Haberler 2013). Abbildung 1-8 zeigt die schematische Darstellung des Steinbeziehungsweise Blockschlages eines kleineren Felssturzes (Zangerl et al. 2008).

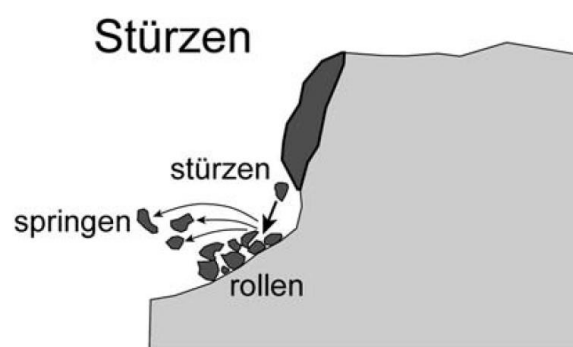


Abbildung 1-8 : Schematische Darstellung des Stürzens. Gezeigt werden stürzende, rollende und springende Bewegungen. (Zangerl et al. 2008)

#### 1.7.1.2 Kippen

Das Kippen ist durch das Ablösen einer Fest- oder auch Lockergesteinsmasse durch eine rotatorische Bewegung mit einem über der Rotationsachse liegendem Schwerpunkt



definiert. Das Versagen kann durch Wasserdruck, Eisdruck und/oder auch durch plastische Verformung der unterlagernden Gesteinsschichten verursacht werden. Die abgelösten Gesteinspakete erfahren dabei oftmals eine Biegebeanspruchung. Der in Abbildung 1-9 gezeigte Prozess des Kippens tritt vor allem bei vorwiegend steil stehenden Trennflächensystemen auf, die hangparallel streichen. Dabei finden auf den einzelnen Ablöseflächen Scherbewegungen statt. Häufig kommt es beim Kippen nach einer beschleunigenden Bewegung zu anschließendem Bruchversagen. Eine weitere Unterteilung erfolgt in Biegekippen und Blockkippen. (Zangerl et al. 2008)

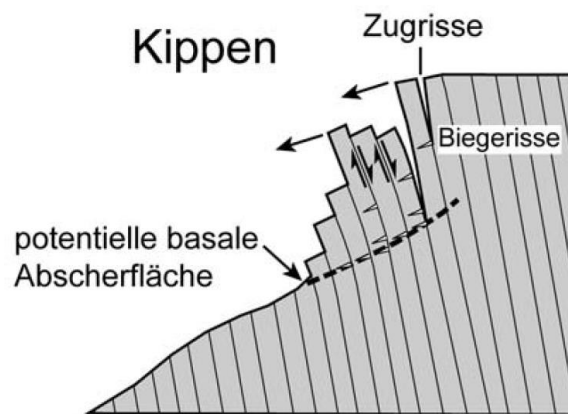


Abbildung 1-9 : Schematische Darstellung des Prozesses Kippen. Gezeigt wird die Rotation von Gesteinspaketen mit Relativbewegungen an den Trennflächen. (Zangerl et al. 2008)

#### 1.7.1.3 Gleiten (translatorisch, rotatorisch)

Beim Prozess des Gleitens handelt es sich um eine hangabwärts gerichtete Verlagerung von Fest- oder Lockergestein, die entlang einer oder mehrerer diskreter Bewegungsflächen oder -zonen, sogenannter Gleithorizonte, stattfindet. Dabei zeigt sich der Hauptteil der Hangdeformation in den Bewegungsflächen/-zonen (Zangerl et al. 2008). Variierende interne Eigenschaften der Trennflächen und des Materials, oder auch sich ändernde Kluft- und Porenwasserdrucke, führen im Verlauf der Bewegung zu internen Deformationen. Dazu gehören Zerrstrukturen, Stauchungen, Teilabrisse und Überschiebungen. Gleitbewegungen weisen eine große Bandbreite an Dimensionen und Bewegungsraten auf (Lotter & Haberler 2013). Zangerl et al. (2008) geben in Abbildung 1-10 einen detaillierten Einblick in die verschiedenen Arten des Gleitens. Dabei erfolgt eine Einteilung in die beiden Grundarten Rotations- und Translationsgleitung.

##### - Rotationsgleitung

Diese Art der Materialverlagerung tritt vor allem bei mechanisch isotropen Gesteinen auf. Die Verlagerung findet dabei wie in Abbildung 1-10 in Abschnitt a) gezeigt auf einer

konkaven oder aber gekrümmten Bewegungszone statt. Bei solchen gekrümmten Bewegungszone wird das geringe Ausmaß interner Deformation der bewegten Masse, mit Ausnahme des Hangfußbereiches, durch kinematische Grundlagen bestimmt. Oftmals treten dabei steile bis vertikale Verschiebungen im oberen Bereich auf. Die Verschiebungsvektoren im Hangfußbereich sind durch flacheres Einfallen oder aufwärts gerichtete Bewegungen, also Hebungen, gekennzeichnet. (Zangerl et al. 2008)

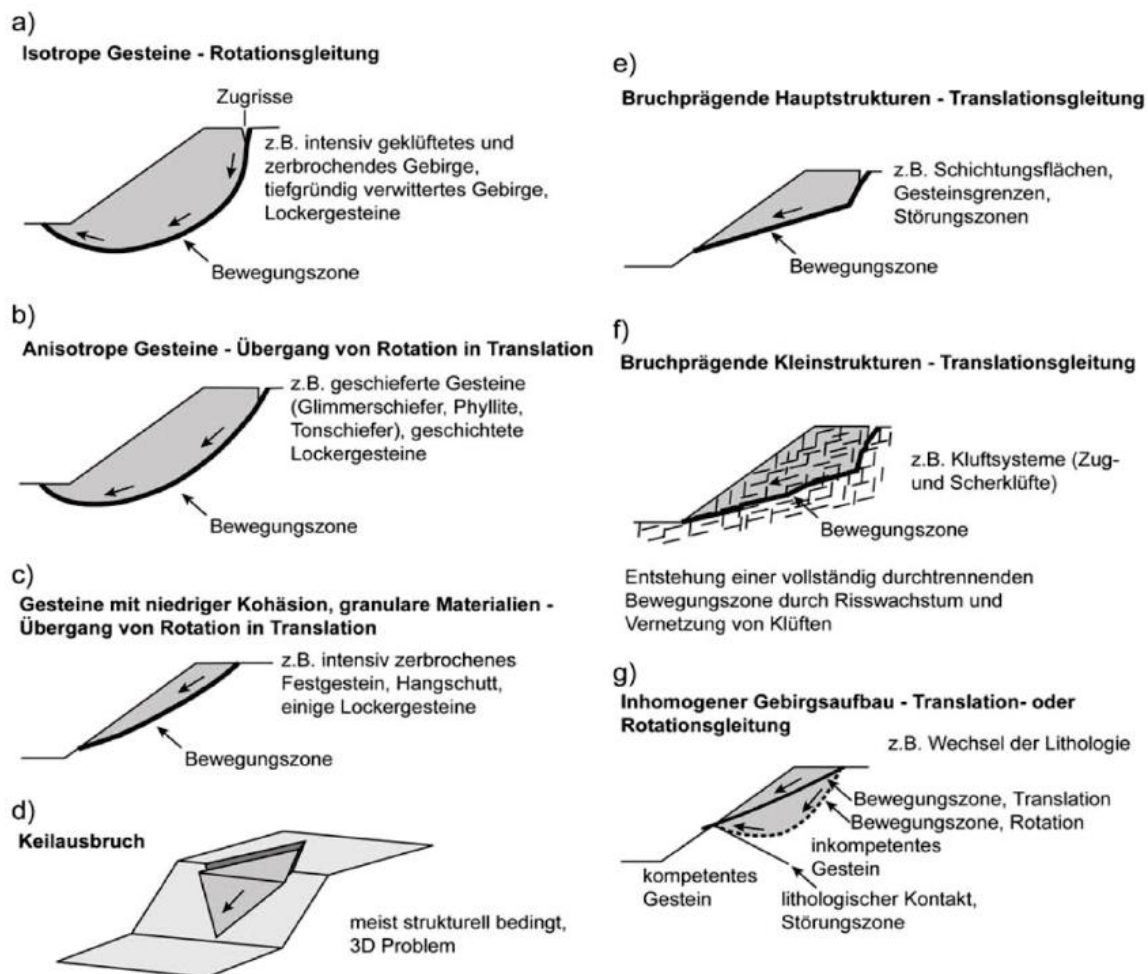


Abbildung 1-10 : Schematische Darstellungen unterschiedlicher Arten des Gleitens. (Zangerl et al. 2008)

#### - Translationsgleitung

Im Gegensatz zur Rotationsgleitung werden die Gesteinspakete im Falle von Translationsgleitungen entlang planarer, undulierender Bewegungszone oder Gleitflächen verschoben. Dabei setzt sich die Translationsbewegung, entgegen der durch eine Überführung in den Gleichgewichtszustand bestimmten Rotationsbewegung, so lange ungehindert fort, wie die Fortsetzung der Bewegung durch die Eigenschaften der Gleitfläche und den nötigen kinematischen Freiheiten gegeben ist. Translationsbewegungen werden häufig mit einzelnen Haupttrennflächen und/oder Trennflächensystemen wie Störungszonen, Klüften, Schieferungsflächen und

Schichtungsflächen assoziiert. Die strukturelle geologische Prädisposition ist hierbei bereits vorhanden oder wird, wie in Abbildung 1-10 in Abschnitt f) gezeigt, von bruchmechanischen Prozessen, wie beispielsweise Risswachstum und Vernetzung bestehender Strukturen bestimmt. Ein weiterer Punkt, in dem sich die Translationsbewegung von der Rotationsbewegung unterscheidet, ist die Verteilung der Bewegungsgeschwindigkeit, die hier dem Lot der Gleitfläche folgend, über die gesamte Mächtigkeit gleichbleibt und durch die Geschwindigkeit entlang der Gleitfläche bestimmt wird. Der Keilausbruch, gezeigt in Abbildung 1-10 in Abschnitt d), stellt einen Sonderfall der Translationsbewegung dar, der durch eine hangabwärts fallende Schnittlinie zweier zueinander einfallender Ablöseflächen bestimmt ist. (Zangerl et al. 2008)

#### 1.7.1.4 Driften

Zangerl et al. (2008) definieren den in Abbildung 1-11 gezeigten Prozess des Driftens als „laterale Dehnung oder Extension einer kohäsiven Lockergesteins- oder Felsmasse auf einem weichen Substrat, wobei zusätzlich zur horizontalen Verschiebung auch Setzungen auftreten können“. Dehnungs- und Setzungsmechanismen können zu Brüchen der kompetenten Masse entlang steil stehender Zerrisse und Spalten führen. Zusätzlich wird bei fortschreitender Dehnung unterlagerndes und plastisch deformierbares Substrat in die Spalten zwischen einzelnen Einheiten gepresst und es kommt zur Auffüllung der Spalten durch Block- und Schuttmaterial von oberhalb. (Zangerl et al. 2008)

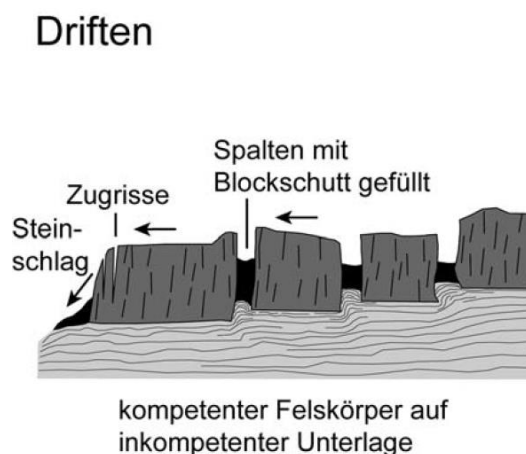


Abbildung 1-11 : Schematische Darstellung des Driftens. Gezeigt werden laterale Extensionsprozesse mit der Bildung von Zugrissen und Spalten. (Zangerl et al. 2008)

#### 1.7.1.5 Fließen (inklusive Kriechen)

Beim Prozess des Fließens (inklusive Kriechen) handelt es sich um eine räumlich



kontinuierliche Bewegung. Dabei treten potentielle Gleithorizonte und -zonen gar nicht oder in Form eng beieinander liegender, in der Regel kurzlebiger Scherflächen auf, die meist nicht erhalten bleiben (Highland & Bobrowsky 2008). Fließprozesse weisen eine hohe Bandbreite an Bewegungsgeschwindigkeiten von Kriechen mit wenigen Millimetern pro Jahr bis hin zu Sturzströmen und Hangmuren mit mehreren Metern pro Sekunde auf. Charakteristisch ist zudem die kontinuierliche Geschwindigkeitsabnahme mit der Tiefe, was auch mit dem Fließverhalten einer viskosen Flüssigkeit verglichen werden kann (Lotter & Haberler 2013). Wie von Zangerl et al. (2008) beschrieben und in Abbildung 1-12 ersichtlich, kann der Begriff sowohl für Locker-, als auch für Festgestein verwendet werden. Im Festgestein entspricht sehr langsames Fließen als kinematischer Begriff Sackung beziehungsweise Felskriechen (Zangerl et al. 2008).

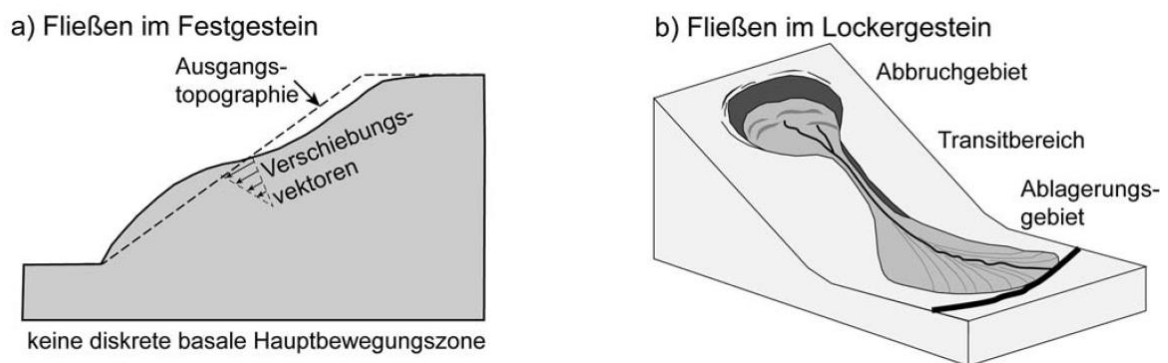


Abbildung 1-12 : Schematische Darstellung des Prozesses Fließen. a) zeigt Fließen im Festgestein ohne die Ausbildung einer zusammenhängenden Bewegungszone und geringen Hangdeformationen bei niedriger Geschwindigkeit. b) zeigt Fließen im Lockergestein gekennzeichnet durch mitunter große Deformationen und hohe Geschwindigkeiten und wird in Abbruchgebiet, Transitbereich und Ablagerungsgebiet unterteilt. (Zangerl et al. 2008)

#### 1.7.1.6 Komplexe Bewegungen

Unter komplexen Bewegungen versteht man eine Kombination von mindestens zwei, der in Kapitel 1.7.1 voranstehend genannten Prozesse (Lotter & Haberler 2013). So können beispielsweise oftmals Kombinationen aus Fließ- und Gleitprozessen beobachtet werden (Zangerl et al. 2008).

### 1.7.2 Typische Ursachen

Die Ursachen gravitativer Massenbewegungen sind vielfältig und teilweise auch in komplexer Form miteinander verknüpft. Wie von Lotter & Haberler (2013) weiter beschrieben, werden in der entsprechenden Fachliteratur verschiedene Gliederungsansätze besprochen. Typische Faktoren sind nachfolgend zusammenfassend gelistet. Eine häufig angewandte Unterteilung erfolgt in natürliche, natürliche externe und

anthropogene Faktoren. So auch die nachfolgende übernommene zusammenfassende Auflistung wesentlicher Faktoren von Lotter & Haberler (2013).

#### 1.7.2.1 Natürliche Faktoren

- Geeignetes Relief als Folge der Gebirgsbildung
- Auflockerung durch glaziale Be- und Entlastung (inklusive Permafrost-Wirkung und spät- bis postglaziale Permafrost-Schmelze)
- Glaziale und fluviale Erosion
- Aufbau einer Lockermaterialbedeckung durch Verwitterungsprozesse
- Akkumulation von Lockermaterial durch glazigene und fluviale Prozesse
- Bodenmechanische und tonmineralogische Eigenschaften der Lockergesteine
- Fels- beziehungsweise festigkeitsmechanische Eigenschaften (Ausbildung und Raumstellung des Trennflächengefüges)
- Mechanische Eigenschaften der veränderlich festen Gesteine in Abhängigkeit von Wassergehalt

#### 1.7.2.2 Natürliche externe Faktoren

- Niederschlag mit der Folge von Porenwassersättigung oder Porenwasserüberdruck in Lockergesteinen, bzw. Kluftwasserschub in Festgesteinen (ausschlaggebend sind vor allem Intensität und Dauer)
- Temporäre fluviale Erosion oder Anstieg von Hang- beziehungsweise Grundwasser durch Hochwasserereignisse
- Trockenheit (Versiegelungseffekt oder Trockenrisse mit Folgen für das Abflussverhalten)
- Seismische Aktivität als dynamische Belastung von Hängen
- Stürme und Orkane (Änderung der Vegetation durch Windwurf)
- Klimatisch bedingter Aufbau oder Rückzug der Vegetation (Veränderungen der stabilisierenden Wirkung des Wurzelraums und des Abflussverhaltens)

#### 1.7.2.3 Anthropogene Faktoren

- Sämtliche menschliche Eingriffe an aufgrund natürlicher Faktoren instabilen beziehungsweise im Grenzgleichgewicht befindlichen Hängen mit zusätzlich destabilisierender Wirkung
- Unkontrollierte Wassereinleitungen
- Bodenverdichtung und Bodenversiegelung mit nicht berücksichtigten beziehungsweise nicht erkannten Auswirkungen auf das Abflussverhalten und den

## Wasserhaushalt

- Landnutzung beziehungsweise deren Veränderung (Rodungen und Monokulturen mit Folge von Erosion und verändertem Wassereintrag in Boden und Fels)
- Statische Auflasten und dynamische Belastungen (beispielsweise Baumaßnahmen und Sprengungen)
- Veränderung der natürlichen hydrologischen Systeme und Abflüsse

## **2 Beispiele von Massenbewegungen in der Umgebung des Arbeitsgebiets**

Die Region des Großarlals ist bekannt für ein häufiges Auftreten von Vermurungen, aber auch größeren Massenbewegungen und Felsstürzen. Die Auswirkungen starker oder anhaltender Niederschläge sind in einer breiten medialen Berichterstattung ersichtlich. So verlegten beispielsweise im Juli 2017 eine Vermurung im Bereich Groß-Ellmau und andere Murenabgänge weiter taleinwärts nach kräftigen Gewittern mehrere Straßen und Zufahrten (LFV 2017). Ende August desselben Jahres führten erneute Unwetter zu Vermurungen im Großarler Gebiet. Nach diesem Ereignis wurde vor allem der Effekt der vorhandenen Schutzmaßnahmen hervorgehoben (Salzburger Nachrichten 2017). Dennoch wurden im Rahmen dieser Ereignisse auch Lücken in den Sicherungsmaßnahmen ausgemacht, was noch im selben Jahr zum Bau zweier neuer Sperren im Schiedbach führte. Die obere Sperre misst dabei eine Höhe von 22 Metern (Boscher 2018). Auch für die Jahre davor und die Folgejahre können der Berichterstattung zahlreiche Feuerwehreinsätze aufgrund von Vermurungen entnommen werden, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Bedingt durch das allgemeine Einfallen der Schichtfolge im Großarlal und im Bereich von Hüttschlag ergibt sich eine Unterscheidung der beiden sich gegenüberliegenden Talflanken. Für die Talseite des Reitalmgrabens ergeben sich dadurch weiche Geländeformen, die zusätzlich durch ein sehr verbreitetes Auftreten von Schwarzphylliten gekennzeichnet sind (Exner 1957). Die Beschreibung dieser Begebenheit findet sich ebenfalls in Broschüren zur Gemeinde Hüttschlag wieder. So schreibt der Alpenverein (2016): „Die eiszeitliche Vergletscherung hat einen eindrucksvollen Taltrog ausgehobelt, der, bedingt durch das Schichtfallen, einen ausgeprägt asymmetrischen Querschnitt besitzt: Besonders von Großarl bis zum Talschluss beherrschen eindrucksvolle Felswände die Ostseite des Tales, während die Westseite in sanften Hängen ansteigt“. Einige Rutschungen wurden von Exner (1956) im Zuge seiner Kartierungsarbeiten und ebenfalls von Exner (1957) in seinen Erläuterungen zur geologischen Karte als „abgerutschter dunkler Phyllit im Verband“ beschrieben. Ein Beispiel des durch den Aufbau der Talanke bedingten Versagens in Form von „Fallen“ stellt der Felssturz in Karteis, einem Ortsteil von Hüttschlag, dar, der in Kapitel 2.1 näher erläutert wird (Salzburger Nachrichten 2019). Als weiteres Beispiel einer Massenbewegung in der Umgebung dient die in Kapitel 2.2 beschriebene, kriechende Massenbewegung am Graukogel in Bad Gastein, in unmittelbarer Nähe zum Reitalmtal.

Diese wurde von Ebner (2013), im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität Graz, untersucht.

## 2.1 Felssturz in Karteis

An der dem Reitalmtal gegenüberliegenden Talflanke des Großarltales ereignete sich im Ortsteil Karteis der Gemeinde Hüttschlag Ende Oktober 2019 ein großer Felssturz, der in Abbildung 2-1 gezeigt wird. Am 24. Oktober stürzten dabei in zwei Phasen rund 15.000 m<sup>3</sup> Fels ins Tal. (ORF Salzburg 2019b)



Abbildung 2-1 : Felssturz in Karteis am 24.10.2019 mit rund 15.000 Kubikmetern Sturzmaterial. (ORF Salzburg 2019b)

Das Gewicht des größten, in Abbildung 2-1 gezeigten Blocks wurde auf rund 750 Tonnen geschätzt. Bereits im März und im Juli desselben Jahres ereigneten sich Felsstürze an derselben Stelle. Als möglicher Auslöser wird hier das viele Schmelzwasser nach starken Schneefällen im Winter herangezogen, was landesweit vermehrt zu Felsstürzen führte (ORF Salzburg 2019b). Die vorangegangene Entwicklung des Felssturzes beziehungsweise des Schuttkegels kann anhand Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3



nachvollzogen werden. Beim Felssturz im vorangegangenen März desselben Jahres, der in Abbildung 2-2 gezeigt wird, versagten rund 2500 m<sup>3</sup> Fels (ORF Salzburg 2019a).



Abbildung 2-2 : Felssturz in Karteis im März 2019 mit rund 2500 Kubikmetern Sturzmaterial. (ORF Salzburg 2019a)

Ein weiteres, vorangegangenes Ereignis im Juli des Jahres 2019, dessen Ausmaß in Abbildung 2-3 gezeigt wird, wies eine Sturzmasse von rund 5000 m<sup>3</sup> auf (ORF Salzburg 2019c).



Abbildung 2-3 : Felssturz in Karteis im Juli 2019 mit rund 5000 Kubikmetern Sturzmaterial. (ORF Salzburg 2019c)

Da sich an der Ablösestelle hinter einem Felskopf mit einem geschätzten Volumen von etwa 10.000 m<sup>3</sup> eine einen Meter breite Kluft geöffnet hatte, wurde bereits im Juli 2019 davon ausgegangen, dass die Felssturzaktivität weiter anhalten würde. (Salzburger Nachrichten 2019)



## 2.2 Massenbewegung am Graukogel

Die Massenbewegung am Graukogel in Bad Gastein beschreibt Ebner (2013) als Abrutschen von Granitgneisen auf den Glimmerschiefern der Woisgenzone. Die in Abbildung 2-4 gezeigte, bereits von Exner (1956) kartierte und (1957) erläuterte Massenbewegung am Graukogel bei Bad Gastein wird ebenfalls nach Ebner (2013) als intraglaziales und postglaziales Ereignis eingestuft. Begründet wird diese Einstufung mit glazialen Kritzern auf den Glimmerschieferplatten in der Northwest-Flanke auf 2100 Metern Meereshöhe und Restmoränen mit Zentralgneis-Findlingen in Tal- und Berg-Lage. Glaziale Kritzer sind ein Produkt des durch Materialtransport im Eisstrom bedingten Aneinanderreibens von Gesteinsfragmenten (van Husen 1987).

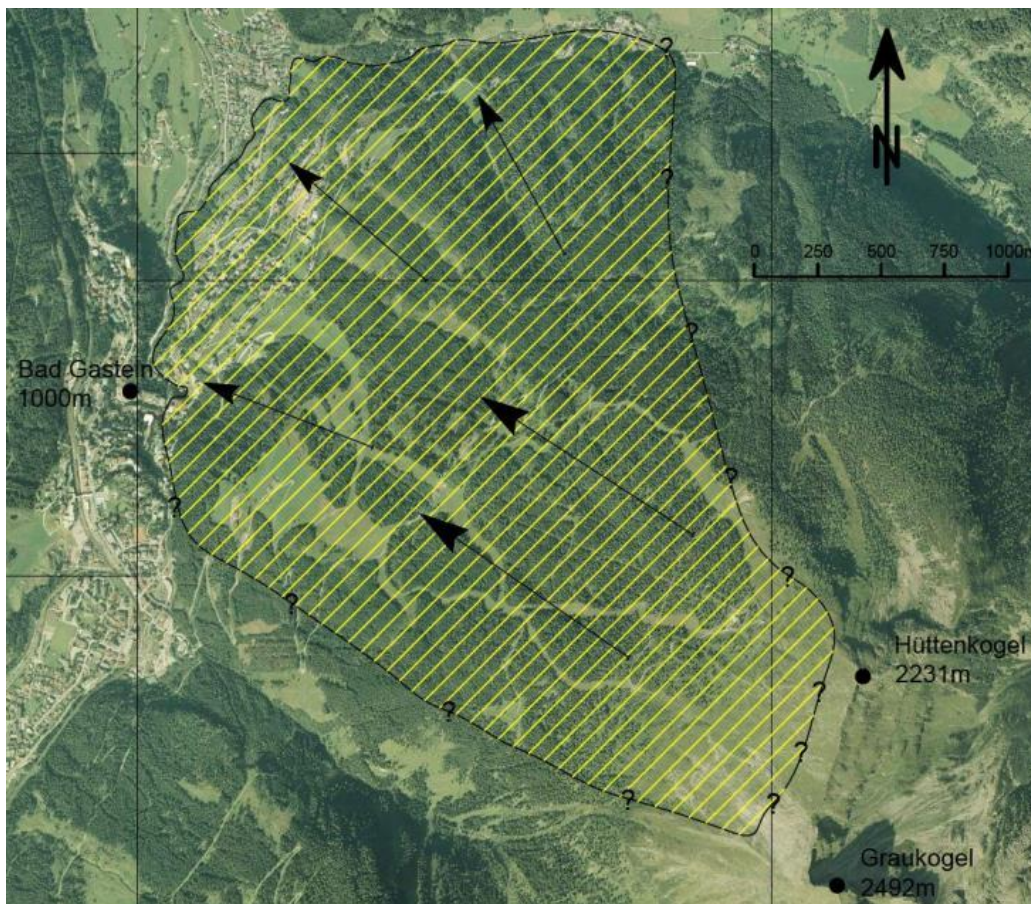


Abbildung 2-4 : Mögliches Ausmaß der Massenbewegung am Graukogel bei Bad Gastein. Die schraffierte Fläche deckt ca. 5,5 km<sup>2</sup> ab. (Ebner 2013)

Im Rahmen der Untersuchungen durch Ebner (2013) wurde für die Massenbewegung für eine Fläche von ca. 5 bis 6 km<sup>2</sup> ein Volumen von ca. 500 Mio. bis 1 Mrd. m<sup>3</sup> ermittelt. Im Bereich des Graukogels sind drei unterschiedliche lithologische Gruppen zu finden. Dabei handelt es sich um Gneise des Siglitzlappens, des Hölltorkerns und die darüberliegende zentrale Schieferserie. Zudem wird für den Bereich des Graukogels und des Hohen Stuhls

autochter und paraautochter Sedimentmantel des Hochalm-Ankogel-Massivs vermerkt. (Ebner 2013)

## 2.3 Weitere Massenbewegungen in der Region

Exner (1957) nennt in seinen Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein weitere Sturzmassen im Bereich des Großarl- und des Kleinarltals, aber auch in der Umgebung von Bad Gastein. In diesem Kontext bezieht sich Exner (1957) auf bereits von Moränen bedeckte Sturzmassen und interstadial beziehungsweise postglazial erfolgte Bewegungen. Bei den bereits von Moränen bedeckten Bewegungen handelt es sich um jene der Hirschkaralm bei Bad Gastein, von Exner (1957) beschrieben als „erratische Gneisblöcke auf einem Glimmerschieferbergsturz“, jene nordwestlich unter dem Kleinen Schneibenstein bei Großarl, von Exner (1957) beschrieben als „Triasdolomit über Schwarzphyllit“ und um eine Massenbewegung in der Ost-Flanke des Gamskarkogels in einem weiteren Seitental des Großartales. Als interstadial erfolgter Bergsturz findet bei Exner (1957) jener des Dürnwaldes im Mauereckgebirge beim Jägersee im Kleinarltal Erwähnung. Dieser wird beschrieben als „wohlausgeprägte stadiale Endmoränenwälle über einem aus Triasdolomitblockwerk bestehenden Bergsturz“ (Exner 1957). Der Bergsturz ist aus der Nordost-Flanke des Mauerecks ausgebrochen. Zum Zeitpunkt der Beschreibung durch Exner (1957) hingen diese teilweise noch über. Zahlreich vorhanden sind postglaziale Bergstürze, wie jene vom Schönersee und Schödertal im hintersten Großarltal, Mühlegg bei Karteis, südlich der Draugsteinalm, Filzmoosalm, Hub-Grundalm im dem Reitalmtal benachbarten Hubalmtal bei Wolfau und viele weitere (Exner 1957). Zudem beschreibt Exner (1957) unter Wahrung des Schichtverbandes abgerutschte Gesteinsmassen. Dabei handelt es sich vor allem um plattige Gesteins-Tafeln aus Kalkmarmor, Kalkglimmerschiefer, Schwarzphyllit und Granitgneis. Diese haben trotz ihrer Rutschung und Kippung die primäre Beziehung beibehalten. Die im Schichtverband abgerutschten Schollen weisen im unteren Bereich oftmals eine Lagerung in Form von Bergsturzblockwerk auf und stellen so ein Anfangs- oder auch Zwischenstadium der Bewegungsvorgänge dar. Das Abrutschen dieser einzelnen Felsplatten auf einer schiefen Gleitbahn führt zu einer charakteristischen Kippung, wenn sie auf dem ebenen Talgrund oder ansteigenden Gegenhang auffahren. Beobachtet werden kann dies beispielsweise bei Wieden, zwei Kilometer nordwestlich von Bad Hofgastein. (Exner 1957)



## 2.4 Ereignisdokumentation Reitalmbach

Eine historische Ereignisdokumentation des Reitalmbachs der Wildbach- und Lawinenverbauung von Sitter (2011g, 2011f, 2011e, 2011d, 2011c, 2011b, 2011a) und Gotthalseder (2012, 2011) ist in Tabelle 2-1 zusammenfassend gelistet.

Tabelle 2-1 : Zusammenfassung der Ereignismeldungen der Wildbach- und Lawinenverbauung im Einzugsgebiet des Reitalmbaches von Sitter (2011a, 2011b, 2011c, 2011d, 2011e, 2011f, 2011g) und Gotthalseder (2011, 2012).

Datum	Dominante Prozessart	Vermerk	Intensitätsklasse
1890	Murgang	Ausbruch am Schwemmkegel mit Geschiebe- bzw. Murablagerungen. Große Schäden an Häusern und Infrastruktur.	Mittel
05.08.1929	Fluvialer Feststofftransport	Nach einem schweren Wolkenbruch schwoll der Bach gewaltig an und riss sämtliche Brücken und Stege mit sich. Eine Verklauung oberhalb des Sackzieherhauses brach im letzten Augenblick, bevor der Bach in den südlichen Ortsteil ausbrach. (entnommen aus dem Erhebungsbericht über dem Zustand der Wildbäche bei Hüttschlag nach dem Hochwasser vom 5.8.1928).	Mittel
1933	Hochwasser	Mittlere Schäden am Schwemmkegel	Gering
16.08.1949	Hochwasser	Mittlere Schäden am Schwemmkegel, Überflutung des oberen Ortsbereiches	Gering
17.09.1966	Hochwasser	Leichte Schäden am Schwemmkegelgerinne	Gering
15.07.1972	Murgang	Ein Gewitterregen fiel auf eine Schneedecke von 20 bis 50cm. Dies führte zu einer starken Geschiebemobilisierung und zu murartigen Abflüssen. Schwere Schäden am Schwemmkegel und an der Baustelleneinrichtung der WLV.	Mittel
05.08.1975	Hochwasser	Nach Augenzeugenberichten hat die Verbauung im Reitalpsbach bereits einen äußerst positiven Einfluss auf die Hochwasserabflusssituation ausgelöst.	Gering
30.07.2009	Hochwasser	Wasser-Retentionssperre im Einzugsgebiet des Reitalpsbaches dämpfte den nach einem Gewitterregen auftretenden Wasserschwall wirksam ab. Der Klappmechanismus der Sperrenöffnungen wurde ausgelöst und die Rechenkonstruktion der Sperre wurde durch Unholz verkleut. Das Unholz stammte in erster Linie aus Lawinenabgängen im Bereich der gefluteten Flächen der Reitalm, wo bis zum Ereignis noch lokale Lawinenschneeablagerungen anzutreffen waren. Die Lawinen waren seit mehr als 50 Jahren nicht mehr in diesem Ausmaß abgegangen. Durch die Holzverklauung kam es zu einer starken Ablagerung von Schlamm und Schwebstoffen, was zu einer außergewöhnlichen Belastung und Beschädigung (Durchbiegung) der Rechenkonstruktion geführt hat.	nicht angegeben
19.07.2012	Fluvialer Feststofftransport	Ein kurzer Starkregen hat zum Einstoß eines linken Seitenzubringers und zur Erosion des Bachlaufes im Bereich der Reitalm geführt. Durch den Unholzurückhalt an der Retentionssperre wurde die Ausbildung eines Murstoßes in der Schluchstrecke verhindert und sehr viel Feingeschiebe zurückgehalten. Das zurückgehaltene Holz wurde umgehend entfernt und eine Geschiebespülung durchgeführt.	nicht angegeben

Am 30. Juli 2009 kam es von 17 bis 19 Uhr im Einzugsgebiet des Reitalmbachs zu extremen Regenfällen, die einen starken Geschiebe- und Wildholztransport zur Folge hatten. Die Rechenkonstruktion der im oberen Einzugsgebiet und etwas außerhalb der Reitalm befindlichen Retentionssperre besitzt drei Klappmechanismen für eine dem Wasser-Rückstau angepasste Größe der Abflussöffnungen. Diese wurde nach Gotthalseder (2012) im Jahr 1974 mit einer Höhe von 28,4 Metern errichtet. Die Sperre wurde im Zuge dieses Ereignisses durch Wildholz 10 Meter hoch verkleut. Die Verklauung führte zu einem weit über die hier ebene Almfläche zurückreichenden Wasser-Rückstau. Die Retentionssperre und der erfolgte Wasser-Rückstau werden in Abbildung 2-5 gezeigt. Dieser Rückstau hatte eine sehr hohe Belastung der Rechenkonstruktion zur Folge, weshalb auch im Hinblick auf mögliche weitere Ereignisse die verkleute Rechenkonstruktion bereits am 1. August 2009 durch einen Bagger freigelegt wurde. Nach der Schadensbegutachtung der Konstruktion erfolgten anschließende Sanierungsmaßnahmen. Dazu zählte das Abstützen der untersten Querbalken der Rechenkonstruktion an einer Betonscheibe. (Hübl et al. 2009)



Abbildung 2-5 : Retentionssperre (28,4 Meter Höhe) von talauswärts betrachtet (links) und eingestaute Almfläche in Blickrichtung zur Sperre mit Resten von Lawinenschnee (rechts). (Hübl et al. 2009)

## 3 Potenzielle Einfluss-Faktoren im Reitalmtal

### 3.1 Geologie

#### 3.1.1 Geologie des Tauernfensters

Das Untersuchungsgebiet liegt im nordöstlichen Bereich des Tauernfensters. Das Tauernfenster erstreckt sich rund 160 Kilometer vom im Westen liegenden Brennerpass bis hin zum im Osten liegenden Katschberg und umfasst dabei die Gebirgszüge der Zillertaler Alpen und jene der Hohen Tauern. Damit ist es das weitaus größte tektonische Fenster in den Ostalpen. Das Tauernfenster wird von drei großtektonischen Einheiten aufgebaut. Es handelt sich dabei um das Venediger-Deckensystem, das Glockner-Deckensystem und das Deckensystem Matreier Zone – Nordrahmenzone (Pestal 2005). Das Venediger-Deckensystem stellt die tektonisch tiefste Einheit dar. Andere Gesteine, wie mesozoische Metasedimente, paläozoische Metamorphite und variszische Metagranite bauten im Jura und in der Kreide die kristalline Basis des südlichen europäischen Schelfs auf. Über dem Venediger-Deckensystem liegt das penninische Glockner-Deckensystem. Dieses ist aus metamorphen Überresten der ozeanischen Kruste des penninischen Ozeans und metamorphen Produkten kreidezeitlicher kalkiger, mergeliger und toniger Sedimente aufgebaut. Häufig wird hier von Bündnerschiefern der Glockner- und der Fuscher-Fazies gesprochen (Pestal 2005). Sturm (1999) beschrieb die Gliederung in zwei tektonische Großeinheiten. Dabei handelt es sich zum einen um einen präalpidischen kontinentalen Basement-Komplex, bestehend aus Zentralgneisen und der polymetamorphen unteren Schieferhülle, und zum anderen um eine diese Basiseinheit überlagernde Sequenz. Diese zweite Sequenz repräsentiert die im Mesozoikum zwischen europäischer und adriatischer Platte liegende ozeanische Kruste. Sie wird wiederum in Eklogitzone und obere Schieferhülle gegliedert (Sturm 1999). Durch die nordwärts gerichtete Bewegung der adriatischen Platte kam es zur Subduktion dieser ozeanischen Kruste, aber auch des Randes der europäischen Platte nach einer Kontinent-Kontinent-Kollision. Dies führte zu teilweise intensiver Metamorphose innerhalb der penninischen Einheiten. Zudem wurden die obere Schieferhülle und die Eklogitzone in mehrere Decken aufgespalten, die dabei in ihrer Metamorphose unterschiedlichen Druck- und Temperaturpfaden ausgesetzt waren. Sturm (1999) übernimmt in seiner Beschreibung die

Gliederung des penninischen Metamorphoseereignisses in drei unterschiedliche Stadien. Das erste entsprechende Stadium repräsentiert die Kristallisation eklogitfazieller Minerale bei ca. 20 kbar Druck und einer Temperatur von ca. 600°C. Beim zweiten Stadium handelt es sich um die blauschiefer- bis eklogitfazielle Überprägung des Basis- und des Hüllkomplexes. Im dritten Stadium kam es zu grünschiefer- bis amphibolitfazieller Überprägung. Dieses letzte Stadium wird auch als Tauernkristallisation bezeichnet, da hier alle Einheiten des Tauernfensters betroffen waren und der Vorgang mit der Hebung als Folge der Erosion überlagernder Decken und tektonischer Exhumation einherging (Sturm 1999). Diese Hebung erfolgte im Miozän durch einen Vorstoß eines Teils des Südalpins, den Südalpen-Indentern, in Richtung Nordosten, gegen das Ostalpin. Diese ausgeprägte Verkürzung führte zu einer Stauchung der alpinen Deckenstapel vor allem im Bereich des Tauernfensters (Hejl et al. 2009). Die gesamte Entwicklung führte zur Freilegung penninischer und subpenninischer Einheiten der Hohen Tauern. Dabei wurden die überlagernden ostalpinen Decken an spröde-duktilen Deformationszonen im Westen und im Osten mit einem Versatz von teilweise mehreren Kilometern abgeschoben. Die Abkühlungsalter der Einheiten des Tauernfensters zeigen jedoch auch eine duktil ablaufende Deformation innerhalb der penninischen und subpenninischen Einheiten (Hejl et al. 2009). Der östliche Teil des Tauernfensters ist in Abbildung 3-1 ersichtlich. Die einzelnen Deckensysteme und Einheiten sind farblich markiert und zudem sind Störungszonen und Deckengrenzen eingetragen.

