



Gregor Weichselbaumer, BSc

**Einschätzung der räumlichen Tiefenvariation
von Erdrutschungen mit Verschiebungsmessungen
am Beispiel Blaubachgraben (Krimml, Salzburg)**

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Erdwissenschaften – Vertiefung Engineering Geology

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. **Qian Liu**

Institut für Angewandte Geowissenschaften

sowie

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Viktor Kaufmann**

Institut für Geodäsie

Graz, März 2017

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 indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

DANKSAGUNG

Steht man erst einmal am Ende des Studiums, kann man mit Freude zurückblicken und Stolz sein, einen so wertvollen Lebensabschnitt gemeistert und abgeschlossen zu haben. Der Dank für diesen oft sehr energieraubenden Weg gilt allen voran meinen Eltern und meiner Schwester Katharina, die mich stets in meinen Entscheidungen unterstützt und mir auch in schwierigen Zeiten zur Seite gestanden sind.

Des Weiteren danke ich meinen Kommilitonen, Dozenten und Professoren auf der Technischen Universität Graz, allen voran meinem Betreuer Dr. Qian Liu, für das exzellente Umfeld rund um das Masterstudium. Sie erleichterten mir durch Kompetenz und Freundlichkeit stets den Zugang zum Lerninhalt. Durch das beinahe familiäre Verhältnis am Institut für Angewandte Geowissenschaften entstanden freundschaftliche Verbindungen, die hoffentlich auch noch nach dem Studium Bestand halten werden. Weiters möchte ich meinem Zweitbetreuer Dr. Viktor Kaufmann (Institut für Geodäsie) danken, welcher mir unzähliges Datenmaterial sowie das nötige Know-How aus dem Bereich der Geodäsie vermittelt hat.

Meinem Vater Dipl.-Ing. Christof Weichselbaumer sowie Mag. Oliver Montag (OM Ziviltechnik Geologie | Mag. Oliver Montag) danke ich für die Möglichkeiten, mich fachlich im beruflichen Umfeld bei diversen Praktika weiter zu entwickeln und meine Interessen zu fördern. Die Tätigkeiten in den Ferien haben mir immer sehr viel Freude bereitet und ich konnte dabei stets Erlerntes praktisch anwenden und etwas Neues dazulernen.

Ein spezieller Dank gilt Mag. Franz Brunner, der sich netterweise bereiterklärt hat diese Masterarbeit Korrektur zu lesen.

Meiner Schwester Katharina Weichselbaumer danke ich für die tatkräftige Hilfe bei der Modellierung der Tiefenwerte sowie beim mühsamen Eintippen der Messwerte. Ohne ihr mathematisches Wissen hätte ich diverse Problemstellungen mit Sicherheit nicht selbstständig lösen können. Ich bin davon überzeugt, dass noch viele weitere Personen bei ihr im Mathematikunterricht von ihren unglaublichen Fähigkeiten profitieren werden.

Danke an alljene, die in dieser Danksagung nicht namentlich erwähnt wurden. Freunde, Bekannte und Verwandte – es ist schön Euch in meinem Leben zu haben.

Abschließend möchte ich diese Arbeit meinem Großvater Florian Huemer-Kals widmen, der stets bekräftigte, wie sehr ihn mein Studium und die weiteren anwendbaren Möglichkeiten damit interessieren. Danke Opa, dass du mir mit unseren spannenden Diskussionen stets das Gefühl vermittelt hast, die richtige Studienrichtung gewählt zu haben.

Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit wurden die Zusammenhänge von oberflächlichen, morphologischen Geländestrukturen mit der Mächtigkeit einer Massenbewegung im Blaubachgraben bei Krimml untersucht.

Anfänglich wurden bestehende Arbeiten, welche den Rutschkörper in der jüngeren Vergangenheit behandelt haben, zusammengefasst und anschließend die gängigsten und verfügbaren Methoden zur weiteren Untersuchung der Rutschung zusammengetragen. Der Kern dieser Arbeit stellt sicher die detaillierte Kartierung des Untersuchungsgebiets sowie die Analyse der Messdaten aus den geodätischen Vermessungen einer Forschungsgruppe der Technischen Universität Graz dar.

Im Gelände wurden sämtliche oberflächlichen Erscheinungen und Aufschlüsse kartiert und mittels Primärkartenmaterial erfasst. Später wurden diese Handkarten in digitale Geländemodelle sowie Höhenschichtlinienkarten übertragen. Dabei wurden die untergeordneten, oberflächlich begrenzten Rutschungen eingetragen und in mehrere große Körper zusammengefasst.

Als Ziel dieser Arbeit wurde vorab die Erkundung des kinematischen Verhaltens der Massenbewegung sowie deren Orientierung und Lage ausgegeben. Anhand eines Modells konnten schließlich Tiefenangaben bzw. Mächtigkeiten der einzelnen Bereiche errechnet werden. Aus diesen Werten wurde bei ausreichender Datenlage die Form der Gleitfläche im Untergrund rekonstruiert. Im oberen Bereich wurden Tiefenangaben von ca. 16 m ermittelt. Die Mächtigkeiten nehmen folglich talwärts zu, wobei die Maximalwerte um 30 m pendeln.

Schlussendlich wurden im Diskussionsabschnitt kurz die wahrscheinlichen kinematischen Bewegungsabläufe besprochen, welche in den höheren Regionen der Alm- und Wiesenbereiche auf Rotationsbewegungen beschränkt sind. Dies wurde durch die Messwerte an den einzelnen Punkten deutlich, da diese hauptsächlich eine vertikale Verschiebung aufweisen und die horizontalen Bewegungen gering sind. Im unteren Bereich nahe der Jagdhütte dominieren jedoch horizontale Bewegungen, was eine Translationsgleitung als wahrscheinlichste Bewegungsart ausweisen würde.

ABSTRACT

Keywords: Landslide – Kinematics – RTK-GPS – Depths Estimation -

The discussion of the importance of landslide investigation increases in geology, geotechnics and also in political and social terms to protect civilization and reduce risk. Shallow landslides often occur after heavy rainfalls, thunderstorms or earthquakes due to changing pore water conditions and increase drastically in recent times of climate change.

Usually the determination of depth and volume of landslides is more difficult and affords statistical modelling or difficult formulas. This master thesis shows how remote sensing systems and the analysis of geomorphological characteristics and surface displacements can be used to determine kinematics, geometry and dimension - especially depth.

In this case there was used a digital elevation model (DEM) to compute the geometry and the depth of a shallow landslide in Krimml, Salzburg. Furthermore absolute surface displacements were quantified by real time kinematic (RTK) GPS based fix point measurements during a time period from 2001 to 2016. The so called Blaubach landslide was also geologically mapped in several field trips. Currently there are existing several studies concerning the sciences of geology, geotechnics, civil engineering and geodesy. The main part of this master thesis consists of the determination of landslide depth via surface displacements and material parameters.

The depth of the landslide mass in Blaubachgraben near Krimml was investigated by the methods of a viscous flow model by HANDWERGER ET AL. (2015) and a sliding plane construction by CARTER & BENTLEY (1985). For the main landslide body was estimated a thickness range from 12 to 20 meters in beneath the headscarp area and about 30 meters in the mass accumulation area. The sliding planes of the shallow landslides which occur after seasonal events and thunderstorms were constructed by the model of CARTER & BENTLEY (1985) with depths of 2 to 6 meters,

All results of the investigations are plotted and discussed in this thesis. Finally there are given examples how to remediate the slope instability and to improve the factor of safety.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINFÜHRUNG	9
1.1. ALLGEMEIN	9
1.2. FRAGESTELLUNGEN UND ZIELSETZUNG	9
2. MASSENBEWEGUNGEN	11
2.1. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	11
2.1.1. MASSENBEWEGUNGEN IM LOCKERGESTEIN UND BODEN	12
2.2. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG VON UNTERSUCHUNGEN AN MASSENBEWEGUNGEN	21
2.2.1. BESTIMMUNG DER VOLUMENSÄNDERUNGEN VON MASSENBEWEGUNGEN	21
2.2.2. BESTIMMUNG DER TIEFE VON ERDBEBCHEITFLÄCHEN	21
2.3. URSACHEN VON MASSENBEWEGUNGEN	31
3. ERKUNDUNG VON MASSENBEWEGUNGEN	32
3.1. GEOLOGISCH-GEOMORPHOLOGISCHE ERKENNUNG GELÄNDEBEGEHUNG UND DETAILKARTIERUNG	33
3.2. FERNERKUNDUNG	34
3.2.1. LASERSCANNING (LIDAR)	35
3.2.2. RADAR - SYSTEME	37
3.2.3. GROUND BASED INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (GBINSAR)	39
3.2.4. DIGITALE PHOTOGRAMMETRIE	39
3.2.5. GEODÄTISCHE VERMESSUNG	41
3.2.6. RTK – GPS / GNSS RTK	42
3.2.7. SONSTIGE DISTANZMESSVERFAHREN	44
3.3. DIREKTE KÜNSTLICHE AUFSCHLÜSSE SOWIE MONITORING IM BOHRLOCH	44
3.3.1. KERNBOHRUNG, BAGGERSCHURF UND SONDIERUNG	44
3.3.2. MONITORINGSYSTEME IM BOHRLOCH	51
3.4. GEOPHYSIKALISCHE MESSUNGEN	51
3.4.1. SEISMISCHE REFRAKTION UND REFLEKTION	52
3.4.2. WEITERE GEOPHYSIKALISCHE MESSMETHODEN	52
4. STABILISIERUNG UND SANIERUNG	54
4.1. PASSIVE MAßNAHMEN	54
4.1.1. ZONIERUNG	54
4.1.2. MONITORING	56
4.1.3. PROTEKTION	56
4.1.4. WARNUNG	57
4.2. AKTIVE MAßNAHMEN	57
4.2.1. DRAINAGEN	57
4.2.2. RELIEFANPASSUNG	58
4.2.3. GEOLOGISCHE MAßNAHMEN	59
4.2.4. KONSTRUKTIVE-GEOTECHNISCHE MAßNAHMEN	59
4.2.5. LEBENDVERBAU UND INGENIEURBIOLOGISCHE MAßNAHMEN	60

5. ERKUNDUNGSGEBIET BLAUBACHGRABEN, GEMEINDE KRIMML (SALZBURG, ÖSTERREICH)	61
5.1. ALLGEMEINES	61
5.2. GEOGRAPHIE	62
5.3. KLIMA	63
5.4. HYDROLOGIE	64
5.5. GEOLOGIE DER HOHEN TAUERN UND DES OBERPINZGAUS	65
5.5.1. LAGE UND ÜBERSICHTSKARTE	65
5.5.2. TEKTONIK UND ABGRENZUNG	66
5.5.3. LITHOLOGISCHER AUFBAU IM OBERPINZGAU SOWIE DES KRIMMLER RAUMES	67
5.6. BLAUBACHGRABEN RUTSCHUNG	67
5.6.1. LAGE UND ÜBERBLICK	67
5.6.2. PETROGRAPHISCHE GEGEBENHEITEN IM PROJEKTGEBIET	69
5.7. HANGBEWEGUNG IM BLAUBACHGRABEN	71
5.7.1. ZUSAMMENHANG VON NIEDERSCHLAG UND BEWEGUNGSRATE IM BLAUBACHGRABEN	71
5.7.2. EINFLUSS DER BAULICHEN MAßNAHMEN AUF DIE HANGBEWEGUNG	72
6. ERGEBNISSE DER GELÄNDEBEGEHUNG UND KARTIERUNGSARBEIT	74
6.1. ERREICHBARKEIT SOWIE EINTEILUNG DES RUTSCHGEBIETES	74
6.2. MORPHOLOGISCHE BESCHREIBUNG DES RUTSCHKÖRPERS	74
6.2.1. ALMBEREICH (OBERER BEREICH)	74
6.2.2. ABLAGERUNGS- UND EROSIONSRaum (UNTERER BEREICH)	79
6.3. FOTODOKUMENTATION	83
7. ERGEBNISSE DER FERNERKUNDUNG UND GEODÄTISCHEN MESSUNGEN	84
7.1. MESSKAMPAGNEN MITTELS PHOTOGRAMMETRIE (ZEITRAUM 1953-1999)	84
7.2. ZUSAMMENFASSUNG DER JÄHRLICHEN MESSKAMPAGNEN (ZEITRAUM 2001-2016)	87
7.2.1. MESSUNG 2002: MESSZEITRAUM OKTOBER 2001 BIS OKTOBER 2002	89
7.2.2. MESSUNG 2003: MESSZEITRAUM OKTOBER 2002 BIS SEPTEMBER 2003	89
7.2.3. MESSUNG 2004: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2003 BIS SEPTEMBER 2004	89
7.2.4. MESSUNG 2005: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2004 BIS SEPTEMBER 2005	90
7.2.5. MESSUNG 2006: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2005 BIS SEPTEMBER 2006	90
7.2.6. MESSUNG 2007: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2006 BIS SEPTEMBER 2007	91
7.2.7. MESSUNG 2008: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2007 BIS SEPTEMBER 2008	91
7.2.8. MESSUNG 2009: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2008 BIS SEPTEMBER 2009	91
7.2.9. MESSUNG 2010: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2009 BIS SEPTEMBER 2010	92
7.2.10. MESSUNG 2011: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2010 BIS SEPTEMBER 2011	92
7.2.11. MESSUNG 2012: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2011 BIS SEPTEMBER 2012	93
7.2.12. MESSUNG 2013: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2012 BIS OKTOBER 2013	93
7.2.13. MESSUNG 2014: MESSZEITRAUM OKTOBER 2013 BIS SEPTEMBER 2014	93
7.2.14. MESSUNG 2015: MESSZEITRAUM SEPTEMBER 2014 BIS AUGUST 2015	94
7.2.15. MESSUNG 2016: MESSZEITRAUM AUGUST 2015 BIS SEPTEMBER 2016	94
7.3. ZUSAMMENFASSUNG	95
8. ERGEBNISSE DER AUSWERTUNG DER GELÄNDEKARTIERUNG	97
8.1. PRIMÄRKARTIERUNG MITTELS SAGIS MAPPENBLÄTTERN	97

8.2. BEARBEITUNG DER GELÄNDEDATEN MITTELS DER SOFTWARE SURFER11	97
8.3. GEOMORPHOLOGISCHE KARTEN	98
9. BERECHNUNG VON TIEFE UND VOLUMEN DER MASSENBEWEGUNG	104
9.1. VISCIOUS FLOW MODELL	104
9.1.1. EINFLUSS DER DICHTEN AUF DIE TIEFE DER MASSENBEWEGUNG	104
9.1.2. EINFLUSS DER HANGNEIGUNG AUF DIE TIEFE DER MASSENBEWEGUNG	105
9.1.3. EINFLUSS DER GESCHWINDIGKEIT DER OBERFLÄCHE AN DEN MESSPUNKTEN AUF DIE TIEFE DER MASSENBEWEGUNG	106
9.1.4. EINFLUSS DER KONSTANTEN UND DES EXPONENTEN AUF DIE TIEFE DES KRIECHENS	107
9.1.5. BERECHNUNGEN DER TIEFE DER MASSENBEWEGUNGEN AN DEN EINZELNEN MESSPUNKTEN IM JÄHRLICHEN RHYTHMUS	108
9.1.6. GEMITTELTE TIEFEN DER MASSENBEWEGUNG AN DEN EINZELNEN PUNKTGRUPPEN	108
9.2. KONSTRUKTION NACH DEM MODELL VON CARTER & BENTLEY (1985)	109
10. DISKUSSION	112
10.1. PROBLEMSTELLUNG	112
10.2. DISKUSSION DER MESS- UND KARTIERUNGSERGEBNISSE SOWIE DER SOFTWARE- UND RECHENAUSWERTUNG	112
10.3. AUSSAGEN ÜBER KINEMATIK UND BEWEGUNGSSINN DER MASSENBEWEGUNG	114
10.4. STELLUNGNAHME ZU MÖGLICHEN SICHERUNGS- UND BEOBACHTUNGSEINRICHTUNGEN FÜR DEN BLAUBACHGRABEN	117
10.4.1. DRAINAGESYSTEME SOWIE ABLEITUNG VON OBERFLÄCHENWÄSSER DURCH VERROHRUNG:	117
10.4.2. ERWEITERUNG DES RETENTIONSOLUMENS OBERHALB DER GESCHIEBESPERRE	118
10.4.3. LANGZEITMONITORING	119
LITERATURVERZEICHNIS	120
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	126
TABELLENVERZEICHNIS	130
ANHANGVERZEICHNIS	130

1. EINFÜHRUNG

1.1. Allgemein

Im Masterstudiengang 815 Erdwissenschaften (UG2002/13U, Masterstudium, laufend) ist im Zuge des Studienabschlusses eine Masterthesis abzulegen. Diese Abschlussarbeit umfasst 30 ECTS und behandelt ein fachspezifisches, angewandtes Themengebiet.

Im Vertiefungsfach Engineering Geology werden angewandte, fachübergreifende Themenfelder diskutiert und behandelt. Dabei spielt nicht nur in Österreich die Erschließung des hochalpinen Raumes eine bedeutende Rolle. Der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Geologie, Geotechnik und Bauingenieurwesen wird dabei eine bedeutende Rolle zugesprochen.

Das Projekt dieser Masterarbeit behandelt das rezente Thema Massenbewegungen, welche in jüngster Zeit stetig zunehmen und aus infrastruktureller Sicht immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die wissenschaftliche Arbeit mit dem Titel „*Einschätzung der räumlichen Tiefenvariation von Erdbeben mit Verschiebungsmessungen am Beispiel Blaubachgraben (Krimml, Salzburg)*“ beschäftigt sich vor allem mit der Erkundung von flachgründigen Massenbewegungen anhand ihrer oberflächlichen Erscheinungsform im Gelände. Das Hauptaugenmerk soll dabei nicht nur auf die modernen Methoden der Fernerkundung gelenkt werden, sondern auch traditionelle und herkömmliche Erkundungsarten behandeln.

Kern dieser Arbeit ist eine rezente, aktive Massenbewegung in der Gemeinde Krimml im Salzburger Pinzgau. Dort sollen anhand von Geländeuntersuchungen und Kartierungen die, in dieser Arbeit angeführten Methoden, getestet und wichtige Fragen hinsichtlich Bewegungsrate, Kubatur und Tiefe beantwortet werden.

1.2. Fragestellungen und Zielsetzung

Flachgründige Massenbewegungen können nahezu in allen Bereichen der kontinentalen Erdkruste auftreten. Die Relevanz von so genannten Auslösern (engl. *triggering mechanisms*) ist demnach unumstritten, denn eine Vielzahl von seichten Erdbeben treten nach Extremwetterereignissen auf. In Zeiten, in denen solche Ereignisse sichtlich zunehmen, treten daher oft nach jahrelanger Inaktivität wieder Hangbewegungen auf.

Der anthropogen bedingte Klimawandel hat in den letzten Jahren neue Ausmaße erreicht. Während durch Starkregenfälle immer wieder Rutschungen auch im Flachland zu Tal gehen, trägt die starke Gletscherschmelze auch im Hochgebirge zu einem erhöhten Gefahrenpotential bei. Dabei wird die Standsicherheit von Hängen herabgesetzt und die Tendenz von Massenbewegungen nimmt zu.

Um solchen zunehmenden Massenbewegungen vorzubeugen, ist es unerlässlich, ingenieurgeologische Erkundungsarbeiten durchzuführen. Mangelnde Gelder und Ressourcen seitens der Auftraggeber aus privater und öffentlicher Hand, lassen

jedoch vor allem bei lokalen und kleineren Projekten kaum größere Aufschluss- und Untersuchungskampagnen - wie beispielsweise Bohrungen - zu. Deshalb ist man immer wieder damit konfrontiert, auf indirekte Methoden und Fernerkundungssysteme zurückzugreifen. Oberflächlich lassen sich mit Fernerkundung Massenbewegungen einfach und schnell feststellen. Die wahren Ausmaße erstrecken sich jedoch oft Meter in die Tiefe, was eine Einschätzung des hervorgerufenen Gefahrenpotentials sowie Berechnung deren Kubatur erschwert.

Daher soll sich ein Teil der Erkundungsarbeiten dieser Arbeit speziell mit den optischen Merkmalen von Rutschungen befassen. Aus diesen Daten, welche mittels Fernerkundungsmethoden (Total Station sowie Satellitenpositionierung) sowie Geländearbeit erfasst werden, sollen schließlich auch Rückschlüsse auf deren Tiefe gezogen werden. Der aktuelle Bezug dieses Themas kann schlussendlich auf einen Erdbeben in Krimml (Bundesland Salzburg) projiziert und umgesetzt werden.

Fragestellung:

- Was sind die Auslösungsmechanismen für die Entstehung dieser Erdbebenrutschfläche?
- Wie kann man aus oberflächlichen Erkundungsmethoden auf die Dimension dieses Erdbebens schließen? Wie tief liegt die Erdbebenrutschfläche im Untersuchungsgebiet unterhalb der Geländeoberfläche?
- Welche Aussagen können hinsichtlich der Bewegung und Kinematik getroffen werden? Wie verhalten sich die Bewegungsraten über einen längeren Untersuchungszeitraum?
- Wie wirkt sich dieses Erdbeben auf Infrastruktur und Umwelt aus?

Zielsetzung:

- Literaturrecherche über bekannte Erkundungsmethoden
- Eingrenzung dieser Erkundungsmethoden auf die Anwendbarkeit und die zur Verfügung stehenden Mittel im Untersuchungsgebiet
- Begehung, Erkundung und Detailkartierung im Gelände
- Auswertung von den Ergebnissen mittels geeigneter Software sowie Planauswertung
- Berechnung von wichtigen Parametern und Auswertung von Tiefe, Geometrie, Kinematik der Massenbewegung in Krimml
- Interpretation der Messergebnisse sowie Detailaussagen über Gefahren und mögliche Auswirkungen dieses Erdbebens

2. MASSENBEWEGUNGEN

2.1. Theoretische Grundlagen

Die Untersuchung von Massenbewegungen hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Der Thematik Massenbewegung wird vor allem durch ihre Aktualität viel Aufmerksamkeit zugesprochen. Durch die Erschließung von unwegsamen Gelände sowie der Urbanisierung von bis dato unbedeutenden und höher gelegenen ländlichen Räumen erhöht das Gefährdungspotential durch Massenbewegungen an Mensch und Infrastruktur.

Zu Anfang werden hier einige Definitionen des Begriffs „Massenbewegung“ angeführt.

„Als Massenbewegungen werden sämtliche gravitative Bewegungen von Gesteins-, Geröll- und Erdmassen hangabwärts bezeichnet.“ (CRUDEN, 1991)

GENSKE (2008) beschreibt im Kapitel 12 des Grundbau-Taschenbuchs Massenbewegungen wie folgt: *„Unter Massenbewegungen versteht man talabwärts gerichtete Verlagerungen von Gebirgsmassen. Massenbewegungen unterliegen Mechanismen, die zu erkennen eine Untersuchung des geologischen Aufbaus des Hangs und seiner Umgebung sowie die Erfassung der wirksamen Kräfte voraussetzt. Ein Hang bewegt sich entsprechend seiner äußeren Geometrie (Geomorphologie) und seines inneren Aufbaus (Geologie).“*

In dieser Definition von GENSKE (2008) können bereits wichtige Eckdaten einer Massenbewegung herausgefiltert werden. So ist der geologische Hangaufbau genau so entscheidend wie das Relief, also die äußere Gestalt. Durch die „talabwärts gerichtete“ Bewegung meint dieser die Gravitation, also die Massenverlagerung hangabwärts, welche die Hauptkraft in einem Massenbewegungssystem darstellt. Dennoch reicht meist die Gravitation alleine nicht aus, um Hangbewegungen zu injizieren. Mit so genannten Auslösermechanismen werden die Werte der inneren Reibung und Kohäsion überschritten, welche dazu führen, dass ein System instabil wird und sich dieses bewegt.

Somit können *Landslides*, wie sie im englischen Terminus bezeichnet werden, verschiedene Bewegungsarten sowie Auslöseereignisse aufweisen. Sie können dabei im Festgestein oder Lockergestein auftreten, wobei sämtliche Verlagerungen sehr komplexer Zusammensetzung sein können. Meist gilt als Gemeinsamkeit lediglich die Gravitation als treibende Kraft.

In dieser Arbeit werden hauptsächlich flachliegende Massenbewegungen im Lockergestein bzw. im Boden behandelt. Der Vollständigkeit halber seien aber auch Massenbewegungen im Festgestein kurz abrissartig beschrieben.

2.1.1. Massenbewegungen im Lockergestein und Boden

2.1.1.1. Allgemeine Definitionen

Die Beschreibung und Untersuchung von komplexen Massenbewegungen erfordert enge Kommunikation von Experten aus verschiedenen Teilbereichen und Fachgruppen. Hierzu zählen im Fall von Rutschungen vor allem Geo- und Ingenieurwissenschaftler, welche als Ziel haben, eine gemeinsame Strategie zu entwickeln. Laut (Genske, 2008) gab es in der Vergangenheit eine Vielzahl an katastrophalen Rutschungsereignissen, welche auf Mängel in der Kommunikation zwischen den einzelnen Disziplinen zurückgehen.

Als Rutschungen werden generell bruchlose oder auch bruchhafte, gravitativ bedingte Massenverschiebungen bezeichnet, welche von einer höheren Lage in eine tiefere transportiert werden. (vgl. PRINZ & STRAUSS, 2011)

BAUM ET AL. (1998) charakterisieren langsam zu Tale gehende Massenbewegungen durch den hohen Betrag an interner Deformation, welche mit der oberflächlichen Verschiebung einhergeht. Solche internen Deformationen können an der Massenbewegungsoberfläche beobachtet werden und beinhalten unter anderem Brüche, Buckel, Senken, geneigte Bäume etc. Diese Deformation wird durch die Bewegung über eine unregelmäßige Bruchoberfläche sowie durch die irreguläre Begrenzung an den Flanken sowie im Kopf- und Fußbereich der Massenbewegung hervorgerufen.

Seichtliegende Rutschungen sind daher auf Grund ihrer geringen Mächtigkeit und flachen Gründung definiert und können demnach bereits bei mäßig steilen bis flachen Geländestrukturen beobachtet werden.

Diese Massenbewegungen können anhand von Bewegungsgeschwindigkeit, Bewegungsart, der Auslösungsursache oder deren Zusammensetzung des mitgeführten Materials unterschieden werden.

Im Falle von Massenbewegungen im Lockergestein betrifft dies hauptsächlich die obersten Schichten der Erdoberfläche. Die Verlagerungen treten in unverdichteten bis leicht konsolidierten Böden oder im lockeren Sediment auf.

2.1.1.2. Auslöser (engl. trigger mechanisms)

Alle Hangbewegungen werden von Auslösern (engl. *trigger*) initiiert. Darunter fallen nach (Genske, 2008) hauptsächlich die Veränderung der Hanggeometrie, der Bergwasserverhältnisse, der Belastung und der Festigkeitseigenschaften. Sämtliche Auslöser können natürlichen Ursprungs oder anthropogen bedingt sein.

Laut PRINZ & STRAUSS (2011) sind die Ursachen für Erdbeben vielseitig und können von Erdbeben, Vulkanausbrüchen bis hin zu Gewittern, Stürmen oder lang anhalten Regenfällen reichen. Ein wichtiger Parameter ist dabei das Grund- und Bodenwasser, welches oft das Hanggleichgewicht maßgeblich beeinflusst. Als ein weiterer Grund für Rutschungen kann die Veränderung der Hangneigung angesehen werden, wobei dies eine Veränderung der Höhe oder des Neigungswinkels bedeutet.

Auch die Bedeutung des geologischen Untergrundes spielt eine wichtige Rolle, da die Auflage einer Rutschfläche oft auf wasserwegsamem Gestein bzw. Schichten gründet. So kann eine Veränderung der Korngröße oder ein lithologischer Wechsel oftmals bei ungünstiger, hangparalleler Lage als Gleitfläche fungieren. Das Zusammenspiel aus Scherparameter, einer wichtigen Materialkonstante sowie des Grundwassers kann demnach als ein maßgebendes Ziel der Erkundung von Rutschungen angesehen werden.

Werden Hanggeometrien verändert, so kommt es zu einer Destabilisierung des Kräftegleichgewichts. So kann es laut GENSKE (2008) bei einer Versteilerung des Hanges zu einer Abnahme der Standsicherheit kommen (z.B. Flussabtragung). In den Alpen bzw. im hochalpinen Raum kommt es durch den Abschmelzprozess der Gletscher zur Freilegung von Trogtälern, welche an ihren Talflanken übersteilte Hänge vorweisen, die stark massenbewegungsgefährdet sein können.

2.1.1.3. Begriffserklärung

Oberflächlich lassen sich rezente seichte Massenbewegungen nur sehr schwer erkennen. Wichtig ist demnach eine einheitliche Beschreibung und Terminologie dieser Erscheinungsformen.

Die 1993 von der UNESCO und der Canadian Geotechnical Society entwickelte MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) beschreibt die einzelnen Komponenten von Massenbewegungen. Diese wissenschaftliche Arbeit orientiert sich dabei an diesen Vorgaben.

Der Sinn einer grundlegenden, allgemeinen Ansprache basiert dabei auf den geländebildenden Elementen. Daher kann laut GENSKE (2008) bei einer geomorphologischen Ansprache des Geländes im Prinzip der Vergleich zwischen der ursprünglichen, vergangenen Geländeform und der tatsächlichen, aktuellen Geländeform verstanden werden. Dabei ist es unerlässlich, auch die geologische Situation und deren Entwicklung des Hangsystems zu kennen.

Einzelne Massenbewegungen werden dabei in drei Zonen eingeteilt, welche unterschiedliche Komponenten bzw. Rutschungsmerkmale aufweisen (vgl. THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETY & CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY ,1993)

- **Abrisszone:** oberste Region einer Rutschung, wobei dieses Gebiet den Beginn einer Massenbewegung darstellt.
- **Mittlere Bewegungszone:** in diesem Abschnitt erreicht die Massenbewegung die größte Ausdehnung und die höchsten Bewegungsraten
- **Fußbereich:** dort sammeln sich die verfrachteten Massen an und lagern sich ab.

In Abbildung 1 kann die international gängige Fachterminologie aus THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETY & CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY (1993) graphisch nachverfolgt werden.

1. Krone
2. Hauptabbriss
3. Top (höchster Punkt)
4. Kopfbereich (oberer Bereich zwischen Ablagerungsraum und Abriss)
5. Sekundarabbriss
6. Haupttrutschkörper
7. Fuß
8. Spitze
9. Zehe
10. Bruchoberkante
11. Spitze der Gleitfläche
12. Bereich nach der Gleitfläche (überlagert von Material)
13. Verlagertes Material
14. Sackungszone
15. Akkumulationszone
16. Sackung
17. Sackungsmasse
18. Akkumulation
19. Flanke
20. Ursprüngliche Geländeoberfläche

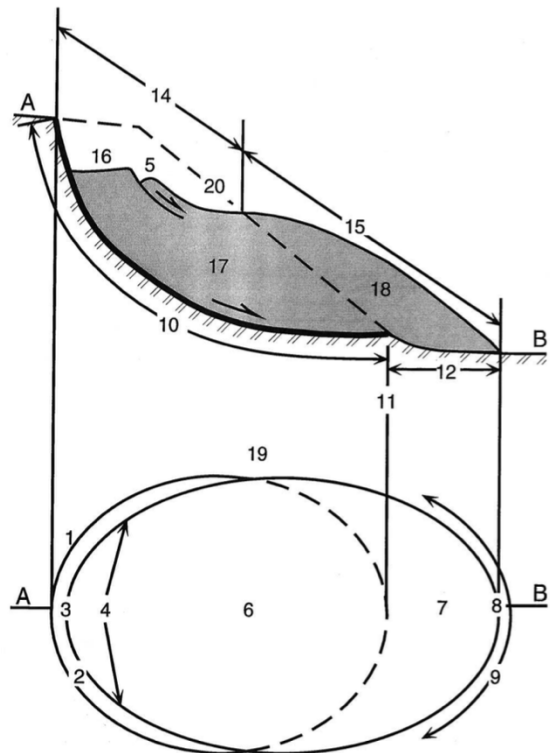


Abbildung 1: Elemente einer Massenbewegung; (entnommen aus THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETY & CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY (1993))

Hinsichtlich der Größe von Rutschungen sind die Dimensionen von Bedeutung. Hierbei werden folgende Werte unterschieden, wobei die Indizes d für Rutschmasse sowie r für die Gleitflächen anzusehen sind (siehe Abb. 2):

1. Breite der Rutschmasse (W_d)
2. Breite der Gleitfläche (W_r)
3. Gesamtlänge (L)
4. Länge der Rutschmasse (L_d)
5. Länge der Gleitfläche (L_r)
6. Mächtigkeit der Rutschmasse (D_d)
7. Tiefe der Gleitfläche (D_r)

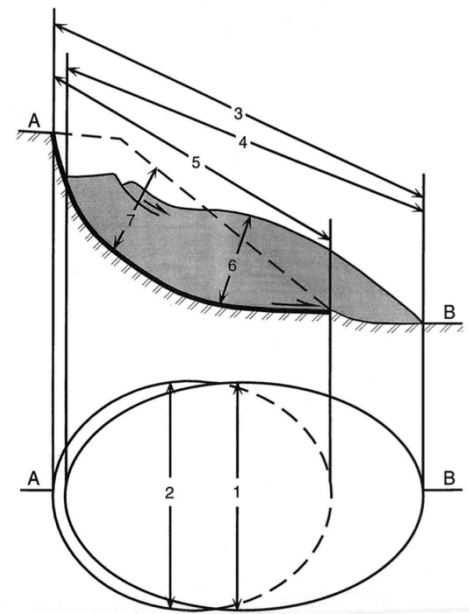


Abbildung 2: Ausdehnung einer Massenbewegung (entnommen aus THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETY & CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY, 1993)

2.1.1.4. Geomorphologie

Die Geomorphologie oder kurz Morphologie beschreibt das Relief der Erdoberfläche und deren Entstehung. Wichtig sind dabei die oberflächenbildenden Prozesse und die Form des Geländes. Die Morphologie eines Hanges kann ein bedeutender Indikator für vergangene oder zukünftige Hangverlagerungen sein und gibt Aufschlüsse. (vgl. NIEDERSCHICK, 2007)

Generell resultiert die Geomorphologie aus der Wirkung der Atmosphäre auf die Geosphäre, wobei die Verwitterung und Abtragung laut GENSKE (2008) dem Hang seine Form geben. Zum Unterschied dazu wird die Geologie vom Gestein und dessen tektonischer Überprägung bestimmt.

Die Betrachtung vom Relief im Gelände hängt stark vom Auge des Betrachters ab. So können sich die Interessen sowie Ziele zwischen konstruktiven Ingenieuren und Geowissenschaftlern unterscheiden. Demnach unterscheidet gemäß GENSKE (2008) der Ingenieur lediglich zwischen Massenbewegungen im Fest- und Lockergestein. Im Gegensatz dazu spielt für einen Geowissenschaftler hauptsächlich das Gebirge als Ganzes eine Rolle, in welchem Diskontinuitäten intakte Bereiche von einander trennen. Der Terminus „intakter Bereich“ kann dabei sowohl Fest- als auch Lockergesteine umfassen.

Das Erkennen von Massenverlagerungen im Gelände kann bei gegebener Vegetation und fortgeschrittener Erosion auch für ein geschultes Auge oftmals schwer sein. Deshalb findet bereits vorab der ersten Geländebegehung meist eine Studie von geologischen und topographischen Karten (z.B. geologische Karten der Geologischen Bundesanstalt sowie der Österreichischen Bundesamtskarte) statt. Zusätzlich können weitere Hilfsmittel wie digitale Geländemodelle verwendet werden, welche den Vorteil besitzen, die genaue Struktur der Erdoberfläche wiederzugeben.

In diesem Kapitel beschränkt sich die Betrachtung jedoch auf die, im Gelände wichtigsten, Erscheinungsformen, welche auf Massenbewegungen hindeuten. Speziell eingegangen wird dabei auf flachgründige Rutschungen.