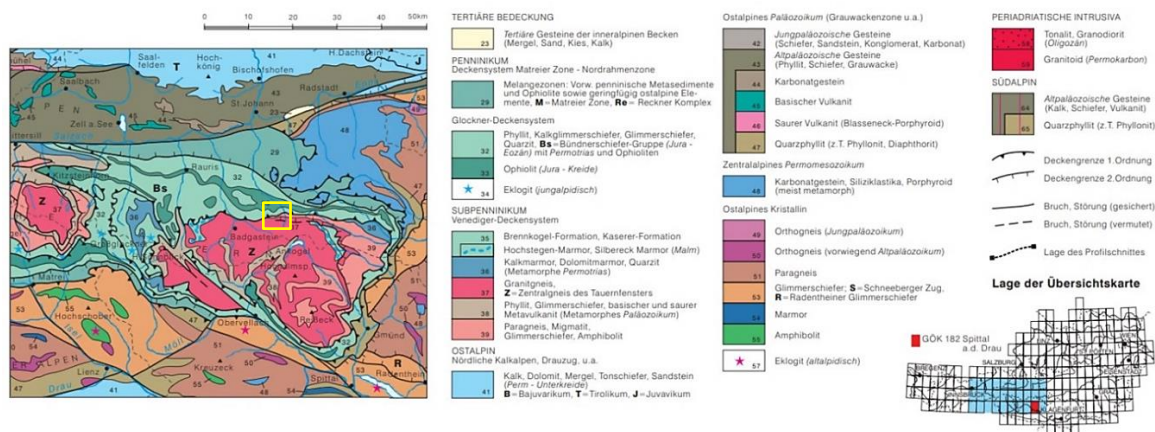


Abbildung 3-1 : Geologische Übersichtskarte des östlichen Tauernfensters. Entnommen von Pestal (2005) und zugeschnitten. Das Gebiet von Hüttschlag wurde gelb umrahmt eingetragen.

Das Untersuchungsgebiet liegt auch in Abbildung 3-1 im Bereich von Penninikum und Subpenninikum. Wie auch nach dem Geofast-Kartenblatt (Kreuss 2021) und der Kartierung von Exner (1956), handelt es sich im entsprechenden Bereich bei der penninischen Einheit um das Glockner-Deckensystem. Diesem wird wiederum die Rauris-Decke untergeordnet. Die subpenninischen Einheiten werden durch das Modereck-Deckensystem und das Venediger-Deckensystem repräsentiert. Dem Modereck-

Deckensystem wird wiederum die Flugkopf-Decke und dem Venediger-Deckensystem die Romate-Decke zugeordnet. Anhand der Gliederung der geologischen Karten von Kreuss (2021) und Exner (1956) folgt eine Beschreibung der entsprechenden Einheiten und des Untersuchungsgebietes unterteilt in Penninikum und Subpenninikum.

### 3.1.1.1 Penninikum

Beim Penninikum handelt es sich um eine tektonische Großeinheit. Diese wird von zahlreichen Deckensystemen aufgebaut. In den Ostalpen bestehen die Decken des Penninikums hauptsächlich aus Resten der ozeanischen Kruste und Tiefseesedimenten mit metamorpher Überprägung. Die penninischen Decken wurden während der Schließung des im mittleren Jura geöffneten penninischen Ozeans gebildet. Diese Schließung begann in der Oberkreide und dauerte bis ins Eozän (Hejl et al. 2009). Dabei wurde ein Großteil der ozeanischen Kruste in den Mantel subduziert. Die penninischen Einheiten wurden vom Ostalpin überschoben und so wiederum auf den europäischen Schelf verlagert. Unterschieden werden heute die penninischen Decken der Rhenodanubischen Flyschzone und der Ybbsitzer Klippenzone und jene des Engadiner Fensters, des Rechnitzer Fensters und des Tauernfensters. Im Tauernfenster umfassen die penninischen Decken das Glockner-Deckensystem und das überlagernde Deckensystem Matreier-Schuppenzone-Nordrahmenzone. Diese metamorphen, überschobenen, penninischen Deckensysteme liegen heute schließlich über dem subpenninischen Venediger-Deckensystem (Hejl et al. 2009). Das größte penninische Deckensystem des Tauernfensters ist das Glockner-Deckensystem. Es ist beinahe vollständig aus metamorphen Produkten kreidezeitlicher kalkiger, mergeliger und toniger Sedimente und metamorphen Resten ozeanischer Kruste aufgebaut. Die entsprechenden Gesteine werden heute der Bündnerschiefer-Gruppe zugeordnet. Dabei liegen die Metasedimente vorwiegend als Kalkglimmerschiefer und kalkige beziehungsweise kalkfreie dunkle Phyllite vor. Die durch die alpine Metamorphose überprägten ehemaligen Basalte der ozeanischen Kruste treten dagegen als Grünschiefer, Amphibolite und Prasinite, aber auch als Eklogite auf. Zudem kommen auch Metagabbros und Serpentinite vor (Hejl et al. 2009). Durch das Vorkommen analoger Einheiten außerhalb des Tauernfensters wird ein Ursprung unmittelbar südlich des an den europäischen Schelf grenzenden Bereichs des penninischen Ozeanbeckens vermutet (Hejl et al. 2009). Aufgrund zweier differenzierbarer Metamorphose-Entwicklungen erfolgt eine weitere Untergliederung des Glockner-Deckensystems in eine Zone der Glockner-Fazies und in eine Zone der Fuscher-Fazies. In der Rauris-Decke, die die hangende Decke des Glockner-Deckensystems darstellt, kann nur die Tauernkristallisation nachgewiesen werden. Diese erreichte im Oligozän die Bedingungen der oberen Grünschieferfazies und

kühlte anschließend im Miozän schrittweise ab. Dagegen weist die tektonisch tieferliegende Decke des Glockner-Deckensystems eine mehrphasige alpidische Metamorphose-Entwicklung auf. Dabei handelt es sich um die, das Modereck-Deckensystem überlagernde, Glockner-Decke. (Pestal & Hellerschmidt-Alber 2011)

### 3.1.1.2 Subpenninikum

Dem Subpenninikum werden Decken aus kontinentaler Kruste mit variszischer Prägung und auflagernden jungpaläozoischen und mesozoischen Metasedimenten zugeschrieben. Nach der Entwicklung des penninischen Ozeans im Jura lagen die Gesteinseinheiten der subpenninischen Decke am südlichen Rand der europäischen Kontinentalplatte (Hejl et al. 2009). Durch die Kontinent-Kontinent-Kollision, vermutlich im Eozän, wurden die subpenninischen Einheiten als frontales Element des europäischen Kontinentalrandes von der Unterkruste und dem subkontinentalen Mantel abgetragen und als Decken auf die europäische Platte verlagert. Eine weitere Untergliederung der subpenninischen Decken des Tauernfensters erfolgt in das Venediger-Deckensystem und in die Eklogitzone (Hejl et al. 2009). Das Venediger-Deckensystem stellt tektonisch die tiefste Einheit des Tauernfensters dar und umfasst möglicherweise jungproterozoische, mit Sicherheit jedoch mesozoische und paläozoische Kristallinkomplexe und Metasediment-Formationen. Eine Unterteilung des Venediger-Deckensystems kann in drei lithostratigraphische Einheiten erfolgen. Dabei handelt es sich um prävariszische Gesteinskomplexe, variszische Intrusivgesteine und postvariszische Gesteinskomplexe beziehungsweise Metasediment-Formationen (Hejl et al. 2009). Entsprechend der Begründung der Unterteilung wurden prävariszische Gesteinskomplexe bei der variszischen Orogenese tief versenkt und erfuhren eine hochgradige Metamorphose (zum Teil inklusive Migmatitbildung). Anschließend wurden sie von intermediären und sauren Plutoniten (variszische Intrusivgesteinen) intrudiert. Diese variszischen Intrusivgesteine liegen heute im Tauernfenster als Zentralgneis vor. Postvariszische Metasediment-Formationen beinhalten hingegen oberkarbone und permomesozoische Metasedimente. Diese wurden wiederum auf dem variszisch geprägten Untergrund abgelagert (Hejl et al. 2009). Die prävariszischen Gesteinskomplexe, die heute noch primäre Intrusionskontakte mit den Zentralgneisen erkennen lassen, werden unter dem Begriff „Altes Dach“ zusammengefasst. Der Begriff „Altkristallin“ beschreibt dagegen Gesteins-Komplexe, die einer ausgeprägten vormesozoischen, zumindest amphibolitfaziellen Metamorphose unterlagen und ungeachtet der nachfolgenden Tauernkristallisation nachweisbare Relikte der voralpinen Metamorphose enthalten. Innerhalb des Venediger-Deckensystems im Bereich der Ostalpen bilden die Gneiskerne die tektonisch tiefste heute aufgeschlossene Einheit. Die alpidische Metamorphose im Venediger-Deckensystem ist von einer

druckbetonten prograden und temperaturbetonten retrograden Metamorphose geprägt. Im Oligozän wurde die obere Grünschiefer- bis untere Amphibolitfazies erreicht und im Miozän erfolgte wiederum eine graduelle Abkühlung (Hejl et al. 2009). Im Zeitraum der alpidischen Kontinent-Kontinent-Kollision wurden Elemente einzelner Zentralgneis-Kerne und Teile des Alten Dachs samt auflagernden mesozoischen Metasedimenten von entsprechenden Hauptkörpern abgeschert und als Gneis-Decken oftmals kilometerweit über benachbarte Gneis-Kerne verlagert. So wurden auch Fragmente jungpaläozoischer und mesozoischer Metasedimente in nördliche Richtung transportiert und bilden unter anderem die heutige Modereck-Decke (Hejl et al. 2009). Vor allem die im tektonisch hangendenden Teil der Seidlwinkl-Decke vorkommenden eklogitischen Prasinite haben Pestal & Hellerschmidt-Alber (2011) dazu bewogen innerhalb des Subpenninikums das Modereck-Deckensystem als weitere tektonische Großeinheit neben dem Venediger-Deckensystem zu unterscheiden. Die Modereck-Decke wird so als selbstständige tektonische Einheit im Liegenden des Glockner-Deckensystems betrachtet (Pestal & Hellerschmidt-Alber 2011). Im Geofast-Kartenblatt (Kreuss 2021) und den Erläuterungen von Exner (1957) wird die im Untersuchungsgebiet vorkommende Flugkopf-Decke als Teil des von Schurk (1915) genauer verfolgten und untersuchten Hochalm-Ankogelmassivs zur Seidlwinkl-Decke und damit zum Modereck-Deckensystem gezählt. Dieses Massiv besteht aus einer halbdomeförmigen, geschieferten Intrusionsmasse. Dabei handelt es sich um Zentralgneise und Gesteine der Schieferhülle (Schurk 1915). Durch diese Intrusion des Zentralgneises wurden die Lithologien der Schieferhülle aufgewölbt aber auch teilweise zersprengt und in einzelne Schollen zerlegt, zwischen die das intrudierende Gestein eindringen konnte. Dadurch konnten einzelne Gneislamellen in den Grenzbereichen zwischen den Schiefen entstehen. Die Flugkopf-Decke wurde als solche Gneislamelle von Schurk (1915) im Bereich des östlichen Abhanges des Gasteiner Tales bei Remsach über die Wasserscheide Gasteiner Ache – Großarler Ache bis in die Hänge der Petzachalm verfolgt (Exner 1957). Wie bei der Flugkopf-Decke handelt es sich auch bei der Romate-Decke um eine solche von Exner (1951) beschriebene "Spalten-Intrusion". Diese wird jedoch zum Venediger-Deckensystem gezählt. Die Romate-Decke wird als eine der tektonisch höchsten Decken im Venediger-Duplex hervorgehoben und liegt ebenfalls im Bereich des Untersuchungsgebietes. Es handelt sich um eine ca. 15 Kilometer lange und dabei maximal 400 Meter mächtige, granosyenitische Gneislamelle zwischen Bad Gastein und Mallnitz (Exner 1951). Die Romate-Decke besteht aus Varietäten des Zentralgneises, den überwiegend jungpaläozoischen Woisgenschiefern, der Wustkogel-Formation, der Brennkogel-Formation und dem Angertalmarmor. Die strukturelle Prägung erhielt diese Decke im Zuge der Tauernkristallisation im Oligozän. Diese erfolgte gemeinsam mit der strukturellen und metamorphen Überprägung der



Zentralgneise des Hölltor-Rotgülden-Kerns und des Hochalm-Kerns. (Pestal & Hellerschmidt-Alber 2011)

### 3.1.2 Ausschnitt aus der geologischen Karte der Umgebung von Gastein

Abbildung 3-2 zeigt den von Exner (1956) unter anderem kartierten Bereich des Reitalmtales. Die entsprechenden Lithologien und Deckengrenzen sind in die Legende eingetragen und werden nachfolgend vor allem auf Basis des aktuelleren Geofast-Kartenblattes 155 (Kreuss 2021) im Kapitel 3.1.4 genauer beschrieben.

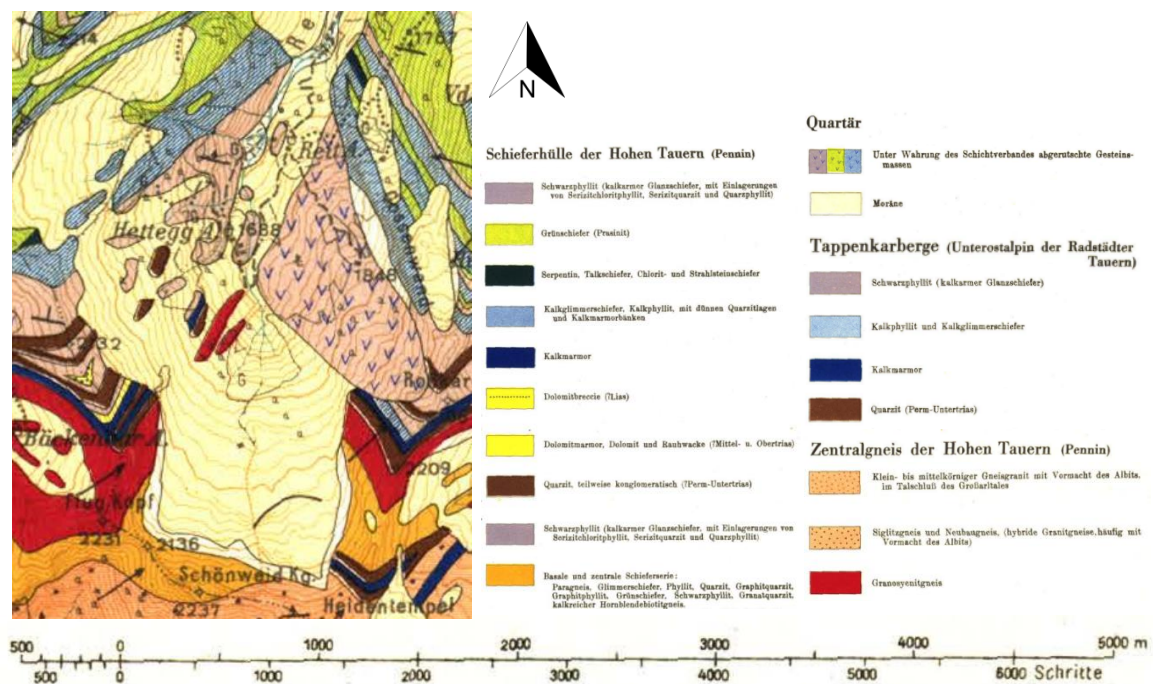


Abbildung 3-2 : Ausschnitt aus der geologischen Karte der Umgebung von Gastein entnommen von Exner (1956) und zugeschnitten.

Zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein (Exner 1956) wurden ebenfalls von Exner (1957) entsprechende Erläuterungen veröffentlicht, die unter anderem einen zum Zweck der Veranschaulichung erstellten schematischen Profilschnitt entlang des Kammes des Rosskarkogels enthalten. Selbiger wird in Abbildung 3-3 gezeigt. Die Profillinie schneidet dabei vom Kötschachtal über den Südost-Kamm des Reitalmtales durch Heidentempel, Rosskarkogel und Karlskogel hin zum Großarlal und dem Hundseck. Zu erkennen ist in Abbildung 3-3 zudem der unter anderem von Exner (1957) und dem Alpenverein (2016) beschriebene, durch das Schichtfallen bedingte, ausgeprägt asymmetrische Querschnitt des Großarler Taltrogs.



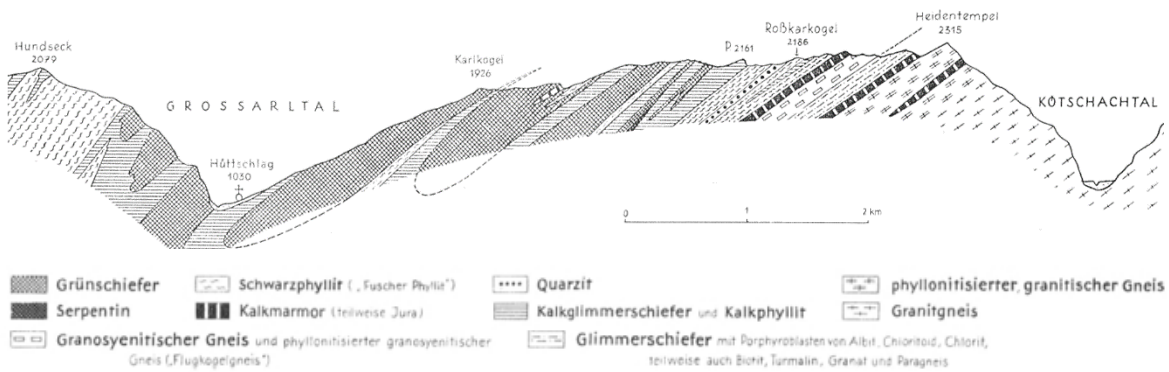


Abbildung 3-3 : Profilschnitt durch den Nordostkamm des Reitalmtals vom Kötschachtal zum Großarl. Gezeigt wird der geologische Untergrund und der vom Schichtfallen geprägte asymmetrische Querschnitt des Großarler Taltrogs. Entnommen von Exner (1957) und zugeschnitten.

3.1.3 Ausschnitt aus dem Geofast-Kartenblatt 155

Basierend auf der geologischen Karte der Umgebung von Gastein (Exner 1956) und den entsprechenden Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein (Exner 1957) wurde das Geofast-Kartenblatt Nummer 155 (Kreuss 2021) erstellt.

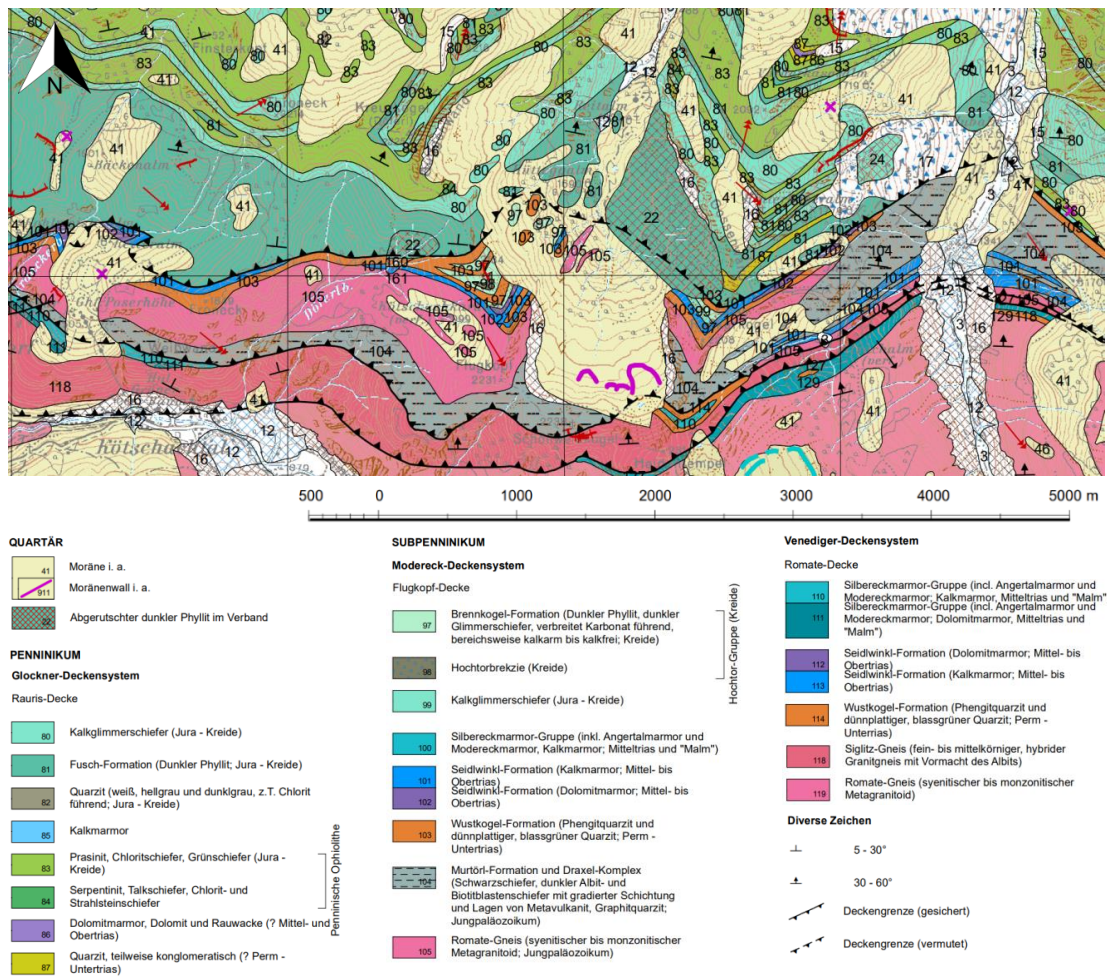


Abbildung 3-4 : Ausschnitt aus dem Geofast-Kartenblatt 155, entnommen von Kreuss (2021) und zugeschnitten.

Ein Ausschnitt des Kartenblattes ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Aufgrund der detaillierteren, aktualisierten Legende und der überarbeiteten Darstellung wurde diese Karte zur Auflistung zu erwartender Lithologien und Decken herangezogen.

### 3.1.4 Decken und Lithologien im Untersuchungsgebiet

Die nachfolgende Unterteilung der im Untersuchungsgebiet zu erwartenden Lithologien gemäß Geofast-Kartenblatt 155 (Kreuss 2021) erfolgt nach ihrer Zuordnung zur jeweiligen tektonischen Decke. Deren Gliederung wird wiederum in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Zusätzlich zu diesen, den unterschiedlichen Decken zugeordneten, Lithologien beschreiben Exner (1956) und Kreuss (2021) die postglaziale Massenbewegung im Reitalmtal als „abgerutschten dunklen Phyllit im Verband“. Dabei handelt es sich um dunklen Phyllit der Fusch-Formation (Exner 1957).

#### 3.1.4.1 Lithologien der Rauris-Decke

##### - Kalkglimmerschiefer (Jura-Kreide)

Der Begriff des Kalkglimmerschiefers beinhaltet hier als gesteinskundliche Bezeichnung Kalkschiefer und Glimmermarmor als Teil der Bündnerschiefer-Gruppe. Diese bilden gemeinsam mit Prasiniten und Amphiboliten den überwiegenden Teil des Glockner-Deckensystems. Die Oberflächen der Felsformationen dieser Kalkglimmerschiefer sind vorwiegend sandig angewittert und durch bräunlich-graue Färbung gekennzeichnet. Bei frischen Bruchstellen dominieren graue bis graublaue Farbtöne. Die vorliegenden Kalkglimmerschiefer bestehen hauptsächlich aus Kalzit, Quarz und Glimmer. Abhängig vom Bereich des Vorkommens treten noch Phlogopit, Chlorit, Feldspat und Dolomit als weitere Bestandteile auf. Der Ursprung der Gesteine liegt in überwiegend kreidezeitlichen Areniten, pelagischen mergeligen Kalkschlämmen und gelegentlich auch schwach bituminösen Mergeln. Diese wurden zuerst am Rand des Kontinentalschelfs in größerem Abstand zum Festland abgelagert, anschließend in zyklischen Schüben in die Tiefsee transportiert und im penninischen Ozean auf der ozeanischen Kruste erneut sedimentiert. Dabei liegen sie größtenteils im amphibolitfaziellen Wirkungsbereich der Tauernkristallisation. (Hejl et al. 2009)

Zusätzlich sind in diesen der Bündnerschiefer-Gruppe zugeordneten Kalkglimmerschiefen oftmals dunkle Phyllite, aber auch Biotit, Granat und Oligoklasblasten führende Schwarzschiefer eingeschaltet. Ihr Ursprung liegt in grünschiefer- bis amphibolitfazieller Metamorphose schwarzer Tone (Pestal 2005). Da die dunklen Phyllite häufig in dichter Wechsellagerung beziehungsweise mit kontinuierlichen Übergängen in den Kalkglimmerschiefen auftreten, werden dünne Lagen der dunklen

Phyllite nicht unterschieden und in die Signatur der Kalkglimmerschiefer subsumiert. (Pestal 2005)

- Fusch-Formation (Jura-Kreide)

Peer & Zimmer (1980) beschreiben den dunklen Phyllit der Fusch-Formation. Dabei wird der Begriff Schwarzphyllit verwendet. Das lässt sich durch die genauere Ansprache der Lithologie erklären. Der Schwarzphyllit, auch Rauriser Phyllit, wird als dünnschichtiger, ebenflächiger, graphitisch abfärbender Phyllit beschrieben. Das Gestein erscheint dadurch wenig metamorph. Das gehäufte Vorkommen von Quarz, aber auch von Karbonat spricht für einen etwas höheren Metamorphosegrad. Die Färbung des Gesteins variiert zwischen einem intensiv schwarzen und helleren, grauen Farbton. (Peer & Zimmer 1980)

Die als Fuscher-Phyllite bezeichneten kalkfreien, dunklen Phyllite zwischen dem unteren Fuscher Tal und unterem Rauriser Tal weisen ein mesozoisches Alter auf. Sie können tektonisch nicht von den in Wechsellagerung auftretenden kalkführenden dunklen Phylliten und Kalkglimmerschiefern der Bündnerschiefer-Gruppe separiert werden. Dies führte zu einer Unterteilung der dunklen Phyllite im Tauernfenster in paläozoische Habach-Phyllite und als Fuscher-Phyllite bezeichnete, mesozoische Rauriser-Phyllite. Die Fuscher-Phyllite bilden heute eine der Hauptlithologien der Bündnerschiefer-Gruppe. Die Phyllite der Bündnerschiefer-Gruppe unterlagen einer grünschieferfaziellen Metamorphose und liegen im Glockner-Deckensystem als tektonisch teilindividualisierte Streifen, zerlegt in Schuppen, vor. Dieses Vorkommen erstreckt sich über Fusch, dem Rauriser Tal, dem Gasteiner Tal und im hinteren Großarlal an den Nordrand des Hölltor-Rotgülden-Kerns. Ihren Ursprung haben die Fuscher-Phyllite in, in tiefen Bereichen des penninischen Ozeans abgelagerten, dunklen Tonen mit sandigen beziehungsweise mergeligen Zwischenlagen. (Hejl et al. 2009)

Exner (1957) ordnet die Fuscher-Phyllite der oberen Schwarzphyllitzone zu und beschreibt das Vorkommen der dunklen, kalkarmen Phyllite als häufig begleitet von Quarzschwielen und Quarzknauern.

- Prasinit, Chloritschiefer, Grünschiefer (Jura-Kreide)

Diese Gesteine weisen eine mehr oder weniger giftgrüne bis gelblich-dunkelgrüne Färbung auf und können dadurch in der Landschaft weithin erkannt werden. Beobachtbar sind entsprechende Aufschlüsse oftmals als steile Felswände oder Grate. Bei den charakteristischen Hauptgemengeteilen handelt es sich um Epidot und Albit. Hinzu kommt einerseits Chlorit und andererseits Hornblende. Das führt zur weiteren Unterscheidung in Chloritprasinit und Hornblendeprasinit. Bei Mallnitz findet sich zudem reichlich Biotit in den

Grünschiefern (Exner 1957). Exner (1957) vermutet einen Ursprung der Grünschiefer der Tauernhülle in der Metamorphose von Diabasen und Diabastuffen. Aus dem mittleren Tauernfenster bekannt gewordene Prasinite und Amphibolite mit Pseudomorphosen nach Lawsonit und mit reliktischem Glaukophan weisen auf eine ursprüngliche Blauschiefermetamorphose und eine erst später erfolgte grünschiefer- bis amphibolitfazelle Metamorphose der ehemaligen Basalte hin. (Hejl et al. 2009)

- Serpentin, Talkschiefer, Chlorit- und Strahlsteinschiefer

Dieser dunkelgrüne, meist brecciös entwickelte Serpentin weist selten ein deutliches Parallelgefüge auf. Er baut linsenförmige Einheiten innerhalb der Tauernschieferhülle auf und dürfte nach Exner (1957) mit den Grünschiefern verknüpft sein. So wird sein Ursprung in Peridotiten und Pyroxeniten im geologischen Verband des Diabasvulkanismus vermutet. Nach Hejl et al. (2009) handelt es sich bei den mittlerweile nahezu vollständig serpentinitisierten Ultrabasiten um obduzierte Überreste ehemaliger ozeanischer Lithosphäre des penninischen Sedimentationsraumes. Für Serpentin sind massige Felswände und eine dunkle Verwitterungsfarbe charakteristisch. Zonen intensiver Zerschierung innerhalb der Serpentinlinsen und die Ränder der Serpentine sind dabei häufig aus Talk-, Chlorit- und Strahlsteinschiefer aufgebaut. Diese Serpentinbegleitgesteine wurden durch Metamorphose, entsprechende Umkristallisationsvorgänge und Stoffwanderungen (insbesondere entlang von Gleitbahnen) aus den ursprünglichen basischen Eruptivgesteinen gebildet (Exner 1957). Der Serpentin im West-Hang des Reitalmtales liegt, wie auch jener des Guggensteins im Gasteiner Tal, im Bereich der oberen Grenzfläche des mittleren Schwarzphyllit-Zuges. Er verläuft dabei über die Talsohle in die Ost-Flanke des Reitalmtales. Zusätzlich wurde von Exner (1957) frisches Serpentinblockwerk im Bereich des Bergsturzgebietes der West-Flanke des dem Reitalmtal benachbarten Hubalmtales gefunden.

- Quarzit, teilweise konglomeratisch (Perm-Untertrias)

Im Gebiet herrschen weiße bis grünlich-weiße plattige Quarzite, dünnstiefrige Serizitquarzite, mitunter aber auch dunkle oder gebänderte Graphitquarzite vor (Exner 1957). Aufgeschlossener Karbonatquarzit wurde bei entsprechendem Quarzgehalt in der Kartierung von Exner (1956) mit den Quarziten, bei geringerem Gehalt jedoch mit den Kalkglimmerschiefern zusammengefasst. Oftmals befinden sich auch quarzitisches Lagen in den zentralen und basalen Glimmerschiefern, aber auch in den Schwarzphylliten. Die Quarzite sind dabei mitunter konglomeratisch ausgebildet. Entgegen dem jüngeren Alter vieler Quarzite in den Kalkglimmerschiefern und Schwarzphylliten wird für Quarzite in Begleitung der Dolomite und Rauwacken ein permo-triadisches Alter vermutet. (Exner

1957)

#### 3.1.4.2 Lithologien der Flugkopf-Decke

##### - Brennkogel-Formation (Kreide)

Bei den Gesteinen der Brennkogel-Formation handelt es sich um dunklen Phyllit und dunklen Glimmerschiefer. Dieser tritt verbreitet karbonatführend, bereichsweise, aber kalkarm bis kalkfrei auf (Kreuss 2021). In die Brennkogel-Formation sind helle, feinkörnige Karbonatquarzite mit Karbonat-Gehalten von rund 10 Prozent mit einer Mächtigkeit von 5 bis 20 Metern und seltener auch mit einem Karbonat-Gehalt bis über 50 Prozent und zudem metamorphe Brekzien eingelagert (Hejl et al. 2009). Exner (1957) ordnet die Gesteine der mittleren Schwarzphyllitzone unter. Diese Schwarzphyllite liegen vom Reitalmgraben zum Hubalmtal über der Randserie und werden mehrere hundert Meter mächtig. Sie sind verantwortlich für große Bergstürze und Rutschungen im Hüttwinkel und im Gasteiner Tal am Mausarkogel bei Bad Gastein. Auch der Sockel des Gamskarkogels ist aus diesen Phylliten aufgebaut. Die in das Reitalmtal streichenden Phyllite werden am Rosskarkogel höher metamorph. Hier sind aufgrund der Nähe zum Zentralgneis größere Mengen an Albit enthalten. Bei der Hub-Grundalm im Hubalmtal gehen die charakteristischen tektonischen Aspekte der mittleren Schwarzphyllitzone verloren, da sich hier Glimmerschiefer in die Marmor- und Kalkglimmerschiefer-Grünschieferserie einschalten. Die Bezeichnung als mittlere Schwarzphyllitzone wurde von Exner (1957) verwendet um die vorgefundenen Phyllite von den Fuscher-Phylliten im Hangenden der Kalkglimmerschiefer-Grünschieferserie zu unterscheiden. Als weitere Zone werden zudem die unteren Schwarzphyllite im Bereich der Mallnitzer Mulde unterschieden. Dort gibt es tektonisch tiefer liegende Schwarzphyllite innerhalb der basalen Glimmerschiefer-Serie. (Exner 1957)

##### - Hochtorbrekzie (Kreide)

Bei der Hochtorbrekzie handelt es sich um in die Brennkogel-Formation eingelagerte metamorphe Brekzien. Diese metamorphen Brekzien bestehen in ihrer Zusammensetzung vorwiegend aus Karbonatgesteinen und wurden zum Teil stark duktil deformiert. Die Gesteine weisen eine entweder phyllitische oder aber quarzitische Matrix auf. (Hejl et al. 2009)

##### - Kalkglimmerschiefer (Jura-Kreide)

Diese Kalkglimmerschiefer enthalten Porphyroblasten aus Albit, Granat, Fuchsit und Disthen. Zudem ist häufig Biotit enthalten. In einem tektonisch eingeschuppten Kalkglimmerschieferband im Siglitz-Unterbaustollen kommen auch Porphyroblasten von

Albit und Mikroklin vor. Teilweise bilden glimmerarme Lagen in den Kalkglimmerschiefern steile Felswände, wie es bei der Böcksteinwand und den Tüchlwänden im Gasteiner Tal der Fall ist (Exner 1957). Bei Hejl et al. (2009) werden diese Kalkschiefer zur Brennkogel-Formation gezählt.

- Kalk- und Dolomitmarmor (Mittel- bis Obertrias)

Die entsprechenden Gesteine sind der Seidlwinkl-Formation zugehörig, deren Gebiet sich vom Seidlwinkltal zum südlichen hinterem Fuscher Tal erstreckt. Es handelt sich dabei um eine tektonische Einheit der Seidlwinkl-Decke. Diese als Seidlwinkeltrias etablierte lithostratigraphische Einheit wird aus metamorphen Karbonatgesteinen aufgebaut, die ihren Ursprung wiederum in seichtmarinen Kalken, Rauwacken und Dolomiten haben. (Hejl et al. 2009)

Exner (1957) beschreibt in seinen Erläuterungen das Wechseln von glimmerärmeren Kalkmarmoren mit glimmerreicheren Kalkglimmerschiefern und Kalkphylliten im Bereich von Zehner-Metern senkrecht zur Schieferungsfläche. Hier bleibt es dem subjektiven Empfinden überlassen, wo Grenzen zwischen Kalkmarmor und Kalkglimmerschiefer gezogen werden (Exner 1957). Dolomitmarmor wurde im Bett des Scheiblingbachs gefunden. Derselbe Dolomit-Zug findet sich auch nordwestlich der Reiter Alm und am Nord-Kamm des Flugkopfes wieder, wo er ins Reitalmtal streicht. In derselben tektonischen Position kommt der Dolomit zwischen Rosskarkogel und Hinterkaser vor. Im Reitalmtal finden sich zahlreiche Dolomitblöcke in der Lokalmoräne südwestlich der Hüttegalm. (Exner 1957)

- Wustkogel-Formation (Perm-Untertrias)

Bei der im Gebiet auftretenden Wustkogel-Formation handelt es sich nach Kreuss (2021) um Phengitquarzit und dünnplattigen blassgrünen Quarzit. Siliziklastische Metasedimente aus Perm und Untertrias wurden im Bereich der mittleren Hohen Tauern gemäß ihres typischen Auftretens am Wustkogel im Osten der Großglockner-Hochalpenstraße benannt und daher als Wustkogel-Serie bezeichnet (Hejl et al. 2009). Der permische Anteil wird durch die ebenfalls im Kartenblatt von Kreuss (2021) eingetragenen Phengitquarziten und Arkosequarziten bis Arkosegneisen repräsentiert. Diese enthalten teilweise Quarzporphyr-Derivate. Der stratigraphisch höher liegende Teil wird der Untertrias zugeordnet und ist aus den von Kreuss (2021) markierten, dünnplattigen, weißen bis blassgrünen, feinkörnigen Quarziten, aber auch aus hellen Serizitschiefern mit dünnen Rauwackenbändern, aufgebaut (Hejl et al. 2009). Erwähnung finden bei Strasser (1989) zusätzlich uranhaltige, permische Phengit-Schiefer und Arkose-Gneise mit zwischengeschalteten Quarzschichten. Diese werden durch triassischen Marmor der

Seidlwinkl-Formation überlagert.

- Murtörl-Formation und Draxel-Komplex (Jungpaläozoikum)

Es handelt sich hierbei um Schwarzschiefer, dunklen Biotit- und Albitblastenschiefer in einer gradierten Schichtung und Lagen aus Metavulkanit und Graphitquarzit (Hejl et al. 2009). Die Gesteine des Draxel-Komplexes wurden nach ihrem Vorkommen im Kammbereich des Draxelnock-Klampferköpfl in der östlichen Hochalmgruppe benannt. Diese lithologische Einheit ist vorwiegend aus, von mittelgradiger Metamorphose überprägten, ehemaligen psammitischen und pelitischen Sedimenten und vulkanischen Zwischenlagen aufgebaut. Neben Vorkommen dunkler Phyllite, Graphitquarzite, Granatglimmerschiefer, Prasinitische, Metaagglomerate und Orthogneislagen ist lagenweise graphithaltiger, dunkler Biotitblastenschiefer mit abwechselnd hohem Feldspat- und Quarzgehalt der häufigste Gesteinstyp (Hejl et al. 2009). Als typisch beschrieben werden zudem regelmäßige Wechsellagerungen dunkler Biotitblastenschieferlagen und dunkler, dünnerer Phyllit-Lagen. Teilweise analog zu diesem Gesteinskomplex tritt die Murtörl-Formation im östlichen Teil des Tauernfensters auf. Diese Gesteinsformation besteht vorwiegend aus häufig kalkfreien, dunklen Phylliten und dunklen Albitblastenschiefern, die eine ausgeprägte Albitblastese aufweisen. Am Ostrand des Tauernfensters erreicht die Formation eine Mächtigkeit von unter 100 Metern. Die Albitblasten sind im Zuge der alpidischen Metamorphose entstanden und können mehrere Millimeter im Durchmesser aufweisen. Zusätzlich treten Derivate eines basischen Vulkanismus als Prasinite und Chloritschiefer auf. Im Gegensatz zum Draxel-Komplex fehlen hier die granitischen und aplitischen Intrusionen. Deshalb sollte die Sedimentation ihrer Protholite erst auf die variszische Intrusion der Zentralgneise gefolgt sein. (Hejl et al. 2009)

- Romate-Gneis (Jungpaläozoikum)

Die von Kreuss (2021) ins Geofast-Kartenblatt eingetragenen syenitischen bis monzonitischen Metagranitoide des Romate-Gneises treten ebenfalls im Bereich der Romate-Decke auf. Sie werden daher auch im entsprechenden Kapitel 3.1.4.3 beschrieben. Der Granitgneis innerhalb der Flugkopf-Decke zeigt einen höheren Härtegrad als die überwiegende Masse der Schiefergesteine. Das Gestein weist dabei jedoch auch ein Bewegungsbild ausgeprägter Deformationen auf (Exner 1957). Unterschieden werden hier große Granitgneiskörper des Hochalm-Ankogelmassivs und des Sonnblick-Kerns und Gneislamellen. Dabei handelt es sich um die Schuppen am Nord- und Nordwest-Rand des Hochalm-Ankogelmassivs, der Romate-Decke im Bereich der Gasteiner Mulde und kleinere Gneislamellen und Gneissplitter im Bereich der

Mallnitzer Mulde. Die großen Granitgneiskörper erfuhren eine typische Einengungstektonik. Währenddessen wurden Gneislamellen vom Rand großer Granitgneismassen abgetragen und gemeinsam mit gleitfähigen Schiefen tangential verfrachtet. Zwischen Gasteiner Tal und Großartal befinden sich nördlich des Hochalm-Ankogelmassivs zwei dieser Gneislamellen. Sie sind aus Granosyenitgneis mit basischen Fischen, bestehend aus Dioriten, Flotiten und Amphiboliten, und Apliten, aufgebaut (Exner 1957). Bei einer dieser Lamellen handelt es sich um die Flugkopf-Decke, deren Flugkogelgneis bereits Schurk (1915) detailliert beschrieb. Der Granosyenitgneis der Flugkopf-Decke, beispielsweise am Kamm zwischen Heidentempel und Rosskarkogel im Reitalmtal, entspricht den beinahe regellos körnigen Granosyenitgneisen der Romate-Decke. Von Schurk (1915) werden auch zwei Generationen der Hornblende beschrieben, die in den dioritischen und amphibolitischen Schollen im Bereich des Flugkopfs und des Rosskarkogels mikroskopisch erkennbar sind. Dabei erscheint die ältere Hornblende braun bis dunkelgrün und dicht gefüllt. Sie wird wiederum von der jüngeren ungefüllten, blaugrünen Hornblende umwachsen und verdrängt. Die Grenze von der Romate-Decke zur Flugkopf-Decke ist nach Exner (1957) im Gebiet nicht direkt aufgeschlossen und aufgrund der Querschiebung einigermaßen komplex. So wird der Granosyenitgneis der Flugkopf-Decke mitsamt basalem Glimmerschiefer als „im Schwarzphyllit des Gebietes zwischen Remsach- und Scheiblinggraben nordöstlich von Bad Gastein auskeilend“ (Exner 1957) beschrieben. Diese westliche Auskeilstelle ist von Moränenmaterial bedeckt. Die östliche Auskeilstelle liegt hingegen über dem Weg zwischen Hinterkaser-Alm und Pitzach-Alm. (Exner 1957)

#### 3.1.4.3 Lithologien der Romate Decke

##### - Romate-Gneis (Jungpaläozoikum)

Beim Romate-Gneis handelt es sich um Granosyenitgneis, der am Süd- und Ostrand des Siglitz-Lappens in der Umgebung der Romatespitze nordwestlich von Mallnitz und entlang der Nassfelder Ache auftritt. Dabei handelt es sich um ein vorwiegend geschiefertes, manchmal aber auch massiges, mittelkörniges, schwarz-weiß gesprenkeltes Gestein mit vielen basischen Schollen. Ein geringer Anteil an Quarz und ein untergeordnetes Vorkommen von Plagioklas gegenüber dem Kalifeldspat ist typisch. Zusätzlich fallen makroskopisch große, weiße Alkalifeldspate auf. Neben gelegentlich enthaltener Hornblende findet man meist Pseudomorphosen, die aus Epidot und Biotit bestehen. Das Gestein ist auch durch das Auftreten von Bänken und Schollen feldspatarmer, dunkler Amphibolite geprägt. (Hejl et al. 2009)



- Silbereckmarmor-Gruppe (Mitteltrias und Malm)

Gemäß Kreuss (2021) handelt es sich hierbei um Kalkmarmor, der auch den Angertalmarmor und den Modereckmarmor umfasst. Als Silbereckserie wird eine Serie von postvariszischen Metasedimenten bezeichnet. Primärstratigraphisch liegt sie auf dem Granitpluton der Hafnergruppe, der spätvariszisch erodiert wurde. Diese Serie beschreibt eine geringmächtige basale Abfolge von Graphitquarzit, Geröllquarzit, Arkosequarzit und Lantschfeldquarzit, aber auch die überlagernden kompakten Bündnerschiefer und Karbonatgesteine (Hejl et al. 2009). Innerhalb der Karbonatgesteine wird der im Liegenden befindliche Dolomitmarmor und der im Hangenden befindliche, bei Kreuss (2021) vermerkte Kalkmarmor unterschieden. Dieser Kalkmarmor zeigt eine deutliche Bankung und Bänderung. Im Norden handelt es sich um bituminösen dunkelgrauen Kalkmarmor und im Süden um weißen grobkörnigeren Kalkmarmor. Die zeitliche Eingrenzung in den Zeitraum der Mitteltrias bis Oberjura erfolgte aufgrund zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollumfänglich bekannter stratigraphischer Ergebnisse der Untersuchungen mehrerer Fossilfunde der Typlokalität. Diese stufen den Silbereckmarmor in den oberen Jura ein und dementierten so die Auffassung der Silbereckmarmor-Gruppe als stratigraphisches Äquivalent der Seidlwinkl-Formation. (Hejl et al. 2009)

- Wustkogel-Formation (Perm-Untertrias)

Wie auch innerhalb der Flugkopf-Decke tritt nach Kreuss (2021) im Bereich der Romate-Decke Phengitquarzit und dünnplattiger, blassgrüner Quarzit der Wustkogel-Formation auf. Dabei sollte es sich um die unter anderem von Hejl et al. (2009) beschriebenen Arkosequarzite, Albitblastenschiefer und weißen bis grünlichen plattigen Quarzite handeln. Diese treten in ihrer stratigraphischen Position analog zu jener der Wustkogelserie im östlichen Tauernfenster auf und wurden als Äquivalent der Wustkogelserie aufgefasst. (Hejl et al. 2009)

#### 3.1.4.4 Lithologien des Quartärs

Wie ebenfalls in Abbildung 3-4 gezeigt, sind weite Teile des Reitalmtales von quartären Ablagerungen bedeckt. Dabei handelt es sich nach Kreuss (2021) um Moränenmaterial und einen am Fuß des Heidentempels befindlichen Moränenwall.

## 3.2 Strukturgeologie

Exner (1957) betrachtete im Rahmen seiner Erläuterungen zur geologischen Karte der

Umgebung von Gastein ebenfalls die Ergebnisse seiner Messungen zu den Orientierungen der Schichtflächen und Falten. Dazu stellte er seine Ergebnisse in einer Strukturkarte dar. Ein Ausschnitt dieser Darstellung wird in Abbildung 3-5 gezeigt. Der Bereich des Reitalmtals wurde rot markiert. Für die südöstliche Talflanke des Reitalmtals werden hier von Exner (1957) einige Faltenstrukturen illustriert, die jedoch zum Großteil im äußeren Bereich des Reitalmtals, beispielsweise im Bereich des Karlkogels liegen. Die Faltenachsen der südöstlichen Talflanke streichen von Ost-Südost nach West-Nordwest und weisen gemäß der Legende in Abbildung 3-5 eine Neigung von  $6^\circ$  bis  $30^\circ$  auf. Die Faltenachsen der nordwestlichen Talflanke entsprechen im Streichen denen der gegenüberliegenden Talseite. Sie weisen jedoch eine Neigung von  $0^\circ$  bis  $5^\circ$  auf. Nur die von Exner (1957) vermerkten Faltenachsen im Bereich der südlicher aufgeschlossenen Decken unterscheiden sich im Streichen von Südwest nach Nordost und ihrer Neigung im Bereich von  $6^\circ$  bis  $30^\circ$ . Die eingemessenen Schichtflächen fallen im Schnitt in nördliche Richtung mit einem Einfallswinkel von  $31^\circ$  bis  $60^\circ$  ein.

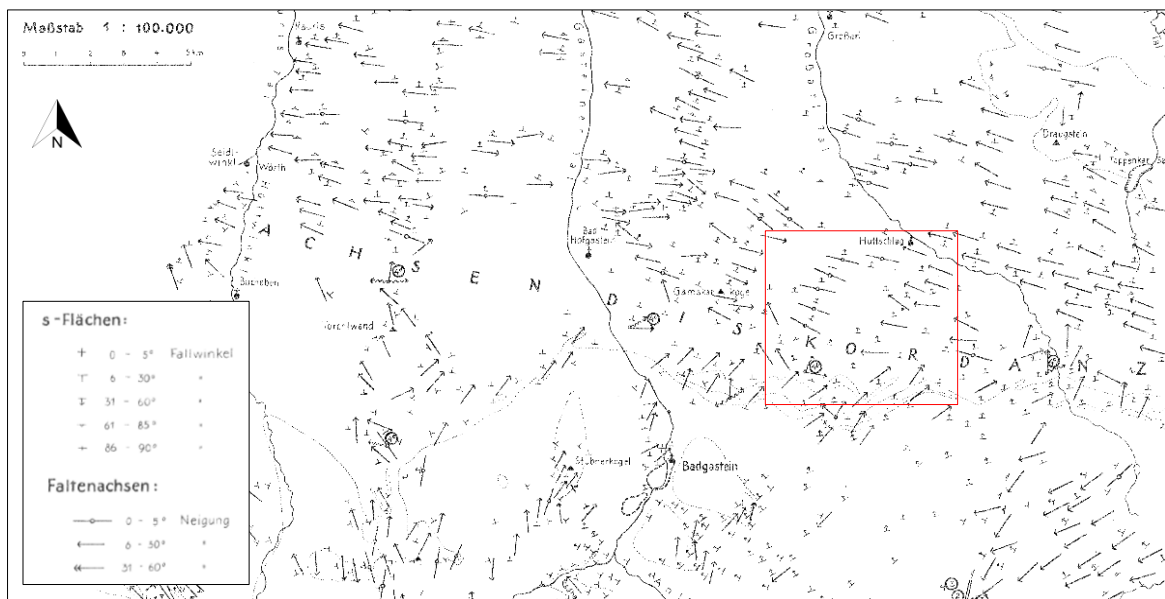


Abbildung 3-5 : Ausschnitt aus der Strukturkarte der Hohen Tauern im Abschnitt von Gastein von Exner (1957). Die Darstellungen wurde zugeschnitten und der Bereich des Reitalmtals rot umrahmt markiert.

### 3.3 Hydrogeologie

Ein natürlicher Umweltfaktor, der unter anderem durch die Herabsetzung des Scherwiderstandes infolge von erhöhtem Porenwasserdruck als Ursache von gravitativen Massenbewegungen herangezogen werden kann, liegt im Arbeitsbereich der Hydrologie, Hydrogeologie und Meteorologie. So können beispielsweise Niederschlag und Schneeschmelze und daraus resultierend Porenwassersättigung oder

Porenwasserüberdruck in Lockergesteinen und Böden zu einem Versagen des Hanges führen. Dabei sind vor allem Intensität und Art des Niederschlages, aber auch die Dauer der Niederschlagsperioden entscheidend. In diesem Zusammenhang spielt auch Erosion, beispielsweise durch Fließgewässer eine wichtige Rolle. In anderen Fällen nimmt auch Trockenheit über den Versiegelungseffekt und Trockenrisse großen Einfluss auf das Abflussverhalten und die Wasseraufnahme betroffener Hänge. (Lotter & Haberler 2013)

Wie in Kapitel 2 beschrieben, zeigt sich die Relevanz des hydrogeologischen Faktors in der Umgebung des Arbeitsgebietes in zahlreichen medialen Erscheinungen. Ergänzt werden diese Meldungen durch die in Tabelle 2-1 gelisteten Ereignismeldungen und die Errichtung einer Retentionssperre im hinteren Reitalmtal. Die Talsohle des hinteren Reitalmtals ist nach Kreuss (2021) vor allem aus Moränenmaterial und den im Verband abgerutschten dunklen Phylliten der Fusch-Formation aufgebaut. Genske (2021) beschreibt den Anstieg des Poren- und Kluftwasserdrucks durch entsprechenden Wassereintrag. Dieser führt zu einer Reduktion des Scherwiderstandes, beispielsweise feinkörniger Böden, oder zu einer Verstärkung der treibenden Kräfte.

### **3.4 Seismik**

Auch Seismische Aktivität und damit einhergehende Erdbeben als dynamische Belastung von Hängen kann einen weiteren auslösenden Faktor gravitativer Massenbewegungen in verschiedenen Regionen darstellen (Lotter & Haberler 2013). Die dem Untersuchungsgebiet am nächsten gelegene große Störung befindet sich nach Kreuss (2021) ca. 7 Kilometer Luftlinie entfernt. Diese Störung streift den Karteisgraben nördlich des Untersuchungsgebiets. Es handelt sich dabei um eine als Katschberg-Scherzonen-System bezeichnete dextrale Seitenverschiebung (Scharf et al. 2013). Sie verläuft nördlich des Untersuchungsgebiets von West-Nordwest nach Ost-Südost, innerhalb der dort aufgeschlossenen Glockner-Decke und ist auch in Abbildung 3-1 in diesem Bereich eingetragen. Im Arbeitsgebiet befinden sich die beiden im Geofast-Kartenblatt als Störungen vermerkten Deckengrenzen zwischen Rauris-Decke, Flugkopf-Decke und Romate-Decke (Kreuss 2021).

#### **3.4.1 Seismische Messstationen**

In der Umgebung der Gemeinde Hüttschlag befinden sich, wie auch bereits von Tauber (2020) beschrieben, mehrere seismische Messstationen. Die Station „ZS-D117“ wurde von November 2017 bis Dezember 2019 im Reitalmgrab durch das „GFZ Helmholtz-

Zentrum Potsdam“ betrieben. Die Station „XT-AAE40“ der ETH Zürich nahm seismische Daten im Zeitraum von Juni 2014 bis September 2015 im Kötschachtal auf. Diese Messstation deckt somit nicht den Zeitpunkt der Reaktivierung der Massenbewegung im Bereich der Hüttegalm ab. Bei der dritten Station handelt es sich um „ZS-D116“, ebenfalls vom „GFZ-Helmholtz-Zentrum Potsdam“, die von August 2017 bis Dezember 2019 im Angertal bei Bad Hofgastein im Einsatz war. Die vierte und letzte seismische Messstation der weiteren Umgebung mit der Bezeichnung „OE-KBA“ ist seit November 1997 im Bereich der Kolnbreinsperre im hinteren Maltatal im angrenzenden Kärnten aktiv. Betrieben wird die Station vom „Königlichen Niederländischen Meteorologischen Institut“ (Orfeus Data Center). Alle vier Stationen sind in Abbildung 3-6 ersichtlich. (EIDA 2023)



Abbildung 3-6 : Seismische Messstationen in der Umgebung von Hüttschlag. Die Station ZS-D117 befindet sich im Reitalmtal. (EIDA 2023)

Die Daten der Messtationen können über den Webdienst „dataselect“, mittels „HTTP-GET“ und „HTTP-POST“ im „miniSEED“-Format abgerufen werden. (EIDA 2023)

### 3.5 Anthropogener Einfluss

Auch Eingriffe des Menschen können bei aufgrund natürlicher Faktoren instabilen oder im Grenzgleichgewicht befindlichen Hängen einen zusätzlich negativen Einfluss oder gar auslösenden Faktor gravitativer Massenbewegungen darstellen. So führen oftmals künstliche Böschungsverteilungen, Wassereinleitungen, Rodungen und statische Auflasten zur Schwächung eines Hanges (Lotter & Haberler 2013). Die in Abbildung 1-3 und Abbildung 1-4 dargestellten Ansichten des Untersuchungsgebiets zeigen eine über

die postglaziale Massenbewegung und den reaktivierten Bereich verlaufende Forststraße und die im Bereich der Reitalm und der Hütteggalm errichteten Hütten. Zusätzlich sind einzelne Wanderwege ersichtlich. Vor allem jener zum Rosskarkogel ist erkennbar. Die 1974 errichtete Retentionssperre (Gotthalseder 2012) unterhalb der Reitalm wird von den beiden Abbildungen nicht abgedeckt, aber in Abbildung 2-5 gezeigt.

### **3.6 Glaziale Überprägung und Gletscher-Rückgang**

Wie auch van Husen (1987) beschreibt, füllten am Maximum der Vergletscherung in der letzten großen Eiszeit mächtige Eisströme die Täler der Ostalpen. Dies führte dazu, dass nur noch hohe Bergspitzen und Plateaus aus diesem Eisstromnetz ragten. Diese waren aber wiederum selbst oftmals von Eispanzern bedeckt (van Husen 1987). Rezent kommen derartige Eisstromnetze nur in Polargebieten, wie Alaska und Spitzbergen, vor. In pleistozänen Kaltzeiten bedeckte dieser Gletscher-Typ jedoch auch die Alpen (Hagg 2020). Das hohe Eisniveau ergab sich aus zunächst geringmächtigeren Gletschern, die wie Bäche aus Quelltrichtern zusammenflossen und so neben durch Engstellen bedingten Staus zu dieser ausgeprägten Hebung der Eisoberfläche führten. Das war insbesondere in den großen Längstälern, wie jenem der Salzach, in die auch die Großarler Ache mündet, der Fall (van Husen 1987). Nicht zuletzt durch diese Bewegung der Eismassen kam es zu Beanspruchung des Untergrundes. Dabei erbringt das Eis selbst eine untergeordnete Erosionsleistung im Fels. Eine Ausnahme hierfür bildet das Herausreißen einzelner Kluftkörper durch das Gefrieren des Wasserfilms im Druckschatten von Hindernissen. Die für diese Zeit beobachtete gewaltige Erosionsleistung konnte somit nur durch aus dem Untergrund aufgenommene und an der Sohle mitgeschleppte Gesteinsfragmente und einem durch mächtige Überlagerung bedingten Druck auf den Untergrund erreicht werden. Da die Erosionsleistung im Bereich der Haupttäler jene im Bereich der Nebentäler übersteigt, kommt es zur Bildung von Hängetälern. Diese werden durch einen höher liegenden Talboden der Nebentäler gegenüber den Haupttälern definiert. Das führt zu Steilstufen im Mündungsbereich und in weiterer Folge zu einer rückschreitenden Erosion (van Husen 1987). Auch das Rauriser Tal, das Gasteiner Tal und das Großarltal sind unter den nördlichen Tauerntäler durch hohe Mündungsstufen und ausgeprägte Klambildung an ihren Mündungen ins Salzachtal gekennzeichnet. Die Stufen und Klammern liegen dabei nach Pippan (1954) im Bereich der Klammkalkzone. Diese gehört der Radstädter-Decke an und hat so ihre Bezeichnung erhalten. Die Liechtensteinklamm bildet südlich von St. Johann im Pongau die Mündung der Großarler Ache in die Salzach (Pippan 1954). Zur Erklärung der eigentlichen Entstehung dieser

letzten großen Eiszeit wird von van Husen (1987) der Milankovitch-Zyklus herangezogen. Dieser besagt, dass die einzelnen Erdbahnelemente für die unterschiedliche regionale Verteilung der einstrahlenden Sonnenenergie verantwortlich sind. Bei diesen Erdbahnelementen handelt es sich um Perihel, Ekliptik und Exzentrizität. Sie sind, abhängig von den geographischen Breiten, unterschiedlich wirksam und überlagern sich durch ihre voneinander abweichende Periodizität. So sorgt eine geringere Sommereinstrahlung im Gebiet der großen Kontinent-Massen der nördlichen Hemisphäre für einen verspäteten und verminderten Abbau der Schneedecke in den hohen Breiten. Das wiederum verursacht durch eine verstärkte Rückstrahlung weitere Abkühlung und erleichtert die weitere Eisbildung. Das größer bleibende Wärmepotential des langsamer abkühlenden Ozeans dient dabei weiter als Feuchtigkeitsspender. Dadurch kommt es zu einer sehr ausgeprägten Schneeakkumulation, da auch Tiefdruckgebiete der Grenze von wärmeren zu kälteren Luftmassen folgen. Werden diese Einstrahlungsverhältnisse jedoch durch den Milankovitch-Zyklus wieder umgekehrt, führt dies zu einem stärker ausfallenden Abbau der entstandenen Schnee- und Eismassen an Land und zu einer stark erhöhten Zufuhr von Schmelzwasser in den Ozean. Dadurch kann sich das eingebrachte, leichtere Süßwasser an der Oberfläche ausbreiten und somit eine frühere Bildung von Eis bewirken als das Salzwasser selbst (van Husen 1987). Durch die geringere winterliche Sonneneinstrahlung bleiben große Areale der Ozeane lange gefroren und können dadurch nicht länger als Feuchtigkeitsspender der höheren Breiten fungieren. Auch die Entstehung der großen Eisschilde um den Nordatlantik wird so erklärt. Dort wurden die Untersuchungen zur Erkennung dieses Mechanismus durchgeführt (van Husen 1987). Die glazial überprägten Talquerschnitte sind oftmals durch hohe, steile Flanken charakterisiert. Viele davon befanden sich nach dem Abschmelzen der Gletscher in einem labilen Gleichgewicht, da die Eis- und Schneemassen nicht nur Ursache der Übersteilung waren, sondern durch ihre Gegenlagerung auch als Stütze dienten (van Husen 1987). So traten bald nach dem Verlust dieses Wiederlagers rasch ablaufende Arten von Massenbewegungen durch das Ablösen von Gesteinsmassen auf. Dieses Versagen fand oft entlang von Klüften und Schichtflächen statt. Die gelösten Gesteinsmassen stürzten oder rutschten entlang einer Gleitbahn ab (van Husen 1987). Im Gegensatz hierzu stehen die langsameren, kriechenden Bewegungen dünnschichtiger, blättriger Gesteine, wie Tonschiefern, Phylliten und Glimmerschiefern. Durch die Aufteilung der vielen einzelnen, kleineren Bewegungen über die einzelnen Schichtflächen kam es zu großräumigen Deformationen der Hänge mit oftmals vorgewölbtem Fuß und Hohlformen mit offenen Spalten im oberen Bereich. Diese Art der Massenbewegung setzte ebenfalls bald nach dem Rückgang der Gletscher ein, dauerte in vielen Fällen aber noch an (van Husen 1987). Das spätere und postglaziale Absinken der Schneegrenze bis



zum heutigen Stand erfolgte nicht konstant, sondern war den klimatischen Schwankungen unterworfen. Diesen Schwankungen unterlagen auch die Stadien der Haltepunkte und kurzfristigen Vorrückungsphasen der Gletscher (Exner 1957). Eine Einteilung erfolgt in das Schliern-Stadium mit einer etwa 800 bis 900 Meter unterhalb der heutigen liegenden Schneegrenze, dem Gschnitzer-Stadium mit einem Senkungsbetrag von etwa 600 Metern unter die heutige Schneegrenze und dem Daun-Stadium mit einem Senkungsbetrag von etwa 300 bis 400 Metern. Anschließend folgte die postglaziale Wärmezeit. Diese war durch eine 300 Meter über der heutigen liegenden Schneegrenze gekennzeichnet und dauerte etwa von 8000 bis 2000 v. Chr. an. Nach einer erneuten kälteren Phase bis ins Mittelalter war es im Spätmittelalter eher warm, gefolgt von einem erneuten Gletschervorstoß im 16. Jahrhundert. Dabei handelt es sich um das Fernau-Stadium. Seither gingen die Gletscher, neben episodenhaften Vorstößen, zurück (Exner 1957). Über der dem Reitalmtal benachbarten Hub-Grundalm lag die Gletscheroberfläche im Hochglazial bei rund 1800 Metern Seehöhe. Im Gebiet von Hüttschlag und Großarl lag diese bei mindestens 1600 Metern Meereshöhe. Diese hocheiszeitliche Gletscherhöhe lässt sich hier im Gegensatz zu beispielsweise jener im Rauristal besser bestimmen, da dort das Granitgneis-Gebiet im Einzugsbereich des Hüttwinkls flächenmäßig zu begrenzt ist, um, wie im Gasteiner Tal und im Großartal eine regelmäßige und dichte Überstreung der Schieferhülle durch Granitgneis-Findlinge zu ermöglichen. Eine große Anzahl dieser Granitgneis-Findlinge mit einem Durchmesser von bis zu 2 Metern befindet sich nordöstlich des Spielkogels im Großartal in 1960 Metern Meereshöhe. Vorgefundene Gletscherschrammen auf geschliffenen Rundbuckeln südöstlich des Seebauers im Großartal streichen mit 22° in nordwestlicher Richtung. Das entspricht dem dortigen Talverlauf (Exner 1957). Im Bereich der Hirschgrubenalm im hinteren Großartal befinden sich die höchstgelegenen erratischen Gneisblöcke auf rund 1500 Metern Meereshöhe, auf der Rackelalm auf 1540 Metern und im Kar oberhalb der Vorderkaseralm im Hubalmtal auf rund 1800 Metern Meereshöhe. Nördlich der Hühnerkaralm im Hubalmtal wurden erratische Gneis-Findlinge auf 1600 Metern, an der nordöstlichen Flanke des Karlkogels südöstlich von Hüttschlag auf 1360 Metern und zwischen Hinterfeld und Schappachalm Granitgneisblöcke mit 2-5 Metern Durchmesser auf 1400 Metern Meereshöhe gefunden. Der wasserscheidende Kamm zum Kleinarltal und zum oberen Elmautal wurde vom Großarler Gletscher nicht überflossen (Exner 1957). Exner (1957) ordnet die Endmoräne im Bereich des Heidentempels in seinen Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein dem Daun-Stadium zu.

### 3.7 Klimatische Entwicklung

Wie ebenso in vielen anderen Bereichen wirkt sich der Klimawandel über Temperatur und Niederschlag direkt auf die Situation und Stabilität von Hängen und Massenbewegungen aus. Hierzu soll jedoch erwähnt sein, dass die unterschiedlichen Bewegungstypen auf individuelle Weise reagieren. Dazu zählt beispielsweise das vermehrte Auftreten spontaner Rutschungen und Muren durch intensivere oder länger anhaltende Niederschläge, aber auch verminderte Aktivität bei kriechenden Hängen aufgrund längerer Trockenperioden und verringerter Schneeschmelze. (Glade 2014)

Um verschiedenen Anpassungsmöglichkeiten eine möglichst zuverlässige Informationsgrundlage zur Verfügung zu stellen, haben das „Ministerium für ein Lebenswertes Österreich“ und die neun österreichischen Bundesländer ein Projekt mit dem Namen „Klimaszenarien für Österreich“ (ÖKS15) in Auftrag gegeben. In einem gemeinsamen Projekt der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (damalige ZAMG, heutige Geosphere Austria), dem Wegener Center für Klima und globalen Wandel (WEGC) und dem interfakultären Fachbereich Geoinformation der Universität Salzburg (Z\_GIS) wurden im Rahmen dieses Auftrages Klimaszenarien für Österreich und seine einzelnen Bundesländer ausgearbeitet (ÖKS15). Ziel der Analyse war es eine hochwertige, belastbare, aber auch anwendungsorientierte Grundlage zu schaffen. So soll ein effizienterer Umgang mit den Herausforderungen des Klimawandels ermöglicht werden (ÖKS15 2016b). Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Kenntnisse aus dem Endbericht zum Bundesland Salzburg herangezogen werden, um die zukünftige Entwicklung besser in die Interpretation der Entwicklung ausgewerteter meteorologischer Daten implementieren zu können.

#### 3.7.1 Temperatur

Abbildung 3-7 und Tabelle 3-1 zeigen die vergangene und simulierte Entwicklung der mittleren Lufttemperatur für das Bundesland Salzburg.

Tabelle 3-1 : Beobachtete Werte und simulierte Änderung der mittleren Lufttemperatur in °C für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a)

1971-2000			2021-2050				2071-2100			
Jahreswerte			RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)		RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)	
bis	4,8		+1,9		+2,1		+3,7		+5,8	
Mittel	4,6		+1,3		+1,4		+2,3		+4,1	
von	4,4		+0,9		+1,0		+1,8		+3,4	
	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
bis	-2,9	12,8	+1,8	+2,3	+2,2	+2,5	+3,3	+3,9	+5,4	+6,9
Mittel	-3,3	12,5	+1,5	+1,4	+1,5	+1,6	+2,2	+2,4	+4,4	+4,6
von	-3,7	12,2	+0,8	+1,1	+0,8	+1,1	+1,8	+1,8	+3,4	+3,4

Winter: Dezember - Jänner - Februar / Sommer: Juni - Juli - August

Dabei ist für das Bundesland Salzburg im Zeitraum von 2021 bis 2050 eine durchschnittliche Temperaturzunahme zum Temperaturmittel von 1971 bis 2000 von 1,4°C vermerkt. Für den Zeitraum von 2071 bis 2100 wurde im Vergleich zur Durchschnittstemperatur im Zeitraum von 1971 bis 2000 eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von 4,1°C ermittelt. (ÖKS15 2016a)

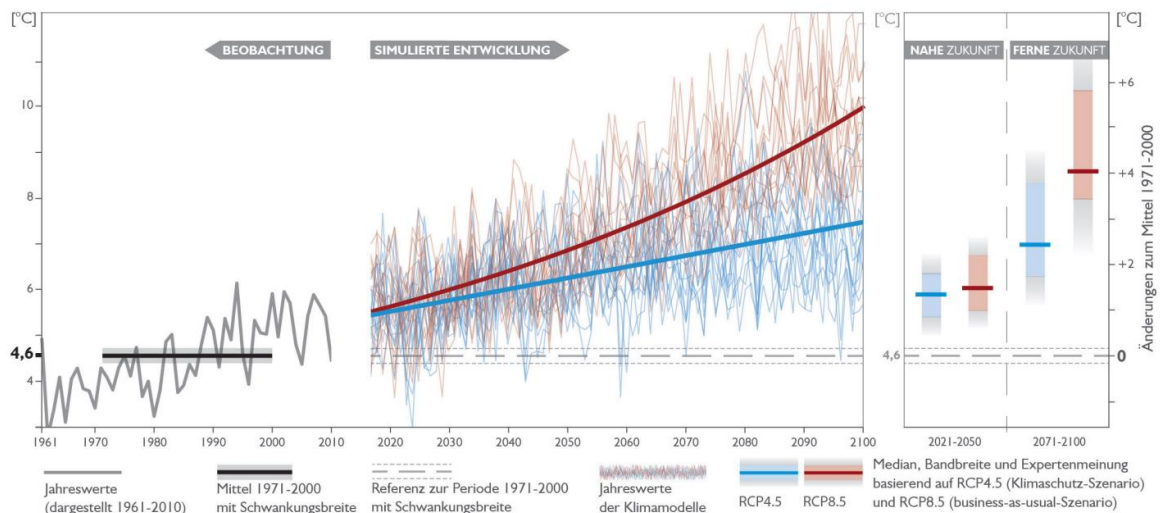


Abbildung 3-7 : Vergangene und simulierte Entwicklung der mittleren Lufttemperatur für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016)

### 3.7.2 Niederschlag

Abbildung 3-8 und Tabelle 3-2 zeigen die vergangene und simulierte Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen für das Bundesland Salzburg.