Generell können verschiedene Rutschungsformen (siehe Abbildung 3) unterschieden werden. Bei einer Rotationsrutschung kommt es zu einem hangabwärts gerichteten Abgleiten einer Rutschmasse entlang einer gekrümmten Fläche. Meistens handelt es sich dabei um Massenbewegungen in Böden oder Lockergesteinsmassen aus tonig bis schluffiger, homogenen Zusammensetzung. Das Gegenstück zur Rotation ist die Translationsrutschung, bei welcher eine planare Bewegungsfläche die Gleitbahn bildet. Solche Translationsrutschungen können im Betrachtungsmaßstab eine Ausdehnung von mehreren Kilometern erreichen und sind meist tiefgründiger als Rotationsrutschungen. Im Allgemeinen herrscht oft eine Kombination aus diesen beiden Systemen vor. (vgl. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Bundesamt für Umwelt), 2015)

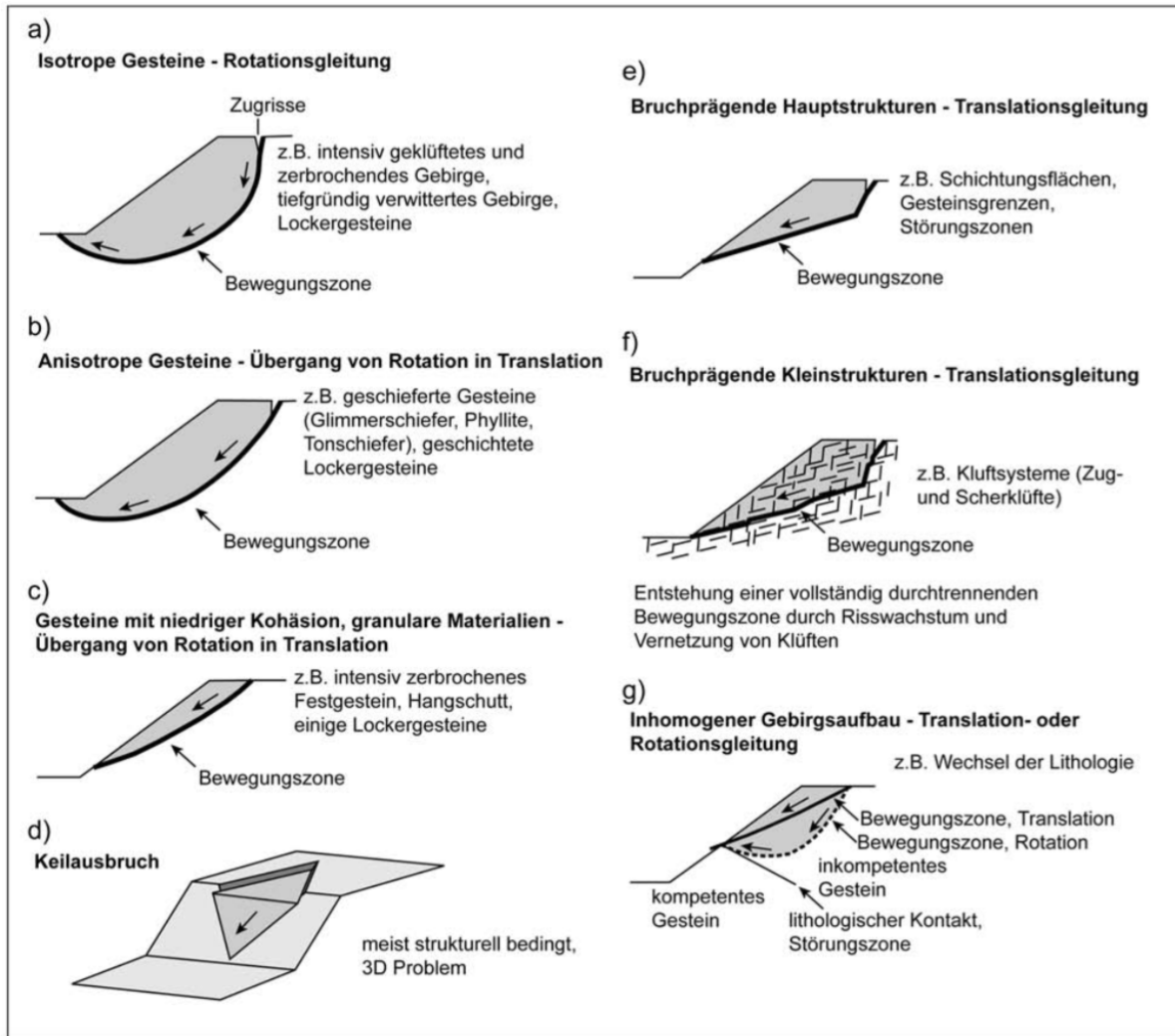


Abbildung 3: Die Abbildung beschreibt die verschiedenen Bewegungsmechanismen bei Rutschungen. Entnommen aus ZANGERL ET AL. (2008).

2.1.1.5. Kinematik und Bewegungsmechanismen

Grundsätzlich tendiert eine Boden- oder Lockergesteinsmasse an einem geneigten Hang zu rutschen, sofern die Gravitationskräfte größer sind als jene der Kohäsion und Scherfestigkeit, welcher dieser entgegenwirken. (vgl. EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (BUNDESAMT FÜR UMWELT), 2015).

GENSKE (2008) führt an, dass sich aus der inneren und äußeren Geometrie des Hanges mögliche Bewegungsmechanismen ergeben, welche aus einem oder mehreren geologisch bedingten Teilkörpern zusammengesetzt sein können.

Die Bewegungsarten von Massenbewegungen können sehr weitreichend sein. Oftmals existieren mehrere kombinierte Bewegungsabläufe aus verschiedenen Arten, in solchen Fällen spricht man von komplexen Massenbewegungen (vgl. CRUDEN & VARNES, 1996).

- *Fall- und Sturzbewegung*: Im steilen Gelände können sich Berg- und Felsstürze abspielen, wobei sich die beiden hauptsächlich im bewegten Volumen unterscheiden.
- *Kippen*: Treten bei einer im Fels situierten Massenbewegung Rotationen in die Luftseite auf, werden solche als Kippen bezeichnet.
- *Rutschen*: Rutschungen können im Fest- und Lockergestein auftreten und bewegen sich auf einer Gleitbahn hangabwärts.
- *Fließen*: Weist ein Material eine Wassersättigung auf bzw. überschreitet eine Bodenmaterial sein *Liquid-Limit* (w_L) spricht man von einer Fließbewegung.

Im *Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen* sind im Kapitel 12: Massenbewegungen nach GENSKE (2008) folgende Bewegungsmechanismen beschrieben, welche kurz erklärt werden sollen.

a) Gleiten:

Zu einer Gleitbewegung kommt es dann, wenn es innerhalb eines Gebirgsbereiches zwischen zwei Trennflächen (Diskontinuitäten) zu einer Bewegung kommt. Gleiten gilt als Initialbewegung, aus welcher im Späteren weitere Bewegungsmechanismen hervorgehen können (sog. Sekundärbewegungen).

Laut LOTTER & HABERLER (2013) bedingen unterschiedliche interne mechanische Eigenschaften der Trennflächen, des Materials sowie des Wasserdrucks bei fortschreitender Bewegung die Interndeformation. Zur Interndeformation zählen Zerrstrukturen, Stauchung sowie Teilabrisse. Daher kommt es bei Gleitprozessen oftmals zur Ausbildung von Teilschollen, die wiederum ein eigenständiges Bewegungsmuster sowie Geschwindigkeitsverhalten ausbilden können.

Generell kann ein genauer Übergang zu Fließprozessen (siehe nachstehend im Punkt "Fließen") kaum exakt bestimmt werden. Die Ausbildung von Bewegungen in Gleitzonen orientiert sich an lokalen Schwächezonen im Untergrund. Des Weiteren können Gleitzonen Massenbewegungen mit sehr unterschiedlichen lateralen Ausdehnungen umfassen. Das Spektrum der Reichweiten erstreckt sich dabei von Zehnerkilometern bis wenigen Metern. Gleiches gilt für die Lage der Gleitfläche selbst, welche in Dezimetern bis wenigen hundert Metern lokalisiert sein kann. Ähnlich dem Fließprozess können auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten wenige Millimeter pro Jahr bis zu mehreren Metern pro Sekunde betragen.

Eine einfache Form eines Gleitprozesses stellt gem. GENSKE (2008) das ebene Gleiten entlang einer Trennfläche dar. Dabei müssen zunächst zwei mechanisch-kinematische Bedingungen erfüllt sein:

- Reibungswiderstand entlang der Gleitfläche wird überwunden
- Potentielle Gleitfläche zeigt aus der Böschung heraus

Räumlich können sich aus zwei Trennflächen Gleitkeile bilden. Diese räumlichen Gleitmechanismen treten auf, sobald folgende Punkte eintreffen:

- Scherfestigkeit in beiden Gleitflächen wird überschritten
- Verschnittlinear zeigt aus der Böschung heraus
- Die Einfallrichtungen der Trennflächen, die das Verschnittlinear bilden, liegen im Schmidt'schen Netz außerhalb des Sektors, der von der Einfallrichtung der Böschung und dem Verschnittlinear selbst gebildet wird. Falls die Einfallrichtung einer der beiden Trennflächen in diesen Bereich fällt, rutscht der Gleitkeil nur entlang dieser Trennfläche ab.

Handelt es sich bei Gleitbahnen nicht um ebene Trennflächen, sondern um eine Kreisform, so können etwa Rutschungen aus einer Böschung rotieren.

b) Kippen, Knicken, Abscheren:

Als Kippen wird das Herauslösen einer Fest- oder Lockergesteinsmasse aus dem ursprünglichen Materialverband verstanden (vgl. LOTTER & HABERLER, 2013). Die primäre Hauptbewegung ist dabei eine Rotation, wobei der Massenschwerpunkt über der Rotationsachse angesiedelt ist. Das Bewegungsschema im Kippprozess ist in Abbildung 4 ersichtlich.

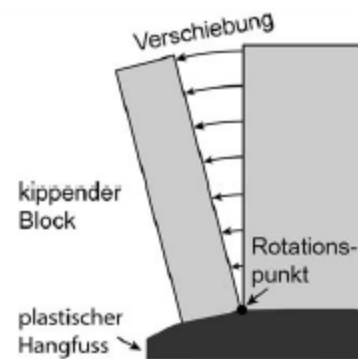


Abbildung 4: Schema einer Kippbewegung - bedingt durch eine Rotation (aus ZANGERL ET AL., 2008)

Kippprozesse können verschiedene Ursachen aufweisen, dabei spielen gehäuft der Wasser- und Eisdruck (vor allem im Gebirge im Zuge der Schneeschmelze) sowie die plastische Verformung von unterlagernden Gesteinen eine bedeutende Rolle.

Entscheidend für einen Kippprozess sind geologische und lagertechnische Eigenschaften des Gesteinsverbandes, wobei das Trennflächengefüge besonders zu beachten ist.

c) Stürzen und Fallen:

Eine Sturz- oder Fallbewegung kann gem. LOTTER & HABERLER (2013) sowie ZANGERL ET AL. (2008) im Locker- oder Festgestein entstehen. Charakterisiert wird eine Fallbewegung dabei durch einen Bewegungsablauf in zunehmend freiem Fall, dabei treten keine bzw. kaum Scherbewegungen auf (siehe Abb. 5). Auffallend sind weiters die hohen Geschwindigkeiten, mit welchen sich das Material nach unten bewegt.



Abbildung 5: Stürzen wird durch eine Teilbewegung im freien Fall charakterisiert (aus ZANGERL ET AL., 2008)

Ausgelöst werden Fallbewegungen meist durch Initialbewegungen wie Kippen oder Gleiten. Meist gehen die stürzenden Bewegungen in andere Bewegungen wie Rollen oder Rotieren über, sobald das Material wieder mit der Erdoberfläche in Kontakt kommt.

Abschließend soll kurz der Unterschied zwischen Berg- und Felssturz angegeben werden. LOTTER & HABERLER (2013) geben dabei unter Einbezug von verschiedener Quellen die Kubatur von 1 Mio. m³ bzw. 1 km³ an, wobei Dimensionen darüber als Bergsturz bezeichnet werden. Kleinere Massenbewegungen werden als Felssturz bezeichnet, wo bei lokalem Ausmaß auch von Steinschlag gesprochen werden kann.

d) Fließen:

Fließprozesse kennzeichnen Massenbewegungen mit stark schwankenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Laut LOTTER & HABERLER (2013) reichen diese Bewegungen von mehreren Metern pro Sekunde bis Millimetern pro Jahr und treten im Locker als auch Festgestein auf. Ähnlich wie bei viskosen Flüssigkeiten nimmt dabei die Geschwindigkeit mit zunehmender Tiefe ab (siehe Abb. 6). Im Gelände ist es oft schwierig, zwischen Fließ- und Gleitbewegung zu unterscheiden, wonach von einer Kombination gesprochen werden kann.

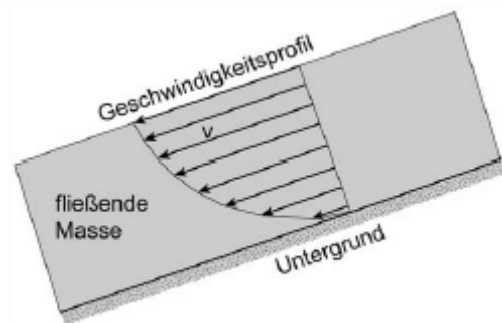


Abbildung 6: Beispiel von idealviskosem Fließverhalten (ZANGERL ET AL., 2008)

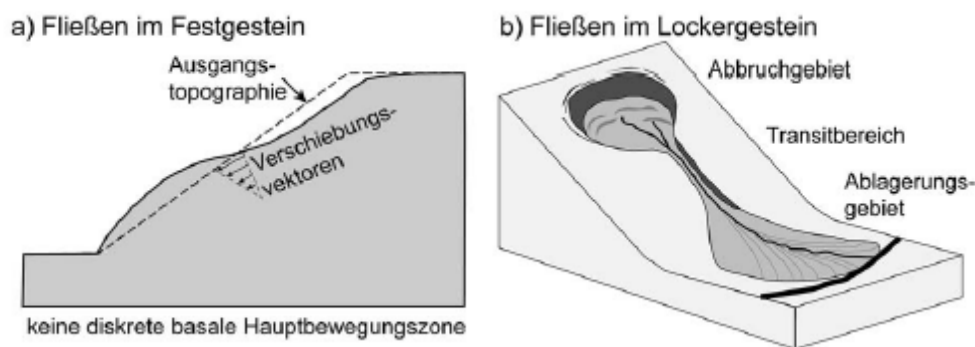


Abbildung 7 und 8: Fließverhalten im Fest und Lockergestein aus ZANGERL et al. (2008)

Generell kann Fließen als Sekundärbewegung bezeichnet werden, da sich diese Prozesse meist aus vorangegangenen Bewegungen wie Fallen, entwickeln. Im Lockergestein können bei gegebenem hohem Wassergehalt Murströme mit sehr hoher Geschwindigkeit und hohem Geschiebetransport erzeugt werden.

Abschließend muss jedoch ausgesagt werden, dass ein Fließprozess nicht nur in wassergesättigten Bereichen auftritt. Demnach können auch im Festgestein aus Fallbewegungen (z.B. Felsstürze) trockene Sturzströme bzw. Schuttstromfließen

entstehen. Die Fließbewegungen in Fest- und Lockergesteinen sind in den Abbildungen 7 und 8 verdeutlicht.

e) Driften, Kriechen:

Driften wird laut LOTTER & HABERLER (2013) als eine Extension bzw. laterale Dehnung verstanden, die im Lockergestein oder im aufgeweichten Fels vorkommen kann. Einhergehen können solche Bewegungsmuster auch mit Setzungserscheinungen.

Beim Einsetzen einer Driftbewegung oder (Hang-)Kriechen reißt die kompetente Ursprungsmasse entlang einer Spalte auf. Dabei kommt es zu einzelner Schollenbildung, welche bedingt durch Zugrisse oder Diskontinuitäten im ursprünglichen Lagerungsverhältnis wie Trennflächen abgesenkt werden.

Kriechbewegungen sind dadurch charakterisiert, dass über sehr lange Zeiträume und kontinuierliche Bewegung zahlreiche einzelne Schollen entstehen können, welche teilweise an den Kanten erodieren und mit neuem Schutt gefüllt werden. Die plastische Bewegung zeigt sich an der Oberfläche oft durch Vernässungszonen, Nackentalbildung, typischer Vegetation (z.B. gekrümmte Bäume) oder Sekundärabrisskanten.

Neben der Art einer Massenbewegung spielt auch die Geschwindigkeit, in der die einzelnen Verlagerungen ablaufen eine gewichtete Rolle. Die Zeiträume in der einzelnen Bewegungen stattfinden, können von sehr schnell ($> 5 \text{ m/s}$) bis sehr langsam (1 mm/a) reichen.

Laut HANDWERGER ET AL. (2015) treten, sich langsam hangabwärts bewegend, Massenbewegungen häufig in tektonisch aktiven Regionen auf. Die Zusammensetzung des Untergrundes ist tonreich, weich und wird von hohen saisonalen Niederschlägen beeinflusst.

2.1.1.6. Aktivität von Massenbewegungen

Ein wichtiger Terminus ist daher die Aktivität von Massenbewegungen, welche nach CRUDEN (1991) in folgende Termini unterteilt werden:

- **Aktiv:** Bewegung findet gerade statt
- **Reaktiviert:** Bewegung findet wieder statt
- **Inaktiv:** Bewegung findet gerade nicht statt
- **Fossil:** Bewegung ist seit längerer Zeit nicht feststellbar

2.2. Praktische Durchführung von Untersuchungen an Massenbewegungen

2.2.1. Bestimmung der Volumensänderungen von Massenbewegungen

Laut ZANGERL ET AL. (2008) kann eine Bestimmung des Volumens einer bewegten Masse nach einem Massenbewegungsereignis einfach und exakt auf Basis von digitalen Höhenmodellen erfolgen. Durch vorhandene Softwarepakete wie GIS etc. können schließlich bei Vor- und Nachbefliegen des Massenbewegungsraumes durch die Volumendifferenz von zwei genauen digitalen Geländemodellen (z.B. luftgestützte Laserscans) berechnet werden.

Wird ein bereits vorangegangenes Ereignis untersucht, so muss vorerst die ehemalige Topographie rekonstruiert und generiert werden. Dies erfolgt am besten durch vektorisierte Höhenschichtlinien. Anschließend wird ein digitales Geländemodell rückgerechnet und man kann somit das Volumen einer Massenbewegung abschätzen.

Generell gestaltet sich die Bestimmung von Volumina von Massenbewegungen als ein schwieriges Unterfangen, während die Massenumlagerung bzw. die Volumendifferenz deutlich einfacher mittels digitalen Geländemodellen abschätzbar ist.

2.2.2. Bestimmung der Tiefe von Erdbebenrutschgleitflächen

Wie ZANGERL et al. (2008) in ihrem Leitfaden zur Beurteilung von Massenbewegungen beschreiben, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, mit welchen die Geometrie und die Tiefe der Gleitflächen von Massenbewegungen bestimmt werden können. Diese variieren je nach wirtschaftlichen und lokalen Parametern stark und sind deshalb stark projektbezogen.

Zur Erfassung der wichtigsten geometrischen Parameter kommen laut ZANGERL ET AL. (2008) Oberflächenkartierungen und Tiefenerkundungen in Frage. Zu Tiefenerkundungen zählen unter anderem Bohrlochmessungen, geophysikalische Methoden oder Sondierstollen. Ergänzend können auch linienförmige Deformationsmessungen im Bohrloch vorgenommen werden (z.B. in Form eines Inklinometers im Bohrloch). Zu den oberflächigen Messverfahren zählen punktförmige Datenerhebungen, aus welchen dreidimensionale Bewegungsvektoren abgeleitet werden können. Auch solche Verfahren können zur Abschätzung der Geometrie verwendet werden.

Hinsichtlich der Tiefe der Gleitbahn werden nach EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (BUNDESAMT FÜR UMWELT, 2015) folgende Terminologien verwendet (Tabelle 1):

Tabelle 1: Rutschungsbezeichnung bezugnehmend auf die Tiefe der Gleitfläche (NIEDERSCHICK, 2007)

Rutschungstyp	Gleitflächentiefe
Oberflächlich	0 – 2 m
Mitteltief	2 – 10 m
Tief	10 – 30 m
Sehr Tief	> 30 m

Generell beschreibt auch ZOBL (2001) in seiner Diplomarbeit, dass solche physikalisch-deterministischen Modelle, welche sie vor allem in der Ingenieurgeologie weit verbreitet sind, vor allem durch ihre Objektivität Vorteile aufweisen. Durch die Vielfältigkeit der in die Formeln eingespeisten Daten können gute Ergebnisse für viele Punkte erzielt werden. Zu diesen Daten zählen unter anderem Wassergehalt, Scherfestigkeit, Plastizität etc. Die Parameter werden entweder im Labor oder durch direkte Messungen und Beobachtungen im Feld erhoben. Nachteil dieser Verfahren ist jedoch, dass die Formeln meist hohen mathematischen Anforderungen entsprechen sowie die Form der Gleitfläche und der resultierende Bruchmechanismus angenommen werden muss.

2.2.2.1. Beziehung zwischen Verschiebungsvektoren und der Form der Gleitfläche

Wie BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) beschreiben, erhöht die Untersuchung von Oberflächenverschiebungen sowie interner Deformation die Aussagekraft der Untersuchung und ermöglicht die Einschätzung des Gefahrenrisikos und der verwendbaren Sanierungsmaßnahmen.

Weiters führen BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) an, dass der Verschiebungspfad eines Punktes auf einer Massenbewegungsoberfläche parallel zur Gleitfläche in der Tiefe ist. Diese fundamentale Behauptung setzt dabei eine signifikante Zu- oder Abnahme in der Mächtigkeit des Materials der Massenbewegung voraus. Sofern also ein Bewegungspfad eines Punktes nachverfolgt werden kann und dieser eine geringe interne Deformation aufweist, können die Verschiebungsvektoren verwendet werden, um die Form der Gleitfläche zu rekonstruieren. Die Tiefe der Gleitfläche kann dabei durch Oberflächenmessungen im oberen Bereich sowie am Fuß der Massenbewegung bestimmt werden.

Abschließend geben BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) an, dass es durchaus angebracht ist, die eingeschätzte Tiefe mittels Bohrungen zu verifizieren. Weiters sollte das kinematische Verhalten der Massenbewegung vorab bekannt sein.

Ein solch kinematisches Modell nach BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) setzt vereinfacht voraus, dass für ein Fehlen von interner Deformation der oberflächliche

Verschiebungsvektor parallel zur Gleitfläche anzusetzen ist. Gleiches gilt umgekehrt, sodass bei einem Auftreten von Deformation, in Abhängigkeit der Art, dieser ungleich der Gleitfläche ist. Für eine longitudinale Dehnung bzw. Abnahme der Materialmächtigkeit ergibt sich somit ein steiler stehender Vektor im Vergleich zur Gleitfläche. Für longitudinale Verkürzung bzw. Zunahme der Materialmächtigkeit ist dieser Vektor flacher als die Gleitbahn. Beispiele für solche Dehnungen und Verkürzungen stellen ähnlich dem Horst-Graben Modell die Bildung von Nackentälern dar.

In der Publikation von BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) ist des Weiteren ein mathematischer Zusammenhang gegeben, welcher durch eine Formel die einzelnen Parameter der Displacements, der Gleitfläche sowie der Deformation mit Hilfe des Gesetzes der Massenerhaltung in Zusammenhang gebracht wird. Dabei gilt, dass die Oberflächenverschiebungen gleich der durchgehenden vertikalen Verschiebungen der Massenbewegungen sind. Diese vertikalen Verschiebungen u_z können nach BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) mittels folgender Gleichung berechnet werden:

$$u_z = H \left(\frac{\rho_0 A_0}{\rho A} - 1 \right) + u_x \left(\frac{\delta \Xi}{\delta X} \right) + u_y \left(\frac{\delta \Xi}{\delta Y} \right) \quad (1)$$

- wobei: u_z ... vertikale Verschiebung der Oberfläche [m]
 u_x und u_y ... horizontale Verschiebungen [m]
 H ... Tiefe der Massenbewegung im undeformierten anfänglichen Zustand [m]
 ρ ... finale Dichte [kg m^{-3}]
 ρ_0 ... Dichte zu Beginn [kg m^{-3}]
 A_0 ... Querschnittsfläche zu Beginn [m^2]
 A ... finale Querschnittsfläche [m^2]
 Ξ ... Seehöhe der Gleitfläche [m]
 X und Y ... horizontale kartesische Koordinaten im undeformierten Zustand [m]

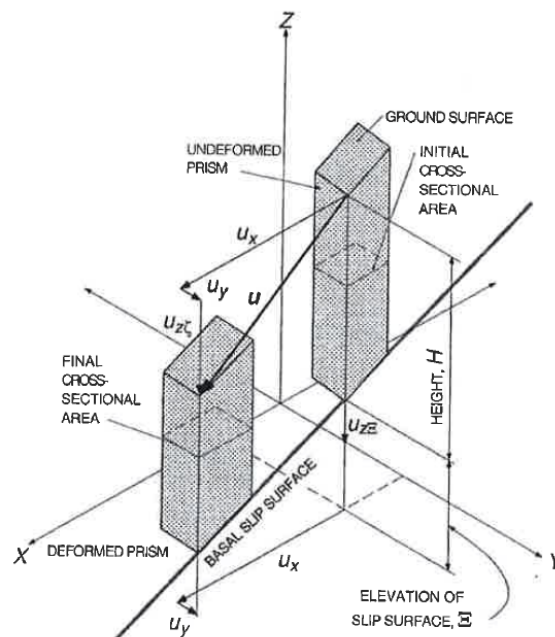


Abbildung 9: Modell nach BAUM et al. (1998) zur oben genannten Formel (1).

Wie im Modell nach BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) in der Abbildung 9 erkennbar ist, handelt es sich um eine idealisierte Form der Deformation eines Prismas in einer Massenbewegung. Das Prisma stellt dabei einen untersuchten Bereich der Massenbewegung dar. In diesem Modell wird angenommen, dass die vertikalen Linien auch lotrecht verbleiben. Die Werte A_0 (anfängliche Prismenfläche), ρ_0 (Materialdichte zu Beginn) sowie die Höhe H beschreiben den ursprünglichen Zustand des Prismas bevor die Massenbewegung einsetzt. Rutscht dieses Prisma entlang der Bewegungsfläche abwärts, so können sich die Dichte, die Höhe und die Querschnittsfläche verändern und das gesamte Prisma wird um die Beträge u_x , u_y und u_z versetzt.

Somit lässt sich für bestimmte Vermessungspunkte die Tiefe der darunterliegenden Gleitfläche berechnen. Diese Methode liefert daher relativ gute Einschätzungsmöglichkeiten der Abgrenzung bei Massenbewegungen. Es können hierbei aus den Displacements quantitative Werte der Tiefe errechnet werden.

Die Methode hängt jedoch stark von der Genauigkeit des zu Grunde liegenden Datensatzes bzw. Geländemodells oder Orthofotos ab. Im Falle der Publikation von BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) konnten Genauigkeiten in der Tiefeneinschätzung der Gleitfläche von $\pm 1\text{m}$ erzielt werden. Bei Orthofotos im Maßstab von 1:2.000 kann man bei niedriger Flughöhe Genauigkeiten hinsichtlich der Displacements im Subzentimeterbereich erhalten. Dementsprechend höher ist später auch die Genauigkeit bzw. Aussagekraft bei der Tiefenberechnung der Gleitfläche.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass diese Methode nach BAUM, MESSERICH & FLEMING (1998) eine kostengünstige sowie sehr einfache Rechenmethode zur Erkundung der Tiefe von Erdrutschgleitflächen darstellt. Durch die Bearbeitung von Orthofotos oder digitalen Geländemodellen können dementsprechende Resultate analysiert und Fragestellungen beantwortet werden.

2.2.2.2. Inversionsmethode (Thickness Inversion)

Die in drei wissenschaftlichen Aufsätzen der Autoren BOOTH ET AL. (2013), BOOTH, LAMB, AVOUAC & DELACOURT (2013) sowie einem methodischen Leitfaden zur Erkundung von Massenbewegungen von ZANGERL ET AL. (2008) beschriebene Methode zur Rückrechnung der Tiefe, wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Hierbei herrscht ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit einer Massenbewegung sowie deren Geschwindigkeit. Für eine Massenbewegung mit konstanter Materialdichte sowie dem gültigen physikalischen Gesetz der Masseninstandhaltung gilt laut BOOTH ET AL. (2013):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla (\bar{u} h) \quad (2)$$

wobei: h ... Mächtigkeit (engl. thickness) der Massenbewegung [m]

\bar{u} ... Gemittelter horizontaler Geschwindigkeitsvektor (Bewegungsvektor) [m s⁻¹]

∇ ... Nabla Operator (Vektor), der Gradient, Divergenz oder Rotation beschreibt

Weiters wird angenommen bzw. vereinfacht, dass die Dicke einer Massenbewegung proportional zur Länge ist. Dabei lässt sich laut BOOTH ET AL. (2013) folgende Gleichung abbilden:

$$\bar{u} = f u_{surf} \quad (3)$$

wobei: f ... Konstante zwischen 0 und 1, welche abhängig von der Rheologie ist

u_{surf} ... horizontaler Oberflächengeschwindigkeitsvektor [m s⁻¹]

Durch die weitere Annahme, dass sich die Höhe der Gleitfläche einer Massenbewegung über kurze Zeitintervalle nicht ändert, ergibt sich folgendes Gleichungssystem BOOTH ET AL. (2013):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\nabla (f u_{surf} h) \quad (4)$$

wobei: z ... die Höhe der Geländeoberfläche einer Massenbewegung [m]

Der Unterschied zwischen u_{surf} und \bar{u} liegt darin, dass erstgenanntes die gemittelte horizontale Oberflächenverschiebung widerspiegelt, während zweiteres die punktbezogene horizontale Oberflächengeschwindigkeit zu einem gewissen Zeitpunkt darstellt.

Die Werte von $\frac{\partial z}{\partial t}$ können über die Differenz von verschiedenen digitalen Geländemodellen (kurz *DGM*) ermittelt werden (z.B. durch LiDAR). Die Oberflächenverschiebungen u_{surf} können via Auswertung von Orthofotos (vgl. BOOTH, ET AL., 2013) oder auch durch RTK-GPS Vermessungen an Fixpunkten ermittelt werden.

Die wichtige Konstante f ist abhängig von der Rheologie¹ (sog. *Fließverhalten*) und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Dabei wird für $f = 0.5$ ein *linear vertical*

¹ Fließverhalten

*velocity model*² angenommen. Für $f = \frac{2}{3}$ gilt das *Newtonian Viscous Flow Model*³ sowie für $\frac{2}{3} < f < 1$ ist das *Plug Flow Model*⁴ gültig. Nimmt f den Wert 1 an, handelt es sich um einen *Rigid Sliding Block*⁵.

Tabelle 2: Tabellarische Auflistung der Werte für die Konstanten der Inversionsmethode.

Wert der Konstante f	Rheologisches Modell
$f = \frac{1}{2}$	Linear Vertical Velocity Model
$f = \frac{2}{3}$	Newtonian Viscous Flow
$\frac{2}{3} < f < 1$	Plug Flow
$f = 1$	Rigid Sliding Block

Im zweiten Artikel von BOOTH ET AL. (2013b) werden Massenbewegungen als *non-Newtonian Fluids* beschrieben, was bedeutet dass der Sedimentfluss einer Massenbewegung von der vertikalen Mächtigkeit (Tiefe, Dicke) sowie dem topographischen Gradienten abhängig ist. Somit werden Fließparameter mit geomorphologischen Transportgesetzen kombiniert.

Der nichtlineare Zusammenhang basiert dabei auf den verschiedenen Ausprägungen der Geländeform, ist also verschieden für Regionen mit einer Häufigkeit von Massenbewegungen oder stabile Hänge.

Dabei spielt laut BOOTH ET AL. (2013) auch die Mächtigkeit der Verwitterungszone, also das mechanisch aufgelockerte Material eine Rolle. Somit wird hierbei auch auf verschiedene Materialparameter eingegangen.

² die Geschwindigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe linear zu

³ Flüssigkeit mit linear viskosem Fließverhalten; Schergeschwindigkeit ist proportional zum Scherverhalten; charakterisiert durch die belastungsunabhängige Viskosität

⁴ Propfenströmung; Kolbenströmung; Begriff aus der Strömungslehre, bei der eine Flüssigkeit optimal durch ein Rohr strömen kann. Dabei ist die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt der Strömung konstant.

⁵ Festes Blockgleiten; Die Gleitkörper beinhalten gerade Gleitflächen und sind in ihrer Form unveränderlich. (von WOLFFERSDORFF & SCHWEIGER, 2008)

Der geomorphologische Prozess ist von vier verschiedenen sog. Schlüsselfaktoren (engl.: *Key Fluxes*) abhängig und kann in folgender Formel (5) zusammengefasst werden. (vgl. BOOTH ET AL., 2013)

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\rho_r}{\rho_{ls}} U - \varepsilon - \nabla (q_s + q_{ls}) \quad (5)$$

wobei: ρ_r ... Bulk Dichte des Festgesteins [m kg^{-3}]
 ρ_{ls} ... Bulk Dichte des verwitterten Gesteins [m kg^{-3}]
 U ... vertikale Hebungsrates relativ zur Basis Fläche [m s^{-3}]
 ε ... vertikale Rate des Rinnen Einschnitts (*eng. channel incision*) [m s^{-3}]
 q_s ... horizontale Boden Kriech-Durchflussmenge [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
 q_{ls} ... horizontale, in der Tiefe auftretende Durchflussmenge der Massenbewegung [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
 ∇ ... Nabla Operator (Vektor), der Gradient, Divergenz oder Rotation beschreibt

Die Bulkdichte wird gemäß geologischem Wörterbuch, vgl. MURAWSKI & MEYER (2010) als die Dichte des eines porösen Festkörpers beschrieben, welches als Rohdichte das Volumen einschließlich der Porenräume berücksichtigt.

Somit lässt sich gemäß BOOTH ET AL. (2013) folgende Berechnungsformel hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Mächtigkeit einer Massenbewegung aufstellen:

$$q_{ls} = \bar{u}_{ls} h \quad (6)$$

wobei: \bar{u}_{ls} ... vertikale gemittelte Geschwindigkeit [m s^{-1}]
 h ... Tiefe bzw. Mächtigkeit der Massenbewegung [m]

2.2.2.3. Viscous Flow Model

Eine Alternative zur vorher beschriebenen Inversionsmethode stellt das Modell des viskosen Fließens dar. Hierbei erläutern HANDWERGER ET AL. (2015) in ihrem wissenschaftlichen Beitrag den Zusammenhang zwischen dem Fließverhalten einer Massenbewegung und deren Mächtigkeit.

Die Kombination aus den Formeln von BOOTH ET AL. (2013) und einer Erweiterung dieser lassen eine Umrechnung auf die Tiefe der Gleitfläche ohne Tiefenerkundung zu.

Die jeweiligen Werte erlangt man durch Messungen aus digitalen Geländemodellen oder Fernerkundung (Geschwindigkeit sowie Hangneigung) sowie durch Laborauswertungen der Materialparameter (z.B. Ermittlung der Dichte). Die weiteren benötigten Werte, welche in die Formel eingebaut werden müssen, sind jeweils Konstanten.

Für die Berechnung wird dabei eine Non-Newtonian Rheologie⁶ angenommen. Schlussendlich ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der

⁶ nicht-newtonisches Fließen; anomalviskos;

Oberflächengeschwindigkeit, der topographischen Hangneigung und der Mächtigkeit der Massenbewegung an einem bestimmten Beobachtungspunkt i .

Die Geschwindigkeit der Massenbewegung an einem Punkt i lässt sich wie folgt berechnen HANDWERGER ET AL. (2015):

$$V_i = \frac{(c \rho g S_i)^p H_i^{p+1}}{p+1} \quad (7)$$

wobei: c ... Konstante aus dem Fließgesetz [$\text{m kg}^{-1} \text{a}^{5/3}$]
 ρ ... Dichte des Massenbewegungsmaterials [kg m^{-3}]
 g ... Erdbeschleunigung [m s^{-2}]
 S_i ... Sinus der Hangneigung [°]
 p ... Exponent aus dem Fließgesetz [-]
 H ... Mächtigkeit der Massenbewegung [m]
 V_i ... Geschwindigkeit der Massenbewegung [m/a]

Somit ergibt sich im Viscous Flow Model nach HANDWERGER ET AL. (2015) folgende Formel 8 zur Berechnung der Mächtigkeit:

$$H_i^{p+1} = \frac{V_i (p+1)}{(c \rho g S_i)^p} \quad (8)$$

2.2.2.4. Modell nach CARTER & BENTLEY (1985)

Eine weitere Möglichkeit um die Tiefe von Rutschungen einzuschätzen, stellt das Modell nach CARTER & BENTLEY (1985) dar. Die Autoren erkannten dabei, dass die Richtung der oberflächlichen Verschiebung parallel zur Orientierung der Gleitfläche im Untergrund verläuft. Das relativ einfache Prinzip wurde außerdem durch Bohrungen im Feld bestätigt, wo gleichzeitig eine hohe Lagegenauigkeit der Gleitflächentiefe erreicht wurde. Das gesamte Modell basiert auf Konstruktion der Gleitfläche, hierfür sind keine aufwendigen Rechenverfahren notwendig.

Vorab sind folgende Annahmen zur Anwendung dieses Modells gültig zu setzen:

- (1) Es darf nur eine Gleitfläche im Untergrund vorhanden sein.
- (2) Die Massenbewegung ist als starrer Körper anzusehen.
- (3) Eine gedachte Linie verläuft durch einen Beobachtungspunkt in die Tiefe. Deren Normale ist parallel zur Bewegungsrichtung an der Oberfläche sowie an der Gleitfläche orientiert.