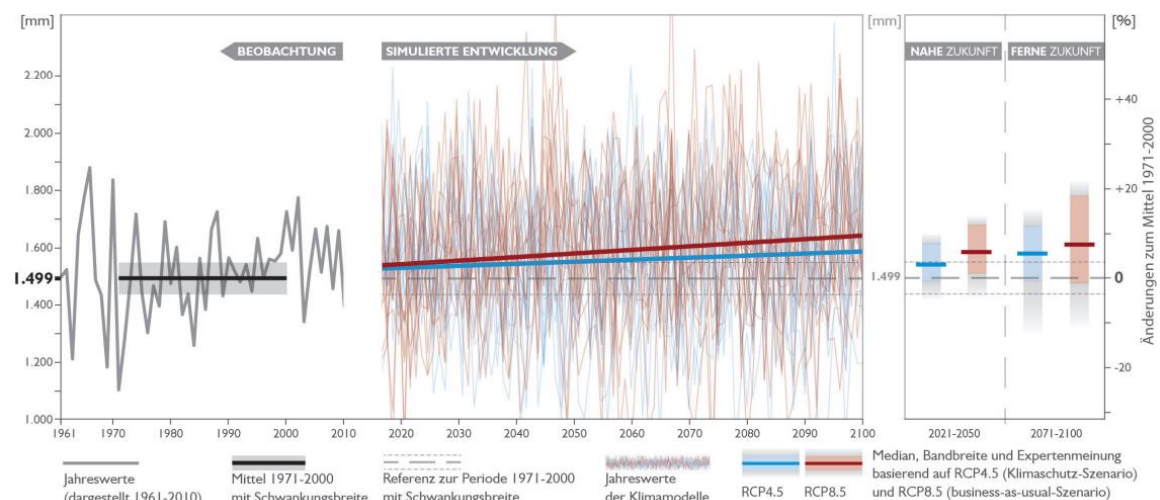


Abbildung 3-8 : Vergangene und simulierte Entwicklung des mittleren Niederschlages für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a)

In Tabelle 3-2 ist für das Bundesland Salzburg im Zeitraum von 2021 bis 2050 eine durchschnittliche Niederschlagszunahme zum Niederschlagsmittel von 1971 bis 2000 von 5,8% vermerkt. Für den Zeitraum von 2071 bis 2100 wurde im Vergleich zur durchschnittlichen Niederschlagssumme im Zeitraum von 1971 bis 2000 eine durchschnittliche Niederschlagszunahme von bis zu 7,5% ermittelt. (ÖKS15 2016a)

Tabelle 3-2 : Beobachtete Werte in Millimetern und simulierte Änderung der mittleren Niederschlagssummen in Prozent für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a)

1971-2000		2021-2050				2071-2100			
Jahreswerte		RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)		RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)	
bis	1.554	+7,9		+12,1		+11,9		+18,1	
<b>Mittel</b>	<b>1.499</b>	<b>+3,2</b>		<b>+5,8</b>		<b>+5,5</b>		<b>+7,5</b>	
von	1.444	-0,8		+2,0		-0,8		-1,1	
		Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
bis	308	582	+19,0	+8,3	+23,5	+12,9	+21,4	+16,0	+29,0
<b>Mittel</b>	<b>283</b>	<b>550</b>	<b>+10,7</b>	<b>-0,4</b>	<b>+14,1</b>	<b>+3,0</b>	<b>+7,9</b>	<b>+2,0</b>	<b>+16,6</b>
von	258	518	-3,5	-9,2	-4,4	-6,5	-11,1	-10,7	+0,7

Winter: Dezember - Jänner - Februar / Sommer: Juni - Juli - August

Abbildung 3-9 zeigt die räumliche Verteilung der Niederschlagsentwicklung für den Zeitraum von 2071 bis 2100. Die Abbildung zeigt für den Winter, aber auch für den Sommer eine Zunahme der Niederschlagssummen für das Gebiet um Hüttschlag. Zudem ist ersichtlich, dass sich das Gebiet hierdurch vom Bundesland-Mittel unterscheidet, das zwar eine Niederschlagszunahme im Winter, aber einen minimalen Rückgang der Niederschlagssummen im Sommer aufweist. (ÖKS15 2016a)

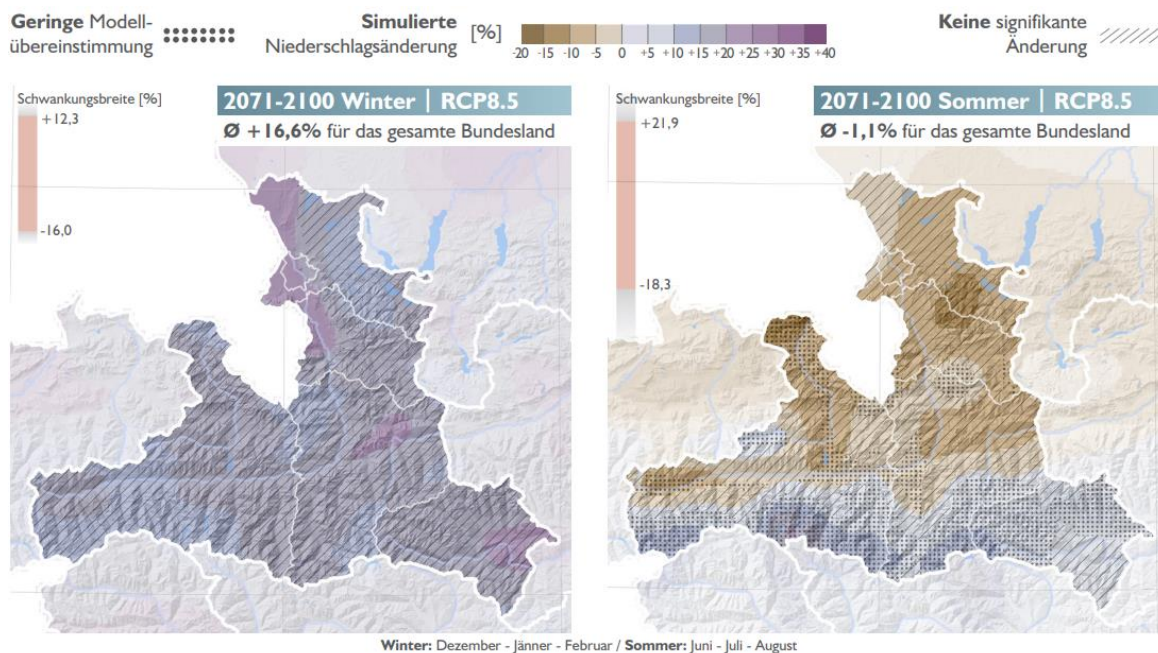


Abbildung 3-9 : Räumliche Verteilung der simulierten Niederschlagsänderung für das business-as-usual-Szenario für das Bundesland Salzburg. (ÖKS15 2016a)

## 4 Methodik

### 4.1 Erhaltene Daten

Nach Abbruch der von Tauber (2020) 2019 begonnenen Masterarbeit wurde sein Arbeitsstand gesammelt und dem Institut für Tunnelbau und Felsmechanik der Technischen Universität Graz übergeben, wie in Kapitel 1.2 beschrieben. Die zur Verfügung gestellten Daten wurden gesichtet und nach Möglichkeit ausgewertet, interpretiert und diskutiert. Dabei wurden brauchbare Datensätze um die noch fehlenden Jahre erweitert. Hierbei handelt es sich vor allem um Messreihen der drei in Kapitel 3.3 genannten hydrologischen und meteorologischen Messstationen. Diese wurden vervollständigt und ausgewertet. Da die Daten der seismischen Station nicht mit der angegebenen „HTTP-GET“ und „HTTP-POST“ im „miniSEED“-Format abgerufen werden konnten und auch nicht den erhaltenen Daten von Tauber (2020) beigefügt waren, wurde auf Erdbeben-Berichte der Geologischen Bundesanstalt zurückgegriffen.

### 4.2 Geologische Karte

Zur Anfertigung einer geologischen Karte des Untersuchungsgebietes wurde vom 18. bis zum 21. Juli 2023 in Zusammenarbeit mit Kaml (2024) im hinteren Reitalmgraben eine mehrtägige Begehung samt Kartierung durchgeführt. Dabei wurden auch Gespräche mit Einwohnern\*innen und Hüttenbesitzern\*innen geführt, um so neben möglichen allgemeinen Beobachtungen auch mangelnde Informationen vergangener Ereignisse möglichst zu kompensieren. Bei der Kartierung erfolgte eine Betrachtung der Lithologie und Strukturgeologie und das Einmessen entsprechender Orientierungen. Für die geologische Karte wurden die Erkenntnisse und Daten aus der Kartierung in der Open Source Software „QGIS“, Version 3.32.3 „Lima“ (QGIS Development Team 2023a) und in der Version 3.18.3 „Zürich“ (QGIS Development Team 2023b), verarbeitet. Als Grundlage hierzu diente das erstellte digitale Höhenmodell (DEM). Hierfür wurde ein vom Land Salzburg (SaGis 2021) zur Verfügung gestellter, 2021 aufgenommener, Laserscan herangezogen. Um vorhandene Lücken zu schließen, wurden die Erkenntnisse aus der Kartierung um jene aus den geologischen Karten von Exner (1956) und Kreuss (2021) erweitert.

## 4.3 Geologische Profilschnitte

Aus den Erkenntnissen der Kartierung vom Juli 2023 und den bereits verfügbaren geologischen Karten des Arbeitsgebietes wurden mehrere Profilschnitte angefertigt. Zum Erstellen der Oberflächenprofile wurden die Profillinien in die bereits angefertigte geologische Karte in der Open Source Software „QGIS“ (QGIS Development Team 2023b) eingetragen und anschließend als Oberflächenprofile ausgegeben. Diese wurden wiederum zur Anfertigung der Profilschnitte verwendet. Die einzelnen Profillinien wurden mit der jeweiligen nachfolgend begründeten Lage in die zuvor erstellte geologische Karte gelegt.

### 4.3.1 Profilschnitt Massenbewegung Rosskarkogel

Zur Veranschaulichung des Aufbaus der postglazialen Massenbewegung unterhalb des Rosskarkogels wurde eine Profillinie ausgehend vom Rosskarkogelsattel in nordwestliche Richtung zum Reitalmbach gelegt. Damit schneidet sie auch den Bereich der Reitalm in der vermuteten Bewegungsrichtung. Die entsprechende Profillinie mit der Bezeichnung „A-A“ wurde in der geologischen Karte vermerkt.

### 4.3.2 Profilschnitt Massenbewegung Hütteggalm

Eine weitere Profillinie mit der Bezeichnung „B-B“ wurde in der vermuteten Bewegungsrichtung durch den aktivierten Bereich der Hütteggalm gelegt. Durch diesen Schnitt vom Hang oberhalb der Alm zum unterhalb fließenden Reitalmbach soll der Aufbau des Untergrundes der Hütteggalm veranschaulicht werden. Diese Profillinie wurde ebenfalls in die zuvor erstellte geologische Karte eingetragen.

### 4.3.3 Profilschnitt Massenbewegung Rosskarkogel-Hütteggalm

Um auch den Zusammenhang beziehungsweise das Zusammenwirken beider Aktivierungen eingehender betrachten zu können, wurde eine dritte Profillinie in die geologische Karte gelegt. Diese Profillinie mit der Bezeichnung „C-C“ beginnt am Rosskarkogelsattel im Ablösebereich der postglazialen Massenbewegung und schneidet in nordwestlicher Richtung durch die Hütteggalm hin zur dem Rosskarkogel gegenüberliegenden Talflanke.



## 4.4 Seismik

Um den Einfluss der Seismik im Bereich des Reitalmtaler Talschlusses näher zu betrachten, sollten die Daten der vier seismischen Messstationen der näheren und weiteren Umgebung von Hüttschlag ausgewertet werden. Da diese jedoch über die von EIDA (2023) beschriebene „HTTP-GET“ und „HTTP-POST“ Methode nicht zugänglich waren, wurde hierzu eine bereits ausgewertete Liste seismischer Aktivitäten der letzten Jahre in Österreich der ZAMG (2020) (heutige Geosphere Austria) herangezogen.

## 4.5 Hydrologie und Meteorologie

Um eine Idee der hydrogeologischen Situation im hinteren Reitalmtal zu gewährleisten, wurden die im Rahmen der Literatur- und Datenrecherche erhaltenen, verfügbaren Datensätze ausgewertet. Hierzu wurden die Daten der drei in Abbildung 4-1 gezeigten Stationen herangezogen.



Abbildung 4-1 : Hydrologische und meteorologische Messtellen in der Umgebung von Hüttschlag. Dabei handelt es sich um eine Niederschlagsstation in Hüttschlag, eine Meteorologische Messstation in Bad Gastein und eine Pegelmessstation in Großarl. Die ebenfalls gezeigte Pegelmessstation der Gasteiner Ache wurde mangels Bedarfs nicht berücksichtigt. (eHyd 2024)

Nach einer Aktualisierung und Erweiterung der erhaltenen Daten um fehlende Zeiträume erfolgte eine Auswertung mithilfe der Microsoft Software „Microsoft EXCEL“ (Version 2016) (Microsoft Corporation 2016). Dazu wurden die Datensätze sortiert, zu betrachtende Zeiträume extrahiert und in entsprechenden Diagrammen dargestellt. Dadurch soll ein Überblick über den Zusammenhang der einzelnen Parameter ermöglicht

werden. Zusätzlich wurde die Entwicklung einzelner Parameter über längere Zeiträume visualisiert. Dies soll die Entwicklung beziehungsweise die Veränderungen der Situation vor Ort veranschaulichen. So sollen auch die Auswirkungen des Klimawandels in die Bewertung einfließen. Da die meteorologischen Daten in direktem Zusammenhang mit den hydrologischen Daten stehen, wurden diese in „Microsoft Excel“ (Version 2016) mit den hydrologischen Daten vereint. So kann ein holistischer Überblick der meteorologischen Umwelteinflüsse und der daraus resultierenden hydrologischen Reaktion gezeigt werden. Bei den hierzu ausgewerteten Datensätzen handelt es sich um jene der Messstationen in Großarl, Bad Gastein und Hüttschlag (eHyd 2024). Die Station in Hüttschlag deckt dabei den Niederschlag ab, während die Station in Bad Gastein für die Temperatur und die Station in Großarl für die Durchflussrate der Großarler Ache herangezogen wurden.

## 4.6 Standsicherheitsanalyse

Um die erhaltenen, recherchierten und erarbeiteten Erkenntnisse zu visualisieren, wurden die Programme „Slide2“ (Version 9.030) (RocScience 2023a) und „Slide3“ (Version 3.023) (RocScience 2023b) aus dem Rocscience-Katalog verwendet. Hierzu wurde für die Modellierung im „Slide3“ ein Oberflächenmodell des Gebietes aus der zuvor erstellten geologischen Karte im QGIS herangezogen und verarbeitet. Anschließend wurde dieses mittels des im „Slide3“ enthaltenen Borehole-Managers um die unterlagernde Deckengrenze und Grenze zwischen Fuscher-Phyllit und Brennkogel-Phyllit erweitert. Die Bohrlöcher wurden an mehreren Positionen der geologischen Karte aufgetragen und anschließend wurde die Tiefe der Deckengrenze an der jeweiligen Position, ähnlich der Erstellung der Profilschnitte, ermittelt. Die dadurch erhaltenen Schichten wurden anschließend mit auf Basis von Literatur- und Laborwerten angenommenen und angenäherten Gesteinskennwerten versehen, um erste Modelle, insbesondere der Reaktivierung der Hütteggalm, zu erhalten. Die Darstellungen im „Slide2“ stellen einen Schnitt durch die jeweilige Massenbewegung dar. Diese Profilschnitte wurden ebenfalls aus der zuvor erstellten geologischen Karte im Programm „QGIS“ als Oberflächenprofil-Linien exportiert. Anschließend wurden diese im „Slide2“ um die unterlagernden Einheiten erweitert. Die unterlagernden Einheiten entsprechen dabei jenen der zuvor angefertigten Profilschnitte. Die Modellierungen in „Slide2“ und „Slide3“ basieren auf dem Lamellenverfahren, genauer auf den Grenzgleichgewichtsmethoden nach Bishop und nach Janbu sowie nach Morgenstern-Price und Spencer. Bei diesen Verfahren wird eine Gleitscholle in einzelne vertikale Lamellen aufgeteilt. Dadurch wird versucht die Verteilung

der Normal- und Schubkräfte entlang der Gleitfuge über die zuvor genannten Verfahren näherungsweise zu bestimmen (Kolymbas 2007). In den Verfahren, basierend auf den Methoden nach Bishop und nach Janbu, werden die Lamellenschnittkräfte berücksichtigt (Lang et al. 2007). Bei der Methode nach Bishop wird dabei eine kreiszylindrische Gleitfläche betrachtet. Die Methode nach Janbu betrachtet dagegen eine gestreckte Gleitfläche. Bei Janbu ist die Bewegung demnach keine Starrkörperrotation, sondern eine translatorische Bewegung, bei der die Rotation vernachlässigbar ist. Deshalb eignet sich die Methode nach Janbu, im Gegensatz zu der nach Bishop, besonders für Gleitflächen, die durch Kreise nicht ausreichend beschrieben werden können. Insgesamt wird bei der Analyse eine Annäherung in mehreren Berechnungsgängen erzielt (Lang et al. 2007). Bei Morgenstern-Price und Spencer handelt es sich um die einzigen Verfahren, bei denen sowohl das Kräfte- als auch das Momenten-Gleichgewicht erfüllt ist (Egger 2012). Die aus den Laboruntersuchungen der Arbeit von Kaml (2024) erhaltenen Kennwerte wurden anschließend ebenfalls in die Modelle implementiert und ersetzen somit die zuvor nur angenommenen, angenäherten Werte. Als Ergebnis der Standsicherheitsanalyse erhält man den sogenannten „Factor of Safety“ (Sicherheitsfaktor, FS) gefährdeter Bereiche und Lagen. Dieser Faktor setzt sich aus dem Verhältnis treibenden Komponenten, wie Eigengewicht und Porenwasserdruck, zu rückhaltenden Komponenten, wie Reibungskraft und Kohäsion, zusammen. Treibende Komponenten wirken sich negativ und rückhaltende Komponenten positiv auf den Factor of Safety aus. Im Allgemeinen wird dieser nach Formel (1) berechnet. (Koos 2017)

$$FS(\eta) = \frac{\text{rückhaltende Kräfte}}{\text{treibende Kräfte}} \quad (1)$$

Der auf diese Weise über Formel (1) ermittelte FS stellt den globalen Factor of Safety dar. Befindet sich das System in einem Grenzzustand, hat der Factor of Safety einen Wert von 1. Das bedeutet, dass die Summe der treibenden Komponenten der Summe der rückhaltenden Komponenten entspricht. Ist die Summe der rückhaltenden Komponenten jedoch größer als die der treibenden Komponenten, ist der Wert des Factor of Safety größer als eins und das System wird unter den gegebenen Bedingungen als stabil betrachtet. (Genske 2021)

## 4.7 Laboruntersuchungen

Neben In-Situ-Versuchen mittels Taschen-Penetrometer und Taschen-Drehflügelsonde wurden im Rahmen der Arbeit von Kaml (2024) diverse Laboruntersuchungen

---

durchgeführt. Dazu zählen Glühverlust-Analysen, kleine Rahmenscherversuche sowie Röntgendiffraktometrie-Analysen inklusive Quantifizierung nach Rietveld. Diese Untersuchungen werden in seiner Arbeit detailliert beschrieben. Die Ergebnisse seiner Analysen wurden zum Teil in diese Arbeit integriert und angesprochen.



## 5 Ergebnisse und Auswertung

Die erhaltenen Datensätze und erlangten Erkenntnisse ermöglichten über die in Kapitel 4 beschriebenen Methoden die nachfolgend gelisteten Ergebnisse und Auswertungen.

### 5.1 Geologische Karte

Durch die Verarbeitung der Erkenntnisse aus der Kartierung des Arbeitsgebietes in Zusammenarbeit mit Kaml (2024) wurde die in Abbildung 5-1 ersichtliche und im Anhang hinterlegte geologische Karte des hinteren Reitalmtals angefertigt.

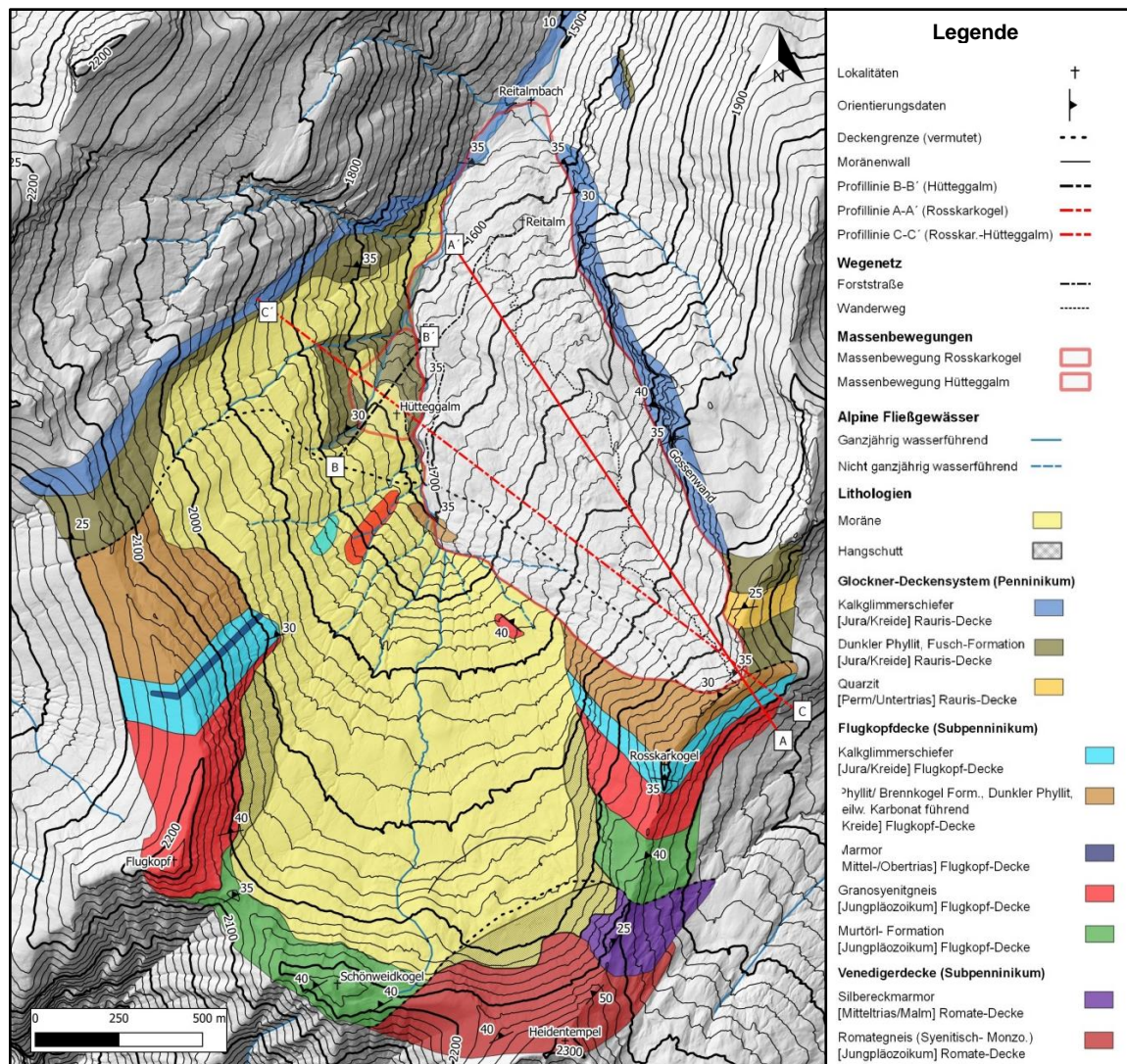


Abbildung 5-1 : Auf Basis der Kartierung mit Kaml (2024) und den erhaltenen geologischen Karten von Exner (1956) und Kreuss (2021) erstellte geologische Karte des hinteren Reitalmtals. Gezeigt wird die postglaziale Massenbewegung, der reaktivierte Bereich, die einzelnen Lithologien, entsprechende Orientierungen, Deckengrenzen und Fließgewässer. Zudem sind die Profilinien der drei erstellten geologischen Profilschnitte vermerkt.

In Abbildung 5-1 ist die bereits von Exner (1956) markierte, aus im Verband abgerutschten Phylliten bestehende postglaziale Massenbewegung ersichtlich. Der hier zusätzlich eingetragene reaktivierte Bereich um die Hütteggalm ist, einer ersten These nach, aus diesen im Verband abgerutschten Phylliten aufgebaut. Demnach führen die abgerutschten Phyllite in diesem Bereich auf und wurden abgelagert. Die beiden in Abbildung 5-1 eingetragenen Deckengrenzen, die hier die Grenze von der Romate-Decke zur Flugkopf-Decke und von der Flugkopf-Decke zur Rauris-Decke bilden, konnten unter anderem am Rosskarkogelsattel ausfindig gemacht, oder aber durch das Auffinden von Übergängen eingegrenzt werden. Diese Erkenntnisse decken sich auch mit den Verläufen der Deckengrenzen im Geofast-Kartenblatt (Kreuss 2021). Daher wurde diese Karte zur Vervollständigung unklarer Bereiche herangezogen. Einige der im Zuge der Kartierung gemessenen, repräsentativen Orientierungswerte der einzelnen Lithologien wurden ebenfalls vermerkt. Die eingetragenen Profillinien wurden herangezogen, um die in Kapitel 5.2 gezeigten und erläuterten Profilschnitte anzufertigen. Bei den vorgefundenen Lithologien handelt es sich um aufgeschlossene Einheiten der drei nachfolgend angeführten Decken. Diese Unterteilung stimmt auch mit den verfügbaren Karten des Gebietes von Exner (1956) und Kreuss (2021) überein. Zusätzlich waren im Bereich der Deckengrenze am Rosskarkogelsattel stark zerscherte Talkschiefer aufgeschlossen, die, aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit, in der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals in Abbildung 5-1 nicht ersichtlich sind. Durch die der geologischen Karte im „QGIS“ entnommenen Flächendaten und gemittelten Mächtigkeiten der Bewegungen in den Profilschnitten in Kapitel 5.2 konnten die Massenvolumen beider Rutschungen abgeschätzt werden. Für die postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel wurde so für eine Fläche von  $949.415 \text{ m}^2$  ein Massenvolumen von rund  $18.980.000 \text{ m}^3$  und für den reaktivierten Bereich der Hütteggalm für eine Fläche von fast  $52.000 \text{ m}^2$  ein Massenvolumen von rund  $400.000 \text{ m}^3$  ermittelt. Die Lithologien, die im Bereich der postglazialen Massenbewegung und der Reaktivierung aufgeschlossen sind und hier eine wesentliche Rolle spielen, sind Teil der Flugkopf-Decke und der Rauris-Decke. Die entsprechenden aufgeschlossenen Lithologien werden nachfolgend in den Kapiteln 5.1.2 und 5.1.3 behandelt.

### 5.1.1 Romate-Decke

Im Bereich der Romate-Decke waren im hinteren Reitalmtal Silbereckmarmor und Romate-Gneis aufgeschlossen. Diese Einheiten zeigen ein nordwestliches Einfallen. Dabei wurde für den Romate-Gneis ein Einfallswinkel von  $40^\circ$  bis  $50^\circ$  und für den Silbereck-Marmor ein Einfallswinkel von  $25^\circ$  gemessen.



### 5.1.2 Flugkopf-Decke

Die hier aufgeschlossenen Lithologien der Flugkopf-Decke umfassen die Murtörl-Formation, Granosyenitgneis, Marmor und Kalkglimmerschiefer und Phyllit der Brennkogel-Formation. Diese Lithologien weisen insgesamt ein nord-nordwestliches Einfallen mit einer Neigung von 30° bis 40° auf. Der Phyllit der Brennkogel-Formation erscheint in den vorgefundenen Aufschlüssen mit hellerer Färbung als jener der Fusch-Formation. Dieser Brennkogel-Phyllit befindet sich im Liegenden des in der Störungszone aufgeschlossenen Talkschiefers. Dieser bildet die Grenze zur überlagernden Rauris-Decke und den im Liegenden der Rauris-Decke befindlichen Phylliten der Fusch-Formation. Der Talkschiefer der Störungszone ist im Bereich der Deckengrenze in der Rosskarkogelscharte aufgeschlossen. Im Allgemeinen weist Talk einen Mohs'schen Härtegrad von 1 und eine Dichte von 2,7 bis 2,8 g/cm<sup>3</sup> auf. Der Bruch ist dabei uneben bis blättrig und die Kristallform ist monoklin (Hochleitner 2017). Der aufgeschlossene Talkschiefer weist eine nach der Basis vollkommene Spaltbarkeit und intensive Zerscherung auf. Die Färbung ist gräulich bis blassgrün und zeigt Perlmuttglanz. Der Aufschluss im Bereich der Rosskarkogelscharte wird in Abbildung 5-3 gezeigt. Hier ist auch die intensive Zerscherung erkennbar.

### 5.1.3 Rauris-Decke

Im kartierten hinteren Reitalmtal sind im Bereich der Rauris-Decke Kalkglimmerschiefer, Quarzit und dunkler Phyllit der Fusch-Formation aufgeschlossen. Der hier vorgefundene Phyllit der Fusch-Formation weist eine sehr dunkle Färbung auf. Dieser Fusch-Phyllit wurde daher unter anderem von Exner (1957) als Schwarzphyllit bezeichnet. Vor allem im Bereich der Hüttegalm weist der aufgeschlossene Phyllit ausgeprägte Zerlegung und Verwitterung auf. Zusätzlich lassen sich ausgeprägte Quarzlagen erkennen. Neben der hohen Sättigung und der Schmierbarkeit mit seidigem Glanz, die im Rahmen der Kartierung beobachtet werden konnte, färbt das Gestein auch auf Papier stark ab. Das spricht für einen erhöhten Graphitgehalt dieser Fusch-Phyllite. Als weitere Bestandteile lassen sich Glimmer und Feldspat, manchmal aber auch Chlorit erkennen. Bei Beträufelung mit dreiprozentiger Salzsäure braust das Gestein in manchen Bereichen leicht, zeigt somit aber auch den bereits von Exner (1957) beschriebenen örtlich auftretenden Karbonatgehalt. Für den Bereich der Hüttegalm und der gesamten postglazialen Massenbewegung konnte für den Fusch-Phyllit, entgegen den kompakteren Aufschlüssen entlang des Kamms, ein ausgeprägter Zerlegungsgrad beobachtet werden. Der den Fusch-Phyllit unterlagernde Brennkogel-Phyllit ist hier durch eine Störung abgegrenzt und ist nach Exner (1957) Teil der mittleren

Schwarzphyllit-Zone. Wie auch bei Kreuss (2021) wird der Phyllit der Brennkogel-Formation in Abbildung 5-1 der Flugkopf-Decke zugeordnet. Im Zuge der Kartierung konnte für den Brennkogel-Phyllit eine Zusammensetzung aus Glimmer, Quarz und in Teilen auch Karbonat festgestellt werden. Eingelagerte Quarzbänder fallen hier jedoch meist geringmächtiger aus als bei den Fuscher-Phylliten. Auch der im Graben oberhalb der Hütteggalm aufgeschlossene Phyllit der Brennkogel-Formation erscheint heller als jener der Fusch-Formation im Bereich der Hütteggalm. Ein möglicher erhöhter Graphitgehalt, entsprechend jenem der dunkleren Fuscher-Phyllite, wurde nicht beobachtet.

## 5.2 Geologische Profilschnitte

### 5.2.1 Profilschnitt A-A' (postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel)

Bei Profil A-A' handelt es sich um einen Schnitt vom Rosskarkogelsattel zum Reitalmbach unterhalb der Reitalm. Diese in Abbildung 5-1 eingetragene Profillinie wurde herangezogen, um den geologischen Untergrund der postglazialen Massenbewegung darzustellen und so eine erste Interpretation möglicher Versagensursachen zu ermöglichen, aber auch um die Grundlage einer nachfolgenden Modellierung im „Slide2“ zu schaffen. Der in Abbildung 5-2 gezeigte Profilschnitt zeigt die Rosskarkogelscharte im höchsten Bereich im nord-nordwestlichen Teil der Abbildung. Westlich der Rosskarkogelscharte liegt das Hubalmtal. Der süd-südöstliche Teil des Schnittes zeigt die Talflanke des Reitalmtes mit dem als Graben sichtbaren Reitalmbach im süd-südöstlichsten Teil der Abbildung. Unmittelbar darüber steht die heutige Reitalm. Zu erkennen sind in Abbildung 5-2 vom Liegenden ins Hangende die am tiefsten liegenden Romate-Gneise der Romate-Decke. Direkt über der entsprechenden Deckengrenze ist der Untergrund aus der Murtörl-Formation, dem Granosyenitgneis, Kalkglimmerschiefer und der Brennkogel-Formation der Flugkopf-Decke aufgebaut. Der Verlauf der Deckengrenze konnte im Zuge der Kartierung für den Bereich des Rosskarkogels und des Kamms definiert und oberhalb der Hütteggalm durch einzelne Aufschlüsse von Phylliten der Brennkogel- und der Fusch-Formation räumlich eingegrenzt werden. Der dazwischen liegende Verlauf wurde aus den geologischen Karten von Kreuss (2021) und Exner (1956) übernommen. Der Verlauf der Deckengrenze und der einzelnen lithologischen Einheiten wurde, aufgrund mangelnder Aufschlüsse entlang der in Abbildung 5-1 gezeigten Profillinie A-A', über die Winkelfunktionen herangerechnet beziehungsweise angenähert. Die Deckengrenze der Flugkopf-Decke ist durch eine sichtbare, im Bereich des Rosskarkogelsattels aufgeschlossene Störungszone gekennzeichnet. Der wiederum in

diesem Bereich aufgeschlossene, stark zerscherte Talkschiefer ist im Profilschnitt in Abbildung 5-2, aufgrund seiner geringen Mächtigkeit von weniger als einem Meter nicht ersichtlich, tritt aber ausschließlich im Bereich dieser oberen Deckengrenze zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke auf.

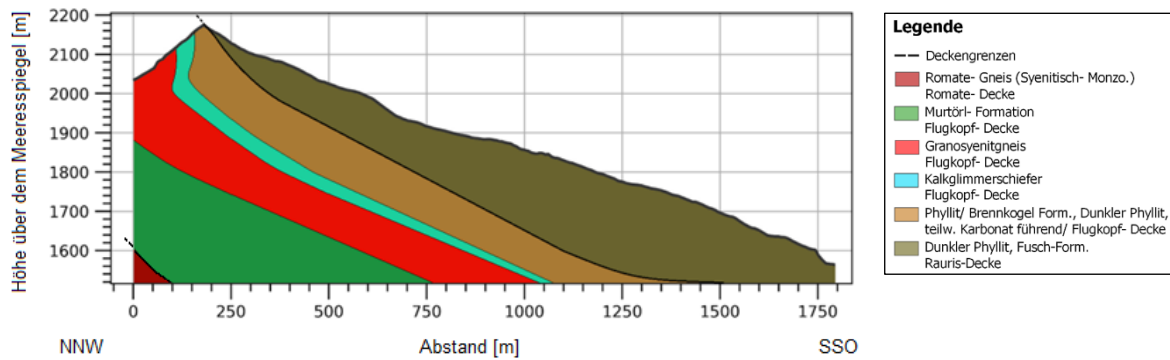


Abbildung 5-2 : Auf Basis der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals erstellter Profilschnitt A-A' vom Rosskarkogelsattel über die Reitalm zum Reitalmbach (durch die postglaziale Massenbewegung) samt Legende.

Abbildung 5-3 zeigt den im Bereich der Deckengrenze im Rosskarkogelsattel vorgefundenen stark zerscherten Talkschiefer. Über dieser Deckengrenze lagern die bereits von Exner (1956) so bezeichneten im Verband abgerutschten Phyllite der Fusch-Formation. Die Deckengrenze bildet entsprechend Exner (1957) auch die Grenze der Einteilung in die obere und die mittlere Schwarzphyllitzone.



Abbildung 5-3 : Aus stark zerschertem Talkschiefer aufgebaute Störungszone im Bereich der Deckengrenze am Rosskarkogelsattel.



### 5.2.2 Profilschnitt B-B' (reaktivierter Bereich der Hütteggalm)

Entsprechend der Profillinie in der geologischen Karte in Abbildung 5-1 zeigt der in Abbildung 5-4 dargestellte Profilschnitt B-B' einen Schnitt durch den reaktivierten Bereich der Hütteggalm.

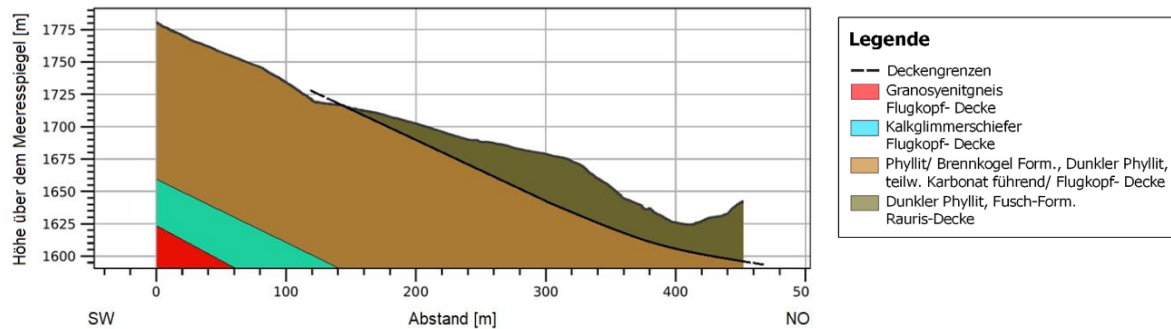


Abbildung 5-4 : Auf Basis der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals erstellter Profilschnitt B-B' durch den reaktivierten Bereich der Hütteggalm zum Reitalmgraben samt Legende.

Das Profil beginnt in der oberhalb der Alm liegenden Böschung im Südwesten und schneidet durch die Hütteggalm zum Reitalmgraben im Nordosten. Dieser Richtung entspricht auch die von Kaml (2024) ermittelte Bewegungsrichtung der Reaktivierung. Zu erkennen sind die helleren Phyllite der Brennkogel-Formation und die durch die Deckengrenze zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke begrenzten, überlagernden dunklen Phyllite der Fusch-Formation. Die Deckengrenze konnte in diesem Bereich durch einen entsprechenden Übergang im Rahmen der Kartierung räumlich eingegrenzt, jedoch nicht genau bestimmt werden. Im Bereich des Phyllits der Fusch-Formation im mittleren, etwas verebneten Teil in Abbildung 5-4 stehen die Gebäude der Hütteggalm.



Abbildung 5-5 : Dunkler Phyllit der Fusch-Formation in der Böschung im Reitalmgraben unterhalb der Hütteggalm.

Der nordöstlichste Teil der Abbildung zeigt die vom Reitalmbach erodierte Böschung

unterhalb der Hüttegalm. Die eingetragene Deckengrenze verläuft in der Böschung oberhalb der Hüttegalm und taucht unter die Alm und anschließend unter den Reitalmgraben ab. Der in der Böschung unterhalb der Hüttegalm im Reitalmgraben aufgeschlossene dunkle Phyllit der Fusch-Formation wird in Abbildung 5-5 gezeigt.

### 5.2.3 Profilschnitt C-C' (Rosskarkogelsattel-Hüttegalm)

Der in Abbildung 5-6 gezeigte Profilschnitt vom Rosskarkogelsattel hin zur Hüttegalm und der dem Sattel gegenüberliegenden Talflanke wurde angefertigt, um den Zusammenhang beziehungsweise das Zusammenspiel der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel und des reaktivierten Bereiches der Hüttegalm näher zu betrachten. Im südöstlichsten Teil des in Abbildung 5-6 gezeigten Profilschnittes ist, wie auch in Abbildung 5-2, das Hubalmtal zu erkennen. Den höchsten Punkt bildet auch hier der Rosskarkogelsattel mit dem entsprechenden, hier nicht erkennbaren, aufgeschlossenen Talkschiefer im Bereich der oberen Deckengrenze. Der größere Graben mittig in Abbildung 5-6 zeigt den Reitalmgraben unterhalb der Hüttegalm.

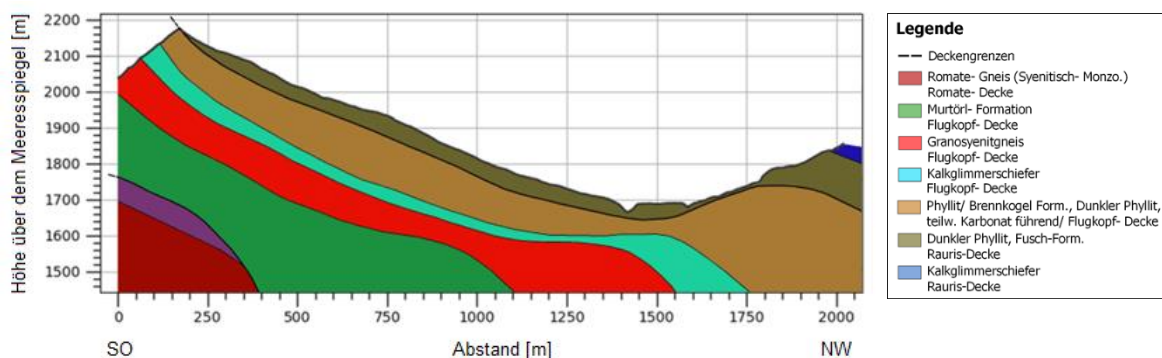


Abbildung 5-6 : Auf Basis der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals erstellter Profilschnitt C-C' vom Rosskarkogelsattel über die Hüttegalm zur gegenüberliegenden Talflanke durch die postglaziale Massenbewegung und den reaktivierten Bereich der Hüttegalm samt Legende.