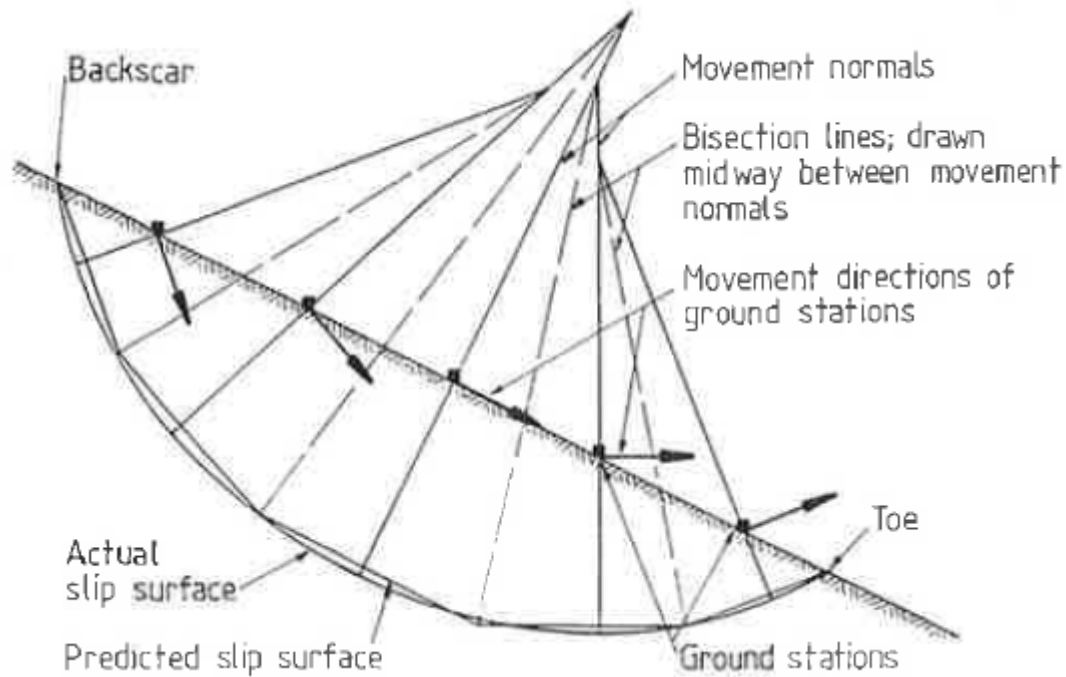


Abbildung 10: Erläuterung des Modells nach CARTER & BENTLEY (1985).

Um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen, sollten möglichst viele Beobachtungspunkte (Fixpunkte) auf der Profilspur liegen (siehe Abb. 11). Zur Konstruktion der Gleitfläche werden gerade, zur Ausbreitungsrichtung senkrechte, Linien durch die Beobachtungspunkte gelegt. Zwischen den Normalen werden anschließend Zwischenlinien eingezeichnet, sog. *bisection lines* (engl.). Man zieht nun die parallel zur Verschiebungsrichtung verlaufenden Linien entweder am Fuß oder am Top beginnend durch den Profilschnitt.

Wie bereits erwähnt, wurde die Aussagekraft dieser Gleitflächenkonstruktion aufwendig im Labor sowie durch Felduntersuchungen (Bohrungen) bestätigt. Vor allem bei Translations- und Rotationsgleitungen ist die Genauigkeit dieser Methode sehr hoch, was in Abbildung 12 ersichtlich ist.

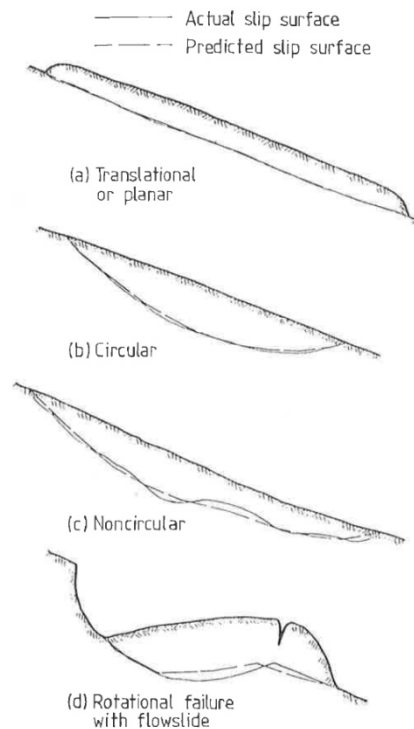


Abbildung 11: Die Abbildung zeigt die Genauigkeit bei der Tiefeneinschätzung bzw. Gleitflächenorientierung einer Massenbewegung durch das Modell von Carter & Bentley. Die durchgezogene Linie ist als tatsächliche Gleitfläche anzusehen, während die unterbrochene Linie den konstruierten Rutschhorizont wiedergibt. (entnommen aus CARTER & BENTLEY, 1985).

Abschließend muss jedoch ausgesagt werden, dass diese Methode bei komplexen Massenbewegungen mit verschiedenen Gleitflächen als zweckwidrig anzusehen ist. Auch die Betrachtung einer Rutschung als starren Körper ist im Falle von Rutschungen kaum annehmbar. Dennoch kann das Modell für die Vorplanung für eine Bohrkampagne hergenommen werden, um einen guten Richtwert für die Endteufen zu erhalten. Des Weiteren genügt bei der Tiefeneinschätzung in geologischen Betrachtungsmaßstäben eine Genauigkeit im Meterbereich meist aus.

2.3. Ursachen von Massenbewegungen

Laut KAMP (2012) sind bei gravitativen Massenverlagerungen im Gegensatz zu glazialen, äolischen oder fluvialen Prozessen keine Transportmedien wie Luft oder Wasser für die Bewegung verantwortlich. Die einzige treibende Kraft ist die Gravitation, welche eine Masse hangabwärts transportiert. Ein typisches charakteristisches Merkmal von Massenbewegungen ist daher, dass die Ablagerungen unsortiert sedimentiert werden.

Dennoch reicht meist ein gravitativer Prozess alleine nicht aus, um eine bestimmte Locker- oder Festgesteinsmasse bzw. Boden zu verfrachten. Daher spricht man hierbei von Auslösermechanismen (engl.: *triggering mechanisms*), die einen gravitativen Abstrom nochmals verstärken.

Eine Rutschung entsteht generell dort, wenn das Verhältnis aus Scherfestigkeit und den treibenden Kräften einen kritischen Wert erreicht. Bei einem Auslösen einer Rutschung kommt es zum Bruch zwischen zwei Boden- oder Gesteinsschichten und einem Abgleiten einer Scholle. (EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (BUNDESAMT FÜR UMWELT), 2015)

Auch GENSKE (2006) nennt (welche?) in seiner Fachpublikation für Ingenieurgeologie das Zusammenspiel aus mehreren unterschiedlichen Mechanismen, welche für das Versagen von Böschungen verantwortlich sind. Neben der Veränderung der hydraulischen Verhältnisse sind auch die Reduktion der Festigkeit, der Eingriff in die Geometrie der Böschung, das dynamische Einwirken auf den Hang (Erdbeben oder Sprengungen), das Belasten an der Böschungskrone sowie der Druck aus dem Quellen von Mineralen (Expansion bzw. Volumenzunahme) maßgebend für das Hangversagen verantwortlich. Einen zentralen Stellenwert spricht dabei der Autor dem Wirken des Bergwassers zu, das die Standsicherheit nach der Schneeschmelze sowie nach längeren Regenfällen herabmindert.

Mit der Einführung des Sicherheitsfaktors (engl. *factor of safety*) werden durch ein simples Verhältnis die treibenden und rückhaltenden Kräfte gegenübergestellt. Dieser Faktor kann als Maß für die Hangstabilität angesehen werden. (vgl. NIEDERSCHICK, 2007) und ist in Formel 9 festgehalten.

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{\text{rückhaltende Kräfte}}{\text{treibende Kräfte}} \quad (9)$$

Wird dabei der Wert von 1 überschritten, sind also die rückhaltenden Kräfte größer als die treibenden, kann der Hang als stabil angesehen werden. Im Gegensatz dazu bedeutet ein Überschuss von treibenden Kräften einen Sicherheitsfaktor von unter 1, was einen instabilen Hang kennzeichnen würde. (vgl. NIEDERSCHICK, 2007)

Im Falle von Rutschungen ist jene treibende Kraft oftmals Wasser. Die Veränderung von Grund- und Porenwasser nach starken oder anhaltenden Niederschlägen ist hierbei ein gutes Beispiel. Die Ausbildung von Gleitflächen an undurchlässigen Bodenschichten fördert die Anfälligkeit von Rutschungen.

Ein weiterer Faktor, welcher bei der Entstehung nicht außer Acht gelassen werden darf ist der Mensch sowie der einhergehenden infrastrukturellen Erschließung des ländlichen und alpinen Raumes. Der Abtransport von Massen am Hangfuß oder die Auflast durch Bebauung am Top stellt ein erhöhtes Risiko für die Entstehung von Massenbewegungen dar.

Weitere bekannte Auslöser sind Erdbeben sowie Vulkanausbrüche, welche jedoch in Österreich einen verschwindend geringen und vernachlässigbaren Einfluss haben.

3. ERKUNDUNG VON MASSENBEWEGUNGEN

Massenbewegungen können durch eine Vielzahl an Methoden untersucht und erkundet werden. Diese werden im folgenden Kapitel angeführt.

Eine Erkundungskampagne von Massenbewegungen untergliedert sich nach GENSKE, (2008) in vier Arbeitsschritte:

- I. **Voruntersuchung:** Hierzu zählen sowohl Vorauswertung (Studium von vorliegenden Unterlagen, Berichten, Gutachten, Karten etc.) als auch Vorerkundung (Geländebegehung und geologische Detailkartierung).
- II. **Hauptuntersuchung:** umfangreiche, meist kostspielige Aufschluss- und Erkundungsarbeiten (Bohrungen, Schürfe, Fernerkundung, Sondierungen etc.)
- III. **Begleitende Untersuchung:** Diese Untersuchungen werden meist baubegleitend durchgeführt und vermerkt.
- IV. **Nachuntersuchung:** Die Nachuntersuchungen umfassen sämtliche Monitoring und Langzeitüberwachungen.

Generell werden bei den Erkundungsmethoden von Massenbewegungen laut GULLÁ ET. AL. (2016) zwischen geologisch-geomorphologischen, Fernerkundung mittels Satellit und geotechnischen Methoden unterschieden. GULLÁ ET. AL. (2016) verweisen bei geologisch-geomorphologischen Methoden auf die regionalen bis überregionalen Betrachtungsmaßstäbe. Satellitenerkundung findet vor allem bei sehr langsamen Massenbewegungen und urbanen Gebieten eine weit verbreitete Anwendung. Bei geotechnischen Fragestellungen handelt es sich um kleinmaßstäbliche und lokale Hangsysteme. Für die endgültige Festlegung der Tiefenlage sowie des Versagensmechanismus der Gleitfläche werden laut PRINZ & STRAUSS (2011) Bewegungsmessungen benötigt.

Vorab einer geotechnischen Untersuchung müssen jedoch Ziele definiert werden, welche die geforderten Messdaten beinhalten sollen. Hier führt THUT (2008) im Grundbau-Taschenbuch an, dass zwischen Instrumentierung in der Sondierphase (Anm.: vor Baubeginn, Planungsphase), Sicherheits- und Qualitätskontrolle sowie Messverfahren an bestehenden Bauwerken unterschieden werden muss. Im Falle

dieser Arbeit beschränkt sich die Betrachtung vor allem auf sicherheitstechnische Aspekte und die Messung auf unbebautem Gelände, im Grunde genommen also jener Phase vor Baubeginn.

3.1. Geologisch-geomorphologische Erkennung Geländebegehung und Detailkartierung

Um komplexe Massenbewegungen verstehen zu können, müssen diese gründlich erkundet werden. Laut ZANGERL ET AL. (2008) unterscheidet man zwischen geologischer und geomorphologischer Kartierung. Zu erst genannter zählt die lithologische Aufnahme von Fest- und Lockergesteinen, sowie allen strukturgeologischen Parametern. Im Zuge einer geomorphologischen Untersuchung werden die räumliche Ausdehnung der Massenbewegung bestimmt und die Hangbewegungsindikatoren erfasst.

Bei allen Massenbewegungen ist es nötig im Gelände eine Detailkartierung bzw. eine gründliche Geländebegehung durchzuführen (vgl. PRINZ & STRAUSS, 2011). Hierzu gehört auch die Aufnahme von Quellaustritten und die Analyse von Grundwasserverhältnissen. Auch ZANGERL ET AL. (2008) erwähnen die Wichtigkeit einer hydrogeologischen Kartierung. Oft spielt die Interaktion von Lagerungsverhältnis im Untergrund und Grundwasser bei Rutschungen eine große Rolle.

Laut GENSKE (2008) wird im Rahmen einer ingenieurgeologischen Kartierung geklärt, welche Bewegungsmechanismen im konkreten Fall wahrscheinlich sind. Demnach werden im Zuge einer solchen Kartierung relevante Unterlagen studiert und eine ausführliche Feldarbeit durchgeführt. Erst nach einem Erkenn der möglichen Bewegungsmechanismen können Massenbewegungen vorbeugend verhindert und rutschgefährdete Hänge gezielt stabilisiert werden. Weiters erwähnen ZANGERL ET AL. (2008) im Abschnitt „Geotechnische Kartierung“ die Erfassung aller hinsichtlich boden- und felsmechanischen Parameter hinsichtlich ihrer hydraulischen und mechanischen Eigenschaften.

Zusätzlich müssen laut GENSKE (2006) alle im Gelände vorliegenden Parameter in die ingenieurgeologische Kartierung und in die spätere Bewertung einfließen. Darunter sind neben den geomorphologischen Erscheinungen auch der rutschungsanfällige Boden, das vorliegende Gebirge, die hydrogeologische Situation, das biologische Setting sowie anthropogene Phänomene genau zu dokumentieren. Bei den beiden letztgenannten Parametern rückt vor allem die Bewaldung sowie die Bebauung in den Fokus. Beide Erscheinungen liefern natürliche sowie künstliche Indizien für eine Bewegung sowie können auch als Ursachen fungieren.

Optisch können bereits unter Betrachtung von simplen Kennzeichen Massenbewegungen erkannt werden. Zu den typischen Beispielen zählen hier die Nackentalbildungen, schiefe Bäume, gewellte Erdoberflächen, Abrisskanten, Erdreichanhäufungen am Hangfuß etc. (vgl. KIEFFER, 2015 sowie PRINZ & STRAUSS, 2011). Gemäß GULLÁ ET AL. (2015) dient die geologisch-geomorphologische

Erkundung zur Beurteilung von Hangstabilität sowie zur Erstellung von Massenbewegungskarten (sog. *landslide inventory maps*) und traditionellen geologischen Detailkarten. Auch die Interpretation von Luftbildern kommt hier zum Einsatz (vgl. GULLÁ ET AL., 2015).

BAUM ET AL. (1998) fügen in ihrem wissenschaftlichen Gemeinschaftsbeitrag an, dass die Kartierung von Abgrenzungen an den Seiten sowie an den unteren und oberen Rändern unerlässlich ist. Der Eintrag in Karten inklusive der Deformationserscheinungen hilft bei der späteren Interpretation erheblich.

Deformationen können laut BAUM ET AL. (1998) an den verschiedensten Beobachtungspunkten registriert werden. Neben Schäden an Bauwerken und Straßen können auch Buckel oder Senken an der Erdoberfläche selbst ausgemacht werden. Die wichtigsten Deformationen stellen somit die Dehnung, Scherung sowie die Verkürzung dar. Scherung tritt dabei meist an den Flanken auf, während die Verkürzung bzw. Kompression eher ab der Mitte bis zum Fuße der Massenbewegung auftritt. Teilweise berichten die Autoren BAUM ET AL. (1998) auch von Rotation einzelner Gebäude im Bereich der Abrisskante sowie von Sackungen, dehrende Deformationen treten daher eher im oberen Bereich der Massenbewegungen auf.

Diese optischen, mit freiem Auge erkennlichen Methoden, stoßen jedoch oft schnell an Grenzen. Hierbei spielt vor allem unzugängliches, unübersichtliches Gelände oder starker Bewuchs, wie beispielsweise Bewaldung oder Verbauung eine große Rolle. Daher muss oft auf andere Methoden ausgewichen werden.

3.2. Fernerkundung

„Der Sicherheit, dem Schutz von Leben und Gut muss die höchste Priorität zukommen, die geotechnischen Messungen tragen Wesentliches zu dieser Sicherheit bei.“, schreibt THUT (2008) im *Grundbau Taschenbuch*, was als maßgebliches Ziel in der Massenbewegungserkundung angesehen werden kann.

THUT (2008) verweist weiters auf die Überwachung der Verschiebung von Hängen mittels der Kontrolle von Porenwasserspannungen und der hohen Effektivität von automatisierten Mess- und Überwachungsverfahren. Generell kann zum Schutz von Mensch und Infrastruktur vor allem im Hinblick auf Massenbewegungen auf Systeme zurückgegriffen werden, welche nach ihrer Installation selbstständig arbeiten, messen und im Grenzfall vorwarnend agieren können.

In der Ingenieurgeologie und Geotechnik findet mittlerweile das Prinzip der Fernerkundung, also die Erkundung von Geländeaufschlüssen mittels elektromagnetischen Wellen einen hohen Verbreitungsgrad. Dabei können Aufschlüsse weit weg vom Betrachter ohne direktem Zugang zum Aufschluss erkundet werden. Herkömmlich kann dies terrestrisch oder aus der Luft (unter anderem: Drohne, Flugzeug, Helikopter, Satellit etc.) durchgeführt werden.

Der Frage nach dem wichtigen Aspekt der zu messenden Parameter, hängt stets mit dem zu bemessenen Objekt oder Gelände zusammen. Des Weiteren spielen wirtschaftliche, rechtliche sowie zugangstechnische Parameter eine Rolle.

Generell kann bei der Fernerkundung (engl.: *remote sensing*) zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden werden, wobei sich beide mit der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen beschäftigen. Zu passiven Sensoren zählen sämtliche Methoden, welche sich mit dem Wellenlängenspektrum des sichtbaren Lichts auseinandersetzen. Hierzu zählen alle Arten von Orthofotos und Luftbildern, Fotografien sowie fotogrammetrische Auswertungen. Passive Sensoren benötigen dabei immer die Hilfe von angestrahlten Objekten, sind also tageszeitabhängig und auf Sonneneinstrahlung angewiesen. Es muss also bei passiven Sensoren eine Bestrahlung mit Licht gegeben sein (z.B. Sonne oder Blitz bei Kamera). Im Gegensatz dazu handelt es sich bei aktiven Sensoren um nacht- und tagaktive Systeme, welche große Bandbreiten von elektromagnetischen Wellenlängen nutzen. Diese Sensoren beleuchten aktiv das Objekt bzw. die Geländeoberfläche. Hierzu zählen Sensoren mit sehr hoher Auflösung und Genauigkeit. Darunter sind Lasersysteme sowie mikrowellenbasierte Radar-Gerätschaften hervorzuheben und in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

3.2.1. Laserscanning (LiDAR)

Wo Rutschungsareale einen dichten Strauch- oder Baumbewuchs aufweisen, was eine Auswertung von Luftbildern stark behindert, können mittels Laserscantechnik hochgenaue digitale Geländemodelle (DGM) erstellt werden. Dabei ist es möglich die Geländeoberfläche in hoher Qualität abzubilden (PRINZ & STRAUSS, 2011). Die Auflösung ist dabei abhängig von der Messdistanz und wird mit zunehmender Entfernung schwächer.

Laut ZANGERL ET AL. (2008) eignet sich die luftgestützte (via Helikopter oder Flugzeug) sowie terrestrische Laserscanvermessung zur direkten Erstellung von dreidimensionalen Koordinaten von einzelnen Messpunkten.

Der Begriff Laser stammt von der Abkürzung *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* und stellt im Allgemeinen einen monochromatischen Lichtstrahl dar, welcher in einer hohen Intensität, stark gebündelt sowie kohärent ausgestrahlt wird. Demnach besteht ein Laserscanner aus einer Systemkombination Transmitter/Receiver sowie einer Scanning-Apparatur. Gemessen werden die Intensitäten der an einem Objekt zurückreflektierten Strahlen bzw. Signale und deren Zeit zwischen Aussendung und Registrierung. Diese Daten werden am Scanner aufgezeichnet und zu einer dreidimensionalen Punktwolke zusammengefügt. (vgl. JABOYEDOFF ET AL., 2012). Eine Punktwolke entsteht bei der digitalen Erfassung von Laserstrahlen, welche entlang einer Oberfläche oder an Gegenständen reflektiert werden. Da beim Laserscanning eine extrem hohe Datenmenge an Abtastpunkten entsteht, wird diese als Punktwolke bezeichnet (vgl. BRIGLMEIR, SANDER, & NEJAT, 2010)

Da laut ZANGERL ET AL. (2008) luftgestützte Laserscanbefliegungen meist zu teuer sind, wird oftmals auf die Methode der terrestrischen LiDAR Vermessung zurückgegriffen. Dabei können Reichweiten von bis zu 1000 m erreicht werden.

Innerhalb von sehr kurzer Zeit können gemäß JABOYEDOFF ET AL. (2012) immense Datenmengen aufgenommen und Flächen vermessen werden. Das vollautomatische terrestrische System misst sowohl den horizontalen und den vertikalen Winkel sowie die Laufzeit. Aus diesen Messgrößen wird anschließend die Position der Punkte in Δx , Δy und Δz bestimmt. Die Abbildung 12 gibt einen vereinfachten Einblick in das Messprinzip von terrestrischem Laserscanning.

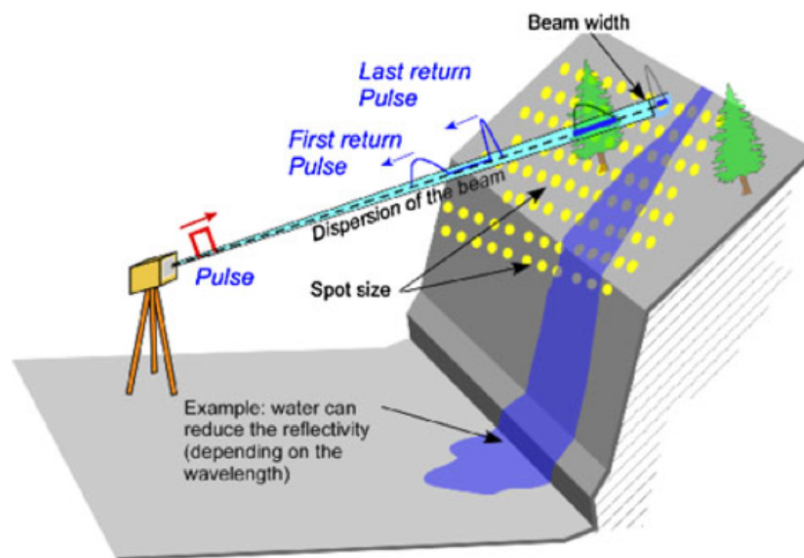


Abbildung 12: Prinzip der terrestrischen Laserscanvermessung im Gelände. (Jaboyedoff, et al., 2012)

FRANZ ET AL. (2016) fügen an, dass die Georeferenzierung der dreidimensionalen Punktwolke bei terrestrischen Laserscans eine wichtige Rolle spielt. Die Zuordnung von absoluten Koordinatenwerten ermöglicht eine präzise Zuordnung auch bei späteren Analysen mit der Software. Dazu werden Testflächen (engl. *targets*) im Feld bereits geodätisch vermessen (z.B. mit GPS RTK oder Total Stations). Für Diskontinuitäten werden die Referenzierungsflächen per Gefügekompas eingemessen.

Laut MAVROULI ET AL. (2015) besteht die Option Diskontinuitäten bzw. Flächen mit einer geeigneten Software zu identifizieren und zu messen. Vor allem im nicht zugänglichen, übersteilten Festgesteinsbereich ermöglicht dieses Verfahren eine deutlich höhere Genauigkeit als bei manuellen Gelände- und Gefügemessungen. Weiters können potentiell gefährdete und bedrohende Felsmassen erkannt werden.

Für die Abschätzung von Kubatur, Ausdehnung und geomorphologischen Eigenschaften von Massenbewegungen werden via terrestrischer Laserscanning Methoden 3D Punktwolken erzeugt. Die Möglichkeit in unwegsamem Gelände eine

hohe Genauigkeit in der Datenbeschaffung zu erzielen, ist ein wichtiger Vorteil in der LiDAR-Technik. (MAVROULI ET AL., 2015)

So genannte digitale Gelände- und Terrain-Modelle sind in vielen GIS-Systeme der Behörden bereits standardisiert und kostenfrei zugänglich. Als Beispiele seien hier die Geoinformationssysteme der Bundesländer Steiermark und Oberösterreich erwähnt. Hinsichtlich Massenbewegungen lassen sich geomorphologische Strukturen erkennen und die Größe der Massenbewegungen abschätzen (siehe <https://www.doris.at>, <http://www.gis.steiermark.at> oder <https://www.salzburg.gv.at/sagis>).

3.2.2. Radar - Systeme

Durch die Entdeckung der Funkortung bzw. Abstandsmessung per elektromagnetischen Wellen zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde eine neue Ära der Lagebestimmung eingeläutet. Seit jeher wurden die Systeme stetig weiterentwickelt und schließlich auch für die Landvermessung zugänglich gemacht.

Diese Systeme werden vor allem für die Erfassung von großflächigen Bodenbewegungen herangezogen und für die Erstellung von digitalen Geländemodellen verwendet. (vgl. PRINZ & STRAUSS, 2011). Diese aktiven Messsysteme akquirieren Datensätze über sehr lange Zeiträume und messen bei Tag und Nacht.

Man unterscheidet generell bei aktiven Verfahren zwischen bildgebenden und nicht-bildgebenden Verfahren. Die Konzentration bei den Remote Sensing Systemen in den Geowissenschaften liegt dabei auf den bildgebenden Verfahren, da sie hochpräzise Abbildungen der Erdoberfläche wiedergeben.

Das Messprinzip bei solchen Systemen ist dabei ähnlich wie bei LiDAR Stationen. Zum einen wird durch eine Laufzeitmessung der Ort eines Messpunktes bestimmt, zum anderen wird durch die rückgestrahlte Intensität des Lichtstrahls die Helligkeit des Pixels ermittelt.

Mit einem Wellenlängenspektrum von Zentimeter bis Meter nutzt diese Technik den Mikrowellenbereich zur Datenbeschaffung. Als Plattformen werden dabei Flugzeuge, Satelliten und Messstationen an der Erdoberfläche genutzt. Demnach unterschiedlich sind auch die Messziele, welche mit diesen verschiedenen Messstationen fokussiert werden.

Während die Plattformen an Flugzeugen vor allem topographische, ozeanographische sowie tektonische Gegebenheiten aus großer Entfernung verfolgen, messen Messstationen an der Erdoberfläche hauptsächlich lokale Deformationen mit einer Genauigkeit im Zentimeter- bis Millimeterbereich. Somit lassen sich genaue Bewegungsdaten von Massenbewegungen abbilden (vgl. GULLÁ ET. AL., 2016). Die Genauigkeit der Höhenmodelle liegt laut PRINZ & STRAUSS (2011) bei optimalen Bedingungen im Millimeterbereich.

3.2.2.1. Synthetic Aperture Radar (SAR)

Satelliten Monitoring mittels Synthetic Aperture Radar (SAR) liefern regelmäßige Datensätze in wiederholten Abständen. Weiterentwickelte Differential Interferometric SAR (DInSAR) ermöglichen schließlich die Akquirierung von kohärenten Signalen (vgl. GULLÁ ET. AL., 2016). Das Messprinzip von Satelliten SAR Systemen kann in Abbildung 13 nachverfolgt werden.

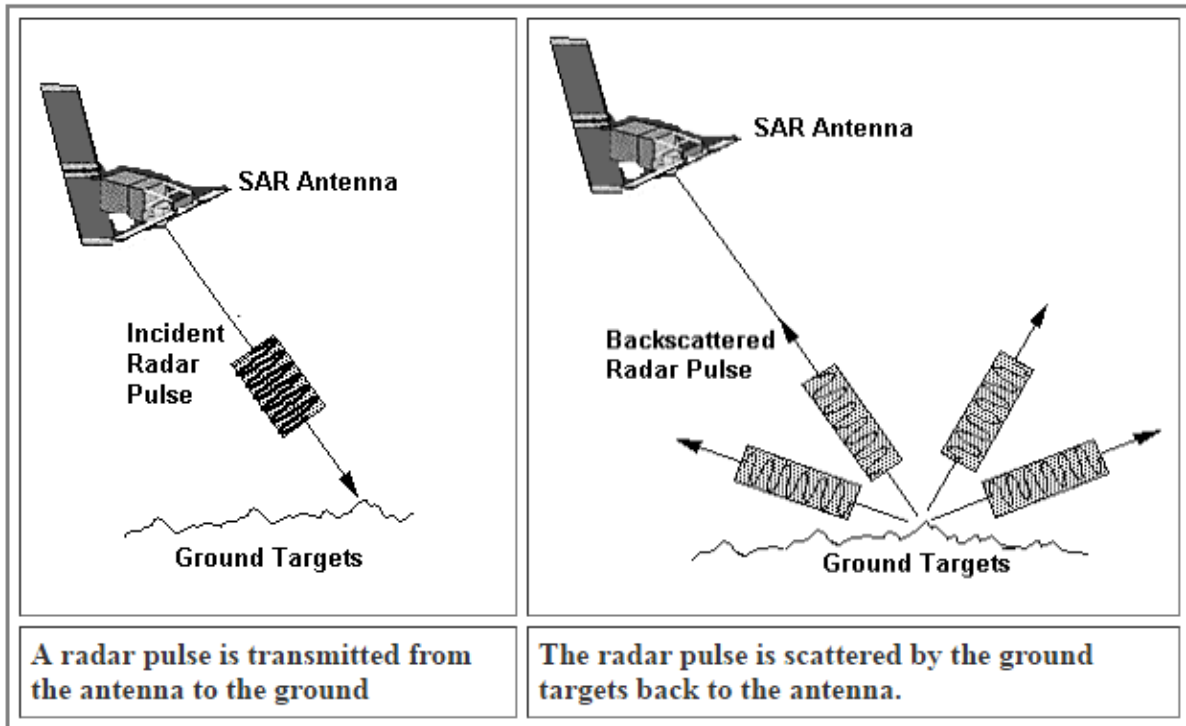


Abbildung 13: Funktionsprinzip von Synthetic Aperture Radar Systemen in stark vereinfachter Form entnommen nach LIEW (2001)

Der Unterschied zwischen SAR und herkömmlichen Radar Systemen besteht darin, dass eine einzelne größere und statische Antenne durch eine Vielzahl an kleineren beweglichen Antennen ersetzt wird. Da der Ort der Abstrahlung des Signals jederzeit bekannt ist, können Objekte öfter angestrahlt werden und die reflektierten Strahlen aufgenommen werden. Dadurch werden Geländeoberflächen genauer abgebildet und dargestellt.

Ein großer Vorteil dieses Systems ist die Möglichkeit, Wolken, Nebel, Regen etc. fast vollständig vernachlässigen zu können. Dies spielt bei Satellitengestützten SAR eine wichtige Rolle.

Als Nachteil dieses Verfahrens kann die Notwendigkeit von langzeitstabilen Fixpunkten (Persistent Scatter) angesehen werden, um einen ausreichenden Vergleich zwischen Satellitenbildern zu erhalten. Beispiele für Persistent Scatter sind Gebäude oder markante Felspartien. (vgl. PRINZ & STRAUSS, 2011)

3.2.3. Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar (GBInSAR)

Die Möglichkeit, statische und bewegte Flächen an der Erdoberfläche mittels SAR zu vermessen, kann mit einem Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar (GBInSAR) vorgenommen werden.

Diese Apparatur wird häufig zur langzeitigen Überwachung von Hangsystemen und Massenbewegungen verwendet. Man kann durch kurze Messintervalle von einem fixen Punkt aus die Bewegungsraten von Massenbewegungen und die oberflächigen Änderungen nachvollziehen. Die Genauigkeit von GBInSAR Systemen liegt im Submillimeterbereich.

Ein großer Vorteil dieser Methode stellt die Möglichkeit dar, dass durch die kurzen Messintervalle auch eine ständige Überwachung des Projektgebiets möglich ist. So können bei plötzlichem Anstieg der Displacements sofort Warnungen an Behörden weitergegeben werden, was den Zivilschutz deutlich erhöht und Schäden vorbeugt.

Jedoch hat auch dieses System Nachteile, so kann für stark bewachsene Areale nicht die nötige Effektivität erzielt werden. Um den Nutzen voll auszuschöpfen ist weiters eine teure Beschaffung und Instandhaltung von nötiger Infrastruktur nötig um dieses System installieren und Dauerhaft nutzen zu können.

3.2.4. Digitale Photogrammetrie

Die Auswertung von Luftbildern und die Aufnahme der Erdoberfläche von oben stellte bereits früh mit der Eroberung des Luftraumes durch den Menschen eine simple, aber effektive Fernerkundungsmethode dar. Im zweiten Weltkrieg wurden durch die Luftaufklärung feindliche Stellungen und Truppenbewegungen bzw. deren Fortbewegungsgeschwindigkeit durch verschiedene Befliegungsintervalle ermittelt.

Auch für geowissenschaftliche Zwecke sind senkrecht auf die Erdoberfläche aufgenommene Orthofotos ein wichtiges Hilfsmittel (vgl. ZANGERL ET AL., 2008). Durch die Auswertung der farbigen oder schwarz-weißen Fotografien mit Stereoskopen kann die Geomorphologie sogar in dreidimensionaler Form betrachtet werden.

Sehr hilfreich ist diese Methode laut ZANGERL ET AL. (2008) hinsichtlich der Möglichkeit, die horizontalen und vertikalen Bewegungen von Massenbewegungen zu rekonstruieren. Dabei werden Orthofotos von gleicher Räumlichkeit, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, herangezogen.

Auch BAUM ET AL. (1998) führen an, dass aus der Kombination zwischen Geländebeobachtung und der photogrammetrischen Untersuchung der Oberflächenverschiebungen wichtige Erkenntnisse zur kinematischen Beschreibung von Massenbewegungen gewonnen werden können. Vor allem die Abgrenzung an den Seiten sowie an den Kopf- und Fußbereichen, die Identifizierung von Zonen mit hoher aktiver und passiver Verformung, die Erkennung von Zonen mit Massenakkumulation, die Abschätzung der Gleitflächen und die Charakterisierung des

bestimmenden Materialverhaltens kann laut BAUM ET AL. (1998) durch solche Methoden erreicht werden.

Bei diesen standardisierten stereo-photogrammetrischen Messmethoden werden laut BAUM ET AL. (1998) die x- und y- Koordinaten von einzelnen Punkten auf verschiedenen Orthofotos ermittelt. Dabei kann schließlich zwischen beweglicher und unbeweglicher (bzw. statischen) Erdoberfläche geschlossen werden, was bei der Untersuchung von Massenbewegungen sehr nützlich ist. Hohe Unterschiede in den Koordinaten einzelner Messpunkte deuten dabei auf Horizontalverschiebungen oder Fehler in den multitemporalen Orthophotos hin. Die Höhenänderung, sprich die vertikale Differenz wird schließlich aus dem Geländemodell bestimmt und dessen Genauigkeit hängt daher maßgeblich von der Auflösung des Bildmaterials ab.

Dieses Verfahren bedingt jedoch einen gewissen Ungenauigkeitsfaktor, da die Oberflächenverschiebungsbeträge deutlich größer sein müssen als dessen Genauigkeit. Daher müssen sehr markant sichtbare Geländepunkte zu verschiedenen Zeitpunkten noch ersichtlich sein. Deshalb wird die Genauigkeit dieses Verfahrens deutlich von der Flughöhe und dadurch vom Bildmaßstab bestimmt. Je höher die Flughöhe, desto schwieriger wird es, eine hohe Auflösung der Messwerte zu erzielen. Bei niedrigen Flughöhen können daher laut ZANGERL ET AL. (2008) Genauigkeiten im Zentimeterbereich erzielt werden (z.B. durch spezielle Drohnen).



Abbildung 14: Photogrammetrische Erkundung eines Aufschlusses in Niederwölz aus dem Jahr 2015.
Foto: privat

Eine Erweiterung dieses Verfahrens stellt die digitale Photogrammetrie dar, bei der einzelne Bilder mittels Software zu einem dreidimensionalen Geländemodell zusammengefügt werden können. Dies erleichtert vor allem im steil exponierten

Gelände die Aufschlussarbeit und ermöglicht eine Bearbeitung auf dem Computer. Hierbei können bei entsprechender Referenzierung Einfallsrichtung und Einfallswinkel direkt aus dem 3D-Bild herausgelesen werden. Weiters können die Daten entsprechend für Berichte bearbeitet werden. Ein entsprechendes Programm stellt die Software *ShapeMatrix* dar. Für nähere Informationen zum Programm kann die Website der Entwicklungsfirma des Programms *3GSM* eingesehen werden (<http://3gsm.at/produkte/shape-matrix/>). Die Anordnung der Vorrichtung ist in Abbildung 14 verdeutlicht, welche die einzelnen Referenzpunkte sowie die Scanline zeigt, mit denen später aus Fotos ein dreidimensionales Modell erstellt wird.

Zusammenfassend kann somit ausgesagt werden, dass die Photogrammetrie, bei entsprechender Auflösung des Bildmaterials, eine sehr effektive und kostengünstige Methode ist. Zudem können eine Vielzahl an aktuellen Orthofotos über die regionalen GIS Systeme der Bundesländer gratis abgerufen werden, was eine Datenbeschaffung dementsprechend erleichtert.

3.2.5. Geodätische Vermessung

Zusätzlich können für Massenbewegungen noch terrestrische Vermessungen an gezielt angeordneten Fixpunkten vorgenommen werden. Sie stellen laut THUT (2008) einen wichtigen Bestandteil der geotechnischen Messungen und der Bauwerksüberwachung dar.

Die Ansprüche an das jeweilige Fachgebiet sind im Vermessungswesen stark unterschiedlich und projektspezifisch. So sind laut GROßMANN (1979) für Geographen und Geologen hauptsächlich morphologische Aspekte von Interesse und im Fokus der geodätischen Vermessung. Die Wichtigkeit von morphologischen Aussagen in der Karte ist dabei hervorzuheben, was sich vor allem in einem möglichst exaktem Verlauf der Höhenlinien, also den Geländeformen, widerspiegelt. Der Kartiermaßstab beläuft sich nach dem Autor GROßMANN (1979) auf Größen von über 1:5.000.

Laut ZANGERL ET AL. (2008) sind terrestrische Vermessungssysteme ideal für die kinematische Untersuchung von Massenbewegungen geeignet, da sie absolute Koordinaten von einzelnen Messpunkten liefern. Mit geodätischen Messverfahren wird die Lage von Punkten im Raum, also deren x-, y- und z-Koordinate ermittelt. So können mittels Nivelliergeräten Setzungen und Höhenverschiebungen bzw. Δz mit einer Genauigkeit von 0,1 bis 1,0 mm gemessen werden (vgl. THUT, 2008).

Präzisionstheodoliten messen die Komponenten Δx , Δy und Δz mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich, motorisierte bzw. automatisierte Systeme arbeiten im Submillimeterbereich. Ausschlaggebend für eine hohe Messgenauigkeit sind jedoch die Messdistanz sowie meteorologische Größen wie Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Luftdruck und Temperatur. Diese hochaufwendigen Messverfahren werden laut THUT (2008) hauptsächlich im Untertagebau, tiefen Baugruben, Untertunnelung sowie bei der Überwachung von Rutschhängen eingesetzt. Als Ingenieurtheodolit oder Tachymetertheodolit werden laut GROßMANN (1975) Geräte mit mittlerer

Ablesegenauigkeit verstanden, die in erster Linie für Polygonierung, Kleintriangulierung sowie Absteckaufgaben bestimmt sind.

Durch eine Installation von Servotachymetern können gemäß ZANGERL ET AL. (2008) permanent in relativ kurzen Zeitintervallen Messungen von verschiedenen Hangsystemen vorgenommen werden. Durch den Anschluss an Computer und vollautomatische Softwaresysteme kann mittels Fernübertragung ein ständiger Datenaustausch zwischen Sachbearbeiter und Gerät erfolgen. Eine besondere Eigenschaft dieser Messsysteme ist weiters die Einstellung von Schwellenwerten (z.B. Grenzwerte der Bewegung), welche in Überschreitungenfällen sofort einen Alarm an die zuständigen Behörden oder Verantwortlichen abgeben.

Der Grundgedanke des Nivellierens ist laut GROßMANN (1976) die Ermittlung des Unterschieds zwischen verschiedenen Geländehöhen. Dabei wird der lotrechte Abstand zweier Punkte von einer horizontalen Ziellinie gemessen. Als Gerätschaften dient dabei das Nivelliergerät inklusive zweier Messlatten. Im einfachen Gelände kann das Nivellieren als schnelle und gut auflösende Methode angesehen werden, um Profile abzustecken und Geländeneigung und -form zu ermitteln. Über größere Betrachtungsmaßstäbe hinaus sowie im sehr steilen Gelände ist eine Nivellierung jedoch kaum von Nutzen und sehr zeitaufwendig.

Die geodätischen Messverfahren sind zwar hochgenau, erzielen jedoch nicht immer den besten Nutzen. Als Beispiel kann vor allem die Unzugänglichkeit des Geländes, Bewaldung/Sichteinschränkung und das erhöhte Risiko (Steinschlag etc.) in hochalpinen Regionen angesehen werden. Außerdem ist der Transport des Equipments in unwegsamen Gelände oft kaum möglich und sehr mühsam.

3.2.6. RTK – GPS / GNSS RTK

Eine gute Alternative zu unhandlichen Theodoliten bietet die Real Time Kinematic GPS Vermessung. *GPS* oder *Global Positioning System* findet in der heutigen Zeit breite Anwendung und ist in vielen Lebensbereichen (z.B. Straßenverkehr) kaum noch wegzudenken. Bei einer geeigneten Nutzung von vier Satelliten können laut THUT (2008) bei speziellen Systemen bereits Genauigkeiten im Millimeterbereich erzielt werden. Weiters ist auch die Abkürzung *GNSS (Globales Navigationssatellitensystem)* gebräuchlich, die für *Globales Navigationssatellitensystem* verwendet wird und ist dem *RTK GPS* gleichgestellt.

Dabei werden laut ZANGERL ET AL. (2008) Einzelpunkte vermessen, welchen schließlich Bezugskordinaten im WGS84-Ellipsoid (World-Geodetic-System) zugewiesen werden. Anschließend werden diese Punktkordinaten in ein lokales Koordinatensystem transferiert.



Abbildung 15: Durchführung einer RTK-GPS Vermessung im Gelände in Krimml, Salzburg. Foto: Kaufmann

Im Falle der am Institut zugänglichen SmartRover Package (GS15 GNSS) von Leica (KAUFMANN, 2012; siehe Abb. 15) können durch dieses simple und schnelle Verfahren Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreicht werden und so die Lage im Gelände bestimmt werden. Im Falle von Rutschungen reichen jedoch meist Genauigkeiten im Zentimeterbereich nicht aus, um die Bewegungsraten der Massenbewegung nachzuvollziehen. Daher beinhaltet dieses komplexe System eine Echtzeitreferenzierung mittels mobilen Datennetz. Somit kann die Genauigkeit mit Datenabgleich im Messnetzgitter erhöht werden. Die Genauigkeit von Höhenangaben ist jedoch im Gegensatz zu den Lagegenauigkeiten um den Faktor 2 bis 3 geringer (vgl. ZANGERL ET AL., 2008).

Die zu befördernde Ausrüstung ist in diesem Falle relativ gering und kann somit auch in unwegsameren Gelände eingesetzt werden. Ein weiterer großer Vorteil besteht gemäß ZANGERL ET AL. (2008) darin, dass zwischen zwei Vermessungspunkten, im Vergleich zu terrestrischen Methoden, kein Sichtkontakt bestehen muss. Ein Nachteil ergibt sich dennoch in Talregionen oder hochalpinem Terrain, da dort der Empfang vom mobilen Netz oft eingeschränkt ist.

3.2.7. Sonstige Distanzmessverfahren

Eine relativ simple und schnelle Methode spiegelt die Distanzmessung wider. Mit einfachen Stahlmessbändern können Distanzen schnell abgemessen und grob überprüft werden. Bei Messbändern kann jedoch oftmals bei größeren Abständen der Messpunkte nicht die gewünschte Genauigkeit erzielt werden.

Elektronische Distanzmesser bieten laut THUT (2008) die Möglichkeit, Genauigkeiten von 0,5 bis 5 mm zu erzielen. Dafür ist kein geodätischer Reflektor nötig und kann für Messdistanzen über 50 bis 100 Meter eingesetzt werden. Diese, auf einzelne Messdistanzen beschränkten Apparaturen können auch für Rutschhänge eingesetzt werden.

3.3. Direkte künstliche Aufschlüsse sowie Monitoring im Bohrloch

3.3.1. Kernbohrung, Baggerschurf und Sondierung

Für die Abschätzung von Tiefe und Lagerungsdichte von Erdreich sind auch direkte Erkundungsmöglichkeiten in der Ingenieurgeologie gegeben. Als Beispiele sind Bohrungen, Sondierungen und Baggerschürfe zu erwähnen. Die Einsicht in den Untergrund kann nur durch direkte Methoden erfolgen.

3.3.1.1. Bohrung:

Für tiefgründige Erkundungskampagnen werden in der Geotechnik Bohrverfahren eingesetzt, welche durch ihre Vielfalt an erreichbaren Endteufen in Locker- und Festgestein maßgeblich für die Aufschließung der oberen Erdkruste sind. Für Verfahren wie Geothermieerschließungen oder Vorprojekte im Tief- und Tunnelbau sind diese Verfahren unerlässlich, im Falle von Massenbewegungen jedoch kaum geeignet.

Generell können Bohrungen zu Land und im Wasser abgeteuft werden. Die Abbildung 16 zeigt eine Erkundungsbohrung in Niederösterreich, während in Abbildung 17 eine Kernbohrung von einem Ponton aus hergestellt wird.

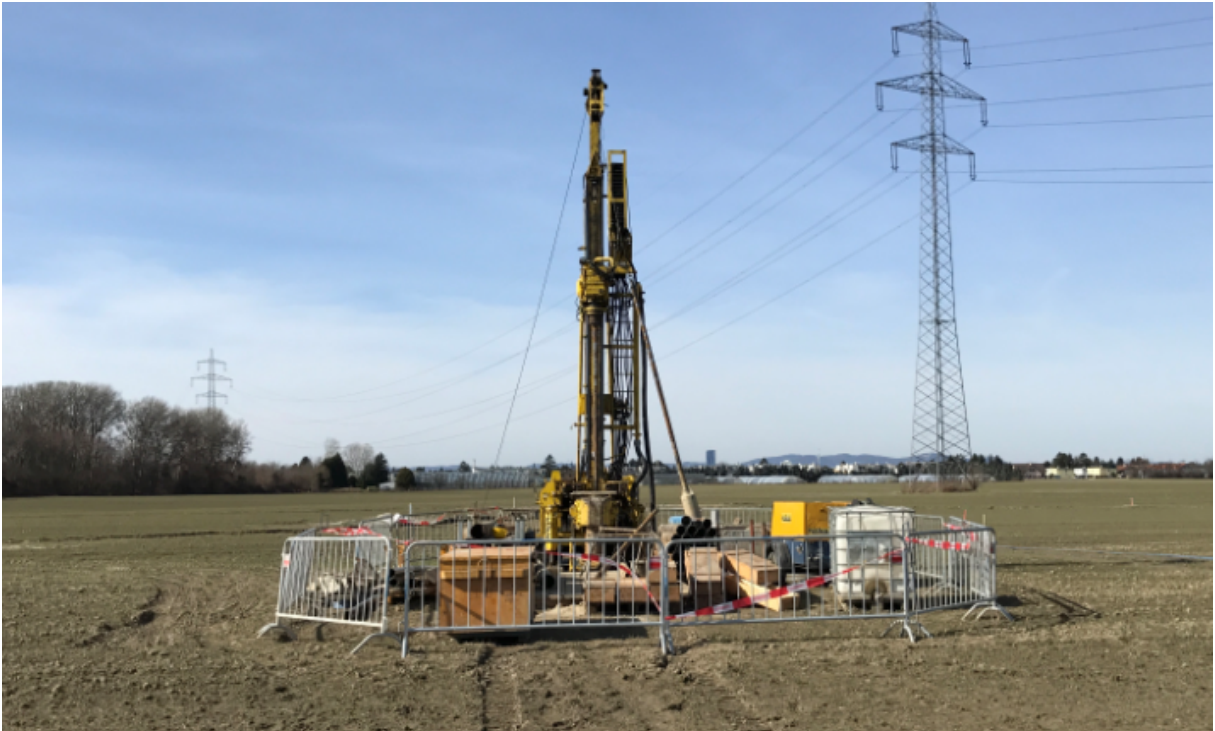


Abbildung 16: Bohrrapparat zum Abteufen von Kernbohrungen im Zuge eines Tunnelprojekts an der Grenze von Wien und Niederösterreich. Foto: privat



Abbildung 17: Abteufen einer Kernbohrung von einem Ponton in der Donau bei Linz. Um einen Kernverlust zu vermeiden, musste hier das Material in einem Liner erbohrt werden. (Foto: Ziviltechnik Geologie | Mag. Oliver Montag)

Die verschiedenen Arten lassen sich grob in gekernt und ungekernt abgeteufte Bohrungen untergliedern. Erstere, so genannte Kernbohrungen, stellen die wichtigste Methode für Aufschließungsarbeiten dar, da der Untergrund tiefenspezifisch an der Oberfläche durch vollständige Bohrkernrekonstruktion rekonstruiert werden kann.

Laut PRINZ & STRAUSS (2011) ist es für Bohraufschlüsse essentiell, diese im durchgehend gekerntem Zustand zu erfassen, um die Tiefe der Erdbebenrutschungsflächen zu rekonstruieren. Das Erstellen von Boden- und Schichtprofilen dient zur dreidimensionalen Modellierung und Verständnis, welche neben der geologischen Kartierung eine wichtige Hilfe in der Einschätzung von Massenbewegungen sind.

Laut MELZER ET AL. (2008) hat die Entnahme von Proben mittels Bohrverfahren zahlreiche Vorteile. Diese beruhen auf der genauen Identifikation der einzelnen Bodenschichten, der Ermittlung der Lage von Schichtgrenzen, der qualitativen Probenahme für Laboruntersuchungen sowie der Durchführung von in situ Versuchen.

Da für Rutschungen die Gleitflächen relativ seicht liegen, ist eine Bohrung mit einer normalen Mindesttiefe ab circa 20 Metern, daher nicht sinnvoll.

Ein großes Defizit dieser Erkundungsmethode stellt die geringe Transparenz und Genauigkeit der erstellten Profile dar. Das Erstellen von Längsprofilen ermöglicht leider nur eine ungefähre Einschätzung der Lage im Raum, da eine durchgängige Bohrung des Untergrundes in regelmäßigen Abständen wirtschaftlich kaum realisierbar ist.

Deshalb liegt ein weiterer Nachteil darin, dass diese Maßnahmen sehr teuer und für hochalpines Terrain kaum einsetzbar sind. Der Transport der Gerätschaften setzt eine geeignete Infrastruktur (Zufahrtsstraßen) sowie ein passendes Gelände (nicht zu steil) voraus. Ausgenommen bei großen Projekten sind diese Methoden also kaum einsetzbar und kostentechnisch nicht tragbar.

Für eine längerfristige Untergrundüberwachung können Bohrungen jedoch sehr nützlich sein. Hydrogeologisch können diese als Messpegel ausgebaut werden und dadurch Grundwasserspiegel überwacht werden. Weiters können Monitoringsysteme installiert werden, welche Bewegungen im Untergrund durch Massenbewegungen aufzeichnen. Auch geophysikalische Messungen, welche Informationen aus den verschiedensten Bereichen der Geologie liefern können, sind optional durchführbar.

3.3.1.2. Sondierung:

Unter Sondierungen, oder besser bekannt unter dem Synonym Rammsondierungen oder SPT (eng. *Standard Penetration Test*), werden indirekte, geotechnische Untergrunderkundungen verstanden, welche mit Hilfe einer spitzen Eisensonde in den Boden abgeteuft werden. Sie dienen vor allem zur Ermittlung der Lagerungsdichte und lassen somit eine ungefähre Interpretation des geologisch vorliegenden Untergrundes zu. Meist werden Sondierungen in Kombination zu direkten Aufschlussmethoden wie Schürfen und Bohrungen verwendet. (vgl. MELZER ET AL., 2008)

Der Ursprung einer Sondierung reicht bereits mehr als 80 Jahre zurück, wobei sich dessen Grundprinzip kaum verändert hat. In der *EN ISO 22476 Norm „Geotechnical investigation and testing“*, Abschnitt 3 ist das Verfahren einer SPT Sondierung festgeschrieben.

MELZER ET AL. (2008) beschreiben Sondierungen wie folgt: *„Bei einer Sondierung wird eine dünne Stange in den Baugrund gedrückt, gerammt oder in einer bestimmten Tiefe um ihre Längsachse gedreht. Aus der Größe bzw. der Änderung des Eindringwiderstands (Sondierwiderstands) mit der Tiefe kann z. B. auf die Festigkeit einer Schicht bzw. auf einen Schichtwechsel geschlossen werden.“* Schichtwechsel und Übergänge im Untergrund können oft als Gleitbahnen für Rutschungen dienen.



Abbildung 18: Abteufen einer Rammsondierung im Zuge einer geologischen Baugrunderkundung.
Foto: Ziviltechnik Geologie | Mag. Oliver Montag)

Im Grunde handelt es sich bei einem SPT Feldversuch um eine Eisensonde, welche durch ein genormtes Fallgewicht mit 63,5 kg und einer definierten Fallhöhe von 76 cm in den Untergrund getrieben wird. Dabei werden die Schläge gezählt, welche für 15 cm bzw. weitere 30 cm Untergrund benötigt werden. Wichtig und aussagekräftig ist dabei der N_{30} Wert, also die Schlagzahl der unteren 30 cm, da die oberen 15 cm als gestörter Boden ausgewiesen werden.

Das Sondiergestänge kann beliebig erweitert werden und somit können theoretisch Tiefen von mehreren Zehner Metern erreicht werden. Im Normalfall endet eine

Sondierung jedoch bei Überschreiten eines gewissen Grenzwertes, welcher für die Oberkante des anstehenden Felsens angesehen wird. Im alpinen Raum kann dies daher ohne gegebener Talfüllung bereits nach wenigen Metern erfolgen.

Als Alternative zum Standard Penetration Test kann die herkömmliche Rammsondierung (siehe Abb. 18) angesehen werden, bei welcher die Schlagzahlen von 10 cm Tiefenschritten gezählt werden. Der Aufbau der Sonde ist ähnlich, jedoch können im Gegensatz zur SPT (oder Rammkernsonde) keine Bodenproben gewonnen werden. Die herkömmliche schwere Rammsonde verwendet zudem Gewichte mit 50 kg und einer genormten Fallhöhe von 50 cm.



Abbildung 19: Kern der oberen 3 Meter unterhalb der Geländeoberkante aus einer Rammkernsondierung im Zuge einer Baugrunderkundung in der Linzer Hafestraße. (Foto: Ziviltechnik Geologie | Mag. Oliver Montag)

Der Vorteil von Sondierungen liegt laut MELZER ET AL. (2008) in der Ableitung von geotechnischen Kenngrößen, wobei sämtliche Untersuchungen das Ziel haben, gesicherte Beziehungen zwischen Sondierwiderstand und geotechnischen Kenngrößen zu liefern. Zu den geotechnischen Kenngrößen gehören die Kohäsion, der Winkel des Scherwiderstands, die Ermittlung des Steifemoduls, die Lagerungsdichte sowie wichtigen Parametern der Tragfähigkeit von Gründungselementen im Bauingenieurwesen. Als Grundlage dienen unter anderem Rammkerne, wie sie in Abbildung 19 dargestellt sind.

Dennoch führt MELZER ET AL. (2008) im *Grundbau-Taschenbuch* an, dass die Messergebnisse einer Rammsondierung stets kritisch zu betrachten sind und ohne kombinierter Ergebnisse aus Labor oder anderen Verfahren schwer interpretierbar sind.

Eine Aussage über die Tiefe von Erdbebenrutschungsflächen ist daher mit Sondierungen kaum zu erreichen und ohne Beleg nicht möglich.

3.3.1.1. *Baggerschurf:*

Schürfe sind händisch oder maschinell hergestellte Gruben, welche meist tiefer sind als in ihrer horizontalen Ausdehnung. Je nach Untergrundverhältnis werden diese Baggerschürfe so tief wie möglich ausgehoben, um den größtmöglichen Informationsgehalt aus den obersten Untergrundschichten zu erhalten. Meist entsprechen diese einer Tiefe von 3 bis 5 m oder bis zum Festgesteinuntergrund. Generell können Baggerschürfe nur im Boden, Lockergestein sowie in stark verwitterten Festgesteinsschichten vorgenommen werden.

Laut MELZER ET AL. (2008) können Schürfe die besten Untersuchungsergebnisse hinsichtlich einer geotechnischen Erkundung liefern. Er führt weiters an, dass hierbei vor allem die Einzelheiten der Schichten und des Bodenzustands deutlich erkennbar sind und auch qualitativ hochwertige Proben entnommen werden können.

Mittels Baggerschurf können wichtige Aufschlüsse hinsichtlich des schichtartigen Bodenaufbaus, dessen Zusammensetzung und die Tiefe der Rutschungsfläche gewonnen werden. Bodenproben werden labortechnisch auf die mineralogische Zusammensetzung geprüft und auf quellfähige Tone untersucht. Ein wichtiger treibender Faktor ist schließlich das Boden- und Grundwasser, welches in Schürfegruben mittels Zutritten evaluiert werden kann.



Abbildung 20: Baggerschurf während einer Baugrunderkundung in Steinbach an der Steyr, Oberösterreich. Gut erkennbar sind die einzelnen Schichten (braun-grau) unterhalb des Mutterbodens sowie der anstehende Flysch als Festgestein (grau). Foto: ZT Weichselbaumer

Ein großer Vorteil dieser Methode ist die direkte Einsicht in die Schurfgrube, welche fotografisch festgehalten werden kann und somit wichtige Informationen wie den Lagenbau oder Durchfeuchtung wiedergibt. Abbildung 20 zeigt einen Einblick in eine Schurfgrube, welche in diesem Bild auf Grund des Grundwassereintrittes im unteren Teil nachbrüchig und instabil ist.

Für flachliegende und oberflächennah ausstreichende Massenbewegungen, wie Rutschungen, sind Schürfe eine sehr gute Möglichkeit, den Untergrund zu erkunden (PRINZ & STRAUSS, 2011).

Dennoch sollten Grabungsarbeiten und größere Eingriffe in den Untergrund ohne vorherige Gefahrenabschätzung, wenn möglich, vermieden werden. Die Wegnahme

von Erdreich und Material am Hangfuß kann durch die Lastabnahme zu einem Fortschreiten der Rutschbewegung führen. Der Eingriff des Menschen in komplexe Hang- und Böschungssysteme darf nicht vernachlässigt werden und ist oftmals auch Auslöser für kleinräumige Rutschungen.

3.3.2. Monitoringsysteme im Bohrloch

Bohrlöcher bieten bei der Untersuchung und Überwachung von Massenbewegungen ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. So können mit geeigneten Systemen verschiedene Parameter erhoben werden. Darunter zählen bei Bohrlochsonden unter anderem die natürliche Radioaktivität, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit des umgebenden Gesteins, grundwasserrelevante Aspekte sowie struktureologische Messwerte (mit Kalibersonden). (vgl. ZANGERL ET AL., 2008)

Für sehr geringe und geodätisch kaum messbare Bewegungsraten sind laut PRINZ & STRAUSS (2011) Inklinometer sowie TDR-Systemmessungen (Time-Domain-Reflectometry) die geeignetsten Methoden. Diese hochsensiblen Systeme reagieren auf Bewegungen im Submillimeterbereich. Beim Inklinometer wird laut (ZANGERL ET AL., 2008) die vertikale Neigung von zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen gemessen. Daraus resultieren wichtige Kennwerte, wie die Horizontalverschiebung, die Aufschluss über die Anzahl und Mächtigkeit von aktiven Bewegungszonen gibt. Somit können mit einem Inklinometer die Tiefe der Rutschfläche sowie die Hanggeschwindigkeiten ermittelt werden.

Dennoch sind solche Verfahren sehr teuer und der Aufwand für die Messdatengewinnung ist dementsprechend beträchtlich. So sind hierfür künstlich geschaffene Messrohre oder Bohrungen nötig und setzen lange Messzeiträume (Monate bis Jahre) voraus.

3.4. Geophysikalische Messungen

Im Spezialgebiet der Geophysik werden für die Erkundung des Untergrundes verschiedene Methoden in Betracht gezogen, welche zumeist in der Rohstofferkundung und für größere Projekte verwendet werden. Zu diesem Fachbereich zählen unter anderem seismische, gravimetrische, geoelektrische, geomagnetische Messungen oder Bodenradar. Ein weiterer wichtiger Zweig hat sich in den letzten Jahren aus der Geophysik hervorgehoben. Dabei handelt es sich um die Bohrlochgeophysik, die durch verschiedene Messverfahren in Untergrundbohrungen bereits präzise Auskünfte über Gesteinsparameter, Gebirgszustand oder hydrogeologische Aspekte wie Porosität liefert.

Die meist sehr aufwendigen und teuren Messverfahren werden jedoch für kleinere Projektgebiete nicht vorrangig verwendet, sie seien hier trotzdem erwähnt und kurz beschrieben.

3.4.1. Seismische Refraktion und Reflektion

Die wohl wichtigste Sparte in der Geophysik umfasst das Kapitel der Seismik, sprich der Erkundung des Erdinneren mittels der Eigenschaften von seismischen Wellen. In großflächigen Erkundungskampagnen werden für wissenschaftliche sowie rohstoffwissenschaftliche Explorationen Tiefenprofile erstellt, die später interpretiert werden und wichtige geologische Aussagen liefern.

Generell machen sich Reflektions- und Refraktionsseismik die unterschiedlichen Eigenschaften und Wellenparameter an Schichtgrenzen zu Nutze. So kann man an geologischen Schichtgrenzen, was auch einen Wechsel der Gesteinseigenschaften mit sich zieht, bei der Refraktionsseismik einen Unterschied der Wellengeschwindigkeit feststellen (vgl. FIGDOR ET AL., 1990). Bei der Reflektion von seismischen Wellen handelt es sich um einen Wechsel der Impedanz, die mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit und dem Dichteunterschied der einzelnen Schichten zusammenhängt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der betrachteten Longitudinalwelle wird durch das Kompressionsmodul sowie durch die Dichte bestimmt. Laut ZANGERL, ET AL., (2008) korrelieren die erfassten Materialparameter mit geomechanischen Kennwerten.

Durch unterschiedliche Verfahren, wie Sprengen oder überdimensionalen Vibratoren, werden Wellen in den Untergrund befördert und an Detektoren (sog. Geophone), die in regelmäßigen Abständen (meist in der Profilspur) angeordnet sind, an der Erdoberfläche aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgt via Software und bedarf an Routine. Verzeichnet werden dabei die Schichtgrenzen bzw. die lithologischen Übergänge im Untergrund. Je nach Ausbreitungseigenschaft der Welle können verschiedene Aussagen, wie Porosität (für Reservoirs) oder Lagerstätten, getroffen werden.

Im Falle der Erkundung von Massenbewegungen lassen sich vor allem für tiefer liegende Gleitflächen Aussagen über die Tiefe treffen. Bei ausreichender Auflösung lässt sich sogar die gesamte Rutschfläche rekonstruieren und im Profil nachzeichnen. Hiermit können exakte Berechnungen hinsichtlich Volumen der Rutschmasse getroffen werden. Die Verfahren für solche Erkundungen sind jedoch sehr teuer und aufwendig. Weiters ist ein Abstecken der Profilspur durch die Detektoren in unwegsamem Gelände nicht einfach. Generell kann laut ZANGERL ET AL. (2008) davon ausgegangen werden, dass bei der Tiefenerfassung einer Massenbewegung eine Genauigkeit von ± 15 bis 20% erreicht werden kann.

3.4.2. Weitere geophysikalische Messmethoden

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, sind etwaige Verfahren kostenintensiv und mit enormen gerätetechnischem Aufwand verbunden.

3.4.2.1. Gravimetrie

Additiv zu den seismischen Methoden können, wie bei FIGDOR ET AL. (1990) beschrieben, auch gravimetrische Messungen vorgenommen werden. Solche Messverfahren sind jedoch heute kaum mehr anwendbar und längst nicht so aussagekräftig. Vor allem für flachgründige Rutschungsflächen bergen solche Methoden einen hohen Unsicherheitsfaktor. Weiters müssen für eine korrekte Darstellung und Aussage eine Vielzahl an Korrekturen vorgenommen werden. Der Bezug auf Dichte und die Lage im Schwerfeld der Erde, auch Gezeiten und Topographie spielen eine Rolle, erschweren eine zielführende Aussage. Somit sind Gravimetrische Methoden hinsichtlich Massenbewegungen kaum geeignet.

3.4.2.2. Ground Penetrating Radar

Laut ZANGERL ET AL. (2008) sind auch Messungen mit einem Georadar bzw. Ground Penetrating Radar (kurz GPR) möglich, welche eine Aufschlusstiefe von mehreren 10er Metern erreichen kann. Durch eine mobile Antenne werden mittels elektromagnetischen Wellen Impulse in den Untergrund abgegeben. Diese Impulse werden schließlich von einer weiteren Antenne detektiert und verzeichnet. Die elektromagnetischen Wellen werden an Schichtgrenzen oder im Falle von Massenbewegungen an Rutschungsflächen reflektiert und vom Detektor verzeichnet. Die Auflösung ist stark frequenzabhängig, erzielt im oberflächennahen Bereich jedoch die höchste Auflösung hinsichtlich geophysikalischer Methoden. Zur Auflösung der Radargramme können mittels der *Maxwell'schen Gleichungen*⁷ und der *Dielektrizitätskonstante* schließlich auch Materialparameter ausgerechnet werden. Die GPR Messungen stellen daher eine gute und vergleichsweise einfache und billige Variante der geophysikalischen Messungen dar. So können diese Messungen auch für die Ablagerungsräume von Massenbewegungen angewandt werden, um deren Mächtigkeit, Ausdehnung und interne Strukturen zu erkunden.

⁷ Maxwell'sche Gleichungen: beschreiben den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern

4. STABILISIERUNG UND SANIERUNG

In diesem kurzen Kapitel seien einige aus der Fachliteratur ausgewählte Maßnahmen vorgeschlagen, welche für eine Stabilisierung des Hanges sowie eine mögliche Sanierung in Frage kommen.

4.1. Passive Maßnahmen

Nach GENSKE (2006) werden bei passiven Maßnahmen vor allem Strategien verfolgt um Schäden, welche in Folge von Rutschungen auftreten, vermieden werden können. Bei solchen Maßnahmen wird zumeist nicht direkt in den Hang eingegriffen und dient zur Vorbeugung und zum Schutz von Infrastruktur und Menschenleben.

4.1.1. Zonierung

Die Erstellung eines Gefahrenzonenplans, wie er heute bei vielen Behörden und Ämtern bereits vorliegt, kann als wichtigstes Instrument zur Vorbeugung von Schäden angesehen werden. Nach einer Detailkartierung des Geländes durch ein Fachpersonal (zumeist Geologen bzw. Ingenieurgeologen) werden Flächen ausgewiesen, welche im Falle eines Hangversagens als gefährdet, bedingt gefährdet oder als ungefährdet eingestuft wurden. Während durch behördliche Regelung in vielen westlichen Staaten bereits ein Bebauungsverbot in besonders gefährdeten Zonen ausgesprochen wurde, bedarf es vor allem in schnell wachsenden Städten extremen Nachholbedarf. Geographen und Raumplaner weisen deshalb oftmals auf eine nachhaltige Planung in solchen Regionen hin.

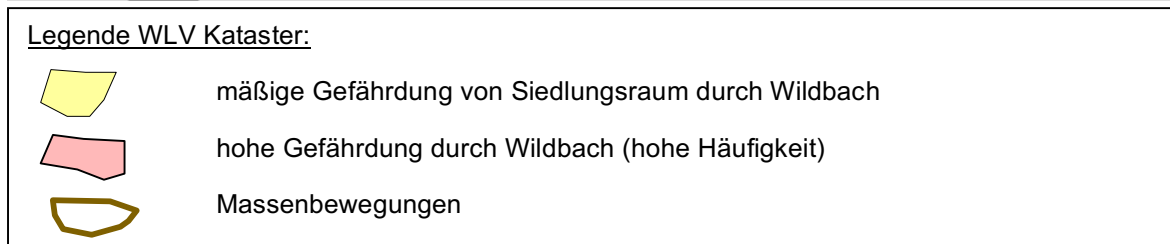
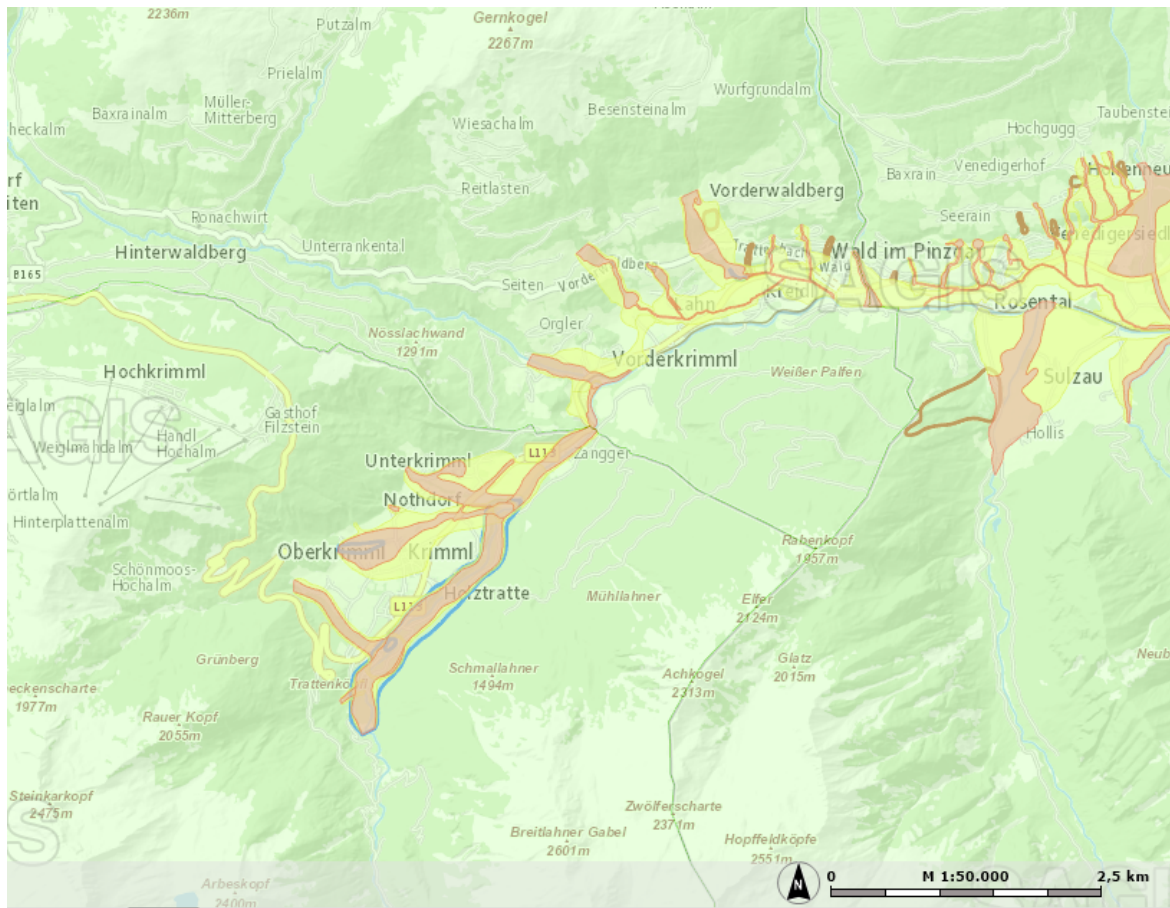


Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Zonenplan der Wildbach- und Lawinenverbauung im Raum Krimml (Salzburg) im Maßstab 1:50.000. (Quelle: SAGIS)

In Österreich ist dies behördlich durch die Landesämter geregelt, weshalb in den letzten Jahren der Kataster für Geogenes Baugrundrisiko vervollständigt wurde. Vor allem bei zukünftigen Bauprojekten soll demnach durch eine fachkundige Beurteilung des Bauuntergrundes erfolgen sowie auf möglichen Gefahren durch Massenbewegungen hingewiesen werden. Auch die Wildbach- und Lawinenverbauung, welche dem Ministerium für ein Lebenswertes Österreich unterstellt ist, hat bereits vor einigen Jahren einen Zonenplan erstellt. Vor allem in Gebieten mit erhöhtem Überschwemmungspotential sowie im alpinen Bereich ist dieser Kataster teilweise sehr gut erschlossen und dient den kommunalen Behörden bei der Vergabe von Baubewilligungen. In Abbildung 21 ist der Gefahrenzonenplan der Wildbach- und Lawinenverbauung der Gemeinde Krimml ersichtlich.