Das Areal der Hüttegalm wird nordwestlich der Alm durch einen weiteren, kleineren Graben begrenzt. Dem Profil weiter folgend wird noch der weitere Anstieg der nordwestlichen Talflanke des Reitalmtals gezeigt. Zu erkennen ist eine auch dem Profil A-A' in Abbildung 5-2 entsprechende Lagerung. Zusätzlich sind in Abbildung 5-6 noch Silbereckmarmor der Romate-Decke aber auch Kalkglimmerschiefer der Rauris-Decke zu erkennen, die den dunklen Phyllit der Fusch-Formation unter anderem im Bereich der Gössenwand überlagern. Die obere Deckengrenze zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke verläuft nach ihrem Ausbiss im Bereich des Rosskarkogelsattels in nordwestlicher Richtung abfallend bis hin zum Reitalmgraben, steigt aber unmittelbar unterhalb der Hüttegalm wieder an. Das konnte auch durch das Auffinden des Übergangs von dunklen

Phylliten der Fusch-Formation im Bereich der Hüttegalm zu helleren Phylliten der Brennkogel-Formation in Aufschlüssen oberhalb der Alm nachvollzogen werden.

5.3 Strukturgeologie

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, befindet sich das Untersuchungsgebiet am nordöstlichen Rand des Tauernfensters. Dort konnten die bereits von Exner (1951) beschriebenen Spalten-Intrusionen ausfindig gemacht beziehungsweise beobachtet werden. Diese werden im Gebiet in jeweiliger Wechsellagerung durch die Flugkopf-Decke und die Romate-Decke repräsentiert. Die in der geologischen Karte des hinteren Reitalmtals in Abbildung 5-1 eingezeichneten Deckengrenzen wurden ebenfalls von Kreuss (2021) ins Geofast-Kartenblatt 155 eingetragen und von Exner (1957) beschrieben. Im Zuge der durchgeführten Kartierung konnte der Übergang an manchen Stellen, wie am Beispiel der Störungszone in der Rosskarkogelscharte, ausfindig gemacht werden. Die während der Kartierung eingemessenen Einfallswinkel und Einfallsrichtungen wurden von Kaml (2024) im Programm „Dips“ aus dem RocScience-Katalog ausgewertet. Dabei erfolgte eine Analyse der einzelnen Decken und ein Plot der gesamten Daten. Der gesamte beobachtete Deckenstapel weist demnach eine recht einheitliche Orientierung der Schieferungsflächen auf. Diese wird durch den Durchschnittswert in der Darstellung aller Werte in Abbildung 5-7 mit einem Wert von 343/31 repräsentiert. (Kaml 2024)

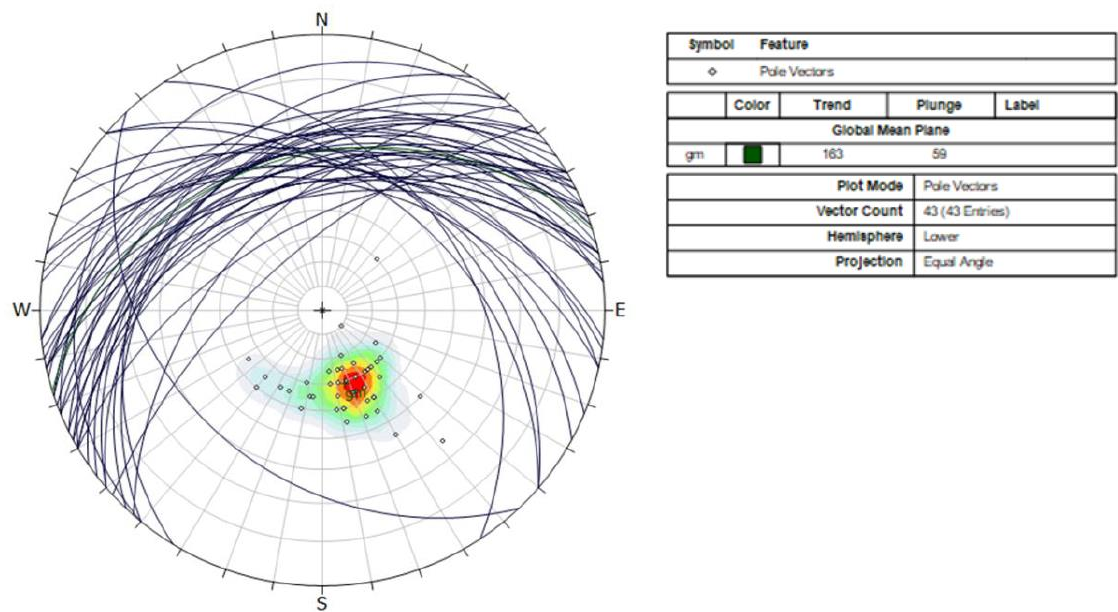


Abbildung 5-7 : Plot der gesamten im Rahmen der Kartierung im Gebiet erhobenen Orientierungswerte der Schieferungsflächen. (Kaml 2024)



Die in der Rosskarkogelscharte aufgeschlossene Störung im Bereich der Deckengrenze zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke ist durch ein stark geschertes Talkschiefervorkommen gekennzeichnet. Der Aufschluss wird in Abbildung 5-3 gezeigt. Die Fläche weist eine Orientierung von 320/35 auf. Die durch die Abscherung bedingte Ausrichtung der Schieferungsflächen lässt hier auf eine Abschiebung schließen. Harnischflächen und -lineare konnten aufgrund der starken Zerlegung und Verwitterung in diesem Bereich nicht ausfindig gemacht werden.

### 5.3.1 Postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel

Die Beobachtungen im Rahmen der Kartierung und der im Oktober 2023 durchgeführten Probenentnahme offenbarten in der Rosskarkogelscharte die bereits angesprochene Deckengrenze. Diese Grenze liegt zwischen den Fuscher-Phylliten der von Exner (1957) so bezeichneten oberen Schwarzphyllitzone und den Phylliten der Brennkogel-Formation, die Exner (1957) der mittleren Schwarzphyllitzone zuordnet. Die im Bereich der Deckengrenze aufgeschlossene Störungszone wird vom stark zerscherten Talkschiefer aufgebaut. Die durch diesen Bereich verlaufenden Profilschnitte A-A' und C-C' in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-6 zeigen den Verlauf der Deckengrenze beziehungsweise der Störungszone.

### 5.3.2 Reaktivierter Bereich der Hüttegalm

Im Bereich der Hüttegalm konnte im Rahmen der Kartierung, wie in Kapitel 4.3.2 angesprochen, ebenfalls ein Übergang von den helleren Phylliten der Brennkogel-Formation zu den überlagernden dunkleren Fuscher-Phylliten ausfindig gemacht werden. Dieser Übergang konnte beispielsweise durch zwei entsprechende Aufschlüsse im nordwestlich verlaufenden Graben oberhalb der Hüttegalm eingegrenzt werden. Der eingetragene genauere Verlauf der Deckengrenze wurde von Kreuss (2021) übernommen, da im Gebiet in diesem Bereich lediglich der besagte Übergang, aber keine Störungszone, wie jene der Rosskarkogelscharte, vorhanden war. Der Verlauf konnte daher nur räumlich eingegrenzt werden. Die die mittlere Schwarzphyllitzone überlagernden Fuscher-Phyllite zeigen eine ausgeprägte Zerlegung. Die Orientierungen der teilweise noch massigen Gesteinseinheiten des Fuscher-Phyllits in der Böschung unterhalb der Hüttegalm weichen stark von der Orientierung dieser Phyllite in der Rosskarkogelscharte, aber auch untereinander, ab. Diese Gesteinseinheiten des Fuscher-Phyllits sind in Abbildung 5-8 zu erkennen. Der im Rosskarkogelsattel vorgefundene Talkschiefer der Störungszone zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke

konnte im Bereich der Hüttegalm nicht aufgefunden werden.



Abbildung 5-8 : Kompakte Gesteinseinheiten des dunklen Phyllits der Fusch-Formation in der Böschung unterhalb der Hüttegalm mit abweichender Orientierung untereinander und zur Lagerung am Rosskarkogel.

## 5.4 Seismische Daten

Bei Tabelle 5-1 handelt es sich um eine Auflistung makroseismischer Beobachtungen.

Tabelle 5-1 : Auflistung makroseismischer Beobachtungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für den Zeitraum der Reaktivierung der Hüttegalm. (ZAMG 2020)

Nr.	Datum	Weltzeit	Localzeit	Breite	Länge	Tiefe	Epizentrum	Land	I <sub>0</sub>	M <sub>L</sub>	@
7	10. Apr	03:08	05:08	47,22	10,75	3	Karrösten bei Imst	TI	3	0,9	1
8	16. Apr	09:51	11:51	48,29	15,95	8	9 km SW von Tulln	NÖ	4-5	3,1	253
9	30. Apr	11:44	13:44	47,08	11,33	-	SO von Neustift im Stubaital	TI	3	2,2	4
10	13. Mai	20:37	22:37	47,30	10,66	-	6 km S von Namlos	TI	3-4	1,9	6
11	26. Mai	01:14	03:14	47,62	13,59	6	SW von Bad Goisern	OÖ	3-4	2,2	4
12	31. Mai	04:31	06:31	47,68	13,69	2	SO von Bad Ischl	OÖ	2-3	2,4	1
13	11. Juni	03:03	05:03	48,34	14,55	5	Pregarten	OÖ	3	1,7	3
14	14. Juni	12:34	14:34	47,75	16,11	12	Neunkirchen	NÖ	3	2,5	17
15	14. Juni	13:57	15:57	46,39	12,98	-	Tolmezzo	ITA	3*	4,1	4
16	15. Juni	04:12	06:12	46,41	12,98	-	Tolmezzo	ITA	2-3*	3,8	1
17	21. Juni	03:52	05:52	47,37	15,06	9	Leoben	ST	3-4	2,6	63
18	26. Juni	19:42	21:42	47,15	10,42	5	Flirsch	TI	4	2,3	17
19	28. Juni	11:17	13:17	47,50	11,14	-	Garmisch-Partenkirchen	DE	2,5*	3,0	1
20	8. Juli	10:41	12:41	47,43	15,06	8	Trofaiach	ST	3-4	2,6	41

Diese Beobachtungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für das Jahr 2019 (ZAMG 2020) (heutige Geosphere Austria) zeigen weder im gelisteten Zeitraum der

Reaktivierung noch außerhalb dieses Zeitraumes um die Reaktivierung der Hüttegalm entsprechende makroseismische Aktivität. Auch die in Abbildung 5-9 gezeigten Positionen der einzelnen aufgenommenen verspürten Beben für das gesamte Jahr 2019 zeigen im entsprechenden Zeitraum lediglich einen markanteren Datenpunkt südöstlich von Bad Ischl.

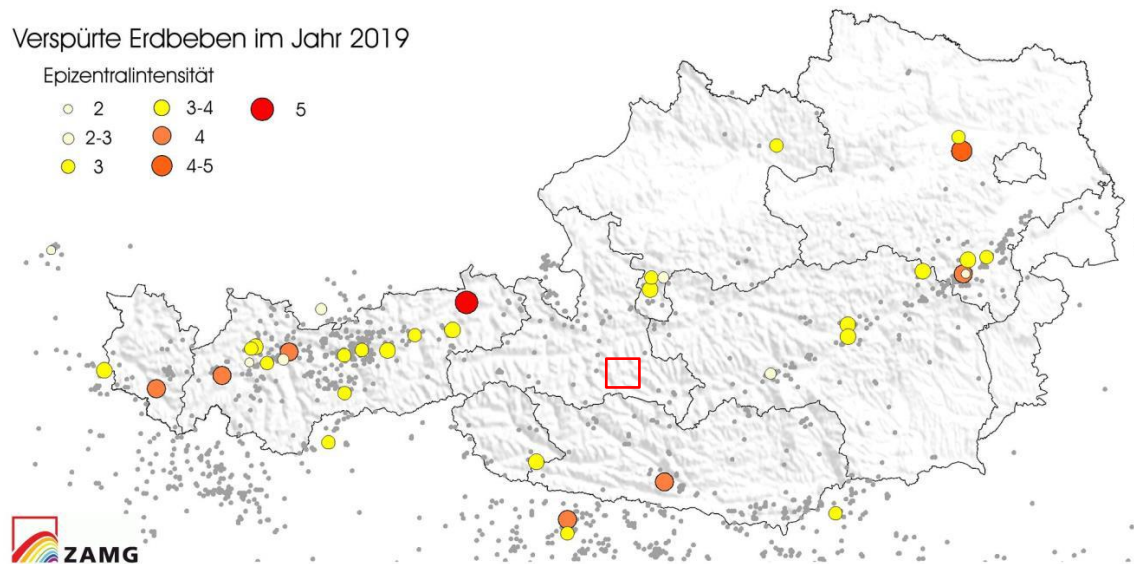


Abbildung 5-9 : Verspürte Erdbeben im Jahr 2019. Das Gebiet um Hüttschlag wurde rot umrahmt markiert. (ZAMG 2020)

Dabei handelt es sich um ein Erdbeben vom 31. Mai mit einer Magnitude von 2,4 nach Richter (ZAMG 2020). Schwächere Beben, die in ihrer Intensität von der Bevölkerung nicht verspürt, aber instrumentell registriert wurden, sind als graue Punkte in Abbildung 5-9 eingetragen. Hier lassen sich Epizentren in der weiteren Umgebung von Hüttschlag erkennen (ZAMG 2020)

## 5.5 Hydrologische und meteorologische Daten

Die Metadaten beziehungsweise Details zu den Messstationen der einzelnen verwendeten Datensätze zur Hydrologie und Meteorologie sind in Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 zusammengefasst gelistet. Dabei zeigt Tabelle 5-2 den Datensatz der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag. Dargestellt sind die Metadaten der Messstation und der verfügbare Zeitraum des Datensatzes. Tabelle 5-3 zeigt die Metadaten und das aufgenommene Zeitintervall der Pegelmessstation der Groöarler Ache in Groöarl. Tabelle 5-4 repräsentiert den Datensatz der meteorologischen Messstation in Bad Gastein. Sie umfasst ebenfalls die Metadaten und den Aufnahmezeitraum des Datensatzes.

Tabelle 5-2 : Metadaten und Zeitraum des verfügbaren Datensatzes der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag. (eHyd 2024)

Messstelle	Hüttschlag		
gültig seit:	Höhe [m ü.A.):		
01.01.1907	1010		
18.07.2004	1030		
01.07.2019	980		
Geographische Koordinaten (Referenzellipsoid: Bessel 1841):	Länge (Grad,Min,Sek):	Breite (Grad,Min,Sek):	
gültig seit:			
01.07.2019	13 14 46	47 10 18	
18.07.2004	13 13 53	47 10 38	
01.01.1907	13 13 56	47 10 33	
Exportzeitreihe:	Niederschlag,I,Sum,T,1,O,Z,0,,,	original N-Messer-Tagessummen	
Exportqualität:	MAXQUAL		
Exportzeitraum:	01.01.1971 07:00	bis	01.01.2021 07:00
Hinweis:	Messwert=0,001 - nicht messbarer Niederschlag		
Werteformat:	1 Nachkommastelle		
Einheit:	mm		
Der Intervallwert gilt bis zum nächsten Zeitpunkt mit einem Wert oder Lücke			
Werte:			
01.01.1971	0		
02.01.1971	0		
03.01.1971	0		
04.01.1971	0		
...	...		
29.12.2020	0,3		
30.12.2020	7,3		
31.12.2020	0		

Tabelle 5-3 : Metadaten und Zeitraum des verfügbaren Datensatzes der Pegelmessstation in Großarl. (eHyd 2024)

Messstelle:	Großarl
HZB-Nummer:	203224
HD-Nummer:	
DBMS-Nummer:	5001021
Gewässer:	Großarlbach
Sachgebiet:	OWF
Dienststelle:	HD-Salzburg
Messstellenbetreiber:	Hydrographischer Dienst
orogr.Einzugsgebiet [km²]:	144,6
Pegelnulldpunkt:	
gültig seit:	Höhe [m ü.A.):
01.01.1976	879,49
17.12.2009	879,57
Bundesmeldenetz(BMN)-Koordinaten:	
gültig seit:	Rechtswert y [m] - Hochwert x [m]:
01.01.1895	439690,00 - 233160,00
Exportzeitreihe:	(5001021,Abfluss,I,Mit,T,1,F,Z,50,,)
Einheit:	[m³/s]
Exportzeitraum:	[01.01.1951 00:00,01.01.2021 00:00]
Der Intervallwert gilt bis zum nächsten Zeitpunkt mit einem Wert oder Lücke	
Werte:	
01.01.1951	1,8
02.01.1951	1,8
03.01.1951	1,7
04.01.1951	1,7
05.01.1951	1,5
06.01.1951	1,4
...	...
29.12.2020	2,41
30.12.2020	2,35
31.12.2020	2,29

Tabelle 5-4 - Metadaten und Zeitraum des verfügbaren Datensatzes der meteorologischen Messstation in Bad Gastein. (eHyd 2024)

Messstelle	Bad Gastein					
Sachgebiet:	NLV					
Dienststelle:	HD-Salzburg					
Messstellenbetreiber:	Hydrographischer Dienst					
Höhe:						
gültig seit:	Höhe [m ü.A.]:					
01.01.1908	1120					
01.07.1998	1140					
Geographische Koordinaten (Referenzellipsoid: Bessel 1841):	Länge (Grad,Min,Sek):	Breite (Grad,Min,Sek):				
gültig seit:						
01.07.1998	13 06 57	47 05 14				
01.01.1908	13 06 56	47 05 24				
Exportzeitreihe:	Niederschlag,I,Sum,T,1,O,Z,0,,,	original N-Messer-Tagess.				
Exportqualität:	MAXQUAL					
Exportzeitraum:	26.01.1943 07:00	bis	01.01.2021 07:00			
Hinweis:	Messwert=0,001 - nicht messbarer Niederschlag					
Werteformat:	1 Nachkommastelle					
Substation:	15504					
Der Intervallwert gilt bis zum nächsten Zeitpunkt mit einem Wert oder Lücke						
Werte:						
Zeit [Tag]	Station	Niederschlag [mm]	Schnee [mm]	T [°C]	Tmax [°C]	Tmin [°C]
26.01.1943	7	0	15	-6,5	-4	-9
27.01.1943	7	7,3	15	-1,3	1,5	-4
28.01.1943	7	0	26	1	3	-1
...	...	...	...	...	...	...
28.06.2019	7	0	0	22,5	27,9	17,1
29.06.2019	7	0	0	20,4	29,9	10,9
30.06.2019	7	0	0	23,1	34	12,2

Die Ergebnisse der Auswertung der zusammengeführten Datensätze in „Microsoft-Excel“ (Version 2016) sind in Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-15 ersichtlich. Dabei werden in Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 die durchschnittlichen Tagestemperaturen der Messstation in Bad Gastein, im oberen Teil der Abbildungen, grün und rot dargestellt. Es handelt sich hierbei um die durchschnittlichen Tagestemperaturen im entsprechenden Jahr, gezeigt in Rot, und den Tagesschnitt der Vorjahre, gezeigt in Grün. Dadurch wird ein Vergleich der Tagestemperaturbedingungen mit jenen der Vorjahre ermöglicht. Die blau markierten Niederschlagswerte wurden von der Messstation in Hüttschlag aufgenommen. Für diese Station standen jedoch keine Temperaturwerte zur Verfügung. Die Durchflussrate der Großarler Ache, gemessen durch die Pegelstation in Großarl, befindet sich jeweils im untersten Bereich der Abbildungen und ist schwarz markiert. Für den jeweiligen Zeitraum wurde eine Betrachtung vom Herbst des Vorjahres bis zum Herbst des jeweiligen Jahres gewählt, um auch den entsprechenden Winter vollständig abzubilden.

### 5.5.1 Hydrologische und meteorologische Bedingungen zum Zeitpunkt der Reaktivierung der Hütteggalm

Die Betrachtung der hydrologischen und meteorologischen Bedingungen des



hydrologischen Jahres der Reaktivierung und speziell des Zeitraumes vor der Reaktivierung der Hütteggalm im Jahr 2019 erfolgt anhand der in Abbildung 5-10 ausgewerteten Daten der zuvor genannten Stationen.

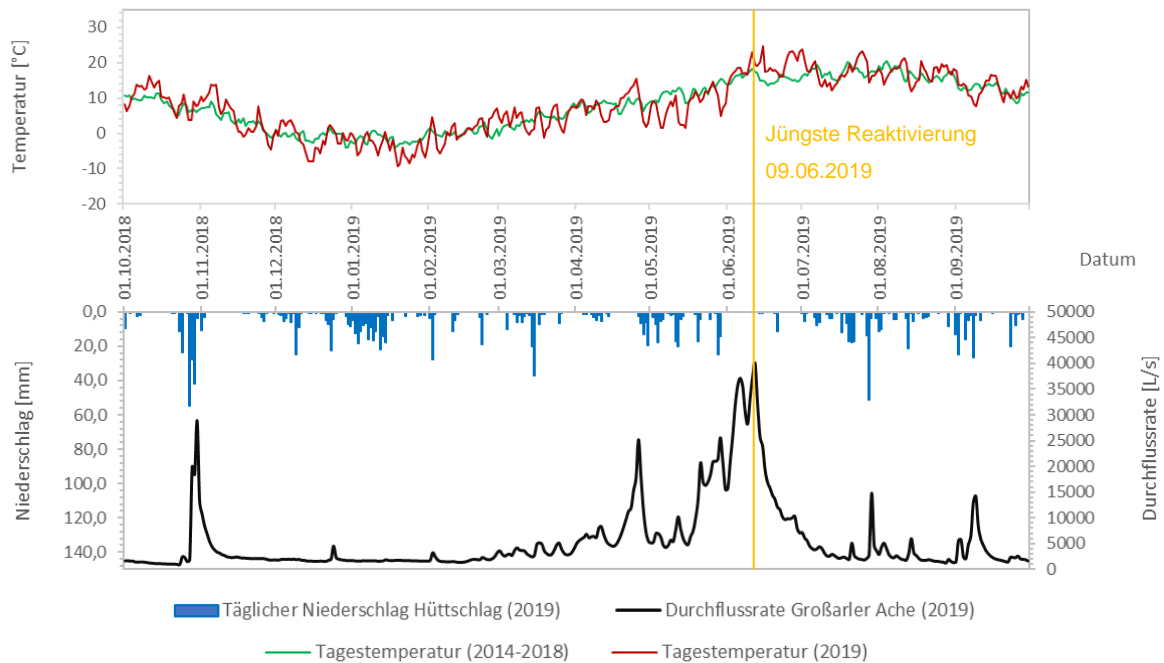


Abbildung 5-10 : Hydrologische und meteorologische Daten der eHyd (2024). Ausgewertet für das hydrologische Jahr 2019 mit entsprechender Legende.

Zu erkennen ist hier ausgeprägter Niederschlag im Spätherbst, der zu einem starken Anstieg der Durchflussrate der Großarler Ache führte. Anschließend werden von Dezember bis Jänner Temperaturen unter dem Vorjahresschnitt gezeigt. In Kombination mit der, trotz anhaltenden Niederschlags, nicht ansteigenden Durchflussrate der Großarler Ache, weist dies auf Schneefall hin. In diesem Zeitraum lassen sich nur zwei kleinere Anstiege der Durchflussrate in Kombination mit höheren Temperaturen erkennen. Diese deuten auf Niederschlag in Form von Regenfällen im jeweiligen Zeitraum Mitte Dezember und Anfang Februar hin. Darauf folgt, mit steigenden Temperaturen, der Beginn der Schneeschmelze. Dies äußert sich im Verlauf der Durchflussrate, kombiniert mit weiteren Niederschlägen, bis Ende April, zuerst allmählich, dann aber stark. Das nun vorliegende extreme Abfallen dieses Verlaufs und die weit unter dem Schnitt der Vorjahre liegenden Temperaturen weisen auf einen weiteren Wintereinbruch mit Schneefall bis Mitte Mai hin. In diesem Zeitraum hatte der Niederschlag kaum Auswirkungen auf die Durchflussrate der Großarler Ache. Auch der Ereignisbericht von Valentin (2019) und ein Artikel zum Felssturz in Karteis vom ORF Salzburg (2019b) weisen auf einen schneereichen Winter 2018/19 im Großarlal hin. Die Anfang Juni wieder über den Schnitt der Vorjahre ansteigenden Temperaturen, der in diesem Zeitraum ausbleibende Niederschlag und der



extreme Anstieg der Durchflussrate deuten auf eine sehr ausgeprägte Schneeschmelze in diesem Zeitraum hin. An der Spitze dieser Entwicklung am 9. Juni 2019 kam es schließlich zur Reaktivierung der Hütteggalm.

### 5.5.2 Hydrologische und meteorologische Bedingungen im Zeitraum der Reaktivierung der 1960er Jahre

Tauber (2020) spricht in seiner 2019 begonnenen Arbeit bereits von einer weiteren nicht genauer datierten Aktivierung der Hütteggalm im Zeitraum 1965/66. Gespräche mit der ortsansässigen Bevölkerung lassen auf eine Aktivierung im Jahr 1964 schließen. Die damalige Aktivierung führte zu Rissen im Fußboden der Hütteggalm. Die hydrologischen und meteorologischen Daten des entsprechenden hydrologischen Jahres 1964 sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

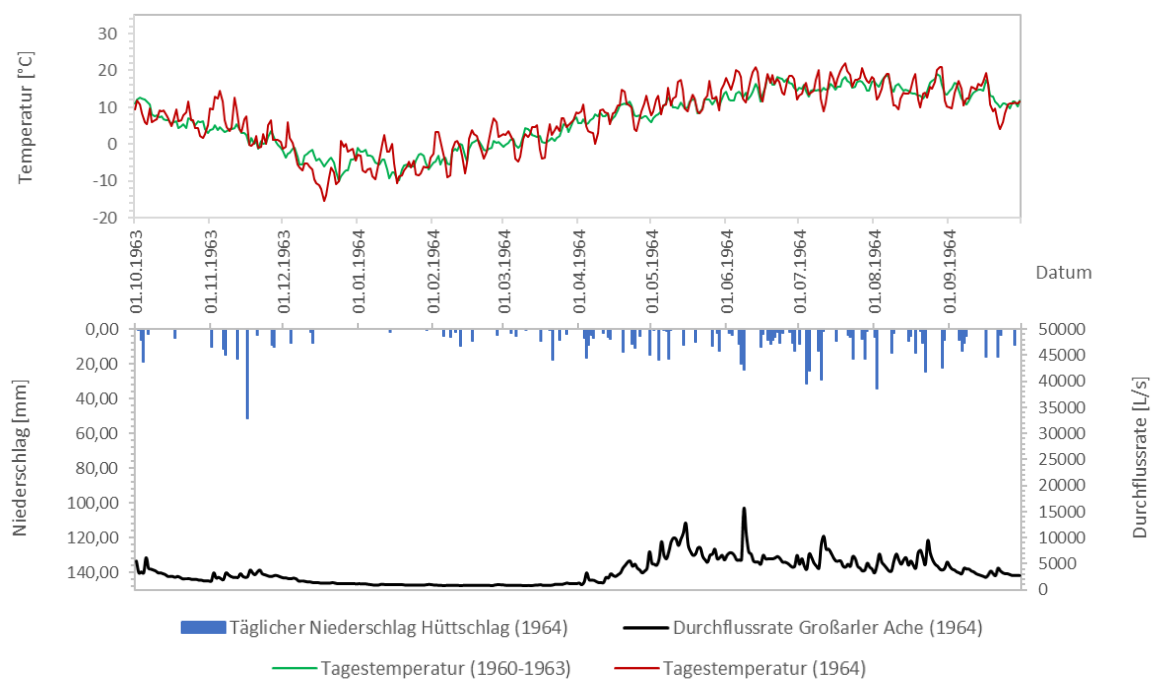


Abbildung 5-11 : Hydrologische und meteorologische Daten der eHyd (2024). Ausgewertet für das hydrologische Jahr 1964 mit entsprechender Legende.

Im Gegensatz zu Abbildung 5-10 des Jahres 2019 lassen sich hier kaum entsprechend ausgeprägte Ereignisse ausmachen. Auch die Niederschlagswerte und Durchflusswerte der Großarler Ache zeigen keinen Zeitraum, der auf eine konkrete Aktivierung schließen lassen würde. Die ausgewerteten Daten in Abbildung 5-11 weisen aufgrund relativ hoher Temperatur auf einige kleinere Niederschlagsereignisse im November hin, die zu einem kleineren Anstieg der Durchflussrate der Großarler Ache führten. Anschließend folgt ein niederschlagsarmer Winter mit relativ konstanter Durchflussrate. Die im April steigenden

Temperaturen, einsetzende Niederschläge und Schneeschmelze führten zum Anstieg der Durchflussrate bis in den Mai. Der weitere Verlauf zeigt eine Vielzahl von Niederschlagsereignissen. Diese führten jeweils zu einem Anstieg der Durchflussrate der Großarler Ache. Die Bedingungen entsprechen somit nicht jenen von 2019, weisen aber dennoch auf anhaltende Niederschlagsereignisse im Sommer 1964 hin. Zum weiteren Vergleich wurde ebenfalls das hydrologische Jahr 1965 in die Betrachtungsreihe mitaufgenommen und entsprechend in Abbildung 5-12 dargestellt.

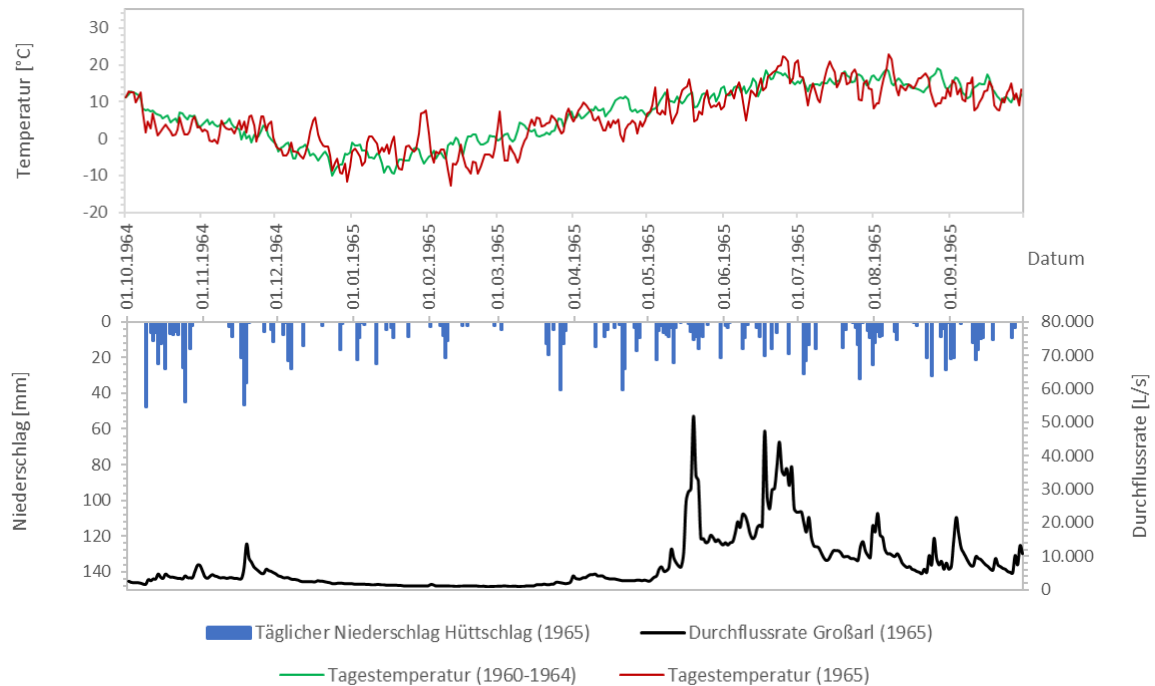


Abbildung 5-12 : Hydrologische und meteorologische Daten der eHyd (2024). Ausgewertet für das hydrologische Jahr 1965 mit entsprechender Legende.

Hier lassen sich dem Jahr 2019 sehr ähnliche Bedingungen erkennen. Das hydrologische Jahr 1965 zeigt ausgeprägte, anhaltende Niederschlagsereignisse im Oktober und im November. Diese hatten jeweils einen Anstieg der Durchflussrate der Großarler Ache zur Folge. Anschließend folgt ein in den Tagestemperaturen wechselhafter Winter mit einigen Schneefällen und relativ konstanter Durchflussrate. Wie auch im Jahr 2019 kam es dann, nach einem Anfang April einsetzenden Schneeschmelze, zu einem weiteren Wintereinbruch. Hier lassen sich ebenfalls Tagestemperaturen unter dem Schnitt der Vorjahre und anhaltender Niederschlag ohne größere Auswirkungen auf die Durchflussrate erkennen. Anfang Mai stiegen die Temperaturen dann wieder. Das führte zum erneuten Einsetzen der Schneeschmelze. Hinzu kommen in diesem Zeitraum einige Niederschlagsereignisse, die zusätzlich den starken Anstieg der Durchflussrate der Großarler Ache begünstigten. Diese überschritt hierbei auch den Höchstwert des Jahres

2019. Nach dem Absinken der Durchflussrate ab Mitte Mai führten weitere Niederschlagsereignisse zu einem erneuten starken Anstieg Ende Juni. Der weitere Verlauf ist von unterschiedlichen Niederschlagsereignissen und entsprechenden Durchflusswerten der Groöarler Ache geprägt.

### 5.5.3 Betrachtung der historischen Entwicklung der hydrologischen und meteorologischen Bedingungen

Um die Entwicklung einzelner Parameter über einen längeren Zeitraum zu veranschaulichen, wurden Abbildung 5-13 und Abbildung 5-15 in „Microsoft Excel“ (Version 2016) erstellt. Bei Abbildung 5-13 handelt es sich um eine Darstellung der täglichen Niederschlagsmengen vom 1. Januar 1971 bis zum 31. Dezember 2020. Abbildung 5-15 zeigt dagegen die durchschnittlichen Tagestemperaturen im Zeitraum vom 1. Januar 1971 bis zum 30. Juni 2019. Beide Abbildungen wurden zusätzlich mit einer Trendlinie versehen, um die Entwicklung über den jeweiligen Zeitraum vereinfacht zu zeigen. Die Trendlinie ist eine Möglichkeit zur Datenvisualisierung, die die allgemeine Richtung beziehungsweise Entwicklung einer Reihe von Datenpunkten darstellt. Durch diese Möglichkeit, Muster und Trends innerhalb der untersuchten Daten zu identifizieren, können auch Vorhersagen und Prognosen auf Grundlage der vorhandenen Daten vorgenommen werden (Excel Dashboards 2024).

#### 5.5.3.1 Niederschlag

Wie Abbildung 5-13 entnommen werden kann, zeigt sich ein relativ einheitliches Bild der einzelnen Jahreszeitenwechsel und der dadurch variierenden Niederschlagsmengen und -häufigkeiten.

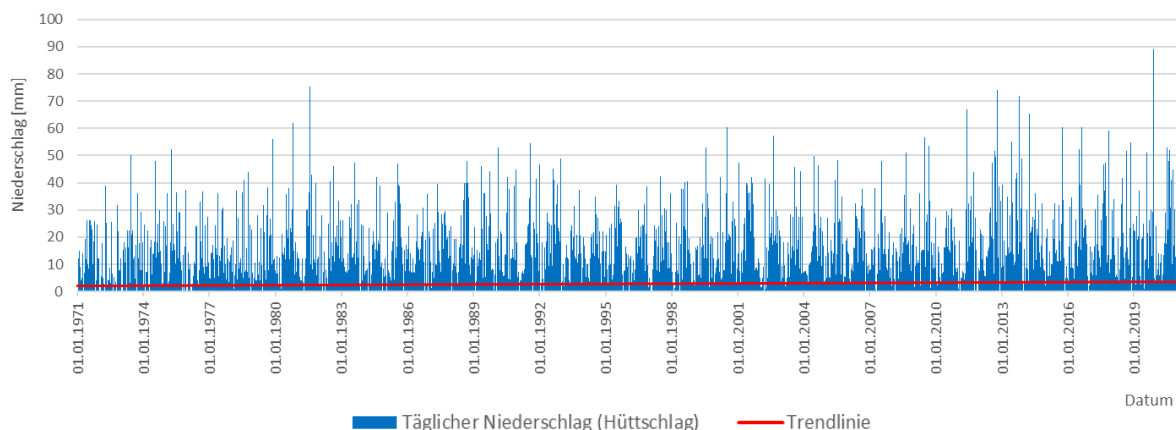


Abbildung 5-13 : Tägliche Niederschlagswerte (aufgenommen von der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 31.12.2020 und eine rot eingetragene Trendlinie.

Zu erkennen sind auch einige ausgeprägtere Niederschlagsereignisse, wie beispielsweise in den Jahren 1975, 1980 und 1982. Ab der letzten Jahrtausendwende steigt die Anzahl ausgeprägter Ereignisse sowie deren Niederschlagsmenge. Zusätzlich fällt bei der Betrachtung von Abbildung 5-13 ein besonders starkes Niederschlagsereignis im November 2019 auf. Berichten der ortsansässigen Bevölkerung zufolge führte dies zwar zu zahlreichen Murenabgängen im Gebiet, jedoch zu keiner erneuten Aktivierung der Hütteggalm. Betrachtet man die in Abbildung 5-13 rot dargestellte Trendlinie, zeigt sich über dem dargestellten Zeitraum ein leichter Anstieg der Niederschlagsmenge.

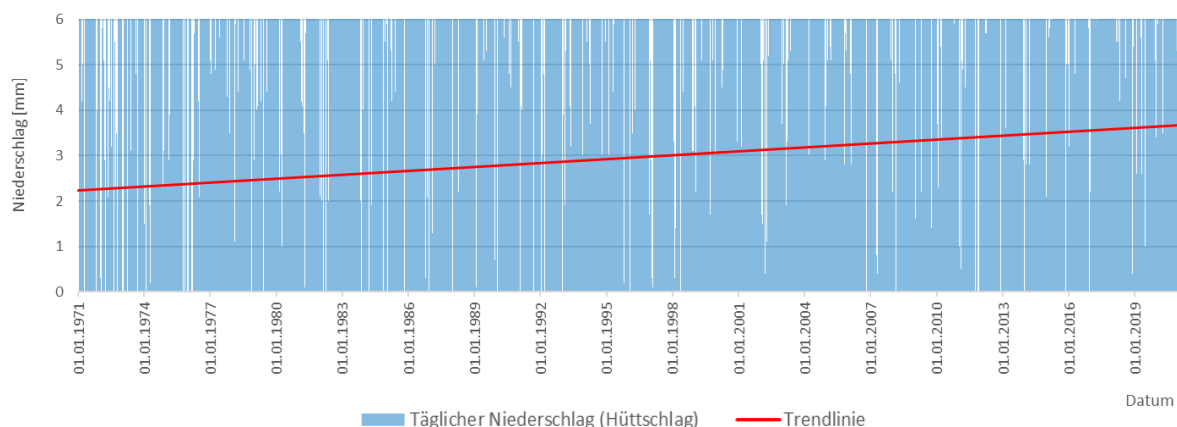


Abbildung 5-14 : Tägliche Niederschlagswerte (aufgenommen von der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 31.12.2020 und eine rot eingetragene Trendlinie. Die angepasste y-Achse und die Erhöhung der Transparenz der Niederschlagsdaten ermöglicht eine bessere Visualisierung der Trendlinie.

Das entspricht auch den Ergebnissen der Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg der ÖKS15 (2016a) in Tabelle 3-2. Um die Trendlinie besser zu visualisieren wurde Abbildung 5-14 erstellt. Hier zeigt sich beim Niederschlag ein Anstieg von rund 1,5 Millimetern im Tagesschnitt für den analysierten Zeitraum.

#### 5.5.3.2 Temperatur

Zusätzlich zum Niederschlag ist auch die Temperatur ein wichtiger Bestandteil der klimatischen Entwicklung. Daher werden die Temperaturdaten für den Zeitraum vom 1. Januar 1971 bis zum 30. Juni 2019 in Abbildung 5-15 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die jahreszeitlich bedingt variierenden Tagestemperaturen, aufgenommen von der meteorologischen Messstation in Bad Gastein (eHyd 2024). Zu erkennen sind auch einige Extremwerte von bis zu  $-20^{\circ}\text{C}$  in den Jahren 1984 und 1987. Auch nach der Jahrtausendwende lassen sich noch sehr niedrige Temperaturen von bis zu  $-15^{\circ}\text{C}$ , beispielsweise in den Jahren 2012 und 2017 beobachten.

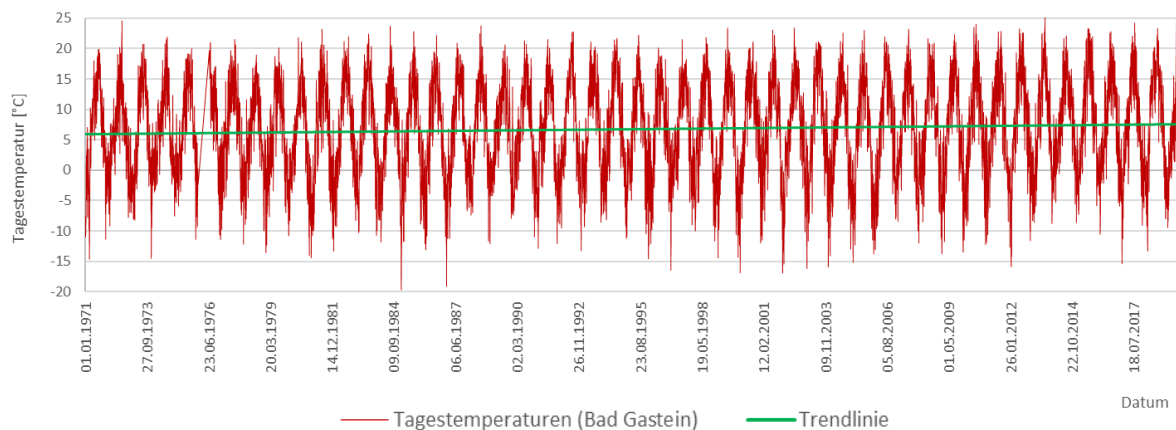


Abbildung 5-15 : Tägliche Durchschnittstemperaturen (aufgenommen von der meteorologischen Messstation in Bad Gastein (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 30.06.2019 und eine grün eingetragene Trendlinie.

Betrachtet man die in Abbildung 5-15 grün eingetragene Trendlinie, lässt sich hier über den dargestellten Zeitraum ebenfalls ein leichter Anstieg der durchschnittlichen Tagestemperaturen erkennen. Das entspricht den Ergebnissen der Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg der ÖKS15 (2016a) in Tabelle 3-1. Um auch den Anstieg der Trendlinie der Temperaturdaten besser sichtbar zu machen, wurde Abbildung 5-16 erstellt.

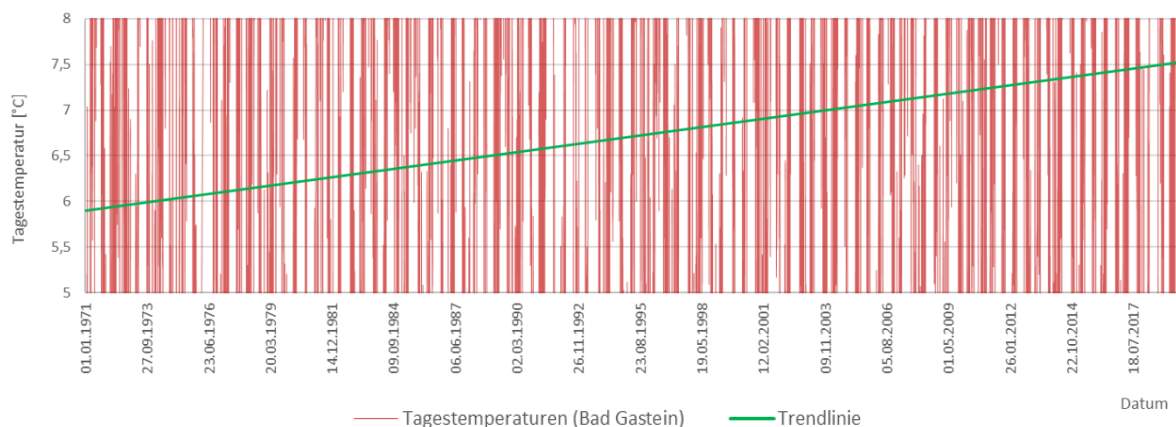


Abbildung 5-16 : Tägliche Durchschnittstemperaturen (aufgenommen von der meteorologischen Messstation in Bad Gastein (eHyd 2024)) für den Zeitraum vom 01.01.1971 bis zum 30.06.2019 und eine grün eingetragene Trendlinie. Die angepasste y-Achse und die Erhöhung der Transparenz der Temperaturdaten ermöglicht eine bessere Visualisierung der Trendlinie.

Hier lässt sich für die durchschnittliche Tagestemperatur ein Anstieg von rund 1,6 °C für den analysierten Zeitraum erkennen. Dieses Ergebnis entspricht dem Temperaturanstieg in den Klimaszenarien der ÖKS15 (2016a) für das Bundesland Salzburg.

## 5.6 In-Situ-Versuche

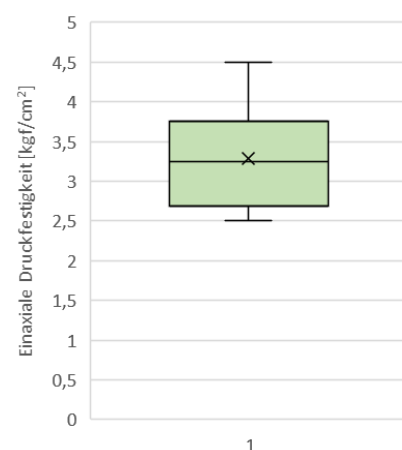
Im Rahmen der Probenentnahme im Oktober 2023 wurden mehrere In-Situ-Versuche durchgeführt, um eine erste Idee zu den möglichen Bodenkennwerten zu erhalten. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 gezeigt. Aufgrund der Ungenauigkeit und Bandbreite der Ergebnisse, auf die in der Methodenkritik in Kapitel 6.9.6 eingegangen wird, wurden diese Werte jedoch nicht für eine Modellierung herangezogen. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurden sie nicht berücksichtigt und sollen an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber genannt werden.

### 5.6.1 Taschen-Penetrometer

Die Anwendung des Taschen-Penetrometers ergab einen Durchschnittswert von 3,25 kgf/cm<sup>2</sup> für die einaxiale Druckfestigkeit. Dieses Ergebnis kann dem Boxplot in Tabelle 5-5 entnommen werden. Bei einem Boxplot handelt es sich um die grafische Darstellung eines Datensatzes. Dabei bildet die in der Abbildung grün gezeigte Box 50 % der Daten ab. Die horizontale Linie innerhalb der dargestellten Box ist der Median/Mittelwert der Verteilung der einzelnen Werte. Die vertikalen Linien bilden eine Verbindung zu den Extremwerten und somit zu den restlichen Werten des Datensatzes. (Simpkins Kendrick 1989)

Tabelle 5-5 : Ergebnisse der Untersuchung mit Hilfe des Taschen-Penetrometers im Rahmen der Probenentnahme und Darstellung der Ergebnisse im Box-Plot.

Messung Nr.	Einaxiale Druckfestigkeit [kgf/cm <sup>2</sup> ]
1	3,75
2	3,75
3	3
4	2,5
5	3,5
6	2,75
...	...
24	4,5
25	2,5
26	2,75
27	4,5
28	3,25
29	2,5
30	3,5



Umgerechnet ergibt dieses Ergebnis eine einaxiale Druckfestigkeit von 0,319 MPa. Gesteine mit einer einaxialen Druckfestigkeit von unter 1 MPa werden nach Müller & Pippig (2013) als extrem gering fest eingestuft und den Lockergesteinen zugeordnet. Diese Einstufung trifft auf den untersuchten Aufschluss zu. Das erhaltene Ergebnis reicht,

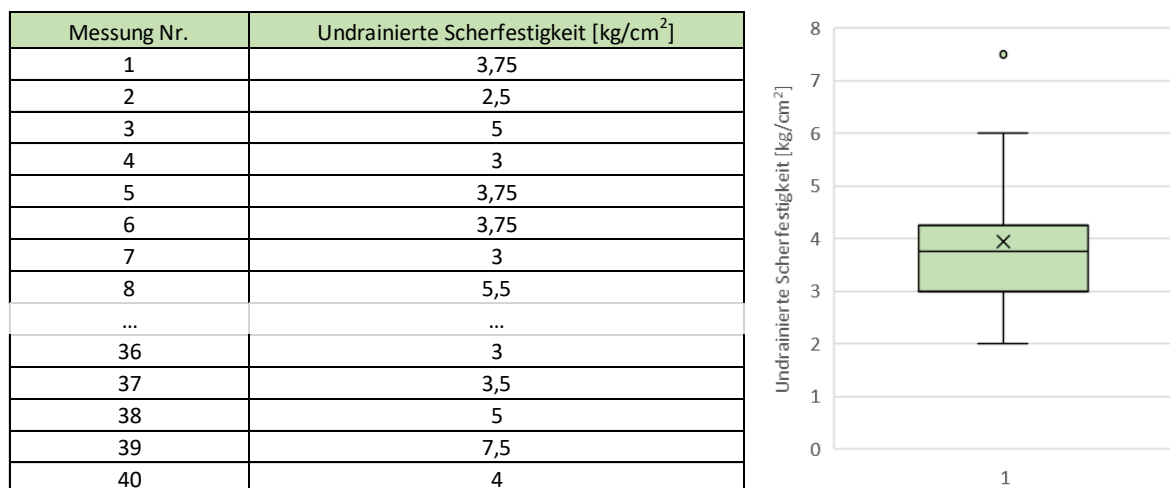


trotz der in der Methodenkritik genannten Fehlerquellen, zur groben Einstufung als Lockergestein, fällt aber dennoch sehr klein aus. In den weiteren Untersuchungen fand der ermittelte Wert, auch mangels Bedarfs, keine Anwendung.

### 5.6.2 Drehflügelsonde

Die Anwendung der Taschen-Drehflügelsonde ergab einen Durchschnittswert von 3,75 kg/cm<sup>2</sup> für die undrainierte Scherfestigkeit. Dieses Ergebnis kann dem Boxplot in Tabelle 5-6 entnommen werden.

Tabelle 5-6 : Ergebnisse der Untersuchung mit Hilfe der Taschen-Drehflügelsonde im Rahmen der Probenentnahme und Darstellung der Ergebnisse im Box-Plot.



Die Umrechnung des erhaltenen Ergebnisses ergibt eine undrainierte Scherfestigkeit von 367,749 kN/m<sup>2</sup>. Dieser Wert ist sehr hoch und übersteigt auch die Ergebnisse des in Kapitel 5.7.3 beschriebenen kleinen Rahmenscherversuchs um ein Vielfaches. Daher wurde das Ergebnis bei der weiteren Untersuchung vernachlässigt. Der kleine Rahmenscherversuch des Fuscher-Phyllits der Hüttegalm ergab, über die drei Versuche, eine Scherfestigkeit zwischen 70 und 160 kN/m<sup>2</sup> (Kaml 2024).

## 5.7 Laboruntersuchungen

Zusätzlich zu den während der Kartierung durchgeführten, anschließend aber nicht weiter herangezogenen In-Situ-Versuchen mittels Taschen-Penetrometer und Taschen-Drehflügelsonde wurden zur Ermittlung wichtiger Kennwerte weitere Untersuchungen im Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Graz und den Laboren des Instituts für Erdwissenschaften der Universität Graz

durchgeführt. Diese im Rahmen der Untersuchung der partiellen Reaktivierung der Massenbewegung am Rosskarkogel erfolgten Laboranalysen wurden von Kaml (2024) erarbeitet und beschrieben. Seine Ergebnisse werden hier kurz zusammengefasst.

5.7.1 Glühverlust-Analyse

Die Glühverlust-Analyse von Kaml (2024) zur Ermittlung der Glühverluste der Phyllite der Brennkogel- und der Fusch-Formation und des in der Rosskarkogelscharte aufgeschlossenen Talkschiefers führten zu den in Tabelle 5-7 gezeigten Ergebnissen.

Tabelle 5-7 : Ergebnisse der Glühverlust-Analyse von Kaml (2024)

Probenbezeichnung	Masse Tigel leer [g]	Masse Tigel mit Probe [g]	Masse Tigel mit Probe geglüht [g]	Glühverlust [kg <sup>-1</sup> ]	GV Durchschnitt [kg <sup>-1</sup> ]
Fuscher-Phyllit Hüttegalm	23.53	33.61	33.26	3.43	4.75%
	25.23	35.52	34.79	7.08	
	25.26	35.57	35.18	3.73	
Fuscher-Phyllit Rosskarkogelscharte	22.48	33.04	32.70	3.17	2.88%
	20.70	30.90	30.59	3.09	
	24.35	34.54	34.29	2.38	
Talkschiefer Rosskarkogelscharte	25.54	36.76	34.94	16.27	17.92%
	25.35	35.52	33.49	19.97	
	19.64	30.66	28.73	17.53	
Brennkogel-Phyllit Hüttegalm	25.99	36.33	35.58	7.22	7.87%
	25.68	36.19	35.30	8.51	
	25.77	36.24	35.42	7.88	

Der größte Glühverlust wurde beim Talkschiefer mit einem Wert von fast 18% beobachtet. Dies begründet Kaml (2024) mit dem hier enthaltenen Kristallwasser. Der Phyllit der Fusch-Formation im Bereich der Hüttegalm, für den bereits im Gelände im Rahmen der Kartierung ein erhöhter Graphitgehalt vermutet wurde, weist einen Glühverlust von rund 5% auf.

5.7.2 XRD-Analyse

Um die Zusammensetzung einzelner beprobter Lithologien zu bestimmen, wurde von Kaml (2024) eine Röntgendiffraktometrie-Analyse durchgeführt. Aufgrund der von ihm beschriebenen Fehlerquellen in der Analyse des Glühverlustes (Kristallwasser, unvollständige Versuchsdurchführung, Probenentnahme) wurde diese Untersuchungsmöglichkeit ebenfalls angewandt, um mit Hilfe der Rietveld-Methode die

quantitative Zusammensetzung zu bestimmen. Dadurch soll insbesondere der Graphitgehalt des Fuscher-Phyllits im Bereich der Hüttegalm quantifiziert werden. Die Analyse des Phyllits der Fusch-Formation ergab eine Zusammensetzung mit entsprechender quantitativer Bestimmung nach Rietveld aus Quarz (36,9%), Chlorit (4,1%), Kalzit (3,3%), Muskovit (44,7%), Albit (1,6%), Biotit (3,2%) und Graphit (6,2%). Die Analyse des in der Rosskarkogelscharte aufgeschlossenen Talkschiefers ergab bei Kaml (2024) eine Zusammensetzung aus Chlorit, Ankerit, Aktinolith, Talk und Kalzit.

### 5.7.3 Rahmenscherversuch

Um die für eine realistische Modellierung benötigten Bodenkennwerte des Talkschiefers der Rosskarkogelscharte und des Phyllits der Fusch-Formation der Hüttegalm zu bestimmen, wurde von Kaml (2024) ein Rahmenscherversuch durchgeführt. Aufgrund der zu geringen Probenmenge musste dabei jedoch auf einen kleinen Rahmenscherversuch mit einer Korngröße von bis zu 4 mm im Durchmesser zurückgegriffen werden. Durch die Untersuchung des Phyllits der Fusch-Formation konnte dabei ein Reibungswinkel von  $29,8^\circ$ , ein Restscherwinkel von  $28^\circ$  und eine Kohäsion von 17 kPa ermittelt werden. Die Untersuchung des Talkschiefers ergab einen Reibungswinkel von  $23,6^\circ$ , einen Restscherwinkel von  $10^\circ$  und eine Kohäsion von 26,1 kPa. Die Verwendbarkeit dieser Ergebnisse (Inhomogenität der Fuscher-Phyllite im Bereich der Hüttegalm, nur bedingt repräsentative Proben durch Reduktion des Korngrößenspektrums, Eignung der Methode zur Analyse des kaum bindigen Lockergesteins) wird von Kaml (2024) in seiner Arbeit eingehender erörtert.

## 5.8 Standsicherheitsanalyse

Zur Modellierung der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel und der Reaktivierung der Hüttegalm wurden zunächst angenommene und angenäherte Werte herangezogen. Für die spezifische Wichte des Phyllits wurde so nach Schön (1996) ein Wert von  $26 \text{ kN/m}^3$  gewählt. Annähernde Werte für den Reibungswinkel und die Kohäsion von Phyllit wurden der Datenbank des Felsmechanik-Labors des Instituts für Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität Graz und Button & Blümel (2004) entnommen und anschließend angepasst. Die Werte für den Talkschiefer wurden angenähert an jene des Phyllits gewählt und anschließend im Modell angepasst. Die Anpassung erfolgte unter anderem nach der Sinnhaftigkeit des kalkulierten Modells. Die Modellierung in den Programmen des Rocscience-Katalogs, aufgeteilt in die beiden

Programme „Slide2“ und „Slide3“ zeigt die betroffenen Bereiche und entsprechende Factors of Safety. Die angenommenen Werte wurden dabei gewählt, um möglichst einen Grenzbereich mit einem Factor of Safety von eins zu erreichen. Dieser Wert entspricht einer Grenzstabilität. Teilweise ergaben die Modelle mit den unterschiedlichen Methoden auch Werte knapp unter dieser Grenzstabilität, was dem Prozess des Kriechens entspricht. Für die den Phyllit der Brennkogel-Formation unterlagernden Einheiten wurden einheitliche Kennwerte angenommen, da hier kein Versagen zu erwarten ist und die entsprechenden Lithologien auch im Rahmen der Laboruntersuchungen durch Kaml (2024) nicht näher betrachtet wurden. Die Ergebnisse mit den entsprechenden jeweiligen Eingabeparametern werden in Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-23 gezeigt.

5.8.1 Modelle auf Grundlage angenommener Materialkennwerte

5.8.1.1 Zweidimensionales Modell der postglaziale Massenbewegung am Rosskarkogel

Das „Slide2“-Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel auf Grundlage angenommener und angenäherter Werte in Abbildung 5-17 zeigt ein Versagen im Bereich der eingetragenen Deckengrenze mit dem entsprechenden Talkschiefer vorkommen.

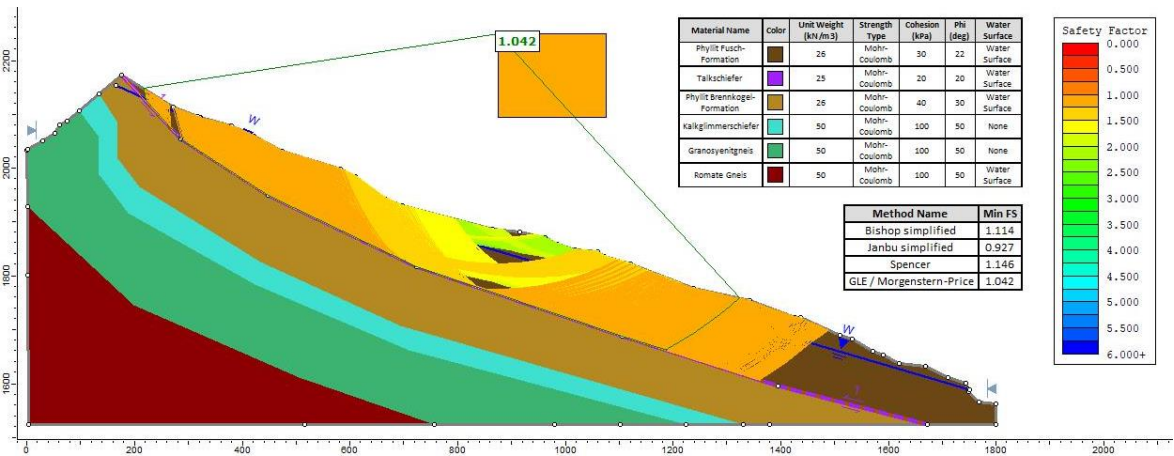


Abbildung 5-17 : Zweidimensionales Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel in Bewegungsrichtung, erstellt in „Slide2“ mit angenommenen und angenäheren Kennwerten.

Dabei weist der Hang mit den eingegebenen Werten und der in Abbildung 5-17 dargestellten Methode nach Morgenstern-Price einen Factor of Safety von 1,042 auf. Die Ergebnisse weiterer möglicher Hangstabilitätsanalyse-Methoden werden ebenfalls in Abbildung 5-17 gelistet. Als Eingabeparameter wurde für den Phyllit der Fusch-Formation eine Kohäsion mit einem Wert von 30 kPa, ein Reibungswinkel von 22° und für den Talkschiefer eine Kohäsion von 20 kPa und ein Reibungswinkel mit einem Wert von 20° gewählt. Zusätzlich wurde in diesem Modell für den Fusch-Phyllit eine Teilsättigung

angenommen.

5.8.1.2 Zweidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm

Das „Slide2“-Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm mit angenommenen und angenäherten Eingabeparametern ist in Abbildung 5-18 dargestellt.

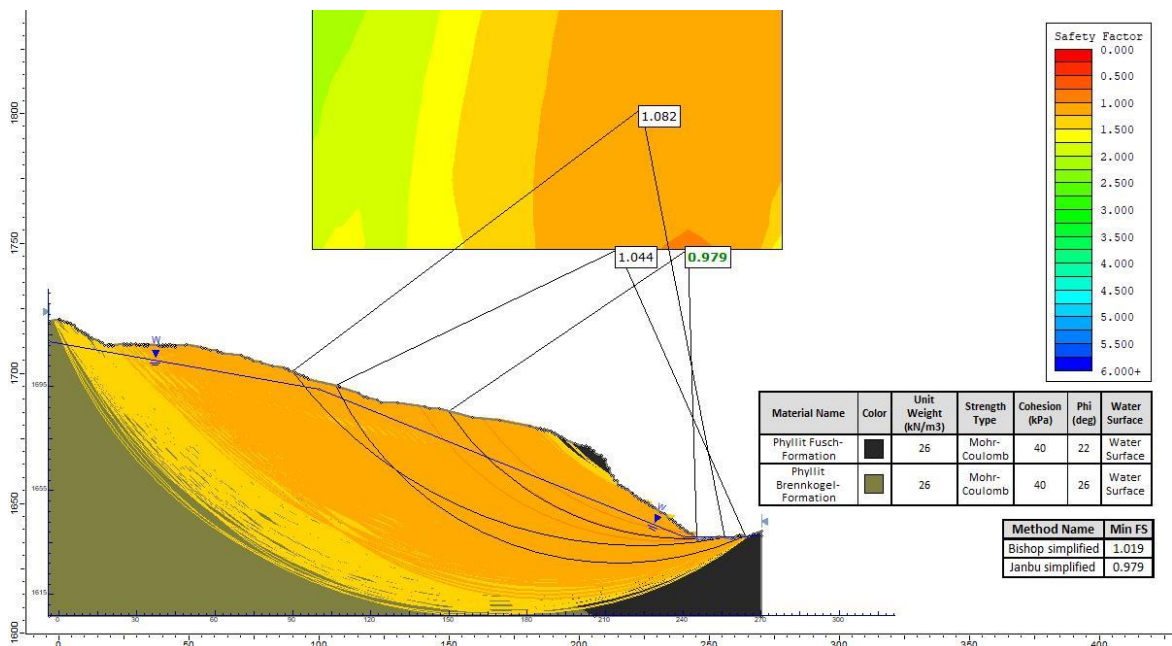


Abbildung 5-18 : Zweidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm in Bewegungsrichtung, erstellt in „Slide2“ mit angenommenen und angenäherten Kennwerten.

Das Ergebnis deutet auf ein Versagen innerhalb der dunklen Phyllite der Fusch-Formation hin. Der Bereich des niedrigsten mit der Methode nach Janbu ermittelten Factors of Safety fällt dabei klein aus, jedoch liegt dieser Faktor auch in anderen Lagen in einem ähnlichen Bereich. Der kleinste ermittelte Factor of Safety liegt bei einem Wert von 0,979. Das Ergebnis der Methode nach Bishop ist in Abbildung 5-18 ebenfalls gelistet. Als Eingabeparameter wurde für den Phyllit der Fusch-Formation eine Kohäsion mit einem Wert von 40 kPa und ein Reibungswinkel von 22° angenommen. Die angenommene Sättigung des Untergrundes ist als Wasserspiegel in der Abbildung ersichtlich. Die Tiefe des Versagens entspricht im Hangbereich der von Kaml (2024) ermittelten Höhe der Böschung von rund 25 bis 32 Metern. Dies kann auch Abbildung 5-18 entnommen werden.

5.8.1.3 Dreidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm

Abbildung 5-19 zeigt das in „Slide3“ erstellte dreidimensionale Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm. Es weist mit den eingegebenen angenommenen und

angenäherten Parametern und der Methode nach Spencer einen Factor of Safety von 1,018 auf. Hierzu wurde für den Reibungswinkel des Phyllits der Fusch-Formation ein Wert von  $25^\circ$  und für die Kohäsion ein Wert von 30 kPa angenommen.

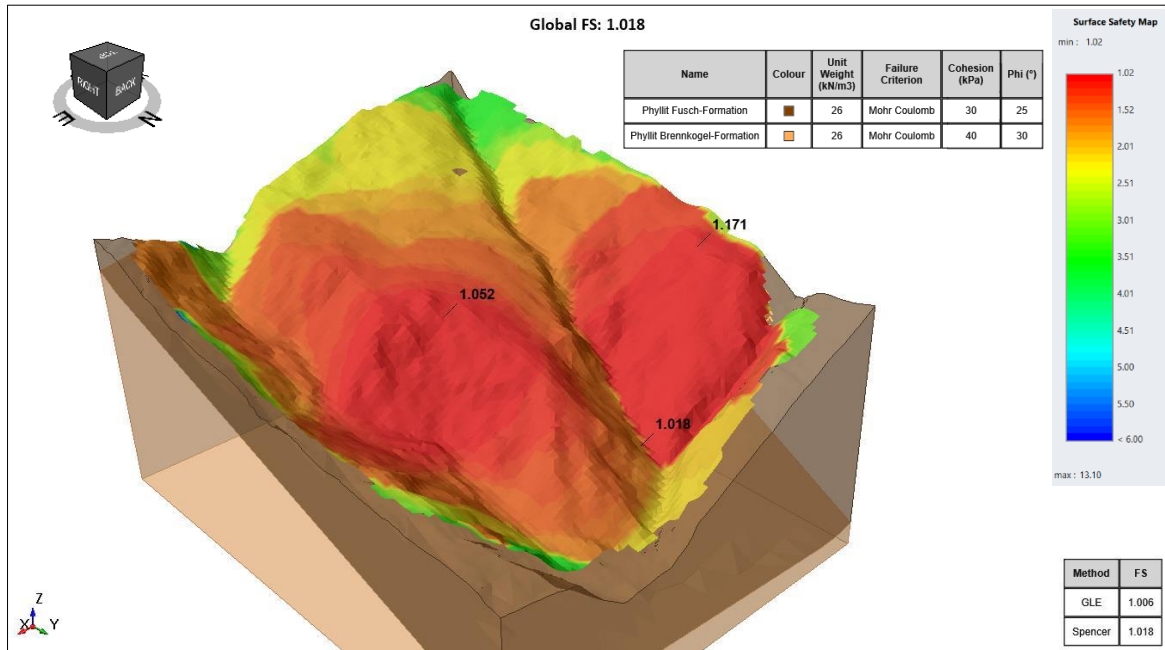


Abbildung 5-19 : Dreidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hütteggalm erstellt in „Slide3“ mit angenommenen und angenäherten Kennwerten.

Die dargestellten schwächsten Bereiche entsprechen in etwa dem von Valentin (2019) in Abbildung 1-5 gezeigten Verlauf der frischen Risse der Reaktivierung vom Juni 2019. Die betroffene Fläche fällt dabei jedoch kleiner aus. Zu erkennen ist in Abbildung 5-19 auch ein weiterer gefährdeter Bereich auf der der Hütteggalm gegenüberliegenden Seite des durch die Alm verlaufenden Grabens. Dies deckt sich ebenfalls mit dem in Abbildung 1-5 gezeigten Verlauf der 2019 durch die Reaktivierung entstandenen Zerrisse.

### 5.8.2 Modelle auf Basis der Laboruntersuchungen

Nach den von Kaml (2024) erarbeiteten Laboruntersuchungen wurden die erhaltenen Ergebnisse herangezogen um die zuvor verwendeten Modellparameter durch diese zu ersetzen. Die Ergebnisse dieser angepassten Modelle werden in Abbildung 5-20 bis Abbildung 5-23 dargestellt.

#### 5.8.2.1 Zweidimensionales Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel

Das „Slide2“-Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel auf Grundlage der Ergebnisse des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024) ist in Abbildung 5-20



dargestellt. Es zeigt ebenfalls ein Versagen im Bereich der eingetragenen Deckengrenze und des dort vorkommenden Talkschiefers.

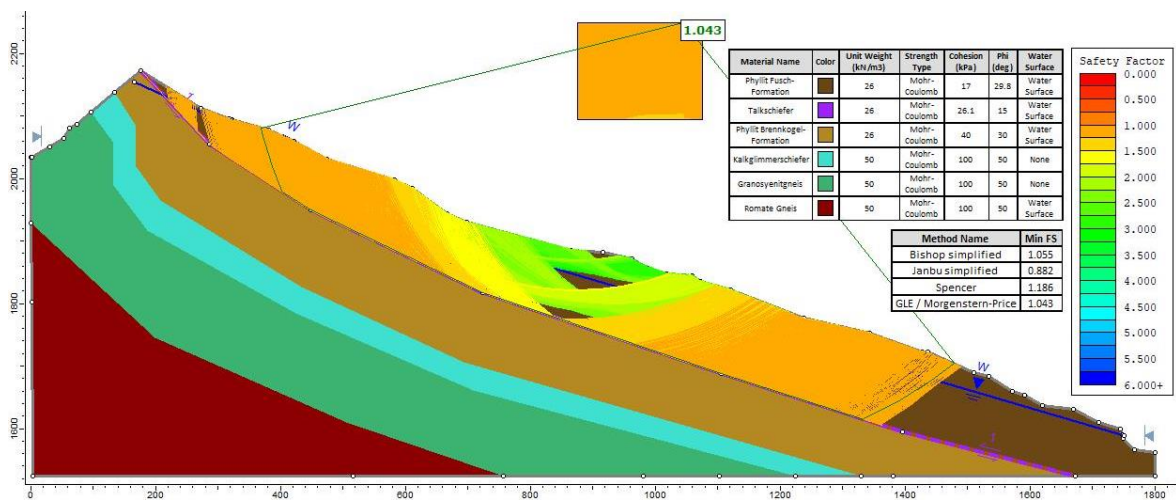


Abbildung 5-20 : Zweidimensionales Modell der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel in Bewegungsrichtung erstellt in „Slide2“ mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024).

Mit den angepassten Eingabeparametern ergab das Modell mit der Methode nach Morgenstern-Price einen Factor of Safety von 1,043. Dabei wurde für den Phyllit der Fusch-Formation eine Kohäsion von 17 kPa und ein Reibungswinkel von 29,8° eingegeben. Der Talkschiefer wurde mit einem Wert von 26,1 kPa für die Kohäsion und einem Reibungswinkel von 15° versehen. Die Ergebnisse anderer möglicher Methoden sind in Abbildung 5-20 gelistet. Der Wasserspiegel für das Modell in Abbildung 5-17 wurde auch für dieses Modell übernommen.

#### 5.8.2.2 Zweidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm

Hierzu wurden die zuvor angenommenen Eingabeparameter durch die Ergebnisse des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024) ersetzt. Dieses „Slide2“-Modell des reaktivierten Bereiches der Hüttegalm deutet, wie ebenfalls das Modell mit angenommenen Werten, auf ein Versagen innerhalb des Phyllits der Fusch-Formation hin. Für den Reibungswinkel des Fusch-Phyllits wurde ein Wert von 29,8° und für die Kohäsion ein Wert von 17 kPa verwendet. Der niedrigste nach Janbu erhaltene Factor of Safety liegt bei 1,071. Im Unterschied zum Modell in Abbildung 5-18 ist hier ein kleinerer Bereich betroffen und der Factor of Safety liegt in Abbildung 5-21 in den anderen gezeigten Lagen weitaus höher. Der eingetragene Wasserspiegel und die damit einhergehende Sättigung des Untergrundes entsprechen jenen des Modells in Abbildung 5-18.

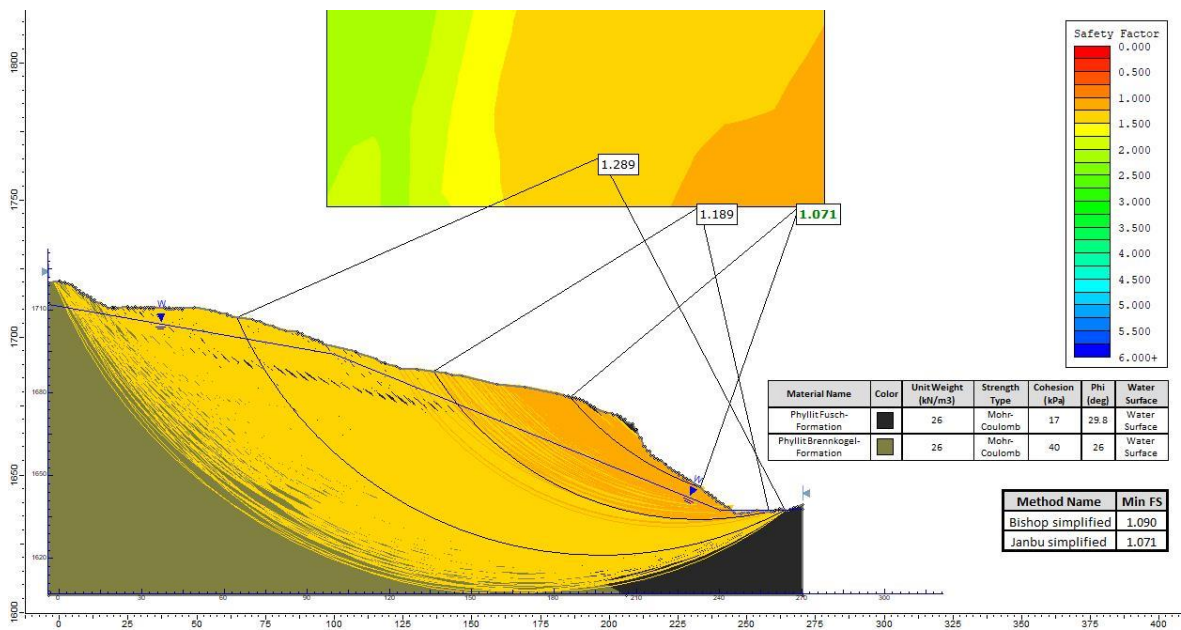


Abbildung 5-21 : Zweidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm in Bewegungsrichtung, erstellt in „Slide2“ mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024).

5.8.2.3 Dreidimensionales Modell der reaktivierten Massenbewegung der Hüttegalm

- Methode nach Morgenstern-Price

Das in „Slide3“ auf Basis der Ergebnisse des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024) erstellte dreidimensionale Modell der reaktivierten Hüttegalm wird in Abbildung 5-22 gezeigt.