4.1.2. Monitoring

Das Ziel von Monitoring ist nach GENSKE (2006) eine gängige Methode, einen Hang über einen längeren Zeitraum zu beobachten. Dabei kann auf eine Vielzahl von Methoden zurückgegriffen werden. Um einen Gesamteindruck über die gesamte Beobachtungsfläche zu gewinnen, eignen sich Luftbilder bzw. Orthofotos, die Ergebnisse der Oberflächenverschiebung von Punkten liefern kann. Durch die Vermessung mit terrestrischen Systemen wie Theodoliten oder satellitengestützte Positionierung werden Verschiebungen und die Geschwindigkeit der Massenbewegung anhand von Beobachtungs- bzw. Messpunkten errechnet. In Bohrungen können durch Inklinometer oder andere Messvorrichtungen die Veränderung der Massenbewegung auch im Untergrund beobachtet werden. Schlussendlich können auch Häufigkeitsanalysen von Steinschlagereignissen verzeichnet werden. Das Monitoring durch bodengestützte Radar-Systeme (GBInSAR) weist zudem den Vorteil auf, dass auch Warnsysteme bei der Überschreitung von gewissen Schwellenwerten vorwarnend mit den Behörden interagieren können. Eine Frühwarnung kann in kurzen Messintervallen auch mittels geodätischer Vermessung erfolgen. Als Beispiel für Monitoring mit sehr kurzen Messintervallen ist in der nachstehenden Abbildung 22 ein installiertes Frühwarnsystem mittels GBInSAR aus Mittelitalien anzusehen.



Abbildung 22: Installation eines Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radars (GBInSAR) zur Beobachtung einer Massenbewegung in den Apenninen (Italien). Diese Vorrichtung kann ebenso als protektive Maßnahme dienen und bei einer Grenzwertüberschreitung als Zivilschutzmedium verwendet werden. (Quelle: TOFANI ET AL. (2014); www.mdpi.com)

4.1.3. Protektion

Unter Protektion werden laut GENSKE (2006) präventive, sprich vorbeugende Maßnahmen zum Schutz vor Massenbewegungen verstanden. Hier seien die Installation von Steinschlaggalerien, Sicherheits- und Ausrollzonen, Schutzwälle, Leit-

und Kanalisierungssysteme, Steinschlagnetze oder Fangzäune erwähnt. Die Art der Schutzmaßnahme hängt dabei sehr stark von der Art der Massenbewegung und vom Bewegungsmechanismus ab. Während Schutt- und Murströme durch ihren Wassergehalt eher durch Kanäle abgeleitet werden, wird für Stein- und Felssturzgebiete die Errichtung von Fangnetzen und Schutzwällen in Erwägung gezogen.

4.1.4. Warnung

Durch die Installation von vorwarnenden Hinweisen auf Massenbewegungen, kann das Risiko der Gefährdung laut GENSKE (2006) ebenfalls minimiert werden. Sie spielt neben Zonierungsmaßnahmen vor allem beim Schutz der Zivilbevölkerung eine bedeutende Rolle. So lassen sich auf vielen Straßen Beschilderungen feststellen, welche zum Beispiel auf Steinschlag hinweisen.

4.2. Aktive Maßnahmen

Während passive Maßnahmen eher vorbeugende Wirkung gegenüber Massenbewegungen erzeugen sollen, werden aktive Methoden direkt angewandt, um Massenbewegungen zu entschleunigen und das Risiko auf weitere Gefährdung zu senken. So werden diese meist installiert, wenn die Massenbewegung bereits im Gange ist.

4.2.1. Drainagen

Laut GENSKE (2006) trägt der Bergwasserzustand erheblich zur Entstehung und Ausbreitung von Massenbewegungen bei. Dies spiegelt sich anhand der Verringerung des Porenwasserdrucks und der effektiven Spannungen wieder. Dabei kann es im schlimmsten Fall zum kompletten Verlust des Reibungswiderstandes kommen. Im eigentlich kompakten Gebirge kann die Zunahme des Kluftwasserdrucks ebenfalls ähnliche Mechanismen hervorrufen.



Abbildung 23: Bereich eines Drainagesystems im Blaubachgraben in Krimml (Salzburg) zur langfristigen Hangstabilisierung. Foto: privat

Im Falle von Drainagen wird das Bergwasser durch Gräben, Bohrungen oder Stollen im Hang entwässert. Am Top oder am Fuß können mittels Oberflächendrainagen Wässer abgeführt und am Eindringen in die Massenbewegung gehindert werden. In Abbildung 23 ist ein solches Beispiel im Projektgebiet des Blaubachgrabens gegeben. Zum sachgerechten Einbau und der korrekten Installation von Drainagesystemen sei jedenfalls ein Fachmann (Geotechniker, Hydrogeologe) miteinbezogen, um den vollen Nutzen eines Entwässerungsprojekts zu erzielen.

4.2.2. Reliefanpassung

Durch die baulichen Maßnahmen von Schutzkörpern kann gem. GENSKE (2006) das Kräftegleichgewicht nach der Veränderung des Reliefs des Hanges wiederhergestellt werden. So kann durch Vorschüttungen am Hangfuß des Rutschkörpers den Kräften entgegengewirkt werden. Ähnliche Effekte erzielt das vorsichtige Abtragen an der Böschungskrone. Da Rutschungen oft in übersteilten Bereichen auftreten, kann eine Verflachung dieser das Risiko deutlich minimieren. Oftmals erfolgt durch gezielte Sprengungen in steilen und instabilen Felspartien ebenfalls eine deutliche Reduktion des Risikos.

4.2.3. Geologische Maßnahmen

Sind die oben genannten aktiven Maßnahmen nicht wirkungsvoll genug bzw. entsprechen nicht den erforderlichen Nutzen, so muss laut GENSKE (2006) über die Anpassung an die geologischen Gegebenheiten des Hangsystems nachgedacht werden. Dabei spielt das Trennflächengefüge des Gebirges eine tragende Rolle. Als Beispiel sei die Anpassung der Böschungsneigung an das Einfallen der Schichtflächen erwähnt. Dabei wird die Böschungsgeometrie an den Versagensmechanismus angepasst. Gegenständliche Maßnahmen reduzieren weiters die Kosten für die Hanggestaltung im eigentlichen Sinne sowie für zukünftige Wartungsarbeiten.

4.2.4. Konstruktive-geotechnische Maßnahmen

Als Ergänzung zu den zuvor genannten geologischen Maßnahmen, können die geotechnischen bzw. konstruktiven Beiträge verstanden werden. Laut GENSKE (2006) werden dabei sämtliche Installationen bzw. Bauwerke verstanden, welche die Böschung dauerhaft stabilisieren. Darunter fallen Stützwände, Schwer- und Winkelstützmauern, Steinsatzkästen oder Verankerungen. Sämtliche Maßnahmen müssen von Geotechnikern oder Ingenieurgeologen sachgerecht geplant werden, da hierbei zahlreiche Nebenfaktoren berücksichtigt werden müssen. Diese Konstruktionen stellen meist die letzte wirksame Alternative zum Schutz vor Massenbewegungen dar und sind daher am kostenintensivsten anzusehen. Teilweise ist auch eine Kombination von verschiedenen geotechnischen Sicherungsmaßnahmen möglich, was den Schutz nochmals erhöht. Auch eine Kombination mit passiven Maßnahmen, wie zum Beispiel Monitoring, wird oft angewandt.

Nachstehend kann in Abbildung 24, welche von der Firmenwebsite der Firma *Porr AG* entnommen wurde, die Installation von Felsankern beobachtet werden. Vor allem im Bereich von Tunnelportalen, entlang von steilen Böschungseinschnitten sowie im Untertagebau stellt ein Ankerschutzschirm oft die einzige wirksame geotechnische Schutzmaßnahme dar.



Abbildung 24: Installation einer Ankerwand zum Schutz von Infrastruktur. Foto: PORR AG (www.porr.at)

4.2.5. Lebendverbau und ingenieurbiologische Maßnahmen

Abschließend sei aus GENSKE (2006) noch erwähnt, Hänge durch gezielte Bepflanzung aktiv zu stabilisieren. Diese biologische Variante kann durch die Wurzelsysteme Zugbelastungen aufnehmen. Zusätzlich wirkt ein Bewuchs der Erosion bzw. Verwitterung entgegen. Durch die pflanzliche Aufnahme von Oberflächen- und Sickerwasser werden zudem auch Porenwasserdrücke minimiert. Auch die ästhetischen und umweltverträglichen Aspekte dürfen beim Lebendverbau nicht außer Acht gelassen werden.

Viele Fachleute stehen jedoch im Widerspruch zur pflanzlichen Sicherung von Böschungen. Zum einen können Gefüge im Untergrund zusätzlich durch die Wurzeltätigkeit aufgelockert werden und zum anderen stellt das Eigengewicht der Pflanzen erneut eine Belastung für den Hang dar.

Generell muss die richtige Auswahl der Pflanzen sowie die Anpflanzung selbst durch Ingenieurbiologen sowie durch geschultes Personal erfolgen.

5. ERKUNDUNGSGEBIET BLAUBACHGRABEN, GEMEINDE KRIMML (SALZBURG, ÖSTERREICH)

In diesem Abschnitt wird das Untersuchungsgebiet dieser Masterarbeit detailliert beschrieben. Neben Information über Geographie, klimatischen Verhältnissen sowie der Geologie wird auch die Massenbewegung im Blaubachgraben näher beleuchtet.

5.1. Allgemeines

Als praktisches Beispiel für diese Masterarbeit dient eine großflächige Massenbewegung in der Gemeinde Krimml, im Salzburger Oberpinzgau an der Grenze zum Bundesland Tirol.



Abbildung 25: Rutschkörper im Blaubachgraben vom Ortszentrum von Krimml aus gesehen. Foto: privat

Die Rutschzone an sich weist eine Y-Form auf und verengt sich in Richtung Tal (siehe Abb. 25). Sie ist westlich der Gerlos Alpenstraße aufgeschlossen und weist eine Ausdehnung von rund 800 m auf und erstreckt sich über eine Höhendifferenz von rund 500 m.

Dieser, als Blaubachgrabenrutschung bezeichneter, Rutschkörper war laut RATHOFER (2012) bereits im Zuge der Errichtung der Gerlosstraße unter näherer Beobachtung und Grund für großräumige Drainagierungsmaßnahmen. Bereits während der Kartierungsarbeiten durch die Geologen *Karl & Schmidegg* (siehe KARL & SCHMIDEGG

(1979) wurde der Talschluss des Blaubaches als Hangkriechen ausgewiesen und die gravitative Bewegung Richtung Tal durch Mur- und Schuttströme bei der Bevölkerung bekannt.

Demnach fanden bereits in den frühen Jahren nach der Errichtung der Gerlosstraße ab 1953 Befliegungen statt, bei welchen das Gebiet nahe der Schönmoos-Hochalm mittels Orthofotos abgebildet wurde. Wermutstropfen waren jedoch die unregelmäßigen Flugepochen, welche eine genaue Auswertung der Bewegungsraten kaum möglich machten.

Erst mit der Errichtung einer nachhaltigen Verbauung des Blaubaches durch die Wildbach- und Lawinenverbauung in den Jahren 1997 bis 2003 fanden regelmäßige Monitoringmessungen statt. Um den Ort im Tal nachhaltig von Vermurung und Schuttströmen zu schützen, wurden ebenfalls durch die WLV Sektion Pinzgau drei Schutzobjekte errichtet. Dabei handelt es sich um eine Konsolidierungssperre mit einer Nutzhöhe von rund 16m sowie zwei Geschiebesortierwerke.

Seit mehreren Jahren werden deshalb in einer Arbeitsgruppe zwischen der Technischen Universität Graz (Institut für Geodäsie, vertreten durch Prof. Kaufmann) und der Wildbach- und Lawinenverbauung Gebietsbauleitung Pinzgau geodätische Messrunden durchgeführt. Diese Monitoringmessungen beinhalten sowohl jährliche geodätische Messungen im Sinne von RTK-GPS Vermessung als auch photogrammetrische Methoden.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass auf Grund der hohen Datendichte und durch die zahlreichen Vorprojekte und Baumaßnahmen im Blaubachgraben dieses Fallbeispiel als sehr geeignet angesehen werden kann, um die Methoden dieser Masterarbeit dort durchzuführen. Neben eigenständiger Geländekartierung und Anwendungen wurde daher vermehrt auch auf bereits vorhandenes Datenmaterial aus vorangegangenen Projekten zurückgegriffen und diese eingearbeitet.

5.2. Geographie

Das Projektgebiet, mit welchem sich die Anwendung dieser Masterarbeit befasst, liegt im Gemeindegebiet von Krimml. Die Oberpinzgauer Gemeinde Krimml stellt die südwestlichste Gemeinde des Bundeslandes Salzburg und des politischen Bezirks Zell am See dar.

Das Ortsgebiet beheimatet rund 900 Einwohner und kann über die Gerlos Alpenstraße B165 erreicht werden. Im Westen grenzt Krimml an das Bundesland Tirol und das Zillertal (Bezirk Schwaz in Tirol). Im Süden verläuft die Bundesgrenze zur Republik Italien, im Südosten die Grenze zum Osttiroler Bezirk Lienz. Im Osten und Norden grenzt Krimml an die Gemeinden Neukirchen am Großvenediger sowie Wald im Pinzgau.

Der Talkessel von Krimml, welcher auf 1067 m Seehöhe gründet, ist in die Hohen Tauern (Venedigergruppe) eingebettet. Der Nationalpark Hohe Tauern, welcher die

gesamte gleichnamige Gebirgskette umfasst, schließt ebenfalls das Gemeindegebiet mit ein. Im Westen grenzt das Gebiet an die Zillertaler Alpen. Beide Gebirgsgruppen erreichen über 3.000 m Seehöhe und zählen damit zum hochalpinen Raum.

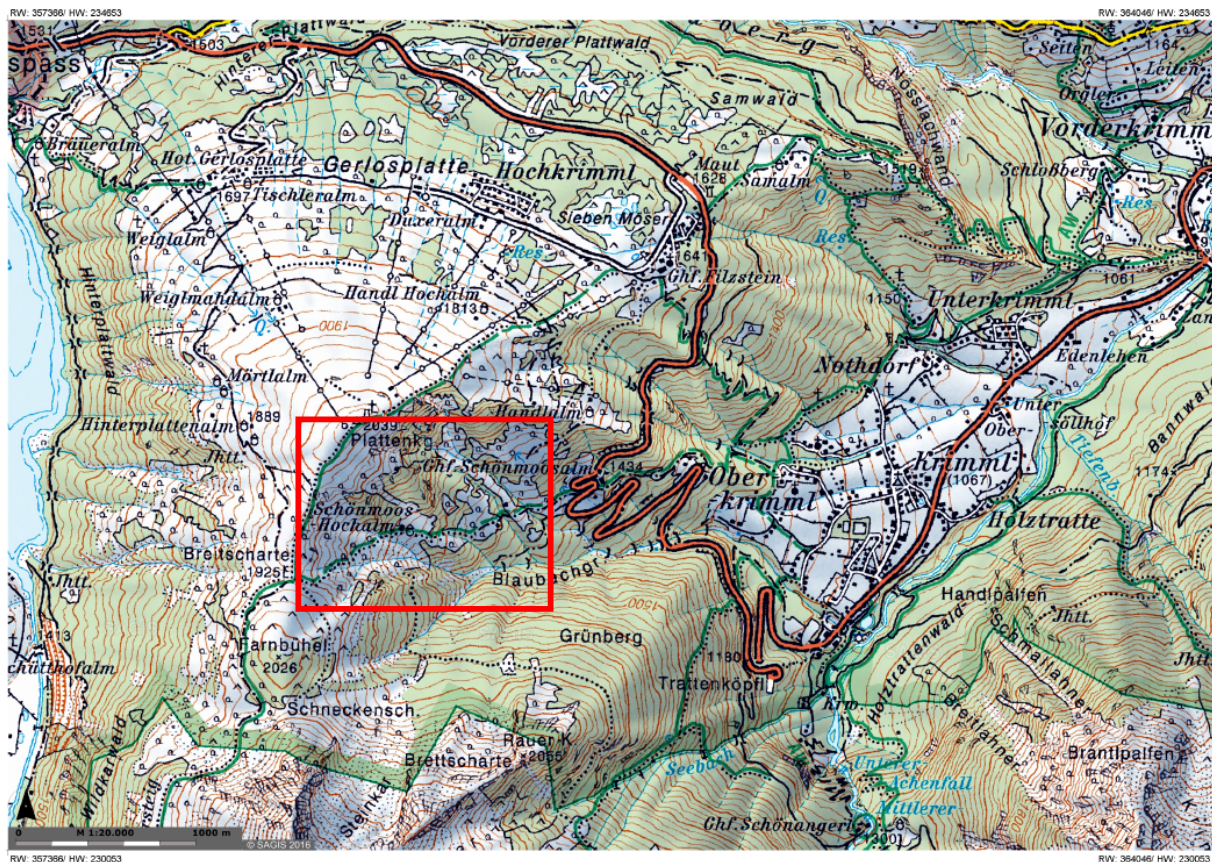


Abbildung 26: Ausschnitt aus der Österreichischen Karte 1:50.000 und dem Raum Krimml mit dem rot umrandeten Projektgebiet im Blaubachgraben. (SAGIS, 2016; Druckmaßstab 1:20.000)

Die Abbildung 26 zeigt das Gemeindegebiet von Krimml mit dem Projektgebiet in roter Umrandung im Bereich der Schönmoos-Hochalm. Weiters ist in dieser Abbildung 26 ersichtlich, dass der Raum von Krimml infrastrukturell gut erschlossen ist, was die zahlreichen Schilfte, Straßen und Wege verdeutlicht. Im Westen bzw. linken Bildbereich ist der Speicher „Durlassboden“ erkennbar, der sich in Nord-Süd Achse erstreckt und die Grenze zum Bundesland Tirol bildet.

5.3. Klima

Bedingt durch die Lage im Hochgebirge und einer durchgehenden Seehöhe von über 1000 m ü. A. herrscht in Krimml kontinentales, inneralpines Klima. Diese lokale Klimazone ist geprägt durch kurze Sommer und lange Winter. Die Temperaturen sind weitgehend niedrig und erreichen in den Sommermonaten Durchschnittstemperaturen von ca. 15°C (Juli). Im Winter steigen die durchschnittlichen Temperaturen nur gering über den Gefrierpunkt und liegen bei ca. 4°C.

Das Klimadiagramm der ZAMG Messstation von Krimml ist in Abbildung 27 dargestellt und wurde aus dem TIROL ATLAS (2016) entnommen.

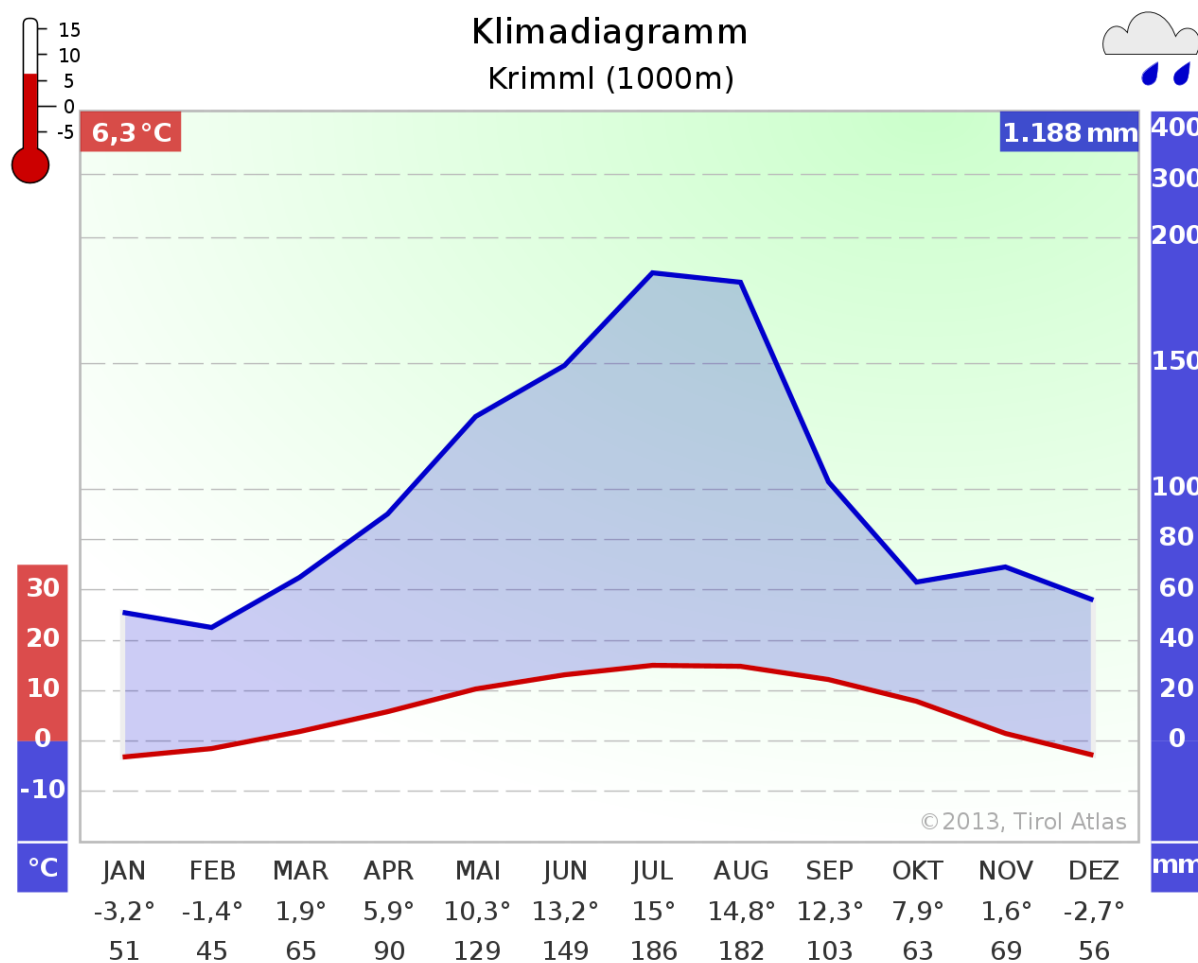


Abbildung 27: Klimadiagramm von der Wetterstation Krimml entnommen aus TIROL ATLAS (2016)

Einen wichtiger Klimaparameter stellt dabei der langjährige gemittelte Niederschlag dar, welcher in Krimml bei hohen 950 bis 1320 mm pro Jahr liegt. Die Niederschlagsmaxima fallen dabei in den Sommermonaten, wobei im Winter an über 100 Tagen eine Schneedecke vorhanden ist. Im Durchschnitt wird an rund 130 Tagen pro Jahr Schneefall registriert.

Typisch für klimatisch inneralpin-kontinental beeinflusste Gebirgstäler sind auch Föhnlagen, welche mit starken Sturmböen einhergehen können. Dabei können selbst im Winter die Lufttemperaturen in relativ kurzer Zeit auf 10 bis 15 Grad ansteigen.

5.4. Hydrologie

In den Krimmler Tauern befindet sich eine bedeutende Wasserscheide, denn im Norden entwässern die Flüsse in Richtung Donau und Schwarzen Meeres, im Süden hingegen über Eisack und Etsch in Richtung Adria.

In der Gemeinde Krimml entspringt die gleichnamige Krimmler Ache, welche über das Achenal in Richtung Norden entwässert. Das Gewässer entspringt in den Gletschern

der Krimmler Tauern im Süden des Gemeindegebiets und überwindet schließlich in den weltbekannten Krimmler Wasserfällen die Talstufe nach Krimml. Die Wasserfälle stellen mit einer gesamten Fallhöhe von 385 m die höchsten Wasserfälle Österreichs dar.

In weiterer Folge mündet die Krimmler Ache in die Salzach, welche den größten Salzburger Vorfluter darstellt. Das System Krimmler Ache gehört somit dem System Salzach – Inn – Donau an und entwässert in Richtung Schwarzes Meer.

Das Projektgebiet ist im Einzugsgebiet des Blaubaches, welcher auch namensgebend für die untersuchte Massenbewegung ist, situiert. Laut ADLER, 2016 umfasst das gesamte Einzugsgebiet des Blaubaches eine Fläche von rund 4,5 km². Generell kann der Blaubach als Zubringer der Krimmler Ache bezeichnet werden. Ergänzend ist anzumerken, dass der Blaubach für die Ausbildung eines Schwemmfächers verantwortlich ist, auf welchem der Ortskern von Oberkrimml gründet. Demnach kann der Blaubach mit seinen zahlreichen vergangenen Murenabgängen und Überschwemmungsereignissen als Hauptgeschiebelieferant für Krimml angesehen werden.

5.5. Geologie der Hohen Tauern und des Oberpinzgaus

Der Abschnitt der regionalen Geologie wurde mit Hilfe des Skripts für Regionale Geologie der Universität Innsbruck aus dem Jahr 2013 von Ao. Univ.-Prof. Dr. *Karl Krainer* beschrieben.

5.5.1. Lage und Übersichtskarte

Die Gemeinde Krimml und das Projektgebiet Blaubachgraben befindet sich im so genannten Tauern Fenster, einem Gebiet der Ostalpen, in welchem penninische und helvetische Decken fensterartig zu Tage treten. Das Tauernfenster erstreckt sich über ca. 150 km vom Wipptal (Tirol) im Westen bis ins Liesertal (Kärnten) im Osten und weist in Nord-Süd Richtung eine Breite von etwa 30 km auf.

Eine allgemeine, großtektonische Karte ist in Abbildung 28 gegeben, die aus dem Vorlesungsskript von Prof. Karl Krainer (Universität Innsbruck) entnommen wurde (KRAINER, 2013).

Geologische Übersichtskarte des Tauernfensters

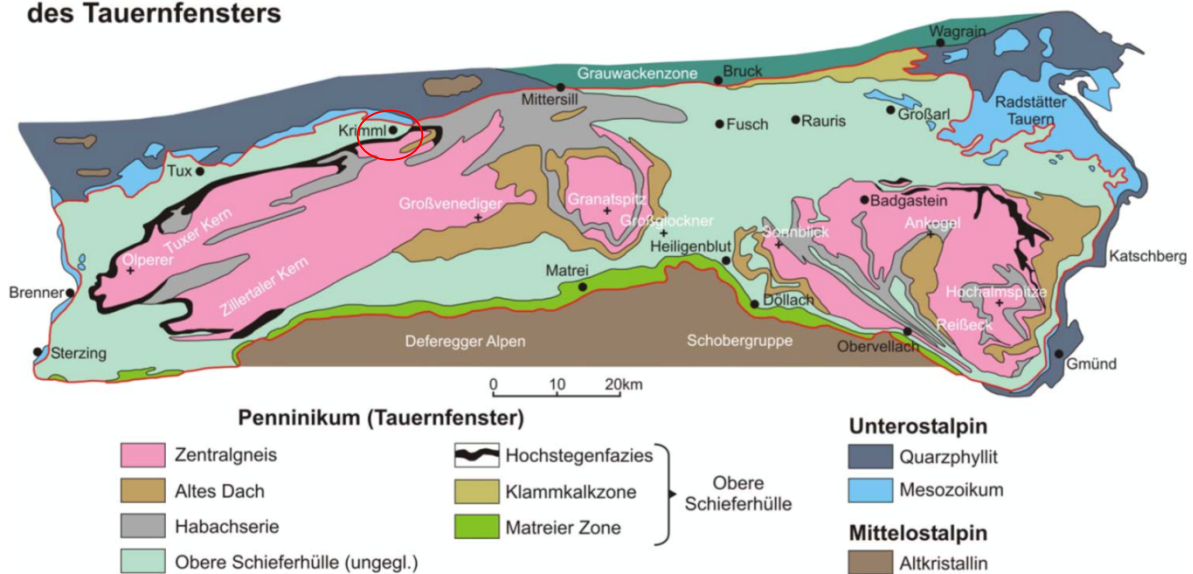


Abbildung 28: Geologische Übersichtskarte des Tauernfensters mit den wichtigsten Deckensystemen. Im roten Kreis ist das Untersuchungsgebiet situiert. (entnommen aus KRÄINER, 2013)

5.5.2. Tektonik und Abgrenzung

Der komplexe geologische Schichtaufbau des Fensters umfasst dabei das Penninikum, welches an allen Begrenzungen unter die ostalpinen Decken abtaucht.

Das Penninikum des Tauernfensters ist in verschiedene Decken gegliedert, welche im Abschnitt 5.6.2. kurz beschrieben werden. Der Bau dieser Decken entstand im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung und ist durch die verschiedenen physiko-chemischen Eigenschaften der einzelnen Gesteinsserien bedingt. Das unterschiedliche Veralten der Gesteinsformationen unter tektonischer Beanspruchung führte dazu, dass der Zentralgneiskörper, welcher eine äußerst starre Komponente darstellt, im Zentrum des Tauern Fensters aufgeschlossen ist (Kernbereich). Die Obere Schieferhülle sowie das Alte Dach können jedoch als teilbeweglich beschrieben werden und bilden daher die Decken.

Die horizontale Verkürzung des Tauern-Massivs und die damit assoziierte Verdickung verursachte eine prägnante vertikale Hebung. Als Reaktion auf diese Hebung wurden im Westen und Osten des Tauern-Massivs Abschiebungen gebildet, welche heute als Brenner- und Katschberg-Abschiebung bekannt sind.

Die bedeutendsten Störungszonen und Begrenzungen stellen im Süden die Matreier Zone (mittelostalpinen Altkristallin) und im Westen und Nordwesten die unterostalpinen Gesteinsserien des Innsbrucker Quarzphyllits sowie der Tarntaler Serie, dar. Im Osten und Nordosten taucht das Tauernfenster unter das Unterostalpin der Katschbergzone und der Radstädter Tauern ab. Im Norden begrenzt die Salzachstörung das Tauernfenster. Dort kommt es zum Übergang zu oberostalpinen Gesteinen der nördlichen Grauwackenzone (vgl. KRÄINER, 2013).

5.5.3. Lithologischer Aufbau im Oberpinzgau sowie des Krimmler Raumes

Im Oberpinzgau und der Gemeinde Krimml tritt das Tauernfenster mit Zentralgneis, Habachserie sowie Gesteinen der Oberen Schieferhülle zu Tage und wird im Norden durch die Salzachtalstörung begrenzt.

Beim Begriff Zentralgneis handelt es sich um einen Sammelbegriff für spätvariszische (Oberkarbon bis Unterperm) intrudierte granitische Schmelzen. Die plutonischen Gesteine erfuhren schließlich während der alpidischen Orogenese einen starken Metamorphose- und Schieferungsprozess (vgl. KRAINER, 2013).

Bei Gesteinen der Habachserie handelt es sich um eine Abfolge von niedrigmetamorphen altpaläozoischen Gesteinen, wobei kaum karbonathaltige Gesteinsserien enthalten sind.

Das Alte Dach, welches laut geologischer Karte des Tauernfensters im Projektgebiet nur eine untergeordnete Rolle spielt, soll der Vollständigkeit halber dennoch kurz erwähnt werden. Dabei handelt es sich im Grunde genommen um bereits voralpidisch deformierte Altkristallingesteine, welche metamorph überprägt wurden (vgl. KRAINER, 2013).

Die Serie der Oberen Schieferhülle wird auch als jüngere oder kalkreiche Schieferhülle bezeichnet. Diese umfasst mächtige Gesteinsabfolgen aus metamorph überprägten, permomesozoisch-klastischen und karbonatischen Sedimenten sowie basischen Vulkaniten (vgl. KRAINER, 2013).

5.6. Blaubachgraben Rutschung

5.6.1. Lage und Überblick

Das Kernstück dieser Masterarbeit sieht die Bearbeitung einer aktiven Rutschung im Blaubachgraben, Gemeinde Krimml (Salzburg) vor. Das Projektgebiet befindet sich nahe der Schönmoos-Hochalm.

Die Hangbewegung grenzt unmittelbar westlich an das Ortsgebiet der Gemeinde Krimml an und erstreckt sich bis zu einer Seehöhe von ca. 1950 m. Im Norden der Rutschung befindet sich das Ski- und Wandergebiet Hochkrimml-Gerlosplatte. Durch das Gebiet der Massenbewegung windet sich die Gerlos Alpenstraße in Richtung Zillertal.

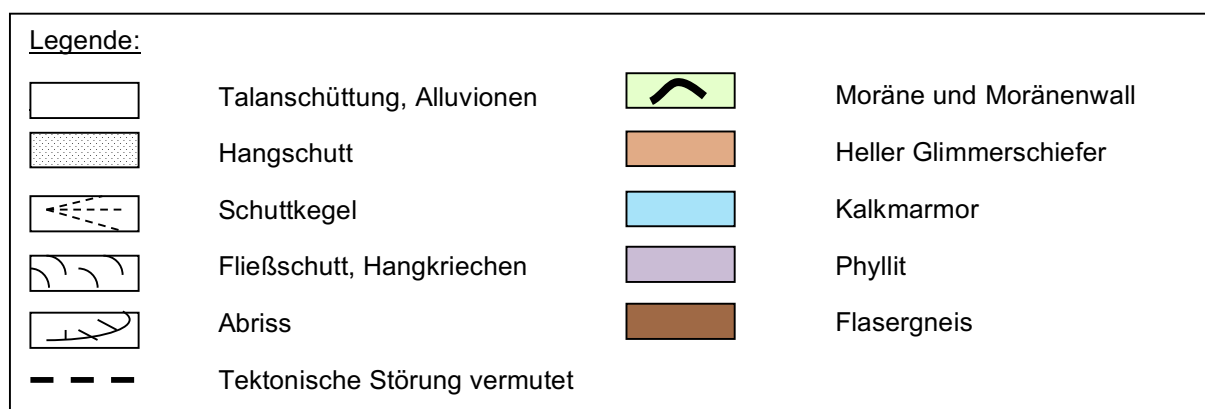
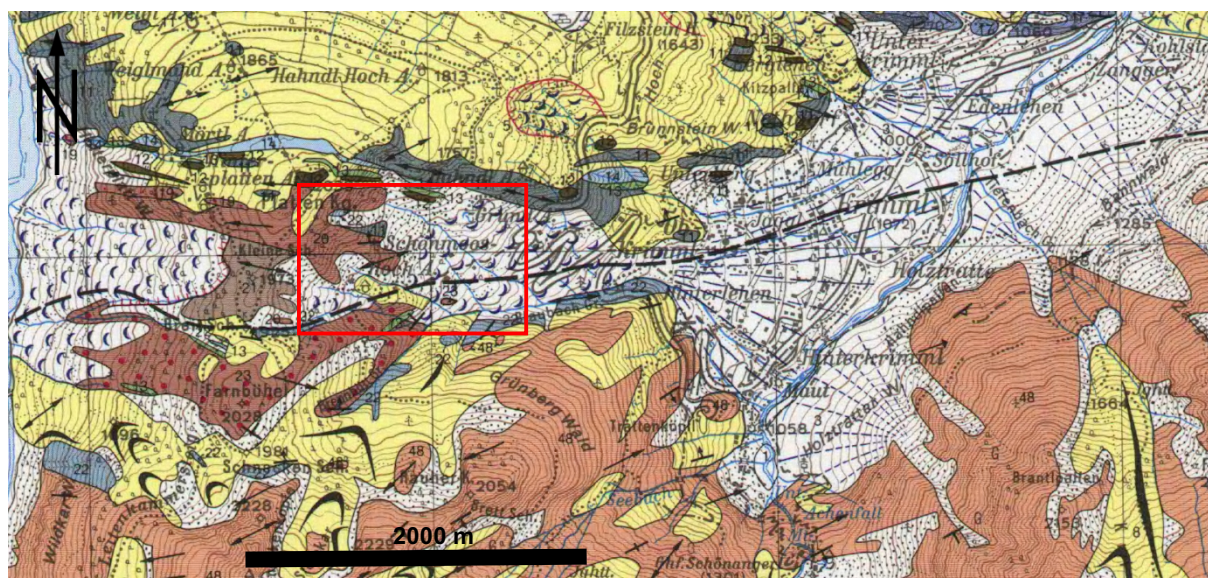


Abbildung 29: Geologische Übersichtskarte vom Ortsgebiet der Gem. Krimml sowie der Hangbewegung im Bereich Schönmoos-Hochalm. Entnommen aus der ÖK Geologischen Karte, Mappenblatt Krimml (M 1:50.000) (Karl & Schmidegg, 1979)

Gemäß geologischer Karte der Geologischen Bundesanstalt der Republik Österreich im Maßstab 1:50.000 aus dem Jahr 1979 (Ausschnitt in Abb. 29 einsehbar) bilden im Projektbereich Unterostalpine Decken die Unterlage für Quartäre Ablagerungen. Im Unterostalpin treten im Projektumfeld gehäuft Quarzite, Serizitquarzite, Chloritschiefer, Amphibolite, Ophiolite sowie vereinzelt Kalke und Dolomite auf. In gelber Signatur sind die Quartären Ablagerungen der Gletscher sowie tributärer Gerinne verzeichnet. Dabei handelt es sich vor allem um Moränenreste sowie Terrassenschotter. Im Talbereich bzw. im Krimmler Kessel sind hauptsächlich Talalluvionen vorherrschend. In der näheren Umgebung der Rutschung im Blaubachgraben liegt Hangschutt und Geschiebematerial der Massenbewegung aufgeschlossen vor.

Die einzelnen lithologischen Unterscheidungen im Projektraum (siehe Abb. 30; rote Umrandung) wurden durch die Detailkartierung vor Ort verzeichnet und können im folgenden Abschnitt eingesehen werden.

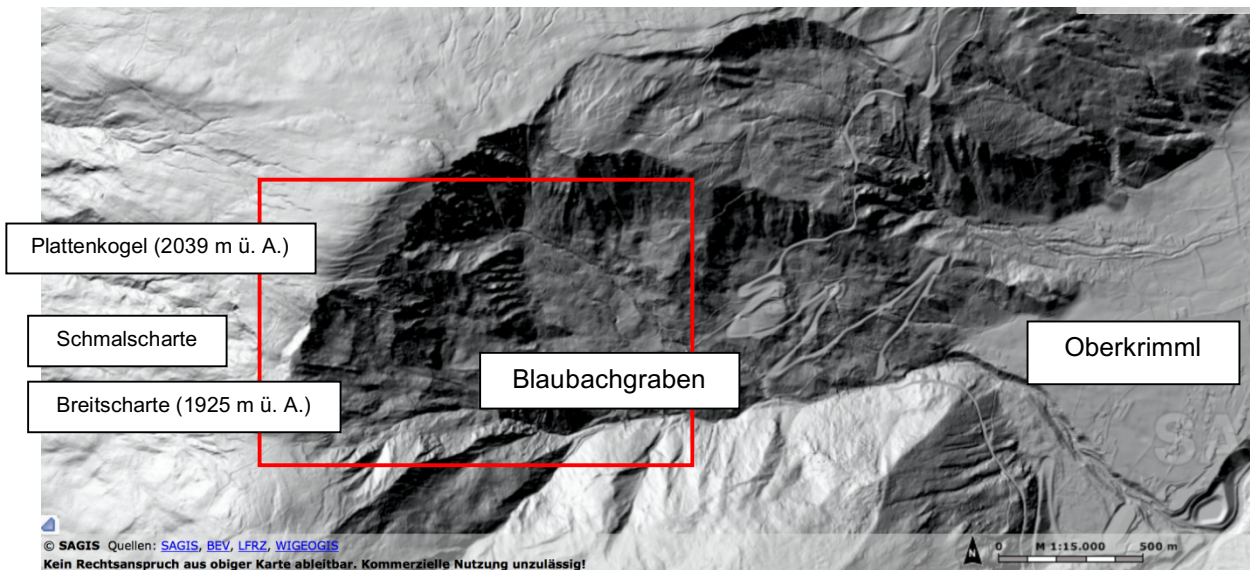


Abbildung 30: Schummerung bzw. Geländemodell im Maßstab 1:20.000 vom Projektgebiet Schönmoos-Hochalm (Blaubachgraben). Entnommen aus SAGIS (2016)

5.6.2. Petrographische Gegebenheiten im Projektgebiet

Die petrographischen Untersuchungen wurden bereits von mehreren Fachleuten in vorangegangenen Studien über die Rutschung im Blaubachgraben vorgenommen. Daher wurde die petrologische Gesteinsbestimmung im Zuge dieser Arbeit eher in den Hintergrund gerückt, weshalb auch keine expliziten Labor- und Gesteinsanalysen mehr durchgeführt wurden.

Die zusammenfassende Beschreibung der Gesteine ist dem folgenden Abschnitt zu entnehmen und wurde aus der Magisterarbeit von ZOBL (2001) entnommen, welcher sich sehr detailliert mit den petrographischen Einheiten im Blaubachgraben befasst hat. Weiters sei auch erwähnt, dass auch Werte für Berechnungen aus den Laborergebnissen von ebengenannten beruhen. Im Falle einer Verwendung wird an den betreffenden Stellen nochmals auf den Autor verwiesen.

5.6.2.1. Zentralgneis

Die Gesteine des Zentralgneises bilden die unterste Deckeneinheit des Projektraums und bestehen zunehmend aus hochgradig metamorphen hellen Gneisen. Mineralogisch setzen sich ebengenannte Gesteine aus Feldspat, Quarz und Hellglimmer (Muskovit) zusammen. Grüne Fasern im Zentralgneis können aus Chlorit und Muskovit bestehen. Die Hauptschieferung fällt monoton nach 010 mit 80 Grad ein (010/80).

Datierungen deuten auf eine altpaläozoisches Alter hin, wobei die Metamorphose im Zuge der alpidischen Orogenese anzusetzen sind, was durch Altersdatierungen anhand von Kataklasten erwiesen wurde.

5.6.2.2. Hochstegenmarmor

Der rund 20 bis 100 Meter mächtige, gebänderte Hochstegenmarmor setzt sich aus wechselnden grauen, bläulichen und helleren Lagen zusammen. Mineralogisch sind hauptsächlich Kalzitkörner sowie untergeordnet Quarz vorkommend, welcher undulös und randlich stark zerfressen sein kann. Akzessorisch können Glimmer wie Muskovit und Biotit sowie Apatit auftreten. Allgemein kann der Hochstegenmarmor als hochreiner Marmor angesprochen werden, welcher in Ausnahme der Basislage nur geringe Mengen an Quarz und Serizit aufweist.

Alterstechnisch konnte mittels Datierung eine oberjurassische Entstehung nachgewiesen werden.

5.6.2.3. Untere Schieferhülle

Die Gesteine der unteren Schieferhülle sind in mehrere Subgruppen unterteilt.

Als Basis fungiert die Porphyrschiefergruppe, ein metamorph überprägtes Sediment. Das stark geschieferte Gestein weist sehr feinkörnige Quarzlagen auf, die sich mit Lagen aus Chlorit und Biotit abwechseln. Auch Feldspat und Epidot kommt untergeordnet in diesen Lagen vor.

5.6.2.4. Obere Schieferhülle

Auch die obere Schieferhülle setzt sich aus einer Reihe von verschiedenen Gesteinen zusammen, welche allesamt der Glocknerdecke zugeordnet werden können. Dabei sind die meist meist mesozoischen Sedimente metamorph überprägt und unterschiedlichen Faziesräumen zugeordnet.

Allgemein kann als typisches Merkmal der Oberen Schieferhülle von grünen Phylliten bis Kalkschiefern ausgegangen werden, welche ebenso auch als Bündner Schiefer ausgeprägt sein können.

5.6.2.5. Quartär

Quartären Ablagerungen setzen sich im Krimmler Raum hauptsächlich als Überreste der Vereisungen zusammen. Dies spiegelt sich in Form von Moränenmaterial wider. Das Material an sich ist meist durch flaches, gekritztes Geschiebe mit dunkelbrauner feinkörnigen Matrix gekennzeichnet. Weiters sind die Moränenablagerungen meist stark konsolidiert.

5.7. Hangbewegung im Blaubachgraben

Bereits durch die geologische Aufnahme des Gebietes im Jahr 1979 durch KARL & SCHMIDEGG im Jahr 1979 wird deutlich, dass im Bereich Schönmoos-Hochalm bereits eine Massenbewegung erkannt wurde. Durch die Signatur Fließschutt wurde bereits auf die Art der Bewegung im Bereich Blaubachgraben eingegangen und ausgewiesen. Im Talbereich im Übergang zum Ortsgebiet von Krimml geht die Massenbewegung in Schwemmfächersedimente über.

Das Gelände im Rutschgebiet ist zusehends nach Osten exponiert. Im oberen, übersteilten Bereich beträgt die Hangneigung deutlich über 30 Grad und das Gelände ist, mit Ausnahme der begehbaren Zonen um die Wanderwege, sehr unwegsam.

Das Institut für Geodäsie der Technischen Universität Graz führt seit mehreren Jahren Detailmessungen auf dem Rutschkörper im Blaubachgraben durch. Die von Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Viktor Kaufmann durchgeführten geodätischen Messungen liefern seitdem wichtige Informationen über die jährlichen Bewegungsraten sowie das kinematische Verhalten der Rutschung. Die geodätischen Messungen wurden anfänglich von 2001 bis 2012 mit einer Totalstation durchgeführt. Ab dem Jahr 2012 wurden die Vermessungen per RTK GPS fortgeführt. Die Messungen fanden dabei einmal jährlich im Herbst statt.

5.7.1. Zusammenhang von Niederschlag und Bewegungsrate im Blaubachgraben

Wie ADLER (2016) in seiner Masterarbeit beschreibt, tragen witterungsbedingte und klimatische, äußere Einflüsse maßgeblich zur Stabilität eines Hanges bei. Auch ZOBL (2001) verweist auf den Niederschlag als wesentlichen Einflussfaktor auf die Hangstabilität und schreibt der Niederschlagsintensität, der Infiltration in den Boden, den Matrixfluss und dem gesättigten oberflächlichen Abfluss einen direkten Einfluss zu.

Generell stellt ADLER (2016) die These auf, dass die größten Bewegungsraten der Massenbewegung mit der Mächtigkeit der Schneedecke korrelieren. Der Vergleich von Jahrgängen mit schneereichen, kalten Wintern, bei welchen viel Wasser in der durchgängigen Schneedecke gespeichert wurde, zeigt, dass hier höhere Bewegungsraten zu verzeichnen sind. Dies spiegelt sich auch in lokalen Abgleitprozessen im Frühjahr 2001 wider, wo eine deutlich höhere Schneedecke registriert wurde als in den Folgejahren.

Als Indiz für die oben genannte Annahme könnte der Bericht zur *Geodätischen Wiederholungsmessung 2002 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg* von Prof. Kaufmann dienen (siehe (KAUFMANN, KIENAST, & LADSTÄDTER, 2002)). In diesem fügen die Autoren an, dass auf Grund der zweimaligen Messungen (jedoch ungleiche Beobachtungszeiträume Juli-Oktober 2001 sowie Gesamtjahr Oktober 2001 bis Oktober 2002) stark unterschiedliche Bewegungsbeträge registriert wurden. Demnach sind die auf jeweils ein Jahr normierten

Verschiebungsgeschwindigkeiten vor allem im unteren Bereich in den Sommermonaten um rund 20% größer als im Vergleichszeitraum Oktober 2001-Oktober 2002. Auffallend ist weiters, dass an den Punkten oberhalb der Abbruchkante die Beträge um mehr als 50% langsamer waren. Schon beim Verfassen des Abschlussberichtes des Kooperationsprojekts zwischen der WLV Gebietsbauleitung Pinzgau und der Technischen Universität Graz wurde seitens der Verfasser auf die Dringlichkeit von weiteren Studien hinsichtlich dieser stark saisonal schwankenden Verschiebungsbeträge hingewiesen. Abschließend sei weiters erwähnt, dass sich die Werte der Rutschung im Vergleich von photogrammetrischen Ergebnissen aus den 1990er Jahren zum Beobachtungszeitraum Oktober 2001 bis Oktober 2002 stark verlangsamt haben.

Weiters ist laut ADLER (2016) auch nach Starkniederschlägen mit einer erhöhten Bewegungsrate zu rechnen, jedoch gibt es auch nach diesen Ereignissen kaum verwendbare Messdaten.

Final sei abschließend dennoch angemerkt, dass die Hypothesen aus ADLER (2016) für das Untersuchungsgebiet kaum verifizierbar sind. Dies ist darin begründet, dass Bewegungsmessungen ausschließlich im Frühherbst stattfinden und nach der Schneeschmelze keine Messdaten vorliegen. Es können daher nur Annahmen getätigt werden, um den Zusammenhang der Schneelage im Gebiet von Krimml und den Bewegungsmustern der Massenbewegung herzustellen. Eine zusätzliche Messreihe im Frühjahr würde demnach die Genauigkeit des Modells von ADLER (2016) zusätzlich erhöhen und möglicherweise stützen.

5.7.2. Einfluss der baulichen Maßnahmen auf die Hangbewegung

Im Rutschgebiet des Blaubachgrabens wurden zahlreiche Entwässerungsmaßnahmen (Drainageschächte) sowie Rückhalte- und Sortierungsvorrichtungen der Wildbach- und Lawinenverbauung errichtet.

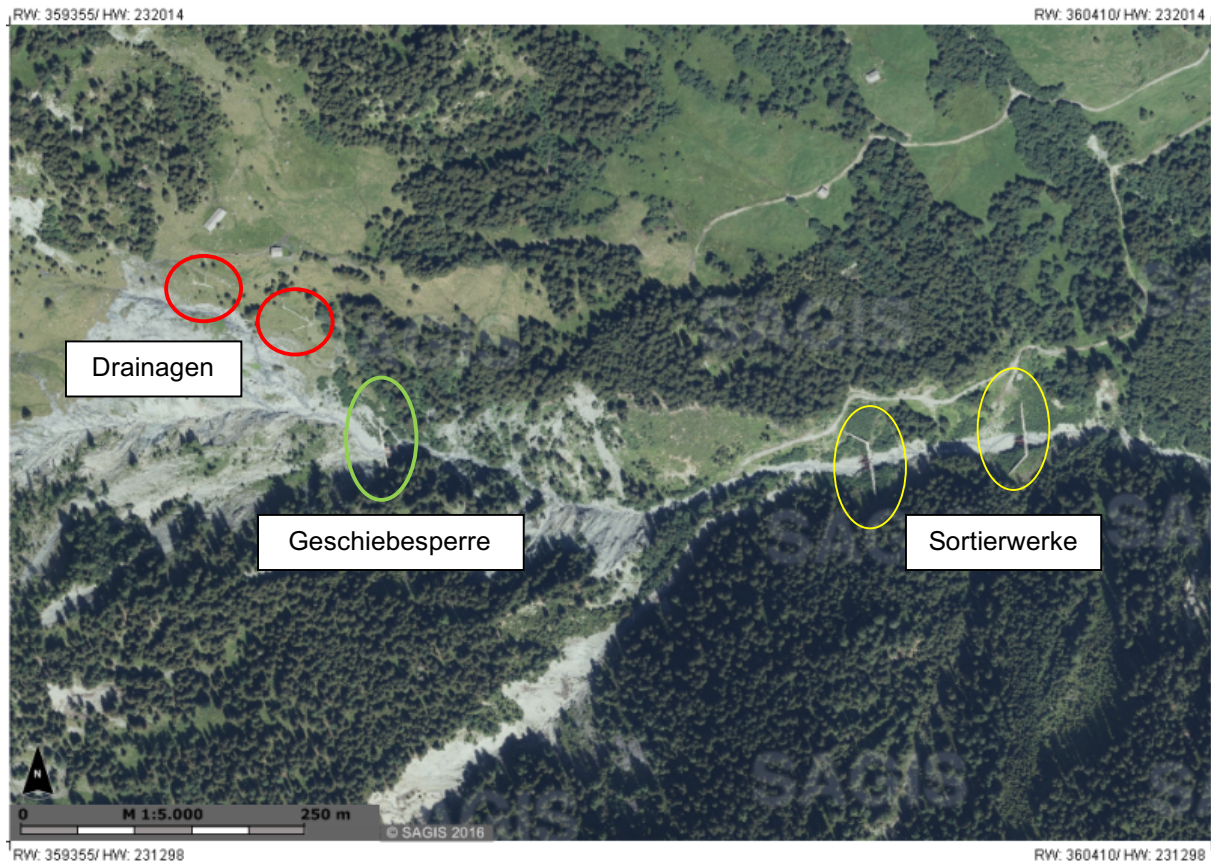


Abbildung 31: Orthofoto aus dem Jahr 2015 zeigt die Baumaßnahmen im Bereich Schönmoos-Hochalm. (SAGIS, 2016; Druckmaßstab 1:5.000)

Wie im Orthofoto in der Abbildung 31 ersichtlich, wurden im unteren Bereich zwei Sortiervorrichtungen sowie eine Konsolidierungssperre errichtet. Diese durch die Wildbach- und Lawinerverbauung geplanten Schutzbauwerke wurden im Zeitraum von 2001 bis 2007 gebaut.

Unterhalb der Jagdhütte an der Schönmoos-Hochalm wurden Drainagesysteme errichtet, um den ober- sowie unterirdischen Abfluss besser regulieren zu können.

Durch vorangegangene Analysen der jährlich gemessenen Bewegungsraten im Blaubachgraben kann laut ADLER (2016) kein tendenzieller Zusammenhang der Verschiebung mit den Schutzbauwerken erkannt werden. Demnach haben die baulichen Maßnahmen keinen Einfluss auf die Bewegung der Blaubachgrabenrutschung. Weiters ergänzt ADLER (2016), dass der Wasserhaushalt im Rutschbereich immer noch erhöhten Einfluss auf das Rutschverhalten vorweist und der Hang daher noch nicht ausreichend entwässert ist.

6. ERGEBNISSE DER GELÄNDEBEGEHUNG UND KARTIERUNGSARBEIT

Zur Aufnahme der einzelnen morphologischen Elemente fand zwischen 28. und 30. September eine Geländebegehung statt. Bei dieser Begehung wurden zusammen mit Prof. Liu und Prof. Kaufmann Messungen an verschiedenen Punkten im Rutschgebiet durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Kartiertage sind im folgenden Kapitel nachzulesen.

6.1. Erreichbarkeit sowie Einteilung des Rutschgebietes

Das Untersuchungsgebiet im Blaubachgraben ist am besten über die Gerlos Alpenstraße via Krimml erreichbar. Nach circa 6 km vom Ortszentrum von Krimml erreicht man den Parkplatz vor dem Almhotel Schönmoosalm, welcher auch Ausgangspunkt des Wanderweges in Richtung Rutschhang ist. Den Hauptkörper der Rutschung erreicht man nach einem halbstündigen Fußmarsch.

Das Rutschgebiet selber kann in zwei große Bereiche eingeteilt werden, welche auch morphologisch starke Unterschiede aufweisen. Während im oberen Bereich das Abrissgebiet angesiedelt ist, kann die untere Zone als Akkumulationsraum des Massenbewegungsmaterials bezeichnet werden.

6.2. Morphologische Beschreibung des Rutschkörpers

6.2.1. Almbereich (oberer Bereich)

6.2.1.1. Allgemein

Der obere Bereich ist landschaftlich gekennzeichnet durch mittelsteile bis steile Almwiesen. Im Abrissbereich ist am Rutschkörper selber kaum dichte Bewaldung festzustellen. Bäume in diesem Bereich weisen teilweise eine starke Krümmung auf, was auf hohe Bewegungsraten im Untergrund deuten lässt.

Generell lässt sich der obere Bereich in vier größere Rutschkomplexe zusammenfassen, wobei jeder einzelne erneut von kleineren, oberflächlichen Massenbewegungen durchzogen ist. Hinsichtlich der Nomenklatur entschied man sich im Zuge dieser Masterarbeit für die Massenbewegung Breitscharte (Süden), Zentrum, sowie im Norden Schmalscharte und Plattenkogel. Ergänzend sei erwähnt, dass sich sämtliche Rutschungen ostwärts in Richtung Krimmler Talkessel ausbreiten.

Die Unterteilung in Abrisszone und Ablagerungs- bzw. Erosionsbereich ist in Abbildung 32 verdeutlicht und durch die gelbe, durchgezogene Linie getrennt.

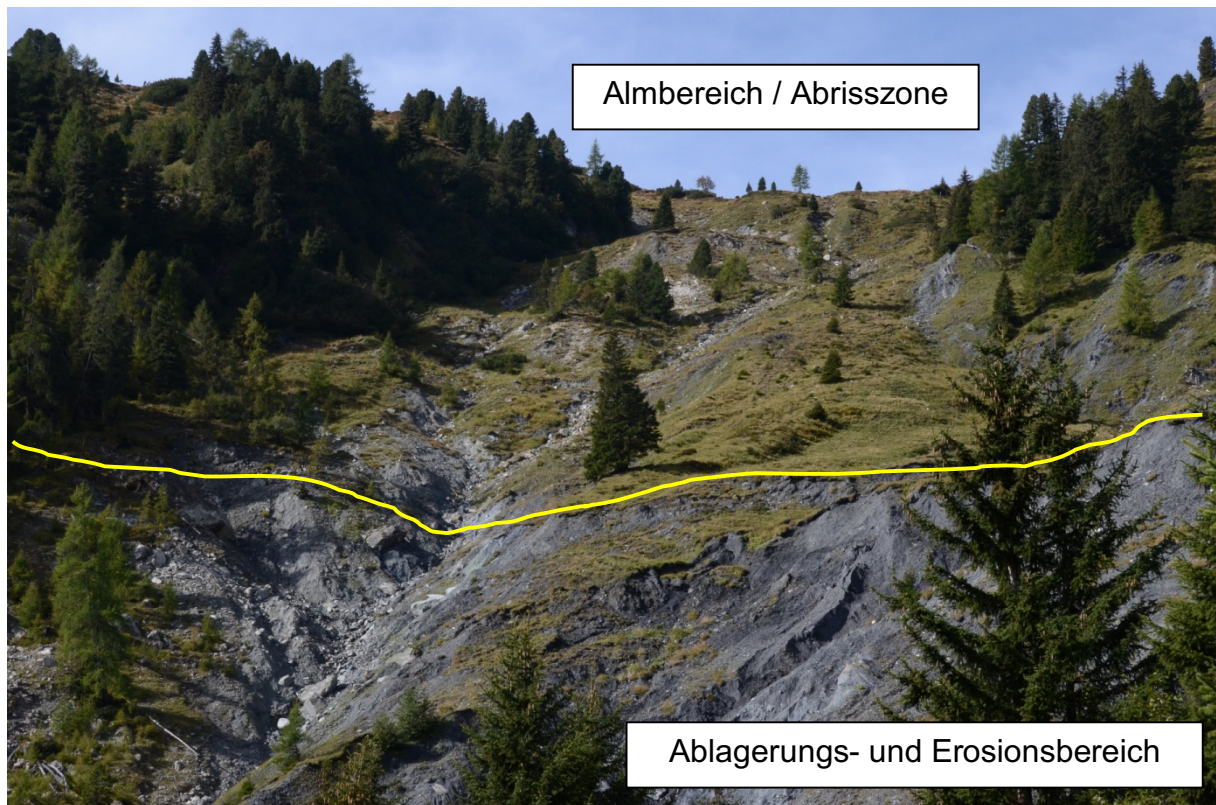


Abbildung 32: Blick vom Gegenhang auf den Übergang von der Erosionsmulde in den oberen Almbereich und der Breitscharte. Foto: privat

6.2.1.2. Material

Die Materialzusammensetzung im Almbereich variiert sehr stark. Während im Kambereich anstehende verwitterungsresistente Gneise auftreten, sind im unteren Bereich stark erosionsanfällige Graphitphyllite zu beobachten. Das Korngrößenspektrum dieser Erosionsprodukte reicht von Schluff bis Kies. Dabei tendiert letztgenanntes Material zu rutschen und abgetragen zu werden, was auch die hohe Materialakkumulation im Bereich der Schönmoos-Hochalm belegt. Weiters sind nahe dem nördlichen Kambereich Störungsgesteine lokalisiert, die auf eine tektonische Aktivität im Untersuchungsgebiet hindeuten. Diese Kataklastite sind hellgrau bis weiß und stark zerlegt. Im Gelände ist diese Zone durch einen mit steilen Felswänden flankierten, ca. 30 Meter breiten, begrünten Bereich gekennzeichnet.

6.2.1.3. Abrissbereiche

An der Erdoberfläche selbst konnte eine Vielzahl an Abrisskanten registriert werden, deren Tiefe bzw. Mächtigkeit teils stark variiert. Im oberen, übersteilten Bereich kann die Mächtigkeit bis zu mehreren Zehnermetern erreichen. Kleinere, lokale Rutschkörper weisen bei deren Abrissflächen Mächtigkeiten von wenigen Metern (siehe Abb. 33) auf und sind vor allem im Übergangsbereich zwischen sehr steilem Gelände und Erosionskegel angesiedelt. Längsrisse bzw. Querklüfte im Almbereich sind vor allem in der Übergangszone zu beobachten. Unmittelbar oberhalb von Abrisskanten treten Querklüfte mit Öffnungsweiten von mehreren Zentimetern auf.



Abbildung 33: Mehrere Meter mächtige Abrisskante im Bereich der Breitscharten Massenbewegung. Gut erkennbar ist hier die völlig heterogene Krönung des Materials, welche von Ton bis Blöcken reicht. (Zahlstab entspricht 1 m). Foto: privat

Am Bergkamm bzw. am Übergang in Richtung Durlassboden ist im übersteilten und nach Südost bis Ost exponierten Bereich das Hauptabrissgebiet lokalisiert. Hier konnten im Gelände senkrechte bis überhängende Felspartien beobachtet werden. Des Weiteren konnten im nordöstlichen Bereich tektonische Störungsgesteine vorgefunden werden, welche zum Teil stark beansprucht und aufgearbeitet sind. Oberhalb der senkrechten Abrissbereiche bilden sich bereits neue Dehnungsrisse aus, welche sich zu Nackentälern ausbilden. In diesem Bereich am Bergkamm ist abermals eine sehr starke Vernässung sowie eine typische Sumpflvegetation zu vernehmen (siehe Abb. 34).



Abbildung 34: Oberhalb der Hauptabrissszone bilden sich am Bergkamm bereits neue Nackentäler samt Dehnungsrissen sowie Vernässungszonen aus (Blick nach Süden). Foto: privat

6.2.1.4. *Hydrologie und Hydrogeologie*

Auffallend ist, dass im obig angesprochenen Übergangsbereich bzw. gemäßigten Gelände starke Vernässungszonen anzutreffen sind. Die sumpfig, moorige Oberfläche erreicht dabei maximale Ausdehnung von 30 Metern und tritt oberhalb von Abrisskanten zu Tage. Des Weiteren sind in diesem Bereich auch kleinere Quellaustritte (siehe Abb. 35) mit stark variablen Schüttungsraten zu verzeichnen. Vor allem im Vernässungsbereich ist eine dunkle Färbung des Wassers festzustellen, was auf eine stark reduzierende Umgebung schließen lässt. Auch schlammige, orange gefärbte Mineralsausfällungen sind hier zu beobachten.



Abbildung 35: Quellaustritt mit leicht rinnender Schüttung ($< 0,5 \text{ l/s}$) sowie vereinzelt okkerfarbenen Mineralausfällungen. Foto: privat

Abschließend sei erwähnt, dass längere Bachverläufe im oberen Bereich nicht zu verzeichnen sind. Alle Quellaustritte sind maximal 50 Meter oberhalb des scharfkantigen Übergangs in den Erosionsbereich feststellbar.

Generell ist das Fehlen von Bächen im oberen Bereich verantwortlich für die intakte Almmorphologie. Im Gegensatz dazu sind die Bäche im unteren Bereich der Grund für die stark erodierten Zonen sowie die hohe Materialverfrachtung.

6.2.1.5. *Vegetation*

Im oberen Bereich ist mit Ausnahme des zentralen Rutschkörpers kaum Bewaldung zu erkennen. Vereinzelt sind Nadelbäume beständig, welche teilweise eine enorme Krümmung (siehe Beispiel in Abb. 36) im Stammbereich aufweisen. Dies ist auf die Bewegung im Untergrund zurückzuführen.



Abbildung 36: Typischer Vegetationsbereich unterhalb der Schmalscharte mit vereinzelt stark gekrümmten Nadelbäumen. Foto: privat

Auch in Rücksprache mit dem zuständigen landwirtschaftlichen Pächter belegt, wird der Bereich bereits seit längerem genutzt. Aus diesem Grund wird der Bereich auch in regelmäßigen Abständen begangen um eine Verbuschung bzw. zunehmende Verwaldung zu verhindern.

6.2.2. Ablagerungs- und Erosionsraum (unterer Bereich)

6.2.2.1. *Allgemein*

Der talwärts liegende Großbereich des Rutschkörpers kann im digitalen Geländemodell sowie im Feld als Ansammlungszone der Rutschmasse bezeichnet werden. Der morphologische Übergang in diesen flacheren Geländebereich konnte visuell nicht eindeutig festgelegt werden und ist daher als schweifend zu bezeichnen.



Abbildung 37: Starke erosive Tätigkeit prägt die Morphologie im unterhalb der großen Abbruchkante im Blaubachgraben. Foto: Kaufmann

Rein optisch unterscheidet sich diese Region deutlich vom zuvor angesprochenen oberen Bereich. Während im oberen Teil übersteilte und kaum bewaldete Hänge vorherrschend sind, wurden im unteren Bereich Nadelwälder angetroffen.

Die Abbildungen 37 und 38 zeigen die enormen Materialverlagerungen, welche durch oberflächliche Gerinne sowie durch die Schneeschmelze im Frühjahr hervorgerufen werden. Diese witterungsbedingten Umstände bedingen auch eine starke optische Veränderung im jährliche Zyklus und die schwierige Kartierung von kleinräumigen Rutschungen. Da sich die Morphologie in relativ kurzer Zeit stark ändern kann, ist es nur sehr schwer möglich auf älteren Daten (z.B. Ortofotos oder Laserscans bzw. Geländemodelle) aktuelle Rutschereignisse festzustellen. Messungen und Begehung in diesem stark rutschigen und unwegsamen Gelände ist zudem nicht einfach.



Abbildung 38: Blick emporm auf die große Abbruchkante der Erosionsmulde.

6.2.2.2. *Material*

Anstehendes Festgestein wurde im Gegensatz zur Abrisszone nicht vorgefunden, was auf eine mächtige Lockergesteinsüberlagerung schließen lässt. Die Zusammensetzung des Materials kann grob als schluffig, sandiger Kies bezeichnet werden. Rein petrologisch ist das Lockersediment als dünnneschieferter, feinkörniger, dunkelgrau bis schwarzer Graphitphyllit angesprochen werden.

Die starke Varietät der Materialzusammensetzung kann in den Abbildungen 38 und 39 nachvollzogen werden. Nicht nur die Korngrößenunterschiede sind beträchtlich, sondern auch die petrologischen Differenzen sind variabel, was die unterschiedliche Färbung der Gesteine zeigt.



Abbildung 39: Stark heterogene Material- sowie Korngrößenzusammensetzung prägt den Ablagerungsraum der Blaubachgrabenrutschung.

6.2.2.3. *Hydrologie und Hydrogeologie*

Im Massenakkumulationsbereich sind starke erosive Vorgänge zu beobachten. So findet sich oberhalb der errichteten Geschiebesperre der Wildbach- und Lawinerverbauung eine rund 100 m breite und 300 m lange Erosionsmulde wieder. Der Hauptabtragungsprozess in diesem Bereich wird durch Oberflächenwässer verursacht, welche unterhalb der großen Abrisskante im Bereich Schönmoos-Hochalm entspringen. Das locker gelagerte, feinkörnige Material kann bei entsprechendem Niederschlag und erhöhter Wasserführung leicht erodiert werden. Durch zahlreiche Murenabgänge in Richtung Krimmler-Talboden wurden deswegen 3 Schutzvorrichtungen errichtet. Eine große Geschieberückhaltesperre sowie zwei weitere Rechen-Bauwerke.



Abbildung 40: Bachlauf im südlichen Bereich der Erosionsmulde mit Blick auf die Geschiebesperre der Wildbach- und Lawinenverbauung.

Als Hauptprozess für die Materialverlagerung im Akkumulationsbereich kann der Geschiebetransport durch fließendes Wasser angesehen werden. Kleine Bäche verlagern dabei das locker gelagerte, feinkörnige Material talabwärts. Die Rinnen sind in Abbildung 40 besonders gut ersichtlich. Des Weiteren kommt es durch die Erosion der Bäche zu einer zunehmenden Übersteilung im Schuttkegel, was folglich zum Nachrutschen von Material führt. Bei auftretendem Starkregen kann es zudem beim Ansteigen der Bachschüttung zu Vermurungen und erhöhtem Geschiebetransport kommen. In solchen Fällen ist auch die Verfrachtung von großen Blöcken und Schwemmholz in Richtung Tal möglich.

6.3. Fotodokumentation

Die Fotodokumentation der Geländekartierung von 28. bis 30. September 2016 in Krimml ist im Anhang 01 ersichtlich und dort einzusehen.

7. ERGEBNISSE DER FERNERKUNDUNG UND GEODÄTISCHEN MESSUNGEN

Seit 2001 führt das Institut für Geodäsie der Technischen Universität Graz im Krimmler Blaubachgraben geodätische Messungen mittels Total Station und Satellitenpositionierung Messungen durch. Das durch Prof. Viktor Kaufmann betreute Forschungsprojekt soll demnach wichtige Erkenntnisse zum Thema alpine Gefahren durch seichtliegende Massenbewegungen liefern.

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der jährlichen Messrunden zusammengefasst. Die Zusammenfassungen wurden mittels der jährlichen Berichte hinsichtlich der *Geodätischen Wiederholungsmessungen am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg* von Prof. Kaufmann erstellt.

7.1. Messkampagnen mittels Photogrammetrie (Zeitraum 1953-1999)

Bereits vor der Installation der geschieberückhaltenden Maßnahmen im Blaubachgraben fand eine Bemessung der oberflächlichen Verschiebung der Massenbewegung mittels fotogrammetrischer Methoden statt.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass gem. KAUFMANN, KIENAST, & LADSTÄDTER (2002) oberhalb der großen Abbruchkante an den Messpunkten 2, 37, 38 (Zeitraum 1991-1999) eine gemittelte jährliche horizontale Bewegungsrate von 113 cm/a vorlag. Unterhalb der Jagdhütte betragen die Bewegungsraten ähnlich hohe Werte und wurden von den Autoren mit 110 cm/a angegeben.

Für die Jahre 1953 bis 1991 sind dem Verfasser dieser Arbeit keine detaillierten Mess- und Analyseergebnisse der fotogrammetrischen Beobachtung des Blaubachgrabens zugänglich gewesen. Zugänglich waren jedoch Orthofoto aus dem Online-GIS des Landes Salzburg (SAGIS) für die Jahre 1953, 1991, 2003, 2007, 2012 sowie 2015. Zwei Abbildungen sind nachstehend als Beispiel in dieser Arbeit zu Veranschaulichung geplottet.

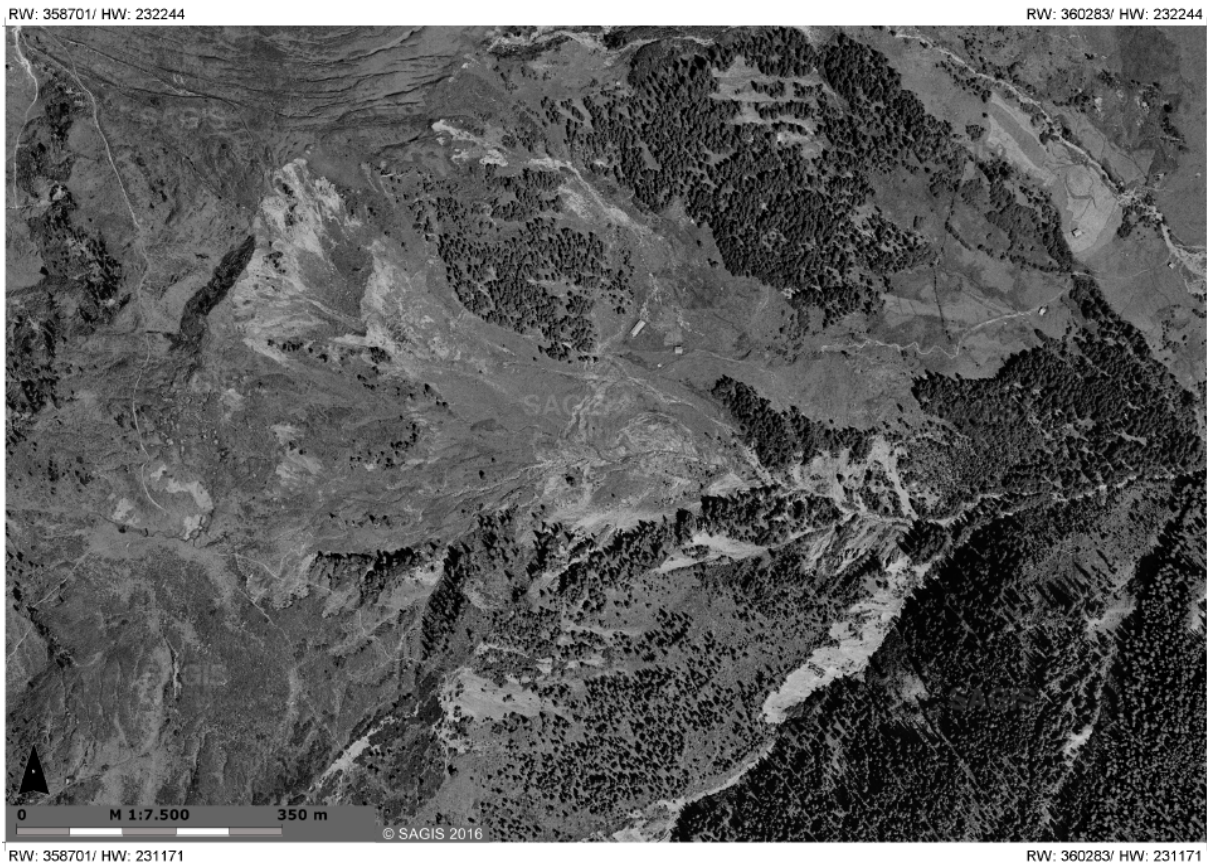


Abbildung 41: Historisches Orthofoto mit Flugdatum vom 5. August 1953 (entnommen aus SAGIS, 20.12.2016).