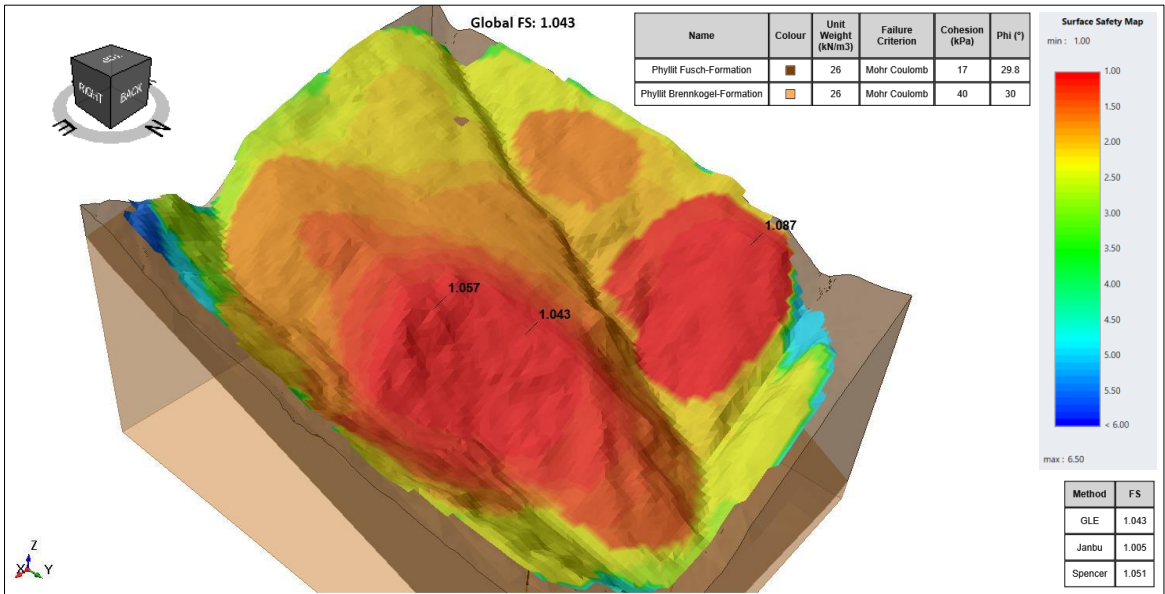


Abbildung 5-22 : Dreidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm erstellt in „Slide3“ nach der Methode von Morgenstern-Price mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024).

Mit den Eingabeparametern von  $29,8^\circ$  für den Reibungswinkel und 17 kPa für die Kohäsion des Fuscher-Phyllits ergab die Modellierung mit der Analyse-Methode nach Morgenstern-Price einen Factor of Safety von 1,043. Die gefährdete Fläche fällt dabei kleiner aus als mit den zuvor angenommenen Eingabeparametern. Dabei entsprechen die betroffenen Bereiche in ihrer Anordnung jedoch dem in Abbildung 5-19 gezeigten Versagen. Die Ergebnisse der Analyse-Methoden nach Janbu und nach Spencer sind ebenfalls in Abbildung 5-22 gelistet. Das Ergebnis der Methode nach Janbu ist in Abbildung 5-23 dargestellt.

- Methode nach Janbu

Abbildung 5-23 zeigt ebenfalls das Modell aus Abbildung 5-22. Hierbei ist jedoch das Ergebnis der Methode nach Janbu dargestellt.

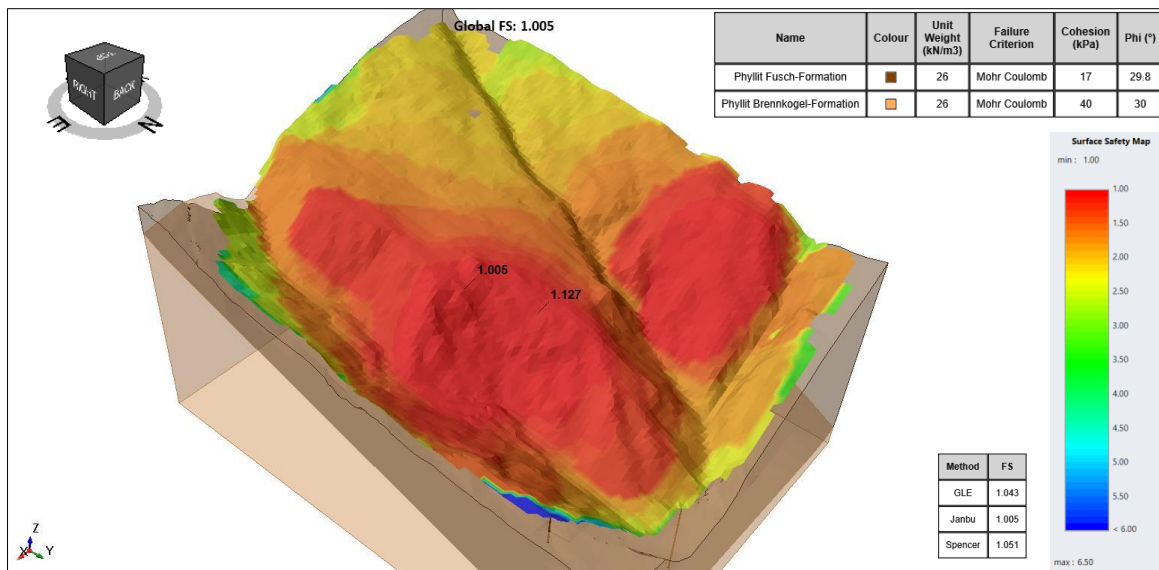


Abbildung 5-23 : Dreidimensionales Modell des reaktivierten Bereichs der Hüttegalm erstellt in „Slide3“ nach der Methode von Janbu mit den Werten aus den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024).

Hierbei wurden jedoch die Ergebnisse der Analyse-Methode nach Janbu visualisiert. Diese ergaben einen Factor of Safety von 1,005. Auch hier fallen die betroffenen Bereiche kleiner aus als von Valentin (2019) gezeigt. In ihrer Anordnung entsprechen sie jedoch dem Verlauf der im Juni 2019 entstandenen Zerrisse. Dieser wird in Abbildung 1-5 gezeigt.

## 6 Schlussfolgerungen

### 6.1 Geologische Karte und Profilschnitte

Die in Kapitel 5.1 in Abbildung 5-1 gezeigte geologische Karte des hinteren Reitalmtals und die entsprechenden Profilschnitte in Kapitel 5.2 lassen bereits auf konkretere Versagensursachen schließen. Erstellt wurden diese anhand der Kartierung in Zusammenarbeit mit Kaml (2024) und den Karten der Geologischen Bundesanstalt von Exner (1956) und Kreuss (2021).

#### 6.1.1 Postglaziale Massenbewegung

Die große Massenbewegung im hinteren Reitalmtal lässt sich vermutlich auf die in der letzten großen Eiszeit erfolgte glaziale Überprägung und den darauffolgenden Verlust des Wiederlagers durch den Gletscher-Rückgang, aber auch auf den Rückgang des Permafrosts im Postglazial zurückführen. Die im Bereich des Rosskarkogels aufgeschlossene Störungszone diente als Gleithorizont. Dies führte zum, ebenfalls von Exner (1956) dementsprechend kartierten, Abrutschen der Phyllite der Fusch-Formation im Verband. Begründet werden kann dies mit dem Vorkommen des Talkschiefers und den entsprechenden, als Ergebnis des Rahmenscherversuchs (Kaml 2024) erhaltenen Materialkennwerten dieser Massenbewegung. Das Vorkommen des Talkschiefers lässt sich dabei durch den Prozess der Talk- und Leukophyllit-Bildung als Folge hydrothermalen Metasomatose erklären. Der erhöhte Magnesium-Gehalt entsprechender Gesteine entstammt dabei dem unmittelbaren Nachbargestein oder wird durch eine relative Anreicherung im Zuge der Leukophyllitisierung von Granitgneisen bewirkt, indem ein Transport von Si, Al, Ca, Alkalien und der meisten Spurenelemente stattfindet. Ein kontrollierender Faktor für den Chemismus der Leukophyllite sind dabei die metamorphen Vorgänge im Störungsbereich (Prochaska 1986). Für die postglaziale Massenbewegung konnte Kaml (2024) im Rahmen seiner Untersuchung der vom Land Salzburg erhaltenen Orthofotos, neben der Reaktivierung des Areals der Hüttegalm, weitere noch in Bewegung befindliche Bereiche der postglazialen Massenbewegungen ausmachen. Diese werden in seiner Arbeit eingehender behandelt. Aufgrund der Interpretation der vorgefundenen Störungszone als Gleithorizont der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel und der Anisotropie der abgerutschten Phyllite kann Gleiten (mit Übergang von Rotation zu Translation) als Versagensart angenommen werden.

### 6.1.2 Reaktivierter Bereich der Hüttegalm

Der in der Rosskarkogelscharte vorgefundene Talkschiefer konnte im Bereich der Hüttegalm im Rahmen der im Juli 2023 durchgeführten Kartierungsarbeit und im Oktober 2023 erfolgten Probenentnahme nicht nachgewiesen werden. Die hier ebenfalls unterhalb der Hüttegalm abfallend verlaufende Deckengrenze und die annähernd dieser Fläche folgende Bewegungsrichtung ließen zu Beginn der Untersuchung auch hier auf ein Versagen entlang der Deckengrenze schließen. Der bei der Kartierung im Juli 2023 bereits vermutete und von Kaml (2024) nachgewiesene hohe Graphitgehalt im Phyllit der Fusch-Formation und auch die für diesen Bereich erstellten Modelle weisen jedoch eher auf ein Versagen innerhalb des Fuscher-Phyllits hin. Die Reaktivierung der Hüttegalm konnte von Kaml (2024) in seinen Untersuchungen und Vergleichen der vom Land Salzburg erhaltenen Orthofotos nachvollzogen und zudem die entsprechende vermutete Bewegungsrichtung bestätigt werden. Die bereits in Abbildung 5-8 gezeigte Lagerung mit auffallenden Unterschieden in der Orientierung, die ausgeprägte Zerschierung und die in diesem Bereich verlaufende Deckengrenze als Gleithorizont der postglazialen Massenbewegung bestätigen die anfängliche These des Auffahrens der im Verband abgerutschten Phyllite im Bereich der Hüttegalm. Für die Reaktivierung der Hüttegalm kann, aufgrund der sehr niedrigen Kohäsion und der intensiven Zerlegung sowie des Vorhandenseins kompakter Einheiten der Fuscher-Phyllite, Gleiten (mit Übergang von Rotation in Translation) als Versagensart angenommen werden. Dieses Gleiten könnte jedoch auch als vom Grundkriechen differenzierbarer Verschiebungszuwachs interpretiert werden. Dieser Zuwachs wird dabei von auslösenden Bedingungen, wie Starkregen oder Schneeschmelze verursacht (Koos 2017). Wie die Auswertung der hydrologischen und meteorologischen Daten gezeigt hat, spielten diese Bedingungen bei der Reaktivierung der Hüttegalm eine entscheidende Rolle. Die ausgeprägte Erosion und der zusätzlich stark erhöhte Porenwasserdruck führten letztendlich zum Versagen dieses Bereiches.

## 6.2 Seismik

Da, wie im Bericht zu den seismischen Beobachtungen für das Jahr 2019 (ZAMG 2020) gezeigt, im Zeitraum der Reaktivierung keine nennenswerte seismische Aktivität für das Gebiet festgestellt werden konnte, kann Seismik als auslösender Faktor für die Reaktivierung der Hüttegalm wohl ausgeschlossen werden. Die Datenreihen der umliegenden Stationen waren über den angegebenen Zugang nicht abrufbar, weshalb auf den Jahresbericht der ZAMG (heutige Geosphere Austria) von 2009 zurückgegriffen wurde.

## 6.3 Hydrologie und Meteorologie

Die Betrachtung der hydrologischen und meteorologischen Rahmenbedingungen, vor allem im Zeitraum der Reaktivierung von 2019, lässt auf einen erheblichen Einfluss dieser Faktoren und die dadurch bedingte Sättigung des Fuscher-Phyllits schließen. Auch der von Kaml (2024) nachgewiesene hohe Graphitgehalt bestätigt diese Annahme. Bereits im Rahmen der Kartierungsarbeiten konnte aufgrund größerer Niederschlagsmengen die Reaktion des Bodens im hinteren Reitalmtal gut beobachtet werden. Hierbei war klar ersichtlich, dass der Phyllit der Fusch-Formation eine stauende Wirkung aufweist, wodurch es auch im Bereich der Böschung unterhalb der Hütteggalm zu zahlreichen Wasseraustritten kam. Zudem lösten die Niederschläge im entsprechenden Zeitraum mehrere Gesteine aus. Diese verlegten in zwei Bereichen die Zufahrtsstraße zur Hütteggalm und die Forststraße unterhalb der Reitalm. Die Befragung der ortsansässigen Bevölkerung ergab zudem eine anhaltende Sättigung des Bodens, welche auch nach einem anhaltend trockeneren Zeitraum von bis zu zwei Wochen erhalten bleibt. Für den Zeitraum der Reaktivierung im Jahr 2019 konnten anhaltende Niederschläge und eine ausgeprägte Schneeschmelze beobachtet werden. Im Bereich der Böschung konnten im Zuge der Kartierung zahlreiche kleinere Rutschungen beobachtet werden. Diese werden durch die direkte Erosion des Reitalmbachs am Rutschkörper ausgelöst und zeigen so auch den fortlaufenden, schrittweisen Flächenverlust der Hütteggalm. Die fortschreitende Erosion wird in Kapitel 6.6 eingehender behandelt.

## 6.4 Anthropogener Einfluss

Wie die Kartierung und die Probenentnahme, aber auch die Abbildungen des hinteren Reitalmtals in Kapitel 1.6 gezeigt haben, weist das Gebiet keinen ausgeprägten anthropogenen Einfluss auf. Die wenigen errichteten Gebäude sowie die vereinzelt Wege, wie beispielsweise die Zufahrtsstraße, sollten, abgesehen von entsprechendem Verlust der Vegetation wenig Einfluss auf die Situation im Reitalmtal nehmen. Die Zufahrtsstraße im Bereich der Hütteggalm könnte als Verebnung und durch die hier im Reitalmbach errichtete Furt als Bachschwelle sogar positive Auswirkungen auf die Hangstabilität nehmen. Die im Reitalmtal errichtete Retentionsmaßnahme stellt eine wichtige Sicherungsmaßnahme für den Fall ausgeprägter Niederschlagsereignisse sowie möglicher weiterer Reaktivierungen dar. Die direkte Beweidung des Bereiches der Hütteggalm mit einer hinter der übersteilten Böschung verlaufenden Einzäunung, die im Rahmen der Kartierung beobachtet werden konnte, könnte allerdings Einfluss auf die



Vegetation und die Entwässerung des Hanges haben. Daher sollte auch dieser Aspekt genauer betrachtet werden. Baldenhofer (2023) beschreibt die Wirkeffekte von Viehtritten. Die Auswirkungen der Beweidung auf die Hangstabilität sind dabei vielschichtig und umfassen bodenphysikalische, ökologische und pflanzenökologische Aspekte. Die Tritte des Viehs verursachen direkte mechanische Schäden an Pflanzen und führen zur Verdichtung des Bodens. Dies beeinträchtigt die Durchwurzelbarkeit und nimmt damit Einfluss auf den Wasser-, Wärme- und Lufthaushalt sowie ökologische Faktoren, wie die Samenverbreitung. Insbesondere bei feuchteren Bodenverhältnissen, also entsprechender Sättigung des Bodens, können Schäden in der Grasnarbe sogar zu Totalausfall der Vegetation führen. Bereiche wie schattige, windfreie Stellen oder Tränkeplätze können so stark betroffen sein, dass ihre Nutzung langfristig ausscheidet (Baldenhofer 2023). Hierbei besteht ein Zusammenhang zwischen der Besatzdichte, der Weidedauer und dem Ausmaß der Narbenschäden. Die Tritte können bis zu einer Tiefe von 10-15 cm in den Boden reichen und die Narbendichte fördern, während gleichzeitig Samen in den Boden eingetreten werden, die so leichter keimen können. Im Alpenraum entstehen durch das Verhalten des almerfahrenden Viehs, das hangparallel frisst, treppenförmige Grasstufen, die bis zu einem gewissen Grad geländestabilisierend wirken können. Viehtritte können jedoch auch Bodenerosion und anderen negativen Auswirkungen nach sich ziehen. Die erosive Wirksamkeit von Viehtritten wird durch Nässe, die Nutzung schwerer Rinderrassen und die Hangneigung verstärkt. Die hirtelose Sömmerung und die damit verbundene fehlende Steuerung des Viehs bei Regenwetter wird als eine mögliche Ursache der Zunahme der Erosion in den Alpen angesehen. (Baldenhofer 2023)

## 6.5 Standsicherheitsanalyse

Die in den ersten Modellen in „Slide2“ und „Slide3“ verwendeten Kennwerte wichen, wie zu erwarten, von den Ergebnissen des kleinen Rahmenscherversuchs von Kaml (2024) ab. Da es sich bei diesen ersten Werten um Annahmen und Annäherungen handelte und die Modelle auf diesem Weg auch einen zu erwartenden Grenzzustand zeigen sollten, fielen die Werte der Kohäsion und des Reibungswinkels des Talkschiefers zu hoch aus. Die angenommenen Werte der Reibungswinkel des Phyllits der Fusch-Formation lagen etwas unter den Ergebnissen des Rahmenscherversuchs. Die anhand der Modelle ermittelten gefährdeten Bereiche entsprechen in ihrer Anordnung dem von Valentin (2019) gezeigten Gesamtbild der Reaktivierung. Die Bereiche der niedrigsten Hangstabilität fallen dabei aber insbesondere in „Slide2“ kleiner aus. Eine Verbindung der

einzelnen Flächen in „Slide3“ entspricht eher dem in Abbildung 1-5 von Valentin (2019) markierten Verlauf der Zerrisse um den Bereich der Hütteggalm. Dabei ist auch der Bereich der über dem begrenzenden Graben liegenden Böschung enthalten. Dies lässt darauf schließen, dass die Reaktivierung sich aus mehreren Einzelbewegungen im Bereich der Hütteggalm zusammensetzt. Das bekräftigt wiederum ebenfalls die These eines Versagens innerhalb der hier lagernden Phyllite der Fusch-Formation. Die Tendenz zu hierbei eher kleiner ausfallenden gefährdeten Bereichen, vor allem in den Modellen in „Slide2“, lässt sich durch die Modellierung an sich erklären. Dabei werden die Füscher-Phyllite als eine Gesteinseinheit mit einheitlichen Kennwerten betrachtet. Die Realität zeigt für diesen Bereich jedoch zusätzlich das Vorkommen kompakter Phyllit-Einheiten mit unterschiedlicher Orientierung, wie bereits in Abbildung 5-8 gezeigt. Zudem nehmen noch von Vegetation bedeckte Bereiche Einfluss auf die Hangstabilität. Der erhöhte Graphitgehalt des Füscher-Phyllits wurde von Kaml (2024) in mehreren Proben nachgewiesen. Dieser könnte jedoch im stark erodierten Bereich unterhalb der Hütteggalm unterschiedlich hoch ausfallen und so einer nicht konstanten Verteilung im Gestein folgen. Die Ermittlung der bodenmechanischen Kennwerte (Kaml 2024) erfolgte über einen kleinen Rahmenscherversuch, wobei lediglich Korngrößen bis zu 4 Millimetern im Durchmesser berücksichtigt wurden, da die Probe hierzu vorab auf diese Korngröße gesiebt wurde. Diese Einschränkung des verwendeten Korngrößenspektrums führt im Allgemeinen zu eher konservativen Werten, jedoch fehlen hier auch größere im Gebiet vorliegende Einheiten und kompakte Bereiche, was sich wiederum negativ auf das Ergebnis auswirken könnte. Insgesamt zeigen sich in den Modellen mit den eingegebenen Parametern äußerst grenzstabile Hänge, die somit eine hohe Anfälligkeit für Änderungen der Bedingungen, wie fortschreitende Erosion und hohe Wassereinträge aufweisen sollten.

## 6.6 Fortschreitende Erosion

Die Erosion wurde von Kaml (2024) als einflussnehmender Faktor in seiner Arbeit zusammen mit der Vegetation genauer behandelt. Hier sei zu erwähnen, dass sich der Reitalmbach durch die Erosion immer weiter eingräbt und sich dadurch auch der unterhalb verlaufenden Deckengrenze nähert. Dies könnte einen weiteren schwächenden Faktor für den reaktivierten Bereich der Hütteggalm darstellen. Neben dem tieferen Einschneiden des Reitalmbaches führt die Erosion der Böschung unterhalb der Hütteggalm zu fortschreitendem Flächenverlust im Bereich der Hütteggalm und der Zufahrtsstraße, deren zukünftige Verlegung weiter in den Hang dadurch unumgänglich ist.

Wie auch in den von Kaml (2024) untersuchten Orthofotos zu erkennen, wurden die Reitalm und die Hüttegalm in den letzten Jahrzehnten abgebaut und weiter von der durch Erosion übersteilten Böschung entfernt neu errichtet. Die in Kapitel 5.5.3 in der Auswertung der historischen Daten zu Niederschlag und Temperatur und in den Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg der ÖKS15 (2016a) gezeigte Zunahme von Temperatur und Niederschlag könnten einen Auslöser der von Kaml (2024) gezeigten Zunahme der Erosion in den letzten Jahrzehnten darstellen. Hinzu kommt ebenfalls der von Kaml (2024) beschriebene Vegetationsverlust durch einen Windschlag im Jahr 2002 als weitere mögliche Ursache der Erosionszunahme. Die Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg (ÖKS15 2016a) zeigen in Kapitel 3.7 in den dargestellten prognostizierten Entwicklungen eine weitere Zunahme von Temperatur und Niederschlag. Dies könnte einen weiteren Anstieg der Erosionsrate im hinteren Reitalmtal bedeuten.

## **6.7 Mögliche Interpretation des Ablaufs postglazialer morphologischer Entwicklung im hinteren Reitalmtal**

In der letzten großen Eiszeit wurde, wie in Kapitel 3.6 beschrieben, auch das Reitalmtal von mächtigen Eis- und Schneemassen überlagert. Diese bedingten durch entsprechende Glazialerosion eine Überprägung der Morphologie. Gut beobachtet werden kann dies auch in der Form des Groöarler Taltroges direkt bei Hüttschlag (Alpenverein 2016) und der Mündungsstufe zur Salzach (Pippan 1954). Der Rückgang der Eismassen, die neben der erodierenden Wirkung auch als Widerlager übersteilter Hänge fungierten und der dagegen langsamer ablaufende Rückgang des Permafrostes im Postglazial führten wohl zum Versagen der dementsprechend benannten postglazialen Massenbewegung im Reitalmtal. Dieses Versagen fand entlang der durch Talkschiefervorkommen gekennzeichneten Deckengrenze statt. Wie in der angefertigten geologischen Karte in Kapitel 5.1, aber auch im Profilschnitt C-C' in Kapitel 5.2.3 ersichtlich, wurde der Fuscher-Phyllit der oberen Schwarzphyllitzone wiederum von Kalkglimmerschiefern überlagert. Sie bauen beispielsweise die der Massenbewegung angrenzende Gössenwand auf. Diese Kalkglimmerschiefer können in kleinerem Ausmaß auch im Bereich der postglazialen Massenbewegung ausgemacht werden. Vor allem unterhalb der Gössenwand handelt es sich hierbei oftmals um nach der postglazialen Massenbewegung erfolgte Ausbrüche aus der Gössenwand mit entsprechender Zerlegung und abweichender Orientierung. Entlang des erschlossenen Weges zum Rosskarkogel sind jedoch auch kleinere Kalkglimmerschiefer-Aufschlüsse vorhanden. Sie weisen teilweise eine den im Verband

abgerutschten Phylliten entsprechende Orientierung auf. Größere Kalkglimmerschiefervorkommen konnten eventuell auch aufgrund der Vegetation nicht ausfindig gemacht werden. Deshalb liegt der Verdacht nahe, dass beispielsweise im Bereich entlang der Gössenwand auch die den Phyllit überlagernden Kalkglimmerschiefer als Teil der postglazialen Massenbewegung abgerutscht sind. In größerer Entfernung zur Gössenwand war jedoch kein überlagernder Kalkglimmerschiefer aufgeschlossen. Obwohl die postglaziale Massenbewegung nach Exner (1956) und Kreuss (2021) unter Wahrung des Schichtverbandes abrutschte, konnten, außer unterhalb der Gössenwand, keine größeren Kalkglimmerschiefervorkommen in der postglazialen Massenbewegung ausgemacht werden. Dies könnte unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen könnten die ortsweise noch überlagernden Kalkglimmerschiefer bereits durch die glaziale Überprägung abgetragen worden sein. Andererseits könnten sie vor dem Versagen dieser heute sichtbaren postglazialen Massenbewegung auf dem Fuscher-Phyllit abgerutscht sein, oder aber, wie im Bereich entlang der Gössenwand, ebenfalls einen Teil dieser Massenbewegung gebildet haben. Dabei folgten sie jedoch möglicherweise, ebenfalls unter Wahrung des Schichtverbandes, einer weiteren Gleitbahn der Fuscher-Phyllite und fuhren so unterhalb der Reitalm an der gegenüberliegenden Talflanke auf, wo sie anschließend durch den Reitalmbach erodiert wurden. Dies könnte durch Talzusub wiederum zum Aufstauen des im hinteren Reitalmtals eingebrachten Wassers geführt haben und durch die Erosion des Reitalmbachs über die Zeit wieder ausgeglichen worden sein. Eine mögliche Interpretation des ursprünglichen Hangverlaufes wird in Abbildung 6-1 gezeigt.

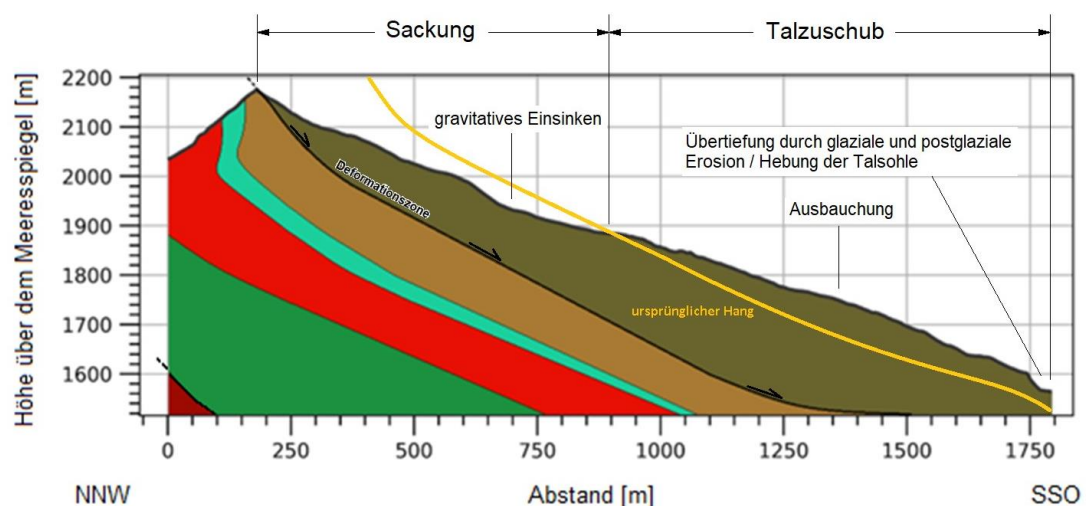


Abbildung 6-1 : Mögliche Interpretation des ursprünglichen Hangverlaufes für den Fall der postglazialen Massenbewegung am Rosskarkogel vom Rosskarkogelsattel (NNW) zum Reitalm (SSO).

Dabei handelt es sich um den Profilschnitt durch die postglaziale Massenbewegung aus

Kapitel 4.3.1, der um entsprechende Interpretationen erweitert wurde. Zu erkennen sind der für derartige Massenbewegungen typische Sackungsbereich und Talzus Schub mit Aufbauchung, aber auch die Erosion durch den Reitalmbach. Diese hatte vermutlich auch spätere Reaktivierungen im Böschungsbereich zur Folge. Der interpretierte ursprüngliche Hangverlauf zeigt die für glaziale Überprägung typische Ausbildung von Trogtälern (van Husen 1987). Wie die Ergebnisse der Arbeit zeigen, sind die im Verband abgerutschten Phyllite der Fusch-Formation im Bereich der heutigen Hütteggalm aufgefahren und wurden dort abgelagert. Dies könnte ebenfalls für diesen Bereich zu einer talzus Schubbedingten Aufschüttung und damit zum Aufstauen des hinteren Reitalmtals geführt haben. Dabei hat sich die Massenbewegung vermutlich langsam bewegt und ist am Gegenhang festgefahren. Durch die nachrutschende Masse wurde das abgerutschte Material weiter auf den Gegenhang geschoben. Anschließend erfolgte ein erneutes Einschneiden des Reitalmbachs entlang der Bachachse. Das Aufbranden der Phyllite der Fusch-Formation im Bereich der Hütteggalm wird in Abbildung 6-2 gezeigt.

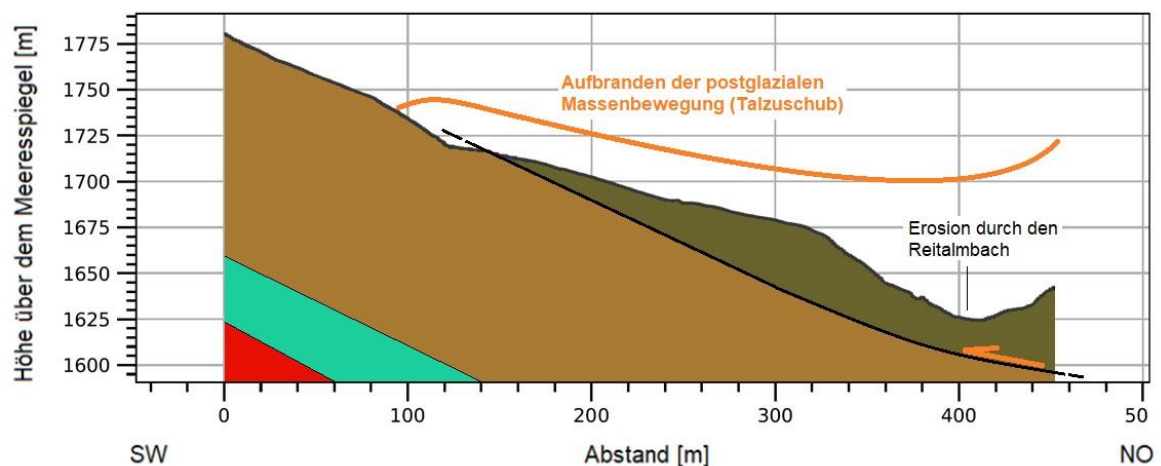


Abbildung 6-2 : Mögliche Interpretation des durch das Aufbranden der im Verband abgerutschten Fusch-Phyllite bedingten ursprünglichen Hangverlaufs im Bereich der Hütteggalm.

Hierzu wurde der Profilschnitt aus Kapitel 5.2.2 um entsprechende Interpretationen erweitert. Gezeigt wird die möglicherweise ursprünglich ausgeprägtere Mächtigkeit des aufgefahrenen Materials. Im Unterschied zur postglazialen Massenbewegung ergab für diesen Bereich bereits das Auffahren des Materials eine für Massenbewegungen typische Form. Trifft eine Interpretation, entsprechend Abbildung 6-2 zu, sollten auch ehemalige Reaktivierungen, des zuvor vermutlich auch mächtigeren abgelagerten Materials im Bereich dieser Talflanke oder des abgelagerten Materials auf der gegenüberliegenden Talseite, nicht ausgeschlossen werden. Diese könnten den eingeschnittenen Reitalmgraben erneut zugeschoben und so eventuell auch zu mehrmaligen Stauungen und Verlegungen des Reitalmbachs geführt haben. Der von Kaml (2024) nachgewiesene

Graphitgehalt des Fuscher-Phyllits im Bereich der Hüttegalm, der ausgeprägte Zerlegungsgrad und die noch unterhalb des Reitalmbaches verlaufende Deckengrenze sprechen im Fall der Reaktivierung der Hüttegalm für ein Versagen innerhalb der Fuscher-Phyllite. Jedoch führt nicht zuletzt die durch den Reitalmbach bedingte Erosion zu einem tieferen Einschneiden des Reitalmgrabens, der sich so auch weiter der unterlagernden Deckengrenze nähert und neben Zunahme der Hangerosion auch eine Schwächung des derzeit noch vorhandenen Widerlagers bewirken könnte. Die Bedingungen zum Zeitpunkt der Reaktivierung im Jahr 2019 waren dabei von sehr starkem und anhaltendem Wassereintrag geprägt.

## 6.8 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Insgesamt zeigt sich für die Situation im hinteren Reitalmgraben anhand der geologischen Karten, Profilschnitte, Datenauswertungen und Standsicherheitsanalysen dieser Arbeit sowie der Ergebnisse der Untersuchungen von Kaml (2024) ein klares Bild. So weisen sowohl Profilschnitt A-A' in Kapitel 5.2.1, als auch die Modelle der postglazialen Massenbewegung unterhalb des Rosskarkogels in Kapitel 5.8 auf die durch Talkschiefervorkommen gekennzeichnete Deckengrenze zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke als Gleithorizont hin. Die postglaziale Massenbewegung wurde von Exner (1956) als „abgerutschter Phyllit im Verband“ kartiert. Dies spricht ebenfalls für die Störungszone als Gleithorizont. Im Gegensatz dazu stehen die Beobachtungen im Bereich der Hüttegalm. Wie bereits in der Auswertung zu den Profilen B-B' und C-C' in Kapitel 5.2 beschrieben, liegt auch in diesem Bereich die Deckengrenze zwischen Flugkopf-Decke und Rauris-Decke mit einem Einfallswinkel von rund 30° relativ flach unterhalb der Oberfläche. Der Verlauf der Deckengrenze, aber auch die Lagerung der Phyllite unterhalb der Hüttegalm bestätigen die bereits von Valentin (2019) aufgestellte These des Auffahrens der im Rahmen der postglazialen Massenbewegung abgerutschten Fuscher-Phyllite. Im Bereich der Deckengrenze, die hier oberhalb der Hüttegalm zu Tage tritt, konnte kein Talkschiefer ausfindig gemacht werden. Dieser wurde auch von Exner (1956 und 1957) für diesen Bereich nicht erwähnt. Die Standsicherheitsanalysen weisen für diese Bewegung ebenfalls nicht auf die Deckengrenze als Gleithorizont, sondern auf ein Versagen innerhalb der Lithologie der Fuscher-Phyllite hin. Dies ist unter anderem auf den hohen Zerlegungsgrad, den von Kaml (2024) nachgewiesenen Graphitgehalt und die Erosion durch den Reitalmbach zurückzuführen. Als entscheidender auslösender Faktor der Reaktivierung im Jahr 2019 kann eine Kombination der genannten Eigenschaften mit dem beobachteten starken Wassereintrag



im Zeitraum des Ereignisses herangezogen werden.

## 6.9 Methodenkritik

Zum Abschluss der Schlussfolgerungen dieser Arbeit soll noch auf mögliche Mängel oder Unsicherheiten und Schwierigkeiten in den Durchführungen und Auswertungen hingewiesen werden, die sich im Rahmen dieser Untersuchung ergaben.

### 6.9.1 Geologische Karte

Die zum Kartieren des Untersuchungsgebiets vorteilhafteste Situation wurde im hinteren Reitalmgraben entlang des Kammes vorgefunden. Dort konnten die Lithologien gut über die gesamte Breite des Reitalmtals nachverfolgt werden. Trotzdem war es, wie auch von Exner (1957) beschrieben, zum Teil auch hier schwierig, ohne eine Vielzahl eventueller mineralogischer Untersuchungen, klare Grenzen zwischen den einzelnen Lithologien zu ziehen. Dennoch lässt sich beobachten, dass die im Zuge der Kartierung bestimmten lithologischen Grenzen weitgehend mit jenen aus den bereits verfügbaren Karten von Exner (1956) und Kreuss (2021) übereinstimmen. Im Bereich des Talbodens war die Aufschlussituation nur in den Gräben und teilweise entlang der Wege sowie der Forststraße für eine Kartierung günstig. Dies lag an der flächendeckenden Vegetation und der weitläufigen Überlagerung durch Moränenmaterial. Die in der Karte eingetragenen Deckengrenzen konnten bei den Kartierungsarbeiten im Rahmen dieser Arbeit lediglich im Kammbereich und oberhalb der Hütteggalm beobachtet werden. Daher wurden die weiteren Verläufe aus den bereits verfügbaren geologischen Karten übernommen. Der Versuch einer genauen Verfolgung des Verlaufs der Deckengrenzen wäre ratsam, um die im Rahmen der Arbeit von Kaml (2024) und der hier vorliegenden Arbeit erstellte geologische Karte des hinteren Reitalmtals zu überprüfen. Im Zeitraum der Kartierung erschwerten die Witterungsbedingungen die Arbeiten teilweise zusätzlich. Die bereits von Tauber (2020) durchgeführte zweiwöchige Kartierung ist in keinerlei Berichten, Mitschriften oder Ergebnissen erhalten geblieben. Daher konnten seine möglichen Erkenntnisse nicht in die Auswertungen einbezogen werden.

### 6.9.2 Profilschnitte

Bei den im Zuge dieser Arbeit angefertigten Profilschnitten handelt es sich lediglich um schematische Profile. Die lithologischen Schichtgrenzen wurden zum Teil aus größerer

Entfernung zur Profillinie herangezogen beziehungsweise herangerechnet und deren Verläufe anhand der Beobachtungen und vorhandenen geologischen Karten interpretiert. Ursache hierfür ist der Mangel an Aufschlüssen entlang der Profillinien. Eine Ausnahme bildet hierbei vor allem der Kambereich des Talkessels. Die Untergrundprofile konnten zudem nicht direkt im „QGIS“ erzeugt werden. Dies führt neben möglichen Fehlern in der Berechnung auch zu einer erheblichen Vergrößerung möglicher Messfehler mit der jeweiligen Distanz zum Messpunkt. Die in den geologischen Profilen in Kapitel 5.2 und in der geologischen Karte in Kapitel 5.1 gezeigte Deckengrenze konnte, wie bereits in Kapitel 6.9.1 beschrieben, bei den Kartierungsarbeiten, nur in den Kamm-Bereichen und oberhalb der Hüttegalm wiedergefunden werden. Die Beobachtungen stimmen in diesen Bereichen jedoch mit jenen der geologischen Karte der Umgebung von Gastein (Exner 1956) und dem Geofast-Kartenblatt (Kreuss 2021) überein. Deshalb wurde der weitere Verlauf aus diesen Karten übernommen und dementsprechend in den Profilschnitten eingetragen. Trotz dieser Einschränkungen geben die Profile einen Überblick über den lithologischen und strukturgeologischen Aufbau des Untergrundes des hinteren Reitalmtals.