Bereits im Jahr 1953 fanden erste offizielle Befliegungen seitens der Behörden statt um Österreich fotogrammetrisch aufzunehmen. Die Abbildung 41 zeigt ein Orthofoto aus dem Jahr 1953, wo vor allem im unteren Erosionsbereich noch deutlich mehr Vegetation (Grasbewuchs) erkennbar ist. Es sei erwähnt, dass auch bereits während des zweiten Weltkriegs durch die U.S. Regierung Luftbilder erzeugt wurden, die jedoch ausschließlich aufklärende militärische Zwecke dienen sollten. Nach und nach werden auch diese Ressourcen für die Forschung zugänglich.

Im oben abgebildeten Luftbild (Abbildung 41) aus 1953 lässt sich bereits erkennen, dass auch damals bereits eine aktive Rutschzone im Blaubachgraben vorlag. Die Erosionsstrukturen auf der schwarz-weiß Photographie deuten bereits auf starke Aktivität im Einzugsgebiet hin. Auch die Jagdhütte sowie der Stall waren bereits vorliegend.

Zum Vergleich ist nachstehend in Abbildung 42 das aktuellste Orthofoto aus mit einem Flugdatum vom 4. August 2015. Deutlich erkennbar ist die hochauflösende Qualität der Aufnahme sowie die gut erkennbaren Details. Am Rutschkörper an sich kann bereits erkannt werden, dass die erosive Tätigkeit an der Oberfläche stark zugenommen hat und zahlreiche kleinere Subrutschungen erkennbar sind.

Die Projektgruppe der Technischen Universität Graz unter der Leitung von Prof. Viktor Kaufmann hat mehrere interessante Animationen der Massenbewegung im Blaubachgraben erstellt. Dabei wird die Bewegung anhand von Orthophotos nachgezeichnet. An dieser Stelle wird auf die Website von Prof. Kaufmann verwiesen, wo die Animationen unter <https://staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/animations.html#Blaubach> abgespielt werden können.

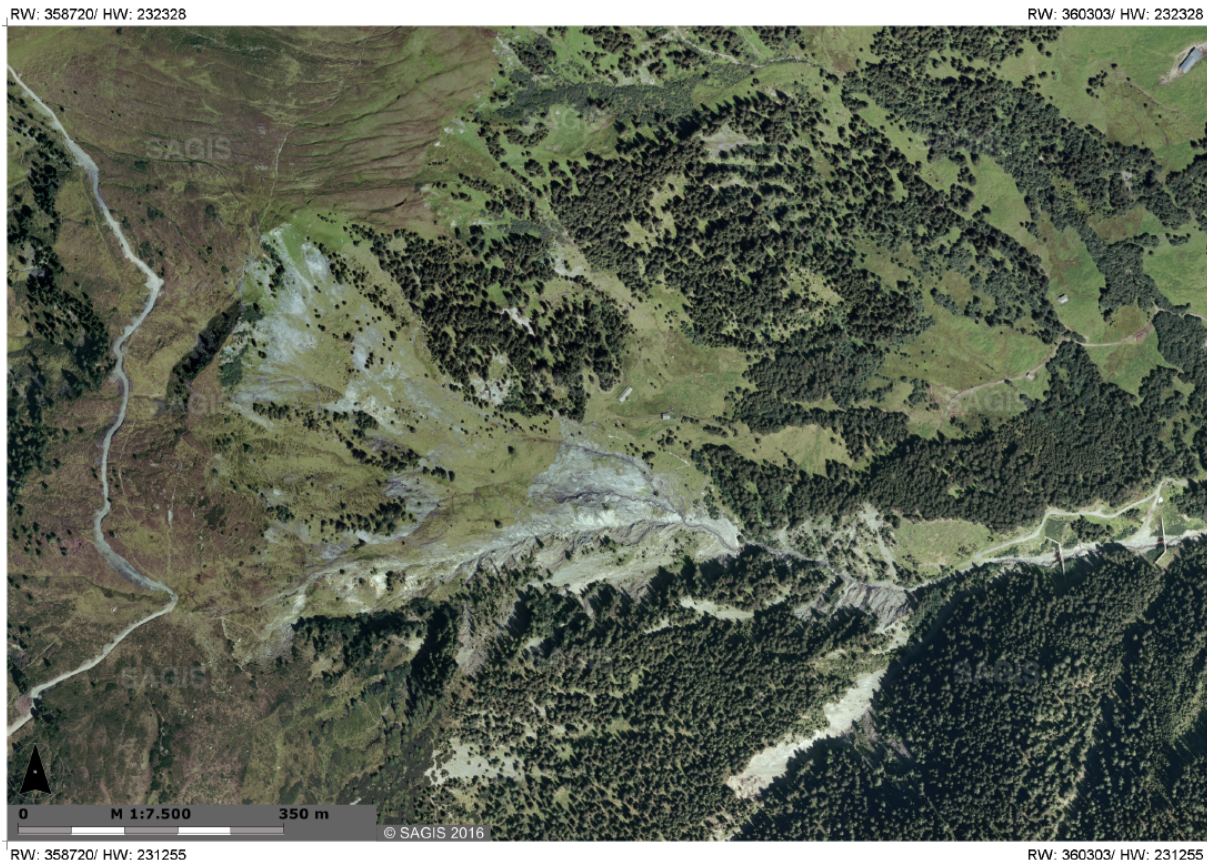


Abbildung 42: Aktuellstes öffentlich zugängliches Orthofoto vom Blaubachgraben aus dem Jahr 2015 (entnommen aus SAGIS, 20.12.2016)

In einer Publikation von KAUFMANN (2002) wurde versucht, mittels Photogrammetrie die Werte der Bewegungen im Blaubach darzustellen. Hierbei entstand folgende Abbildung 43, welche die jährlichen Bewegungsraten verdeutlicht.

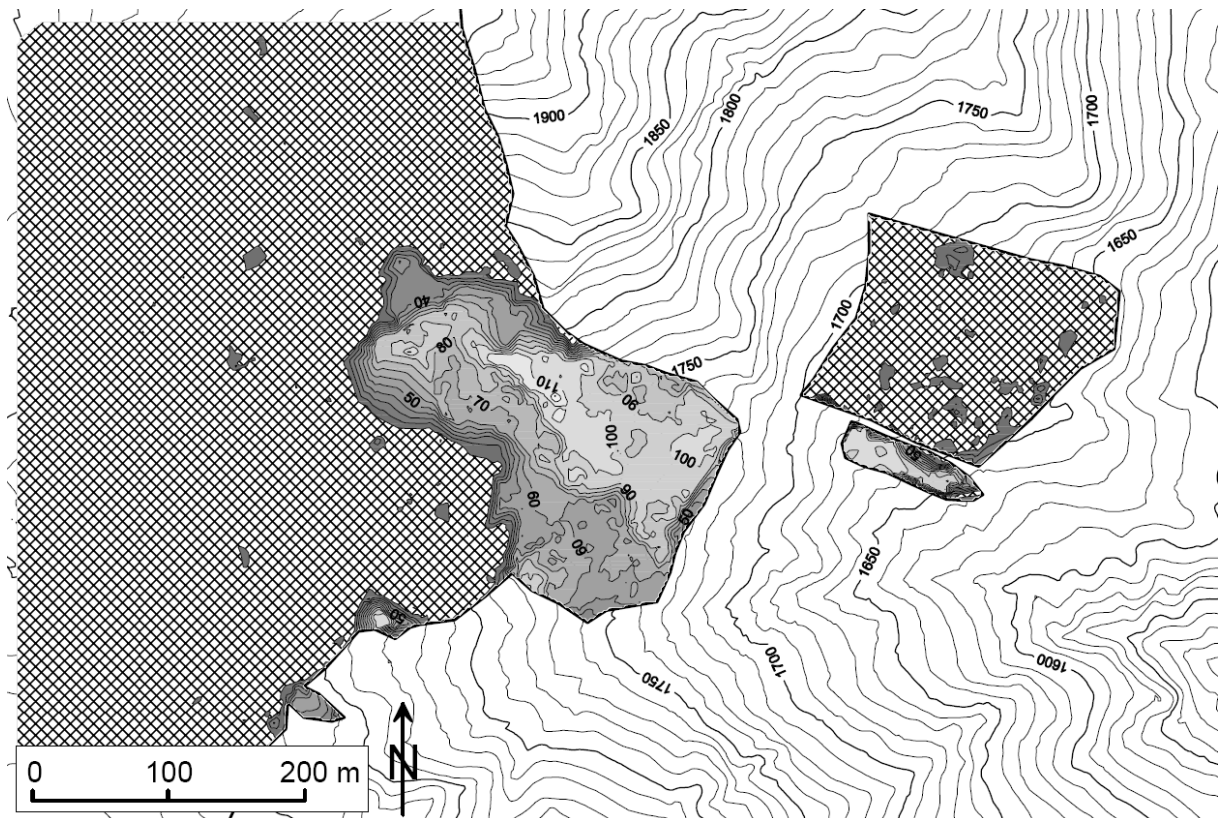


Abbildung 43: Durchschnittliche jährliche Bewegungsraten im Blaibachgraben im Zeitraum von 1991-1999, ermittelt durch Photogrammetrie (KAUFMANN, 2002)

7.2. Zusammenfassung der jährlichen Messkampagnen (Zeitraum 2001-2016)

Vorab sei erwähnt, dass sämtliche Messpunkte von Prof. Kaufmann in Punktgruppen zusammengefasst wurden. Die jährlichen Verschiebungen wurden dabei grob in textueller Form beschrieben. Die genauen gemittelten jährlichen Horizontalverschiebungen sind nachstehend auch in tabellarischer Form angegeben.

Als Messinstrumentarium standen von 2001 bis 2011 eine Totalstation des Typs *Leica TCRA 1201* sowie ab dem Messjahr 2012 *GNSS⁸ GS15* der Firma *Leica* (RTK-GPS⁹) zur Verfügung.

⁸ GNSS ... Globales Navigationssatelliten System

⁹ RTK-GPS ... Real Time Kinematics Global Positioning System

Tabelle 3: Jährliche gemittelte Horizontalverschiebung vom Zeitraum von 2001 bis 2008

Punktgruppe	Punkte	Jährliche gemittelte Horizontalverschiebung [cm/a]						
		2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
1	1, 5	4,5	6,2	4,1	5,1	4,9	3	4,7
2	26, 27, 28, 30	8,3	3,1	5,2	6	7,3	3,6	14,4
3	39, 45, 46, 47	10,7	12,2	7,8	7,5	8,5	6,6	9,9
4	20, 21	21,1	5,5	21,4	11,8	23,9	6,1	78,5
5	13 bis 21	34	18,9	43,9	29,1	51,5	13,8	97,6
6	2, 23 bis 25, 31 bis 38, 49	41,3	9,8	32,5	37,2	65,9	30,9	128,7
7	40 bis 44	63,4	55,8	17,8	26,3	35,7	25,2	46,2
8	2, 22, 37 -38, 49	50,9	14	41,7	45	74,7	35,2	147,9
9	37	51,6	14,2	52,3	45,8	75,5	37,6	142,8

Tabelle 4: Jährliche gemittelte Horizontalverschiebung vom Zeitraum von 2008 bis 2016

Punktgruppe	Punkte	Jährliche gemittelte Horizontalverschiebung [cm/a]						
		2008-2009	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
1	1, 5	5,3	4,6	4,6	5,1	5,8	5,3	4,7
2	26, 27, 28, 30	6,8	4,4	3,9	9,6	9,3	3,5	6,8
3	39, 45, 46, 47	9,5	10	8,9	10,2	11,2	5,8	7,2
4	20, 21	31,9	6,9	0,9	90,6	51,8	11,7	24,7
5	13 bis 21	63,1	20,4	12,3	109,2	68,9	16,8	39,4
6	2, 23 bis 25, 31 bis 38, 49	130,7	39,3	16,5	116,6	144,2	46,9	108,9
7	40 bis 44	62,6	69,9	22,7	27	27,9	11,5	35,4
8	2, 22, 37,38, 49	181,6	60,5	22,1	153,1	193,1	58,5	140,3
9	37	196,6	66,1	25,9	169,2	254	64,5	156,9

Tabelle 5: Beschreibung und Lage der einzelnen Punktgruppen mit den zugehörigen Messpunkten.

Punktgruppe	Punkte	Lokalität
1	1, 5	Jagdhütte
2	26, 27, 28, 30	Punkte direkt unterhalb der Schmalscharte
3	39, 45, 46, 47	Punkte unterhalb der Jagdhütte
4	20, 21	unterste Punkte der orographisch rechten Rutschzone unterhalb der Breitscharte
5	13 bis 21	orographisch rechte Rutschzone unterhalb der Breitscharte ohne Punkte 10 bis 12
6	2, 23 bis 25, 31 bis 38, 49	orographisch linke Rutschzone unterhalb der Schmalscharte ohne Punkte 26 bis 30
7	40 bis 44	Rutschzone unterhalb der Jagdhütte
8	2, 22, 37 -38, 49	große Abbruchkante
9	37	Punkt mit größter mittlerer Horizontalbewegung (unterer Bereich der orographisch linken Rutschzone)

7.2.1. Messung 2002: Messzeitraum Oktober 2001 bis Oktober 2002

Dem Messzeitraum Oktober 2001 bis Oktober 2002 geht eine Messrunde voraus, welche in den Sommermonaten 2001 stattfand. Die Ergebnisse wurden bereits im Abschnitt 4.7.1. *Zusammenhang von Niederschlag und Bewegungsrate im Blaubachgraben* kurz beschrieben. Aussagekräftig ist bei dieser Messung vor allem die Tatsache, dass diese kurz nach der Schneeschmelze stattfand. Demnach konnte einmalig die Auswirkung der Schneeschmelze auf die Ausbreitung der Massenbewegung erahnt werden, für einen naturwissenschaftlichen Rückschluss reicht dies jedoch auf Grund der geringen Datenlage nicht aus.

Die Messung fand laut KAUFMANN, KIENAST, & LADSTÄDTER (2002) von 4.-5. Oktober 2002 statt und bewies im Gegensatz zu den Analysen aus fotogrammetrischen Methoden eine deutliche Abnahme der Verschiebungsbeträge. Oberhalb der großen Abrisskante wurden horizontale Bewegungsbeträge von 0,5 m/a registriert, unterhalb dieser wurden zwischen 0,6 und 0,7 m/a verzeichnet. Unterhalb der Breitscharte im südwestlichen Bereich der Massenbewegung wurden im steilen Gelände zwischen 0,12 bis 0,16 cm/a verzeichnet, im unteren Teil konnten Bewegungen zwischen 0,43 und 0,53 cm/a gemessen werden.

7.2.2. Messung 2003: Messzeitraum Oktober 2002 bis September 2003

Aus dem Abschlussbericht von KAUFMANN, KIENAST, & LADSTÄDTER, (2003) ist hervorzuheben, dass die Rutschbeträge im oberen Bereich (oberhalb der großen Abbruchkante) des Blaubachgrabens weiterhin signifikant abgenommen haben. Vor allem im nördlichen Bereich unterhalb der Schmalscharte wurden Bewegungen von lediglich wenigen 2 bis 5 cm/a verzeichnet. Die restlichen Punkte im Nahbereich der Abrisskante wiesen Bewegungsbeträge von 8 bis 14 cm/a auf, was eine Reduktion der Verschiebungsbeträge von bis zu 80% nach sich zieht.

Weiters weisen die Verfasser darauf hin, dass trotz zureichender Drainagierung unterhalb der Jagdhütte in diesem Bereich weiterhin ein Hangkriechen von ca. 55 cm/a zu verzeichnen ist.

Abschließend sei zu diesem Messzeitraum erwähnt, dass es sich laut KAUFMANN & LADSTÄDTER (2007) beim Messjahr 2003 um ein außergewöhnlich trockenes Jahr (Hitzesommer) gehandelt hat und dies womöglich auch großen Einfluss auf die geringen Messwerte hatte.

7.2.3. Messung 2004: Messzeitraum September 2003 bis September 2004

Im Gegensatz zu den Messrunden in den Vorjahren, wo durchwegs von einer Abnahme der Verschiebungsbeträge gesprochen werden kann, wurden laut KAUFMANN, KIENAST, & LADSTÄDTER (2004) im Zuge der Messungen vom 21. und 22. September 2004 vor allem im oberen Bereich starke Zunahmen registriert.

Oberhalb der Abbruchkante bei der Schönmoos-Hochalm wurden durch Zunahmen von 200 bis 280% Bewegungsraten von 21 bis 42 cm/a festgestellt. Völlig konträr verliefen die Messungen im unteren Bereich nahe den Drainagesystemen. An diesen Messpunkten wurde eine signifikante Verringerung der Beträge festgestellt. Wurden an diesen Stellen in den 1990er Jahren noch mehr als 1 m/a vernommen, so lag die Bewegungsrate im Zeitraum 2003-2004 nur mehr bei gemittelt 18 cm/a.

7.2.4. Messung 2005: Messzeitraum September 2004 bis September 2005

Tendenziell geht aus dem Bericht von KAUFMANN, KIENAST, LADSTÄDTER, & FLECKL (2005) hervor, dass im Zuge der Messung vom 13. und 14. September 2005 keine gravierenden Veränderungen zum Bewegungsverhalten des Rutschhanges im Blaubachgraben zu verzeichnen sind.

Allgemein kann davon gesprochen werden, dass im orographisch linken Bereich der Rutschung unterhalb der Schmalscharte eine Bewegungszunahme zu beobachten ist. Die Beträge nahmen demnach von gemittelt 33 cm/a um ca. 15% auf 37 cm/a zu. Im Kontrast dazu wurde im gegenüberliegend befindlichen Teil des Rutschgebiets (orographisch rechts, unterhalb der Breitscharte) eine geringfügige Abnahme festgestellt. Ebendort konnte eine Verringerung von 44% auf 12 cm/a verzeichnet werden.

Im Bereich der Jagdhütte, welcher mit Drainagevorrichtungen versehen ist, wurde eine leichte Bewegungszunahme registriert, welche jedoch noch immer deutlich geringer war als vor der Drainageinstallation. Im Durchschnitt wurde an den Punkten nahe der Drainageschlitzte Geschwindigkeiten von 4 bis 37 cm/a vermessen.

7.2.5. Messung 2006: Messzeitraum September 2005 bis September 2006

Im Vergleich zum Messzeitraum 2004-2005 wurden laut KAUFMANN, LADSTÄDTER, & KIENAST (2006) am 29. September 2006 für die Periode 2005-2006 stark unterschiedliche Werte geodätisch aufgenommen.

An beiden oberen Flanken der Massenbewegung, also unterhalb der Schmal- und Breitscharte wurden Zunahmen der Bewegungsraten von 75-77% auf bis zu 88 cm/a beobachtet. Die Bewegungen in diesem Messintervall waren demnach so hoch, dass sogar einzelne Messpunkte durch die enorme Materialumlagerung verloren gingen. Laut Autoren zeigte sich dies vor allem durch eine morphologische Umgestaltung im Gelände, was auch mit Orthofotos belegt wurde.

Die Beträge unterhalb der Jagdhütte nahe den Drainagevorrichtungen weisen jedoch mit 6 bis 47 cm/a ähnliche Bewegungsraten auf als im Jahr zuvor und sind demnach nur geringfügig gestiegen.

7.2.6. Messung 2007: Messzeitraum September 2006 bis September 2007

Nach der Analyse der Messungen vom 16. und 17. September 2007 kann laut KAUFMANN & LADSTÄDTER (2007) ausgesagt werden, dass während der Messperiode 2006-2007 bis dato seit Messbeginn die niedrigsten maximalen jährlichen Bewegungsraten registriert wurden (Anmerkung: Ausnahme Hitzesommer 2003).

Demnach konnten im oberen Bereich unterhalb der Schmalscharte Reduktionen von 66 auf 31 cm/a (mehr als die Hälfte) sowie unterhalb der Breitscharte mit 73% auf lediglich 14 cm/a verzeichnet werden.

Ebenso unterhalb der Jagdhütte registrierte man mit einer gemittelten Horizontalbewegung von 25 cm/a eine Verringerung um ca. 29% im Vergleich zum Untersuchungszeitraum 2005-2006.

7.2.7. Messung 2008: Messzeitraum September 2007 bis September 2008

Bei der Messung am 27. September 2008 wurden gem. KAUFMANN & GRAMM, (2008) signifikante Zunahmen der Bewegungsraten festgestellt. Die zonalen Bewegungsmuster lagen dabei in allen Zonen der Rutschung über dem langjährigen Mittel der seit 2001 durchgeführten geodätischen Messreihe, wobei die Messperiode 2007-2008 die größten maximalen jährlichen Bewegungsraten hervorbrachte.

Dabei halten die Gutachter fest, dass sich die markante Zunahme der Hangbewegung auch oberflächlich stark bemerkbar machte. So wurden im oberen Bereich unterhalb der Breit- und Schmalscharte neue Teilrutschungen vernommen. Dies machte sich durch Abgleiten von kompakten Geländestücken, Hanginstabilität, Scherzonen sowie Oberflächenrissen bemerkbar, so KAUFMANN & GRAMM, (2008). Weiters wurde die Geschiebesperre mit Schlamm und Geröll überspült, was auf starke Niederschlagsereignisse hindeuten könnte.

Numerisch ergeben sich oberhalb der großen Abrisskante unterhalb der Schmalscharte enorme Geschwindigkeitszunahmen von mehr als 300% von 31 auf 129 cm/a. Auf der gegenüberliegenden südlichen Seite, unterhalb der Breitscharte zeigt sich dieses Bild noch deutlicher. Hier wurde eine Verstärkung der Bewegung um den 6-fachen Betrag gemessen, womit sich eine mittlere horizontale Bewegungsrate von 98 cm/a ergibt.

In der Zone unterhalb der Jagdhütte ergeben sich Geschwindigkeiten von 6 bis 75 cm/a, was ebenfalls eine teilweise deutliche Beschleunigung der Rutschbewegung nach sich zieht.

7.2.8. Messung 2009: Messzeitraum September 2008 bis September 2009

Dem Abschlussbericht der Messungen vom 23. und 24. September 2009 von KAUFMANN & GRAMM (2009) ist zu entnehmen, dass eine generelle Zunahme der Rutschbeträge im Blaubachgraben nicht erfolgt ist. Dennoch ist festzuhalten, dass die

betragliche Zunahme in Teilbereichen der Massenbewegung weiter enorm ist, wobei zonal die größten maximalen horizontalen Verschiebungen zu beobachten waren. Diese Zunahme war mit einer deutlichen Veränderung der Geländemorphologie zu vernehmen, da zahlreiche neue Teilrutschungen, Oberflächenrisse und instabile Hangbereiche beobachtet wurden.

Im orographisch rechten Bereich oberhalb der großen Abrisskante (Breitscharte) wurden abnehmende horizontale Bewegungsraten verzeichnet. Im Vergleich zum Messzeitraum 2007-2008 wurden numerisch 32 cm/a (Abnahme um ca. 59%) gemessen. In der orographisch linken oberen Zone unterhalb der Schmalscharte zeigte sich jedoch eine signifikante Zunahme der Verschiebung um 21% auf 168 cm/a.

Auch im Bereich der Drainageschächte und im unteren Rutschungsbereich nahe der Jagdhütte war eine Bewegungszunahme zu verzeichnen, welche Werte zwischen 7 und 118 cm/a annahm.

7.2.9. Messung 2010: Messzeitraum September 2009 bis September 2010

Anders als in den Messrunden der Jahre zuvor wurde im Zuge der Kampagne am 14. September 2010 laut KAUFMANN & GRAMM (2010) eine signifikante Abschwächung der horizontalen Hangbewegung im oberen Rutschbereich festgestellt. Generell kann ausgesagt werden, dass die großen Beschleunigungen aus den Vorjahren in der Messperiode 2009-2010 keine Fortsetzung fanden.

So wurde unterhalb der Schmal- und Breitscharte eine Reduktion der Bewegung von 131 auf 40 cm/a (minus 70%) sowie von 32 cm/a auf 21 cm/a festgestellt. Die Beschleunigung unterhalb der Jagdhütte an den Drainageschächten verringerte sich schwach und beträgt Raten von 6 bis 101 cm/a.

7.2.10. Messung 2011: Messzeitraum September 2010 bis September 2011

Die Bewegungsraten im Messzeitraum 2010-2011 waren laut Aussagen im Bericht von KAUFMANN & GRAMM (2011) ähnlich niedrig wie bei den Messungen nach dem Hitzesommer 2003. Auffallend war, dass in einigen Bereichen die Bewegungsraten sogar unterhalb der Minimalwerte aus 2002-2003 lagen.

Beispielhaft für die niedrigen Bewegungsraten des Messzeitraumes 2010-2011 seien die oberen Bereiche unterhalb der Schmal- und Breitscharte erwähnt. Dort betragen die horizontalen Beträge 17 bzw. 13 cm/a, was eine Abnahme von 58 und 40% nach sich zieht. Auch im unteren Bereich an den Drainageschächten wurden mit 5 bis 30 cm/a zusehends niedrige Werte verbucht.

7.2.11. Messung 2012: Messzeitraum September 2011 bis September 2012

Mit der Messung vom 26. und 27. September 2012 fand eine Adaptierung des Messinstrumentariums statt. Anstatt der Totalstation *Leica TCRA 1201* wurde erstmalig ein Real Time Kinematics GPS des Typs *Leica GNSS GS15* verwendet, womit die Arbeit im Gelände merklich erleichtert und beschleunigt wurde.

Aus dem Bericht von KAUFMANN (2012) geht hervor, dass auf die Periode 2010-2011, wo extrem geringe Bewegungsraten verzeichnet wurden, enorme Anstiege registriert wurden. So stiegen die horizontalen Beträge unterhalb der Breit- bzw. Schmalscharte um das 8- bzw. 6-fache an. Numerisch kann somit von gemittelten Bewegungsbeträgen von 110 bzw. 117 cm/a ausgegangen werden. Hervorzuheben ist, dass an einer Stelle im oberen Rutschbereich sogar ein Verschiebungswert von 170 cm in der Messperiode verzeichnet wurde.

Unterhalb der Hütte im Grabenbereich kann bei den Messpunkten an den Drainageschächten von einer geringeren Zunahme als im oberen Bereich gesprochen werden. Die Bewegungsbeträge umfassen hier ein Spektrum von 9 bis 43 cm/a.

7.2.12. Messung 2013: Messzeitraum September 2012 bis Oktober 2013

Basierend auf dem Abschlussbericht von KAUFMANN (2013) ist zu Grunde gelegt, dass auch im Zuge der Messungen am 2. und 3. Oktober 2013 im oberen Bereich teilweise beträchtliche Verschiebungswerte gemessen wurden. So sei an dieser Stelle verdeutlicht, dass der schnellste Punkt (Punkt 37) im System seit Beginn der Messkampagne bereits 11,3 m horizontale Wegstrecke zurückgelegt hat. Der Höhenversatz betrug am Punkt 37 rund 4,6 m vertikal. Jener Punkt 37 bewegte sich auch im Zeitraum 2012-2013 aus horizontaler Sicht am weitesten und erreichte die Maximalgeschwindigkeit von 254 cm/a.

Trotz dieses enormen Versatzes im Punkt 37 verzeichnete man in der Region Schmalscharte nur eine geringe Zunahme von 24% auf 117 cm/a. Im Raum unterhalb der Breitscharte wurde sogar eine Abnahme der Geschwindigkeit vernommen. Dort erreichte man Werte von 69 cm/a, was mit einer Reduktion von 37% gleichbedeutend ist.

Betrachtet man den horizontalen Versatz im Untersuchungsbereich unter der Jagdhütte, so lassen sich an den Drainageschächten gemittelte Beträge von 10 bis 80 cm/a beobachten.

7.2.13. Messung 2014: Messzeitraum Oktober 2013 bis September 2014

Aus den Tabellen von KAUFMANN (2014) geht hervor, dass im Zuge der Messkampagne vom 17. September 2014 während des Zeitraums 2013-2014 durchwegs Abnahmen im Sinne der horizontalen Bewegungsraten verzeichnet wurden.

Unterhalb der Schmalscharte reduzierte sich die Bewegung um knapp die Hälfte und ging auf 74 cm/a zurück. Auf der gegenüberliegenden orographisch rechten Hangseite nahm die horizontale Bewegung um circa ein Drittel ab und beträgt gemittelte Raten von 23 cm/a.

Die Punkte nahe der Jagdhütte zeigen im Gegensatz zur oberen steilen Zone einen geringfügigen gemittelten Bewegungsanstieg von wenigen Zentimetern pro Jahr. Diese Zunahme beläuft sich auf etwa 32 cm/a.

7.2.14. Messung 2015: Messzeitraum September 2014 bis August 2015

Die Messrunden vom 29. und 30. August 2015 brachten laut KAUFMANN (2015) folgendes Ergebnis hervor: Erneut wurde eine signifikante Verringerung der Bewegungsraten unterhalb der Schmal- und Breitscharte festgestellt. Der abnehmende Trend hinsichtlich der Bewegungsraten konnte bereits in den zwei Epochen 2012-2013 sowie 2013-2014 festgestellt werden. Somit können die Verschiebungsbeträge wieder unterhalb der langjährigen Mittelwerte eingestuft werden.

Unterhalb der Breitscharte, also im orographisch rechten Rutschbereich wurde einer Verringerung der horizontalen Bewegungsraten von 23 auf 17 cm/a festgestellt. Auf der gegenüberliegenden Seite unterhalb der Schmalscharte konnte ebenfalls eine markante Abnahme festgestellt werden, wobei diese von ursprünglich 74 auf 47 cm/a noch deutlicher ausfiel.

Im talnäheren Bereich unterhalb der Jagdhütte wurden Beträge zwischen 5 und 27 cm/a vernommen, was ebenfalls teilweise unterhalb des langjährigen Durchschnitts liegt.

7.2.15. Messung 2016: Messzeitraum August 2015 bis September 2016

Die Messungen der Periode 2015-2016 fanden laut KAUFMANN (2016) vom 28. bis 29. September 2016 im Blaubachgraben am Rutschhang statt und erfolgten bei guten Witterungsbedingungen.

Der Messung ging ein sehr mildes (Temperatur) sowie feuchtes (Niederschlag) Jahr voraus. In den Wintermonaten wurde erst sehr spät eine durchgängige Schneedecke verzeichnet, wobei der Boden scheinbar vorab der ergiebigen Schneefälle auf Grund der milden Temperaturen auch im Blaubachgraben nicht durchgefroren schien.

Möglicherweise kann dies dazu geführt haben, dass sich deshalb im oberen Bereich unterhalb der Schmal- und Breitscharte die Bewegungsraten deutlich erhöht haben. An beiden Flanken der Rutschung nahm die horizontale Bewegungsrate um 132 bzw. 135% zu, was Geschwindigkeiten von 109 sowie 39 cm/a bedeuten.

Im flacheren unteren Geländeabschnitt lassen sich nahe der Jagdhütte Bewegungsraten um 35 cm/a beobachten, wobei die Zunahmen stark schwanken. Der

schnellste Punkt im Bereich der Hütte bewegte sich horizontal fast viermal so rapid als in der vorigen Messepoche 2014-2015. Im Mittel liegen die Zunahmen an den einzelnen Messpunkten jedoch bei 50%.

Nahe des Drainagesammelschachts wurden ebenfalls Messungen durchgeführt und Raten von 4,6 bis 136 cm/a verzeichnet. Auch an diesen Punkten kann von einer deutlichen Bewegungszunahme gesprochen werden.

Das folgende Bild (Abb. 44) entstand im Zuge der Feldarbeit im September 2016.



Abbildung 44: Foto mit meinen beiden Betreuern Prof. Qian Liu (links) und Prof. Viktor Kaufmann (rechts) während der Kartierungs- und Messarbeiten im Blaubachgraben Ende September 2016. Foto: Kaufmann

7.3. Zusammenfassung

Die Auswirkungen der Massenbewegung im Blaubachgraben wurden durch bauliche Maßnahmen in den 1990er Jahren teilweise für die Bevölkerung und Infrastruktur durch die Wildbach- und Lawinenverbauung entschärft. Als weiterführende Maßnahme wurde ein Monitoring-Konzept erstellt und über Jahre hinweg von einer Forschungsgruppe der Technischen Universität Graz unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Viktor Kaufmann beobachtet. Der Fokus wurde dabei auf die Verschiebungsbeträge gelegt, welche durch verschiedene Vermessungssysteme erfasst wurden.

Tendenziell ergibt sich aus den Messungen von Prof. Kaufmann ein relativ eindeutiges Bild. Die Geländemessungen belegen einen Hauptanteil an vertikaler Bewegung im oberen Teil der Massenbewegung, während im unteren Bereich horizontale bzw. längsgerichtete Bewegungsraten dominieren. Somit kann im steileren oberen Bereich von einem rotierenden Bewegungssinn der Massenbewegung und im unteren Teil eine von einer Translation ausgegangen werden.

Quantitativ lassen sich die jährlichen Beträge der Massenbewegung in einer Größenordnung von mehreren Dezimetern pro Jahr einordnen. Generell ist ein Vergleich aus Niederschlags- und Bewegungswerten nur schwer möglich, was auch die Arbeit von ADLER (2016) teilweise bestätigt.

Diese Bewegungsmuster geben wichtigen Aufschluss auf das kinematische Gesamtverhalten der Massenbewegung.

8. ERGEBNISSE DER AUSWERTUNG DER GELÄNDEKARTIERUNG

In diesem Kapitel wird detailliert auf die Auswertung der Ergebnisse eingegangen, welche im Zuge der Geländekartierung erhoben wurden. Speziell der Analyse mittels *Surfer11* wird hier besonderes Augenmerk geschenkt.

8.1. Primärkartierung mittels SAGIS Mappenblättern

Um im Gelände einen bestmöglichen Kartiererfolg zu erzielen, wurden bereits vorab der Begehung Kartengrundlagen erstellt. Dabei erwies sich das Internetportal des Salzburger Geographischen Informationssystem (kurz: SAGIS) des Landes Salzburg als sehr hilfreich.

Auf der Website des www.salzburg.gv.at/sagis sind öffentlichen Themenbereiche wie Bauen und Wohnen, Agrar und Wald, Bildung, Energie, Gesundheit, Kultur, Natur, Sport, Umwelt, Verkehr und Wasser online abrufbar. Der Informationsoutput für die verschiedensten Anwendungsbereiche ist enorm. Für diese Masterarbeit wurde hauptsächlich das Kartensystem Wasser mit der Unterkategorie Naturgefahren und Gefahrenzonen verwendet.

Mit Hilfe dieses GIS Systems wurden spezielle Kartenblätter für die Kartiertage im Gelände in Krimml erstellt. Neben geologischen und hydrogeologischen Übersichtskarten dienten vor allem Höhenschichtlinienkarten sowie digitale Geländemodelle als Grundlage. Höhenschichtlinien waren in verschiedenen Auflösungen erhältlich, wobei sich für das kleine Kartiergebiet im Blaubachgraben 1m und 5m Isolinien die beste Option herausstellten. Geplottet wurden die Kartenblätter auf A3 Format - um eine bessere Handlichkeit im Gelände zu gewährleisten - und im Maßstab 1:2.000.

Im Gelände selbst wurden mittels Hand-GPS des Typs *GARMIN terex 30*, Orthofotos, Gefügekompas, Geländemodelle sowie Höhenschichtlinienkarte sämtliche Aufschlüsse und geologisch-relevanten Punkte eingetragen und verzeichnet.

8.2. Bearbeitung der Geländedaten mittels der Software Surfer11

Die finale Überarbeitung der Geländedaten wurde mittels Software am Computer vollzogen. Die geeignete Software, welche auch am Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Graz zugänglich ist, stellt das Programm *Surfer11* der Firma Golden Software Inc. mit Sitz in Golden, Colorado, USA dar. Unter der Firmenwebsite <http://www.goldensoftware.com/products/surfer> können zur Software *Surfer11* nähere Informationen eingeholt werden.

Mit dieser Software ist es möglich, bei einer geeigneten Anzahl von Geländepunkten bzw. Laserscan Punkten aus einer Punktwolke verschiedene Karten zu erstellen. Das

Spektrum an verschiedenen Karten reicht dabei von digitalen Geländemodellen bis zu dreidimensionalen Ansichten von Oberflächen.

Durch die von Prof. Liu und Prof. Kaufmann zur Verfügung gestellten Datensätze aus vorangegangenen Befliegungen, wurden verschiedene computergenerierte Geländemodelle erstellt. Des Weiteren wurde die georeferenzierte Punktwolke in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem mit dem M31 Meridian umgewandelt. Diese Umwandlung wurde auch mit den Wegpunkten, welche mittels Hand-GPS im Zuge der Geländearbeit erstellt wurden, vollzogen und in das digitale Oberflächenmodell eingespielt. Das digitale Oberflächenmodell weist laut Prof. Liu durch die hohe Dichte der Punktwolke eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ m auf.