### 6.9.3 Standsicherheitsanalyse

Die vor dem Erhalt der bodenmechanischen Kennwerte (Kaml 2024) im Rahmen dieser Untersuchung erstellten Modelle der postglazialen Massenbewegung und der Reaktivierung der Hüttegalm stellen lediglich Annäherungen dar. Sie sollen eine Hangstabilität im Grenzbereich abbilden und so das mögliche Versagen im Untergrund zeigen. Die anschließend ermittelten Kennwerte (Kaml 2024) wichen von den zuerst angenommenen Werten ab, zeigten in der erneuten Standsicherheitsanalyse jedoch ähnliche Ergebnisse. Die durchgeführte Modellierung in „Slide2“ und „Slide3“ verzichtet auf weitere Unterscheidungen der Eigenschaften innerhalb einer Lithologie. Auch mineralogische Zusammensetzungen, wie der Graphitgehalt des Fuscher-Phyllits, die Korngrößen sowie eine Unterscheidung massiver und lockerer Bereiche werden nicht berücksichtigt. Zudem erfolgte die Darstellung des geologischen Untergrundes anhand der angefertigten Profilschnitte. Daher wurden auch mögliche bereits darin enthaltene Abweichungen übernommen. Diese sollten in diesem Fall, aufgrund des Versagens im Bereich der obersten Schichten, jedoch keinen größeren Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Die Modellierung des geologischen Untergrundes erfolgte anhand angenommener, fiktiver Bohrlöcher. Die Lage beziehungsweise Tiefe der jeweiligen Lithologie wurde aus der erstellten geologischen Karte und den Profilschnitten über trigonometrische Funktionen errechnet. Der bereits dadurch entstehende Fehler wird

durch die automatisierte Ermittlung entsprechender Schichten im „Slide3“ weiter vergrößert. Das stellt im Fall des kleineren Areals der Hüttegalm kein erhebliches Problem dar. Es machte aber das Erstellen eines sinnvollen Modells der postglazialen Massenbewegung ohne eine mit entsprechendem Aufwand verbundene Vielzahl erstellter Bohrlöcher unmöglich.

#### 6.9.4 Hydrologische und meteorologische Daten

Trotz der großen Anzahl recherchierter Daten über einen langen Zeitraum, handelt es sich in den einzelnen Grafiken in Kapitel 5.5 um Werte unterschiedlicher Messstationen. So enthält der Datensatz der Niederschlagsmessstation in Hüttschlag (eHyd 2024) Niederschlagsdaten, jedoch keine entsprechenden Temperaturdaten. Diese werden von der Station nicht aufgenommen oder sind nicht zugänglich. Da auch die Pegelmessstation in Großarl nicht die Aufnahme meteorologischer Daten abdeckt, mussten hierfür die Daten der weiter entfernten meteorologischen Messstation in Bad Gastein herangezogen werden. Die Temperaturen entsprechen somit nicht zur Gänze jenen der höher liegenden Hüttegalm im Reitalmtal. Bei den Abflusswerten handelt es sich um Messwerte der Pegelmessstation in Großarl deren Einzugsgebiet sich hier bereits aus einem großen Teil des Großarlals zusammensetzt. Dieses Einzugsgebiet umfasst so, neben dem Abfluss des Reitalmbachs, beispielsweise auch jene des Hubalmbaches, des Karteisbaches und des Schrambaches. Vergangene Bewegungen wurden leider nicht aufgenommen und konnten somit nicht ausgewertet werden. Ausschließlich das Ereignis aus der Mitte der 60er Jahre ist, ohne genaueres Datum, aus Erzählungen bekannt. Hierzu konnten jedoch, aufgrund des nicht bekannten genaueren Datums der Bewegung, keine klaren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen definiert werden. Das Ereignis kann nicht mit ausreichender Sicherheit konkret datiert werden.

#### 6.9.5 Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg

Bei den gezeigten Klimamodellen (ÖKS15 2016a) in Kapitel 3.7 handelt es sich, wie bei solchen Modellen üblich, um vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. Sie weisen in diesem Fall, ungeachtet ihrer unbestreitbaren Nützlichkeit und ständigen Weiterentwicklung, auch Schwächen auf. Diese müssen bei einer Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden (ÖKS15 2016b). Die derzeitige Ungewissheit über zukünftige anthropogene Einflüsse, die Komplexität des Klimasystems an sich und die Beeinträchtigungen der Modelle führen zu einer möglichen Bandbreite an Ergebnissen. Dabei kann die reale zukünftige Klimaentwicklung, auch trotz eines großen Modell-

Ensembles, außerhalb einer simulierten Schwankungsbreite liegen (ÖKS15 2016b). Zudem stammen die herangezogenen Klimaszenarien aus dem Jahr 2016, weshalb auch eventuelle Veränderungen der modellierten Szenarien in den letzten 8 Jahren nicht berücksichtigt wurden. Die Klimaszenarien wurden daher lediglich der inhaltlichen Vollständigkeit halber und zum Vergleich mit den Auswertungen längerer Zeiträume hydrologischer und meteorologischer Daten herangezogen.

#### 6.9.6 In-Situ-Versuche und Laboruntersuchungen

Die Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen von Kaml (2024) nehmen zum Teil großen Einfluss auf die Ergebnisse der Standsicherheitsanalysen. Daher sollen die von ihm genannten Fehlerquellen und Unsicherheiten in der Ermittlung der Materialkennwerte hier kurz zusammengefasst und erweitert werden.

##### 6.9.6.1 In-Situ-Versuche

Die In-Situ-Versuche mittels Taschen-Drehflügelsonde und Taschen-Penetrometer konnten aufgrund der Ungenauigkeit und Bandbreite der Ergebnisse nicht herangezogen werden. Hierzu waren die Unterschiede der untersuchten Oberflächen zu groß, aber auch der Boden im Bereich der Hüttegalm entsprach nicht den notwendigen Bedingungen einer solchen Untersuchung. Diese stellt selbst im Idealfall nur eine Annäherung möglicher Kennwerte dar. Die angewandten In-Situ-Versuche werden im Normalfall herangezogen, um bindige Böden zu untersuchen. Die Anwendung im kaum bindigen Lockergestein liefert dadurch sowie durch die Vielzahl größerer Komponenten, die die Ergebnisse weiter beeinträchtigen, kaum verwendbare Werte. Daher wurden die erhaltenen Werte nur als erste Einschätzung betrachtet. Für die Standsicherheitsanalysen wurden die Ergebnisse des kleinen Rahmenscherversuchs abgewartet.

##### 6.9.6.2 Glühverlust

Die Glühverlust-Analyse, die von Kaml (2024) erarbeitet wurde, nimmt keinen Einfluss auf die Ergebnisse der hier beschriebenen Standsicherheitsanalysen. Kaml (2024) nennt hier als Methodenkritik die unvollständige Versuchsdurchführung zur Ermittlung des anorganischen Kohlenstoffs sowie das Vorhandensein von Kristallwasser in den untersuchten Mineralen.

##### 6.9.6.3 XRD-Analyse

Wie die Glühverlust-Analyse hat auch die XRD-Analyse von Kaml (2024) keinen

maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Standsicherheitsanalysen. Dennoch konnten auf diesem Wege die mineralogischen Zusammensetzungen der beprobten Lithologien bestimmt und auch der Graphitgehalt der Fuscher-Phyllite nachgewiesen und quantifiziert werden. Als kritisch zu betrachtenden Aspekt der Analyse nennt Kaml (2024) die Probenentnahme. Identifizierung und Quantifizierung der Mineralphasen hängen stark von der Auswahl der repräsentativen Probe ab. Dies betrifft in der Untersuchung der Fuscher-Phyllite vor allem den Graphit.

#### 6.9.6.4 Kleiner Rahmenscherversuch

Die von Kaml (2024) erhaltenen Ergebnisse des kleinen Rahmenscherversuchs der Fuscher Phyllite und des Talkschiefers wurden in der vorliegenden Arbeit zur abschließenden Standsicherheitsanalyse der postglazialen und reaktivierten Massenbewegung herangezogen. Da die Probenmenge, wie von Kaml (2024) beschrieben, nur für kleine Rahmenscherversuche ausreichte, mussten die Proben mit einer Maschenweite von 4 mm gesiebt werden. Seinen Erläuterungen nach erwies sich diese Methode für den stark zerscherten Talkschiefer als zielführend, zeigt aber diverse Unsicherheiten in den Ergebnissen für den Phyllit der Fusch-Formation. Das untersuchte Korngrößenspektrum beschreibt den lithologischen Untergrund der Hüttegalm nicht ausreichend, da dieser nicht ausschließlich auf stark zerlegte und erodierte Phyllite in diesem Korngrößensbereich aufgebaut ist. Der im Böschungsbereich der Hüttegalm aufgeschlossene dunkle Phyllit der Fusch-Formation zeigt, wie auch in der vorliegenden Arbeit in der entsprechenden Abbildung 5-5, ein breites Korngrößenspektrum, aber auch das Auftreten kompetenter Bereiche mit entsprechenden von den Laborergebnissen abweichenden Materialkennwerten. Daher wäre zur Ermittlung der Materialkennwerte des Fuscher-Phyllits ein großer Rahmenscherversuch, mit der Realität entsprechender Lagerung, oder für kompetentere Bereiche möglicherweise ein Triaxialversuch, zielführender. So könnte die Inhomogenität des die Hüttegalm unterlagernden Untergrundes besser berücksichtigt werden. (Kaml 2024)

## 7 Ausblick

Die weitere Entwicklung der Situation im hinteren Reitalmtal wird von fortschreitender Erosion und klimatischen Entwicklungen geprägt. Die zunehmende Erosion durch den Reitalmbach als Hauptursache des Versagens im Böschungsbereich der Hütteggalm sowie die Stabilität der Massenbewegung, werden von der weiteren Entwicklung von Temperatur und Niederschlag stark beeinflusst. Die beobachtete Zunahme dieser beiden Kennwerte in den letzten Jahrzehnten setzt sich den Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg (ÖKS15 2016a) zufolge weiter fort und bewirkt eine Steigerung des Wassereintrages. Dies ist unter anderem auf bereits vergangene, aber auch auf zukünftige Veränderungen der Vegetation, beispielsweise durch mögliche Sturmereignisse, zurückzuführen. Insgesamt könnte dies neben häufiger auftretender, extremer Sättigung der Fuscher-Phyllite und entsprechendem oberflächigen Abfluss, eine weitere Zunahme der Erosion durch den Reitalmbach bewirken. Diese Entwicklung würde weitere Reaktivierungen, vor allem des Bereiches der Hütteggalm, begünstigen. Aber auch weitere Areale der postglazialen Massenbewegung wären vermutlich davon betroffen. Zudem führt der fortschreitende Anstieg der Temperatur zum Rückgang möglichen Permafrosts. Daher sollte auch die weitere Entwicklung beobachtet, überwacht und dokumentiert werden. Hierzu anwendbare Maßnahmen werden in Kapitel 7.2 vorgestellt. Zusätzlich zu diesen Maßnahmen bieten sich weitere Untersuchungsschritte zur detaillierteren Bewertung der Situation im hinteren Reitalmtal an, die in Kapitel 7.3 vorgeschlagen werden. Mögliche Sicherungsmaßnahmen werden zwar in Kapitel 7.1 beschrieben, sind im hinteren Reitalmtal aufgrund hoher Kosten und schwerer Abschätzbarkeit der Wirksamkeit jedoch kaum umsetzbar. Daher müssen die aufgezeigten und illustrierten geologischen Prozesse wohl auch künftig in Kauf genommen werden. Durch die Beobachtung der weiteren Entwicklung könnte diese Einschätzung allerdings auch jederzeit einer neuen Bewertung unterzogen werden.

### 7.1 Mögliche Sicherungsmaßnahmen

Aufgrund der vorgefundenen Lithologien und der untersuchten Situation im hinteren Reitalmtal, aber auch fehlender direkt betroffener größerer Infrastruktur, stellt eine mögliche wirtschaftliche Sicherung in diesem Fall eine Herausforderung dar. Trotz dieser Einschätzung ist die Ansprache möglicher Sicherungsmaßnahmen wichtig und Teil der



Beurteilung der Situation im hinteren Reitalmtal. Zudem spielt hier auch die direkt am Talausgang liegende Ortschaft Hüttschlag eine bedeutende Rolle. Eine mögliche größere Mobilisierung könnte eine erhebliche Gefahr darstellen. Das zeigt auch die Ereignisdokumentation des Reitalmbaches (Gotthalseder 2011, 2012; Sitter 2011a, 2011b, 2011c, 2011d, 2011e, 2011f, 2011g) in Kapitel 2.4. Eine entsprechende Mobilisierung, auch hinsichtlich weiter voranschreitender Erosion könnte zum Zuschub des Reitalmtals führen, was durch ein Aufstauen des Reitalmbachs auch beträchtliche Folgen im Bereich der Ortschaft Hüttschlag haben könnte. Die 1974 im Reitalmtal errichtete Retentionssperre (Gotthalseder 2012) ist für diesen Fall ein wichtiges Sicherungsbauwerk und kann die Abflussrate eines eventuellen Rückstaus steuern. Jedoch könnte der entstandene Talzuschub durch eine Verlagerung hin zur Sperre eine Verklausung und einen entsprechend beträchtlichen Rückstau des Reitalmbaches zur Folge haben. Wirtschaftlich betrachtet und durch die Gegebenheiten im hinteren Reitalmtal begrenzt, bieten sich einige Sicherungsmaßnahmen an, um die Gefahr möglicher Folgen einer erneuten entsprechend größeren Mobilisierung einzugrenzen und die fortschreitende Erosion durch den Reitalmbach und oberflächiger Entwässerung zu verlangsamen. Auch die bereits in Kapitel 5.5.3.1 gezeigte Zunahme des Niederschlags in den letzten Jahrzehnten und die in den Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg der ÖKS15 (2016a) gezeigte weitere Anstieg der Niederschlagsmengen bedeuten ebenfalls eine weitere Zunahme der Relevanz des Faktors der Erosion. Deshalb wären hier gezielte gegenwirkende Maßnahmen mit Sicherheit sinnvoll. Dennoch gestaltet sich der Einsatz technischer Maßnahmen zur Stabilisierung des Untergrundes, auch aufgrund des Ausmaßes der Rutschungen, sehr schwierig (Valentin 2019). Daher müssen die hier aufgezeigten geologischen Prozesse, auch aufgrund der schwierigen Abschätzbarkeit der Sicherheit möglicher Gegenmaßnahmen mit entsprechendem Kostenfaktor, in Kauf genommen werden.

#### 7.1.1 Sicherung der Zufahrtsstraße

Bis zu einer Furt unmittelbar vor der Hütteggalm, verläuft die Zufahrtsstraße im Reitalmtal entlang der östlichen Talseite des Reitalmtals. Im Bereich der Reitalm verläuft die Straße über die postglaziale Massenbewegung. An der Furt überquert die Straße den Reitalmbach und verläuft, wie bereits in Abbildung 1-5 ersichtlich, oberhalb der erodierten Böschung zur Hütteggalm. Die letzte Reaktivierung hatte, dem Ereignisbericht von Valentin (2019) folgend, auch die Entstehung von Rissen und damit vorübergehend nicht mögliche Passierbarkeit der Straße zur Folge. Für diesen letzten Bereich der Zufahrtstraße würde sich, aufgrund der voranschreitenden Erosion, eine weitere

Verlegung in den Hang und parallele Sicherung der Straße anbieten. Diese Sicherung könnte beispielsweise durch eine Wiederaufforstung beziehungsweise die Wiederherstellung der Vegetation zur Verminderung der oberflächigen Erosion erreicht werden. Dazu sollte jedoch auch eine Stabilisierung des Fußbereiches, der durch den Reitalmbach erodierten Böschung erfolgen. Eine entsprechende Stabilisierung des Hanges könnte durch Anschüttungen, bauliche Maßnahmen sowie durch die zuvor angesprochenen Wiederherstellung der Vegetation erreicht werden (Genske 2021). Diese Maßnahmen stellen vor allem eine Begrenzung des von Kaml (2024) untersuchten durch Erosion gesteuerten Flächenverlusts dar. Sie wären dabei aber auch nur in Kombination mit einer entsprechenden Sicherung des Reitalmbachs dauerhaft anwendbar. Zusätzlich käme die Anwendung dieser Maßnahmen im Bereich der Zufahrtsstraße ohne weitere Maßnahmen im Reitalmbach und im Böschungsbereich der Hüttegalm lediglich einer kleinen Verminderung des Gefahrenpotentials einer erneuten Reaktivierung gleich. Eine größere Mobilisierung könnte dennoch zu weiteren Beschädigungen oder einer Zerstörung der Zufahrtsstraße führen.

#### 7.1.2 Sicherung des Reitalmbaches und Verminderung der Erosion

Um die Erosion im Bereich der Hüttegalm einzugrenzen beziehungsweise effektiv zu verlangsamen, sind bauliche Maßnahmen im hier verlaufenden Reitalmgraben unumgänglich. Vor allem das fortschreitende Einschneiden des Reitalmbachs in den Reitalmgraben, auch bis zur hier verlaufenden Deckengrenze, würde, neben dem steigenden Flächenverlust, wohl eine weitere Schwächung des Hanges bedeuten. Die Untersuchungen von Kaml (2024) haben gezeigt, dass die durch den Reitalmbach verursachte Erosion in ihrer stetigen Zunahme ein schrittweises Versagen der Böschungskante verursacht. Das ließe sich auch für einige in Kapitel 5.8 gezeigte Modelle interpretieren. Um diese Erosion einzugrenzen und die Wirksamkeit möglicher Maßnahmen im Böschungsbereich zu erhöhen, würde sich eine Sicherung der Bachsohle des Reitalmbaches anbieten. Diese Sicherung könnte beispielsweise durch eine Auspflasterung der Bachsohle erfolgen. Diese würde die Erosion in diesem Bereich begrenzen. Die unterhalb der hier wenige Zehner-Meter unterhalb der Oberfläche verlaufenden Deckengrenze lagernden Phyllite der Brennkogel-Formation sind oberhalb der Hüttegalm als kompaktes Gestein aufgeschlossen. Sie könnten in Kombination mit der Begrenzung der Erosion durch den Reitalmbach eine Hangstabilisierung über bauliche Maßnahmen mit einer entsprechenden Ankerung ermöglichen, deren Wirksamkeit aufgrund der überlagernden, möglicherweise kriechenden und stark zerlegten Phyllite der Fusch-Formation, jedoch kaum garantiert werden könnte. Auch eine

Bodenvernagelung durch in den Boden gewachsenen Bewehrungselementen aus Stahl oder Kunststoffstäben könnte die Zug- und Scherfestigkeit des Bodens steigern. Diese Nägel können Biegemomente, aber auch Zug- und Scherkräfte aufnehmen (Koos 2017). Hier stellt sich jedoch die Frage, ob die genannten Maßnahmen, auch aufgrund der hohen Kosten und schwierigen Abschätzbarkeit ihrer Wirksamkeit, überhaupt als wirtschaftlich angesehen werden können.

### 7.1.3 Maßnahmen zur Entwässerung

Ein weiterer schwächender Faktor ist die durch den Graphitgehalt der Fuscher-Phyllite bedingte stauende Wirkung. Diese bedeutet im Falle einer entsprechenden Sättigung eine Herabsetzung des Reibungswinkels, führt aber auch zu erhöhter oberflächiger Erosion. Als eine Maßnahme zur Verminderung der Auswirkungen dieser oberflächigen Entwässerung würde sich eine Wiederaufforstung, vor allem gefährdeter Bereiche, aber auch eine gezieltere Entwässerung des Hanges anbieten. Dies stellt auch eine primäre Maßnahme für eine sinnvolle Wiederherstellung der Vegetation dar. Die Auswirkungen mangelnder Vegetation auf die Entwässerung des Hanges, vor allem der der Hüttegalm gegenüberliegenden Talseite, wurde von Kaml (2024) angesprochen und untersucht. Als Entwässerungsmaßnahme könnte die Errichtung von Sammelgräben im Bereich der Hüttegalm, aber auch bereits oberhalb der Alm Anwendung finden. So könnte, vor allem auch bei starken Niederschlagsereignissen, Oberflächenwasser zum unterhalb der Hüttegalm verlaufenden Reitalmbach geleitet werden. Dies würde neben einer Verminderung der oberflächigen Erosion auch die Sättigung der Phyllite der Fusch-Formation verringern beziehungsweise verzögern (Genske 2021). Mögliche Drainagen als Maßnahme zur Entwässerung des Hanges sind in diesem Bereich aufgrund der geologischen Situation und wahrscheinlichen Grenzstabilität des Hanges nur schwer umsetzbar und stellen auch aufgrund entsprechend hoher Kosten wohl keine wirtschaftliche Sicherungsmaßnahme dar.

### 7.1.4 Sicherung der postglazialen Massenbewegung

Die postglaziale Massenbewegung im hinteren Reitalmtal weist nach den Erkenntnissen von Kaml (2024) kaum größere Bewegungen auf. Entsprechende Beobachtungen von Bewegungen sind gemäß seiner Arbeit auf kleinere Ausbrüche im Bereich der Gössenwand und kleinere Bewegungen aktiver Bereiche, verursacht durch die Erosion des Reitalmbaches, begrenzt. Kaml (2024) weist hierzu für diese betroffenen Bereiche auf die aufgrund eines Windschlags im Jahr 2002 verringerte Vegetation hin. In diesem

Bereich könnte bereits eine Wiederaufforstung eine zur Sicherung ausreichende Maßnahme darstellen. Eine mögliche Mobilisierung im Bereich der Reitalm könnte durch Talzus Schub und entsprechende Stauung des Reitalmbaches erhebliche Folgen haben, scheint aber unwahrscheinlich.

## **7.2 Mögliche Überwachungsmaßnahmen**

Auch der Einsatz verschiedener Maßnahmen zur Überwachung der postglazialen Massenbewegung und des reaktivierten Bereiches der Hüttegalm stellt, unter Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, eine Herausforderung dar. Hier könnten jedoch beispielsweise regelmäßige Meldungen von Beobachtungen durch die ortsansässige Bevölkerung und Hüttenwirt\*innen eine wertvolle und kostengünstige Möglichkeit zur laufenden Überwachung darstellen. Zusätzlich sollte auch bei weiteren Bewegungen eine Aufnahme der Beobachtungen und eingehende Untersuchung erfolgen. So könnte eine möglichst vollständige Ereignisdokumentation geschaffen werden, die auch eventuelle Änderungen der Größenordnung und Häufigkeit der Bewegungen des reaktivierten Bereichs aufzeigen würde. Eine in anderen Fällen vorhandene, hier aber verständlicherweise fehlende Berichterstattung vergangener historischer Reaktivierungen, wie jener der 1960er Jahren, würde eine Bewertung der Entwicklung des reaktivierten Bereiches, aber auch das Erkennen möglicher Faktoren erleichtern. Dazu gehören beispielsweise hydrologische, meteorologische und seismische Bedingungen. Da, wie von Kaml (2024) in seiner Arbeit gezeigt, für eine Aufnahme eventueller Bewegungen der Hüttegalm nötige Reflexionspunkte zur Anwendung von TerraSAR-X fehlten, könnte hier über eine mögliche Anbringung fester Reflexionspunkte nachgedacht werden. Auch eine fortlaufende Auswertung zukünftiger Orthofotos nach der von Kaml (2024) gezeigten Methode könnte sich als nützliches Mittel zur Ereignisdokumentation erweisen. Eine mögliche Überwachung oder Aufnahme hydrologischer und meteorologischer Daten im Reitalmtal wäre eine nützliche Maßnahme zur genaueren Bestimmung der Reaktivierungsbedingungen und zur Vervollständigung der Ereignisdokumentation.

## **7.3 Weitere Untersuchungsmöglichkeiten**

Zur weiteren Analyse der Situation im hinteren Reitalmtal und zur Überprüfung und Erweiterung der vorliegenden Ergebnisse bieten sich weitere potenzielle Untersuchungsmöglichkeiten an.

### 7.3.1 Laboruntersuchungen

Wie von Kaml (2024) beschrieben, wurde die Analyse des Glühverlustes nur bis zu einer Temperatur von 550°C durchgeführt. Daher zeigen die Ergebnisse nur den Glühverlust durch Verglühen des organischen Kohlenstoffs. Hinzu kommt der durch Kristallwasser bedingte Glühverlust. Eine LECO-Analyse (Verbrennung im Hochfrequenzofen der Laboratory Equipment Corporation) zur genaueren Bestimmung des Kohlenstoffgehalts war für diese Untersuchung aufgrund technischer Probleme des Geräts nicht möglich. Daher wurde auf die Glühverlust-Analyse zurückgegriffen. Neben einer möglichen LECO-Analyse wäre hier auch eine weitere Glühverlust-Analyse, unter Ausschluss des Kristallwassers und zusätzlich höherer Temperatur, zur Abschätzung des Graphitgehaltes der Fuscher-Phyllite im Bereich der Hüttegalm, sinnvoll. Zudem würde eine mehrfache Beprobung möglicherweise die Verteilung des Graphits in diesem Bereich zeigen. Diese würde weiteren Einfluss auf die Wasserwegigkeit und Verteilung schwächerer Lagen nehmen. Gemäß Kaml (2024) könnte bei einer größeren Probenmenge ein Großrahmenscherversuch durchgeführt werden. Da dabei nicht nur Korngrößen von bis zu 4 Millimetern im Durchmesser untersucht werden, würde ein solcher Großrahmenscherversuch zu weitaus genaueren und realitätsnäheren Ergebnissen für die einzelnen Bodenkennwerte, auch unter Berücksichtigung der entsprechenden Lagerung führen und somit eine adäquatere Standsicherheitsanalyse ermöglichen.

### 7.3.2 Hydrologische, meteorologische und seismische Daten

Eine weitere Untersuchung der hydrologischen und meteorologischen Daten, besonders auch im Falle zukünftiger erneuter Aktivierungen, aber auch eine weitere Betrachtung der Bedingungen eventueller nicht aufgenommener früherer Reaktivierungen, könnte ein wichtiger Schritt zu einer möglichen Vorhersage sein. Anhand dieser Daten ließe sich unter Umständen auch ein Warnsystem für erneute Aktivierungen entwickeln. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgrund fehlenden Zugangs nicht ausgewerteten seismischen Daten der umliegenden seismischen Messstationen könnten und sollten, trotz des unwahrscheinlichen Einflusses auf das Versagen, im Rahmen einer solchen Untersuchung zur Vervollständigung der Ereignisdokumentation ausgewertet werden.

### 7.3.3 Bohrkern-Analyse

Für die genauere Bestimmung der unterlagernden Schichten, inklusive des Talkschiefers der Störungszone und der genaueren Mächtigkeiten der Massenbewegung wäre eine Durchführung einzelner Bohrungen und eine entsprechende Auswertung zielführend.

Zudem könnten auf diesem Weg realitätsgetreuere Modelle erstellt und ausgewertet werden. Die dabei anfallenden Kosten und die schwierige Zugänglichkeit mit entsprechendem Gerät im Gelände sprechen dennoch gegen eine derartige Untersuchung.

#### 7.3.4 TerraSAR-X

Eine detaillierte Auswertung der auch von Kaml (2024) gezeigten TerraSAR-X-Daten und Sentinel-Daten, im Idealfall mit einer ausreichenden Anzahl an Reflexionspunkten auch im Bereich der Hütteggalm, würde ein sehr gutes Gesamtbild der Situation im hinteren Reitalmtal ermöglichen. Diese zudem kostengünstige Untersuchungsmöglichkeit wäre der wohl interessanteste nächste Schritt einer möglichen weiteren Untersuchung der Reaktivierung dieser postglazialen Massenbewegung.



# Literaturverzeichnis

- ALPENVEREIN, Ö. (2016): Hüttschlag. Almen und Bergmähder im Großarlal. In: Bergsteigerdörfer. URL: <https://www.bergsteigerdoerfer.org/126-0-Ueber-das-Bergsteigerdorf-Huettschlag.html>, zuletzt geprüft am: 05.02.2024.
- BALDENHOFER, K. (2023): Lexikon des Agrarraums. Viehtritte. URL: <https://www.agrarraum.info/lexikon/viehtritte>, zuletzt geprüft am: 20.02.2024.
- BERNET, J. (2006): Gravitative Massenbewegungen. GRIN-Verlag.
- BOSCHER, A. (2018): Die Sperre bedeutet Sicherheit für Großarl. Salzburger Nachrichten. URL: <https://www.sn.at/salzburg/chronik/die-sperre-bedeutet-sicherheit-fuer-grossarl-36916750>, zuletzt geprüft am: 05.02.2024.
- BUTTON, E., BLÜMEL, M. (2004): Charakterization of Phyllitic and Schistose Rock Masses. From System Behaviour to Key Parameters. In: EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium.
- EBNER, M. (2013): Geotechnisch-geologische Untersuchung einer großen, kriechenden Massenbewegung am Beispiel Graukogel in Bad Gastein. Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz.
- EGGER, D. (2012): Untersuchungen zur Böschungsstabilität mittels FE-Methode. Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz.
- EHYD (2024): Hydrologische und meteorologische Datensätze. Bundesministerium für Land-, Forst-, Regionen- und Wasserwirtschaft. URL: <https://ehyd.gv.at/>, zuletzt geprüft am: 03.03.2024.
- EIDA (2023): Seismische Messstationen und Daten. European Integrated Data Archive. URL: <https://www.orfeus-eu.org/data/eida/>, zuletzt geprüft am: 05.02.2024.
- EXCEL DASHBOARDS (2024): Excel Tutorial. Trendlinien in Excel. URL: <https://excel-dashboards.com/de/blogs/blog/excel-tutorial-what-is-a-linear-trendline-in-excel>, zuletzt geprüft am: 01.03.2024.
- EXNER, C. (1951): Tauernfenster (Gastein-Mallnitz). In: Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt (Sonderheft).
- EXNER, C. (1956): Geologische Karte der Umgebung von Gastein. Im Verlag der Geologischen Bundesanstalt Österreich, Wien.
- EXNER, C. (1957): Erläuterungen zur geologischen Karte der Umgebung von Gastein. Im Verlag der Geologischen Bundesanstalt Österreich.
- GENSKE, D. (2021): Ingenieurgeologie. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- GLADE, T. (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. In: Geografische

- Rundschau (54(1)), S. 38–45.
- GLADE, T. (2014): Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel (Band 2), 557-600.
- Google (2023): Google Earth - Luftbild Österreich. Landsat / Copernicus.
- GOTTHALMSEDER, P. (2011): Ereignismeldung Wasser 2009. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- GOTTHALMSEDER, P. (2012): Ereignismeldung Wasser 2012. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- HAGG, W. (2020): Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie. Springer-Spektrum. 1. Aufl. Springer-Verlag, Deutschland, Berlin, Heidelberg.
- HEJL, E., BRAUNSTINGL, R., PESTAL, G., SCHUSTER, R. (2009): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Salzburg. Geologische Bundesanstalt Österreich.
- HIGHLAND, L., BOBROWSKY, P. (2008): The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides. Landslide Program. National Landslide Information Center.
- HOCHLEITNER, R. (2017): Welcher Stein ist das? 3. Aufl. Franckh-Kosmos-Verlag.
- HÜBL, J., CHIARI, M., KOGELNIG, A., SCHEIDL, C. (2009): Die Wildbachereignisse im Sommer 2009. Detailbericht Reitalpsbach. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- KAML, G. (2024): Analyse der Bewegung, der lithologischen Eigenschaften und mechanischen Kennwerte der Massenbewegungen im hinteren Reitalmtal. Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität Graz.
- KOLYMBAS, D. (2007): Geotechnik. Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- KOOS, M. (2017): Rutschung Gumpenberg: Geologisch-geotechnische Untersuchung. Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz.
- KREUSS, O. (2021): Geofast Kartenblatt 155 - Bad Hofgastein. Verlag der Geologischen Bundesanstalt, Wien.
- LANG, H.; HUDER, J.; AMANN, P.; PUZRIN, A. (2007): Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 9. Aufl. Springer-Verlag.
- LFV (2017): Hochwassereinsätze in Großarl. Landes-Feuerwehr-Verband Salzburg. URL: <https://www.lfv-sbg.at/blog/2017/07/23/hochwassereinsaetze-in-grossarl/>, zuletzt geprüft am: 05.02.2024.
- LOTTER, M., HABERLER, A. (2013): Geogene Naturgefahren - 978-3-540-68968-3. Geologische Bundesanstalt Österreich. In: Berichte GBA (100).
- MICROSOFT CORPORATION (2016): Microsoft Excel.
- MÜLLER, B., PIPPIG, U. (2013): Vorstellung von praktikablen geotechnischen

- Klassifikationen der Festgesteine und Festgebirge an Beispielen aus der Praxis des Fels- und Tunnelbaues. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen München 2013.
- ÖKS15 (2016A): Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg bis 2100. Klimaszenarien für Österreich.
- ÖKS15 (2016B): Klimaszenarien für Österreich bis 2100. Klimaszenarien für Österreich.
- ORF SALZBURG (2019A): Großer Felssturz in Hüttschlag. Österreichischer Rundfunk Salzburg. URL: <https://salzburg.orf.at/v2/news/stories/2972539/>, zuletzt geprüft am: 19.12.2023.
- ORF SALZBURG (2019B): Hüttschlag: Lage nach Felssturz angespannt. Österreichischer Rundfunk Salzburg. URL: <https://salzburg.orf.at/stories/3020136/>, zuletzt geprüft am: 19.12.2023.
- ORF SALZBURG (2019C): Landesgeologe erwartet weitere Felsstürze. Österreichischer Rundfunk Salzburg. URL: <https://salzburg.orf.at/stories/3005841/>, zuletzt geprüft am: 19.12.2023.
- PEER, H., ZIMMER, W. (1980): Geologie der Nordrahmenzone der Hohen Tauern (Gasteiner Ache bis Saukarkopf-Großarlal). Geologische Bundesanstalt Österreich. In: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt (123/2), S. 411–466.
- PESTAL, G. (2005): Geologischer Bau des Tauernfensters - Erläuterungen zu Blatt 182 Spittal a. d. Drau. Geologische Bundesanstalt Österreich.
- PESTAL, G., HELLERSCHMIDT-ALBER, J. (2011): Bericht 2009 und 2010 über geologische Aufnahmen auf 154 Rauris 142. Geologische Bundesanstalt Österreich. In: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt.
- PIPPAN, T. (1954): Vergleichende geologisch-morphologische Untersuchungen in den drei Klammern des östlichen Tauernnordrandes unter besonderer Berücksichtigung des Problems der Klamm- und Stufenbildung. In: Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien (47), S. 121–140.
- PROCHASKA, W. (1986): Talk- und Leukophyllitbildung als Folge hydrothermalen Metasomatose. In: Mitteilung der österreichischen geologischen Gesellschaft, S. 167–179.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2023A): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 3.18.3 Zürich.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2023B): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 3.32.3 Lima.
- ROCSCIENCE (2023A): Slide2 (Version 9.030).
- ROCSCIENCE (2023B): Slide3 (Version 3.023).
- SaGis (2021): Laserscan des Arbeitsgebiets. Salzburg GIS - Land Salzburg.

- SALZBURGER NACHRICHTEN (2017): Nach den Unwettern: Die Hilfe kam in Großarl an. Salzburger Nachrichten. URL: <https://www.sn.at/salzburg/chronik/nach-den-unwettern-die-hilfe-kam-in-grossarl-an-20773402>, zuletzt geprüft am: 05.02.2024.
- SALZBURGER NACHRICHTEN (2019): Großarlal: Wieder großer Felssturz in Hüttschlag. Salzburger Nachrichten. URL: <https://www.sn.at/salzburg/chronik/video-grossarlal-wieder-grosser-felssturz-in-huettschlag-78689290>, zuletzt geprüft am: 19.12.2023.
- SCHARF, A., ZIEMANN, M., HANDY, M., SCHMID, S. (2013): Peak-temperature patterns of polyphase metamorphism resulting from accretion, subduction and collision (eastern Tauern Window, European Alps). A study with Raman microspectroscopy on carbonaceous material (RSCM). In: Journal of Metamorphic Geology.
- SCHÖN, J. (1996): Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of Petrophysics. In: Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration (18).
- SCHURK, L. (1915): Der Flugkogelgneis aus dem Hochalm-Ankogelmassiv. Geologische Bundesanstalt Österreich. In: Mineralog. u. petrogr. Mitt. XXXIII.
- SIMPKINS KENDRICK, J. (1989): The box plot. A simple visual method to interpret data. In: Annals of Internal Medicine.
- SITTER, F. (2011A): Ereignismeldung Wasser 1890. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- SITTER, F. (2011B): Ereignismeldung Wasser 1929. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- SITTER, F. (2011C): Ereignismeldung Wasser 1933. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- SITTER, F. (2011D): Ereignismeldung Wasser 1949. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- SITTER, F. (2011E): Ereignismeldung Wasser 1966. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- SITTER, F. (2011F): Ereignismeldung Wasser 1972. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- SITTER, F. (2011G): Ereignismeldung Wasser 1975. Wildbach und Lawinenverbauung Österreich.
- STRASSER, A. (1989): Die Minerale Salzburgs. Eigenverlag.
- STURM, R. (1999): Wie ist das Tauernfenster entstanden? In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Nationalpark Hohe Tauern (5), S. 241–259.
- TAUBER, F. (2020): Der komplexe Bergrutsch am Rosskarkogel. Analyse der Faktoren der Ursprungsdynamik und der Reaktivierung. (Unvollendete Masterarbeit). Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität Graz.
- VALENTIN, G. (2019): Rutschung bei der Hütteggalm. Gemeinde Hüttschlag.

VAN HUSEN, D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. Aus der geologischen Geschichte Österreichs - Populärwissenschaftliche Veröffentlichungen der geologische Bundesanstalt Österreich.

ZAMG (2020): Seismische Beobachtungen 2019. (Heutige Geosphere Austria).

ZANGERL, C., PRAGER, C., BRANDNER, R., BRÜCKL, E., EDER, S., FELLIN, W., TENTSCHERT, E., POSCHER, E., SCHÖNLAUB, H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. In: Geo. Alp. (Vol. 5), S. 1-51.



# Anhang - Geologische Karte