Nach der Erstellung des digitalen Geländemodells mittels *Surfer11* wurden die Daten aus der Geländebegehung sowie aus den Primärkarten eingespielt und digitalisiert. Als besonders wichtig wurde dabei die genaue Lokalität bzw. die exakte Position von Abrisskanten und Quellaustritten angesehen.

Dennoch muss ausgesagt werden, dass auf Grund des Befliegungsdatums vom 04.08.2015 die genaue Position nicht mit voller Sicherheit rekonstruiert werden konnte. Durch die hohen Erosionsraten sowie die Bewegung der Massenbewegung in Richtung Tal können sich diese Punkte sogar um mehrere Meter verschoben haben. Teilweise sind die genauen Verläufe der Abrisskanten durch Neu- oder Umbildung im Laserscan nicht erkennbar. Bei sehr lokalen, kleinen Rissen ist eine genaue Rekonstruktion im Laserscan oder auf den Primärkarten ohnedies kaum möglich.

8.3. Geomorphologische Karten

Im folgenden Abschnitt werden überblicksmäßig kurz die Ergebnisse der Auswertung mittels des Programms *Surfer* dargestellt..

Generell wurden mittels *Surfer11* verschieden Arten von Karten generiert, welche das Gelände und die Ausprägung der Massenbewegung im Blaubachgraben unter verschiedenen Gesichtspunkten darstellen sollen. Neben digitalen Oberflächenmodellen sind auch topographische Höhenschichtlinienkarten und Querprofile erstellt worden. Nachstehend sind die einzelnen Ergebnisse kurz beschrieben.

Durch das Tool „Contour-Map“ wurde mittels *Surfer* aus den Rasterdaten Höhenschichtlinien erstellt. In Kombination mit einem digitalen Geländemodell lassen sich die einzelnen Rutschungsbereiche sehr gut per Computer nachzeichnen und verfolgen. Nachdem zuerst die Abrisskanten per Polylinie nachgezeichnet wurden, wurden die Rutschkörper per Polygon umrandet und eingefärbt. Im Gesamtbild wurden schließlich noch grob die vier größeren Rutschbereiche im oberen Bereich verdeutlicht.

Erschwert wurde die Darstellung durch die Bäume bzw. den pflanzlichen Bewuchs, der vor allem in den Randbereichen eine gute Kontur der Rutschungen erschwert hat. In

den zentralen Almbereichen ist ein Nachzeichnen mittels Fernerkundung und Höhenschichtlinien leichter möglich und auch mittels SAGIS Mappenblättern relativ einfach zu bewerkstelligen.

Einschätzung der räumlichen Tiefenvariation von Erdrutschungen

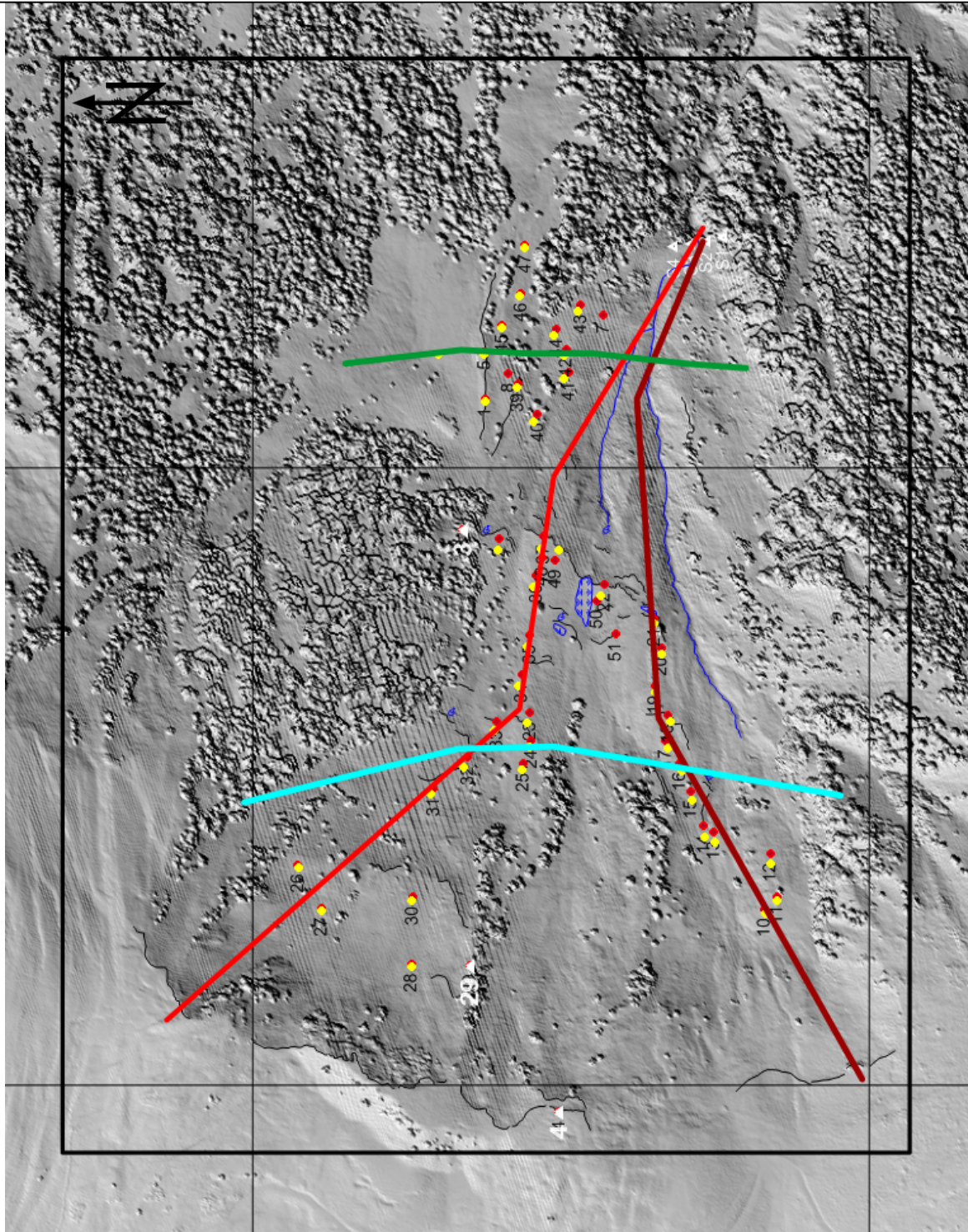
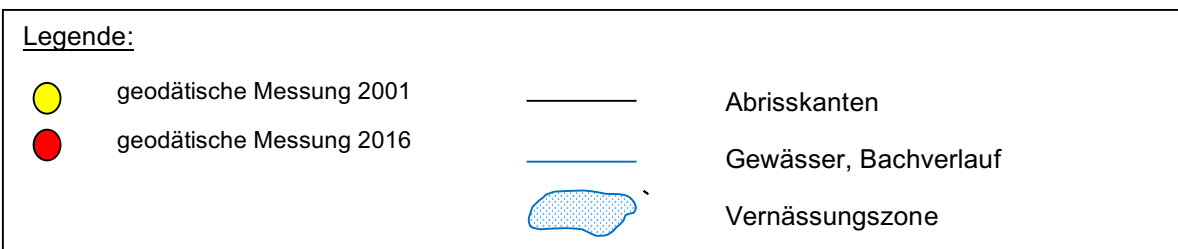


Abbildung 45: Digitales Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 0,5 m erstellt mit *Surfer11*. Eingefärbt sind hier die einzelnen Profilsuren, die Messpunkte von Prof. Kaufmann, GPS Punkte aus der Geländekartierung sowie die Abrisskanten von deutlich erkennbaren Rutschungen.

Ähnliches wie in Höhenschichtlinienkarten ist auch mittels digitalen Oberflächenmodellen möglich (siehe Abb. 45). Sehr gut erkennbar ist hier die Lage der Häuser sowie der Zufahrtsstraßen und Wanderwege. Auch Bachverläufe sind einfach nachzuzeichnen und deshalb mit einer hohen Lagegenauigkeit versehen.

Weiters sind in Abbildung 45 sind die Profilsuren aus Abbildung 46 gefärbt eingezeichnet. Dabei repräsentiert rot das nördliche Profil 1 und die braune Linie das Profil 2 (Süd). Die hellblaue Färbung spiegelt das Profil 3 (West) wider. Die östliche, grüne Profilsur in Richtung Tal wurde als Profil 4 bezeichnet.

Gut differenzierbar ist neben Wald- und Almbereich auch das sehr steile, unruhige Gelände sowie das flachere Terrain. Ein Einzeichnen der größeren Rutschflächen ist hier jedoch sehr schwer und kann nur bei starker Vergrößerung erfolgen. Auf eine Kartierung der Rutschkörper wurde hier verzichtet und nur im Höhenschichtlinienmodell erwogen.

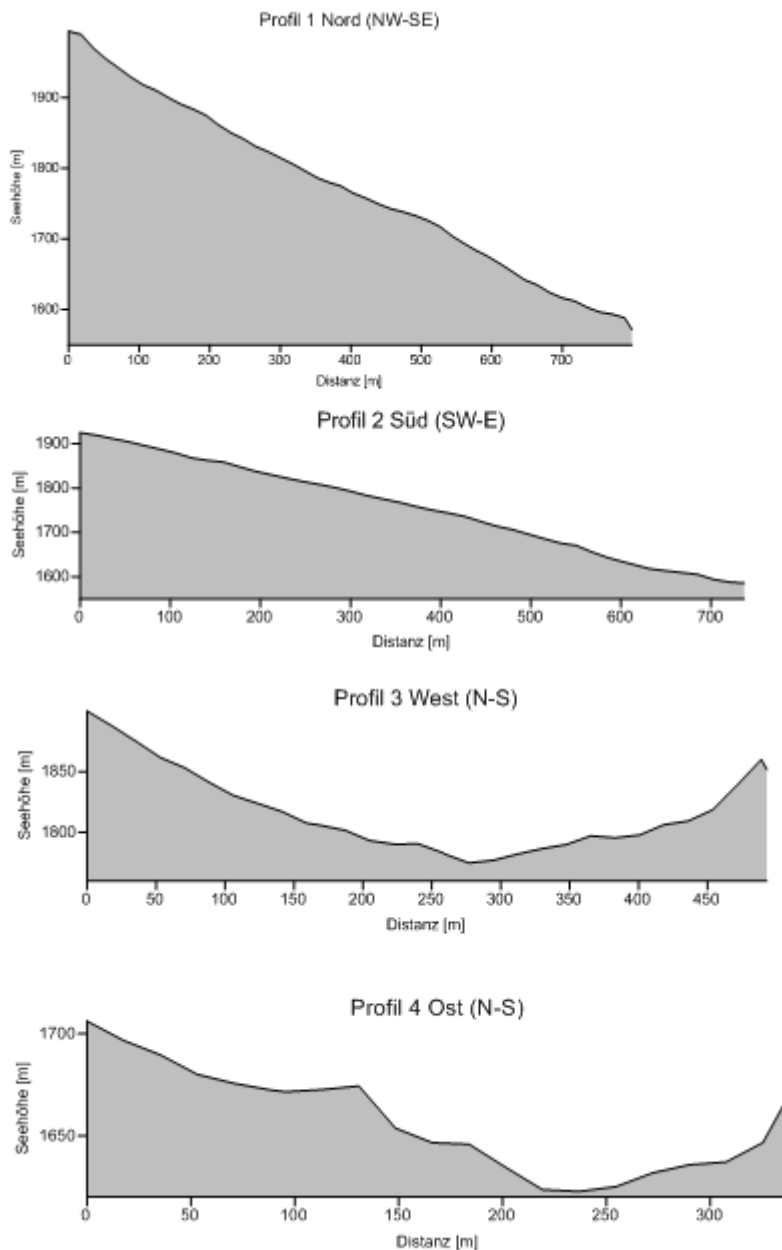


Abbildung 46: Unbearbeitete Spuren der geologischen Profilschnitte in unterschiedlichem Maßstab, erstellt mit dem Programm Surfer11.

Relativ einfach lassen sich im Programm Surfer die Spuren der Profilschnitte erstellen. Die Lage ist in der vorhergehenden Abbildung 46 zu entnehmen. Die Auswahl erfolgte durch Interpolation an oberflächlichen Fixpunkten aus dem Messprogramm sowie ingenieurgeologischen Gesichtspunkten.

Um die Hangneigungen an den einzelnen Messpunkten nachzeichnen zu können, wurde eine Contour Map mit der Geländeneigung erstellt (siehe Abb. 47). Sie ist ähnlich einer Höhenschichtlinienkarte zu verstehen, mit dem einfachen Unterschied, dass Isolinien gleicher Hangneigung entsprechen. Die Hangneigungen wurden für die spätere Tiefenberechnung benötigt und sie weisen einen relativ hohen Einfluss auf die errechnete Tiefe auf. Deshalb wurde versucht, die Neigung des Geländes möglichst genau zu ermitteln.

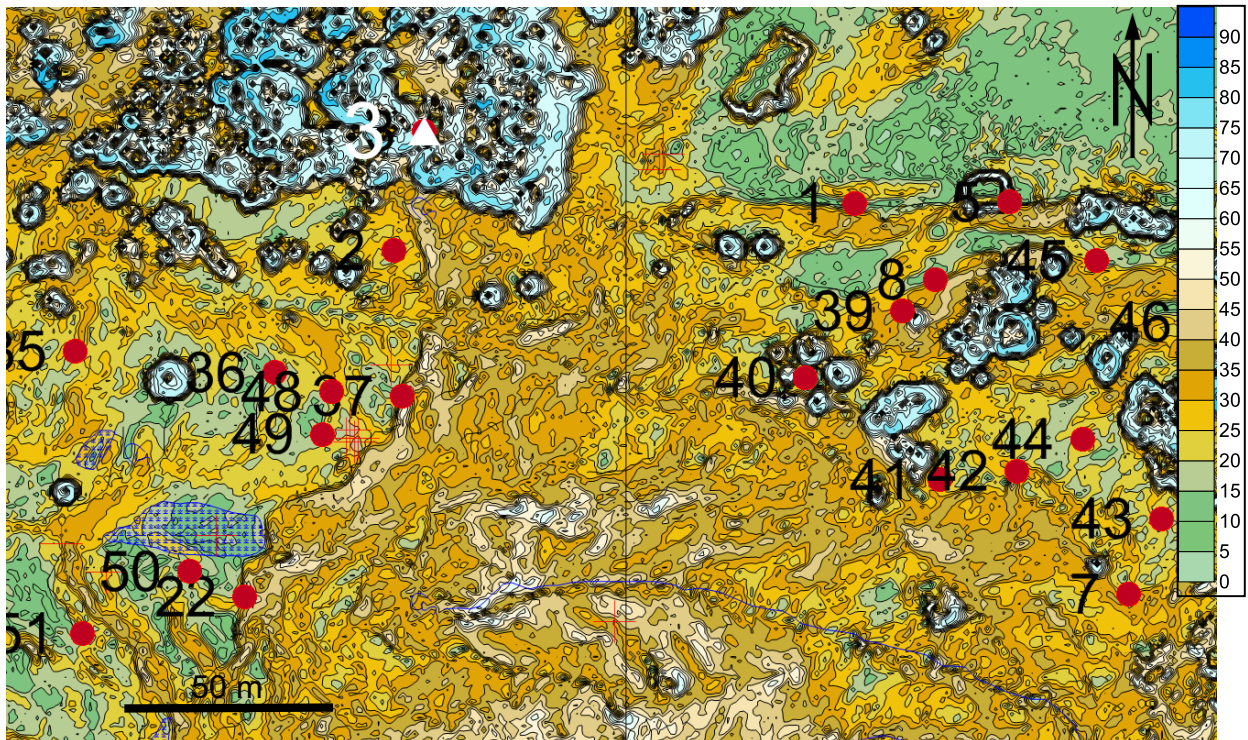


Abbildung 47: Ausschnitt aus der Hangneigungskarte, welche mit Surfer11 erstellt wurde. Die Intervalle sind in diesem Ausschnitt mit 5 Grad Neigungsunterschied versehen, wurden aber im Analyseverfahren auf 1 Grad Unterschied herabgesetzt. Die Farbe Grün spiegelt hier die flachen Bereiche wieder (0 bis 15°), während die gelb- bis orangefarbenen Bereiche bereits Neigungen von 15 bis 45° entsprechen.

9. BERECHNUNG VON TIEFE UND VOLUMEN DER MASSENBEWEGUNG

9.1. Viscous Flow Modell

Nach HANDWERGER, ROERING, SCHMIDT, & REMPEL (2015) wurden mit Hilfe der Vermessungsdaten von Prof. Kaufmann Berechnungen hinsichtlich der Tiefe der Rutschfläche angestellt.

Folgende Formel, welche bereits im Kapitel 2.3.3. näher erläutert wurde, wurde dafür für die Tiefenberechnungen verwendet. Dabei wird speziell auf die dort beschriebene Formel 8 hingewiesen.

Der Grund für die Auswahl dieses Verfahrens liegt darin begründet, dass hier die Messdaten von Prof. Kaufmann sehr gut angewendet werden können. Die Geschwindigkeit aus den Messreihen sind dabei die wichtigsten Formelglieder (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Angenommene Werte für die Konstanten in der oben genannten Gleichung.

Kürzel	Konstante	Wert	Quelle
ρ	Dichte des Massenbewegungsmaterials	2000 kg m^{-3}	-
g	Erdbeschleunigung	$9,81 \text{ m s}^{-2}$	-
p	Exponent aus dem Fließgesetz	3	HANDWERGER, ET AL. (2015)
c	Konstante aus dem Fließgesetz	$4,6 \cdot 10^{-21} \text{ m kg}^{-1} \text{ a}^{5/3}$	HANDWERGER, ET AL. (2015)

Im Zuge des Berechnungsverfahrens wurde festgestellt, dass die Formel nach HANDWERGER, ROERING, SCHMIDT, & REMPEL (2015) für die Berechnung äußerst komplexe Randbedingungen aufweist und beim Anwender sehr viel notwendiges Vorwissen abverlangt. Im Paper, welches von den zuvor genannten Verfassern zur Anwendung der Formel niedergeschrieben wurde, sind zudem keine Verweise auf Einheiten der Rohdaten angeben. Schließlich hielt man sich bei den Konstanten an die Vorgaben aus dem Paper selbst, vor allem der Exponent p sowie die Fließkonstante c bereiteten Probleme. Die Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ wurde auf deren jährlichen Betrag umgerechnet, was $9,76 \cdot 10^{15} \text{ m/a}^2$ entspricht.

9.1.1. Einfluss der Dichte auf die Tiefe der Massenbewegung

Zuerst wurde der Einfluss der Dichte auf das Ergebnis der Tiefe an einem Versuchspunkt (Messpunkt 49) getestet. Dabei wurden die Werte für die Geschwindigkeit, die Fließkonstante, der Exponent, die Hangneigung sowie die Erdbeschleunigung nicht verändert. Die Werte für die Dichte wurden aus der Literatur BOOTH ET AL. (2013) entnommen. Die Berechnungen erfolgten im Programm *Microsoft Excel* anhand einer Tabellenkalkulation.

Tabelle 7: Änderung der Gleitflächentiefe bei veränderter Dichte.

3D-Geschwindigkeit (m/a)	Erdbeschleunigung (m/a ²)	Exponent	Fließkonstante (m*a ^{5/3} *kg ⁻¹)	Dichte Material (kg/m ³)	Hangneigung (°)	Tiefe (m)
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2500	18.27	24.73
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2250	18.27	26.77
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2041	18.27	28.80
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2000	18.27	29.24
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	1800	18.27	31.64
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	1730	18.27	32.60
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	1700	18.27	33.03

Bei Veränderung der Dichte-Werte wird deutlich, dass die Materialeigenschaften einen deutlichen Einfluss auf die Tiefe der Gleitfläche haben (siehe Tabelle 7). Bei einer Dichte von 2500 kg/m³, was einem gut konsolidierten Rutschungsmaterial entspricht, liegt die Tiefe der Gleitfläche mit ca. 25 m rund 8 Meter oberhalb einer Fläche in weniger gut zusammengepressten Material mit Dichte von 1700 kg/m³.

Im Fall der Gleitfläche in Krimml wurde folglich ein durchgängiger Dichte-Wert von 2000 kg/m³ angenommen. Diese Annahme stützt sich zum einen auf Werten aus der Literatur von BOOTH ET AL. (2013) und zum anderen aus eigenen Abschätzungen des Probenmaterials, welches im September 2016 im Zuge der Kartierungsarbeiten im Gelände gezogen wurde. Da eine genaue Analyse im Labor nicht erwogen wurde, berechnete man die Dichte auf Grund des Massen- und Volumenverhältnis im Probenkübel. Klarerweise ergeben sich im Zuge dieser simplen Abschätzung nur grobe Richtwerte, dennoch erscheint dies für diese Masterarbeit als ausreichend. Dennoch könnte vor allem durch genaue Analyse des Materials im Blaubachgraben eine höhere Genauigkeit in der Aussagekraft erzielt werden.

9.1.2. Einfluss der Hangneigung auf die Tiefe der Massenbewegung

Der Umstand, dass sich im Laufe der Jahre die Hangneigung an einem Beobachtungspunkt ändern kann und dadurch die Tiefe der Gleitfläche verändert wird, wurde ebenfalls in einem Testversuch überprüft. Abermals wurden sämtliche restlichen Werte der Formel mit Ausnahme der Hangneigung unverändert belassen und in die Formel eingesetzt. Die Auswertung erfolgte mittels *Microsoft Excel*.

Tabelle 8: Auswirkung einer Veränderten Hangneigung auf die Tiefe der Gleitfläche

3D-Geschwindigkeit (m/a)	Erd-beschleunigung (m/a ²)	Exponent	Fließ-konstante (m*a ^{5/3} *kg ⁻¹)	Dichte Material (kg/m ³)	Hang-neigung (°)	Tiefe (m)
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	5	71.10
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	10	42.40
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	15	31.43
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	20	25.50
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	25	21.76
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	30	19.18
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	35	17.30
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	40	15.89
1.019	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	45	14.79

Beim Vergleich von Hangneigungen (siehe Tabelle 8) wurde ebenfalls sichtbar, dass die Geomorphologie des Geländes unter Umständen beträchtlichen Einfluss auf die Lage der Gleitfläche im Untergrund aufweist. Mit zunehmender Hangneigung, also einer Zunahme der Steilheit des Geländes, sinkt die Mächtigkeit der Massenbewegung. Dies scheint demnach sehr plausibel, da die Gleitfläche an den Abrisskanten senkrecht und nahe der Oberfläche liegen. Am Fuß der Massenbewegung zeigen sich eine Verflachung der Topographie und eine erhebliche Akkumulation an Massenbewegungsmaterial bzw. eine Verdickung des Untergrunds, was eine deutlich tiefere Lage der Gleitfläche nach sich zieht.

Die Hangneigungen wurden für die Berechnungen mittels Geländeoberflächenmodelle an den Messpunkten, topographischer Karten sowie durch das *SAGIS System* ermittelt. Weiters wurde angenommen, dass sich die Neigungen der Hänge an den Messpunkten während der Messperiode seit 2001 nur geringfügig im Gradbereich geändert haben. Daher wurde ein Schwankungsbereich von $\pm 5^\circ$ um den gemittelten Wert aus dem Jahr 2015 in die Tiefenabschätzung mit einbezogen.

9.1.3. Einfluss der Geschwindigkeit der Oberfläche an den Messpunkten auf die Tiefe der Massenbewegung

Da die dreidimensionale Geschwindigkeit, mit welcher sich die Messpunkte zu Tale bewegen, durch die jahrelangen Monitoringbeobachtungen in hochgenauen Messwerten vorliegt, wurde der Einfluss von Zu- und Abnahmen ebenfalls überprüft. Hier sei zu erwähnen, dass durch die hochgenauen Messprogramme von Prof. Kaufmann auf Änderungen im Millimeterbereich eingegangen wird. Weiters wurden Extrembeispiele für besonders starke Zu- und Abnahmen getestet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Einfluss der oberflächlichen Geschwindigkeit der Messpunkte auf die Tiefe der Gleitfläche

3D-Geschwindigkeit (m/a)	Erdbeschleunigung (m/a ²)	Exponent	Fließkonstante (m ³ *a ^{5/3} *kg ⁻¹)	Dichte Material (kg/m ³)	Hangneigung (°)	Tiefe (m)
0.800	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	25.62
0.801	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	25.63
0.802	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	25.64
0.805	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	25.66
0.810	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	25.70
0.820	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	25.78
1.400	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	29.47
1.401	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	29.48
1.405	9.76 E+15	3	4.600E-21	2200	18.27	29.50

Verändert man die Beträge der räumlichen Geschwindigkeit im Millimeterbereich, so kann von einer Zunahme der Mächtigkeit der Massenbewegung bei höherer Geschwindigkeit ausgegangen werden. Dieser Umstand scheint ebenfalls einer logischen Erklärung zu entsprechen, wo bei höheren Verschiebungsraten an der Oberfläche auch mehr Material transportiert werden kann und dies zu einer Zunahme in der Mächtigkeit führt. In mittelsteilem Gelände bei 18,27° Hangneigung wird bei einer gemittelten jährlichen Verschiebung von 80 cm eine Mächtigkeit von 26 m angenommen. Für den gleichen Messpunkt kann bei einer deutlichen Geschwindigkeitszunahme von 1,4 m pro Jahr was eine Zunahme der Mächtigkeit von ca. 4 m ausgegangen werden.

9.1.4. Einfluss der Konstanten und des Exponenten auf die Tiefe des Kriechens

Folgende Werte für die Konstante aus dem Fließgesetz, dem Fließ-Exponenten sowie der Erdbeschleunigung wurden im Zuge dieser Masterarbeit nicht verändert und aus den zitierten Quellen und Literaturangaben übernommen. Die Auswirkungen einer Veränderung auf die Tiefe einer Massenbewegung wurden im Zuge dieser Masterarbeit nicht überprüft.

Der Vollständigkeit sei erwähnt, dass auch die Konstante aus dem Fließgesetz verändert und dem Material angepasst werden kann. Laut BOOTH ET AL. (2013) kann in deren ursprünglicher Notation von einer Schwankung im Bereich von 10^{-56} bis 10^{-63} m³ kg⁻³ a⁵ ausgegangen werden. In diesem Sinne wurde der Wert aus HANDWERGER ET AL. (2015) mit $4,6 \cdot 10^{-21}$ m kg⁻¹ a^{5/3} übernommen. Dabei wurde bereits die 3. Wurzel aus den Werten gezogen und entspricht einem Wert von ca. 10^{-61} .

Der Exponent aus dem Fließgesetz wurde ebenfalls aus HANDWERGER ET AL. (2015) übernommen und beträgt den dimensionslosen Wert p.

Für die Erdbeschleunigung wurde ein Wert von $9,81 \text{ m/s}^2$ angenommen, was den Angaben des BUNDESAMTES FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN sowie der UNIVERSITÄT WIEN (FAKULTÄT FÜR PHYSIK, https://www.univie.ac.at/physikwiki/index.php/LV012:LV-Uebersicht/SS08/Vortraege/Gruppe_2b_Der_Effekt_der_Erdrotation_auf_die_Erdbeschleunigung) entspricht. Umgerechnet auf die einen jährlichen Betrag ergibt dies eine Erdbeschleunigung von $9,76 \cdot 10^{15} \text{ m/a}^2$.

9.1.5. Berechnungen der Tiefe der Massenbewegungen an den einzelnen Messpunkten im jährlichen Rhythmus

Die errechneten Tiefen an den einzelnen Messpunkten können im Anhang 02 als Tabellensammlung eingesehen werden. Für sämtliche Messpunkte, welche von Prof. Kaufmann seit 2001 jährlich geodätisch vermessen wurden, sind die ermittelten Tiefen der Gleitflächen einzusehen.

9.1.6. Gemittelte Tiefen der Massenbewegung an den einzelnen Punktgruppen

Nachstehend wurden die gemittelten Tiefenberechnungen der einzelnen Punktgruppen tabellarisch (Tabelle 10) zusammengefasst.

Tabelle 10: Gemittelte Tiefen der Gleitflächen unterhalb der einzelnen Punktgruppen.

Punktgruppe	Punkte	Lokalität	Tiefe der Gleitfläche
1	1, 5	Jagdhütte	28 m ± 2 m
2	26, 27, 28, 30	unterhalb der Schmalscharte	18 m ± 7 m
3	39, 45, 46, 47	unterhalb der Jagdhütte	16 m ± 3 m
4	20, 21	unterhalb der Breitscharte	16 m ± 4 m
5	13 bis 21	unterhalb der Breitscharte (ohne Punkte 10 bis 12)	19 m ± 5 m
6	2, 23 bis 25, 31 bis 38, 49	unterhalb der Schmalscharte (ohne Punkte 26 bis 30)	24 m ± 6 m
7	40 bis 44	Rutschzone unterhalb der Jagdhütte	18 m ± 4 m
8	2, 22, 37-38, 49	große Abbruchkante	23 m ± 4 m
9	37	Punkt mit größter mittlerer Horizontalbewegung	21 m ± 4 m

Anhand der Tabelle erkennt man, dass die Werte vom höhergelegenen Rutschgebiet in Richtung Tal zunehmen. Dabei ist eine Zunahme in der Mächtigkeit des Rutschkörpers von ca. 10 m anzunehmen, wobei die Tiefe der Gleitflächen in den Anrissbereichen unterhalb der Schmal- und Breitscharte grundsätzlich ähnliche Werte annehmen. Ebenfalls gut korrelierbar sind die Werte im unteren Bereich der Rutschung am Übergang zur großen Abbruchkante.

9.2. Konstruktion nach dem Modell von CARTER & BENTLEY (1985)

Ein weiteres Verfahren, mit welcher sich die Form und Tiefe der Gleitfläche gut abschätzen ließ, stellt das Verfahren nach CARTER & BENTLEY (1985) dar. Das bereits im Kapitel 2.3.4. angesprochene Modell sieht dabei die Konstruktion der Gleitflächen vor.

Die Werte für die graphische und mathematische Konstruktion der Gleitflächenmorphologie wurde durch die Tiefenwerte aus der *Viscous Flow Modellierung* möglich. Hierfür wurden für zwei ausgewählte Rutschkörper die Gleitflächen rekonstruiert.

Abhängig war die Auswahl von der stark eingeschränkten Verfügbarkeit an Messpunkten in der jeweiligen Profilrichtung. Aus diesem Grund wurden im Zuge dieser Arbeit ausschließlich die Punktgruppen 5 und 6 herangezogen, da hier die Messpunkte von Prof. Kaufmann beinahe linear angeordnet waren.

In folgenden Schritten wurde versucht, die Gleitflächentiefe sowie die Morphologie der Bewegungsfläche der oberflächlichen Rutschungen zu ermitteln.

- (1) Zuerst wurde ein Profilschnitt erstellt, welcher eine möglichst hohe Punktdichte bzw. viele Messstationen aufweist.
- (2) Durch die einzelnen Messpunkte entlang der Profilspur wurden schließlich die Verschiebungsrichtungen eingezeichnet und durch deren Mitte eine Normale gelegt, welche als „*movement normals*“ bezeichnet wurden.
- (3) Im nächsten Schritt erfolgte die Konstruktion der so genannten „bisection lines“, welche zwischen den einzelnen „*movement normals*“ zu liegen kommen.
- (4) Beginnend am Fuß der Rutschung wurden schließlich parallel zur Verschiebungsrichtung an der Oberfläche die einzelnen „bisection lines“ bis zum Anrissbereich miteinander verbunden.
- (5) Derselbe Prozess der Punkte (1) bis (4) erfolgte nun in der entgegengesetzten Richtung, also vom Anrissbereich zum Fuß der Rutschung.
- (6) Die Lage der Gleitfläche ergibt sich aus den gewichteten Mittelwerten jedes Punktpaars, welches auf der relativen Distanz auf der Gleitfläche basiert.

Die folgende Seite zeigt die zwei Profilschnitte der Punktgruppen 5 und 6. Erstellt bzw. konstruiert wurden diese Schnitte mit dem weit verbreiteten Zeichenprogramm *AutoCAD Civil 3D 2015*, welches in den verschiedensten Sparten des Ingenieurwesens Anwendung findet.

Tabelle 11: Ergebnisse der Gleitflächenkonstruktion nach CARTER & BENTLEY (1985)

Punktgruppe	Tiefe der Gleitfläche (West)	Tiefe der Gleitfläche (Ost)
5	2 bis 3 m	5 bis 6 m
6	1 bis 2 m	2 bis 3 m

Durch das Werkzeug Messen im *AutoCAD Civil 3D 2015* wurden die Werte aus Tabelle 11 aus der Konstruktion herausgemessen. Diese ergaben im Rutschbereich innerhalb der Punktgruppe 5 im oberen bzw. westlichen Teil 2 bis 3 Meter, im unteren und östlichen Bereich 5 bis 6 Meter. Die Mächtigkeit dieses Rutschbereiches nimmt also entsprechend vom oberen bis zum unteren Messpunkt um mehr als die Hälfte zu. Im Gegensatz dazu wurden in der Punktgruppe 6 zwei kleinere Rutschkörper verzeichnet, wobei sich diese in der Ausdehnung und Mächtigkeit von jenem in der Punktgruppe 5 stark unterscheiden und deutlich geringer sind. In der westlichen Rutschung, also im höher gelegenen Bereich ist von einer geringen Mächtigkeit von 1 bis 2 m auszugehen. Die weiter im Osten gelagerte Rutschung ist mit einer konstruierten Gleitflächentiefe von 2 bis 3 m zwar mächtiger als die weiter westliche, aber dennoch deutlich geringer als die Rutschung in Punktgruppe 5.

Die Zeichnungen sind verkleinert in den Abbildungen 48 und 49 gegeben und können außerdem im A4 Format dem Anhang 03 entnommen werden.

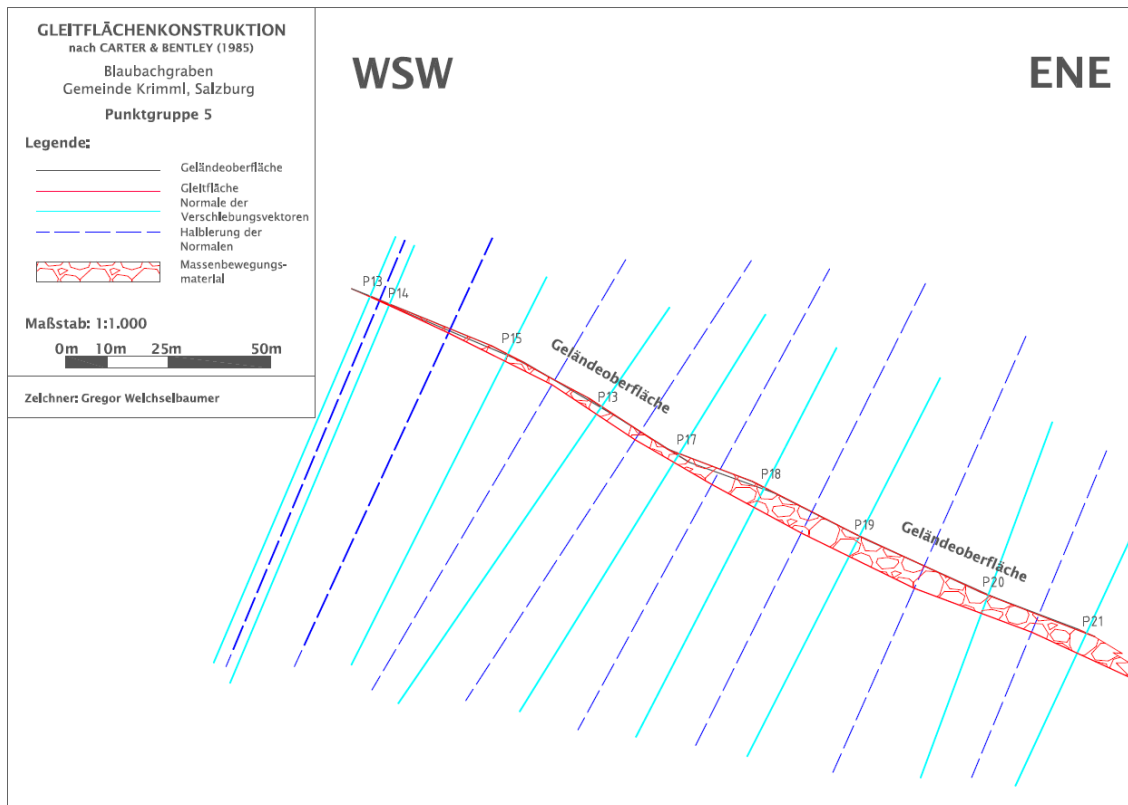


Abbildung 48: Konstruktion mittels *AutoCAD Civil 3D 2015* der oberflächlichen Rutschflächen innerhalb der Punktgruppe 5 nach der Methode von CARTER & BENTLEY (1985).

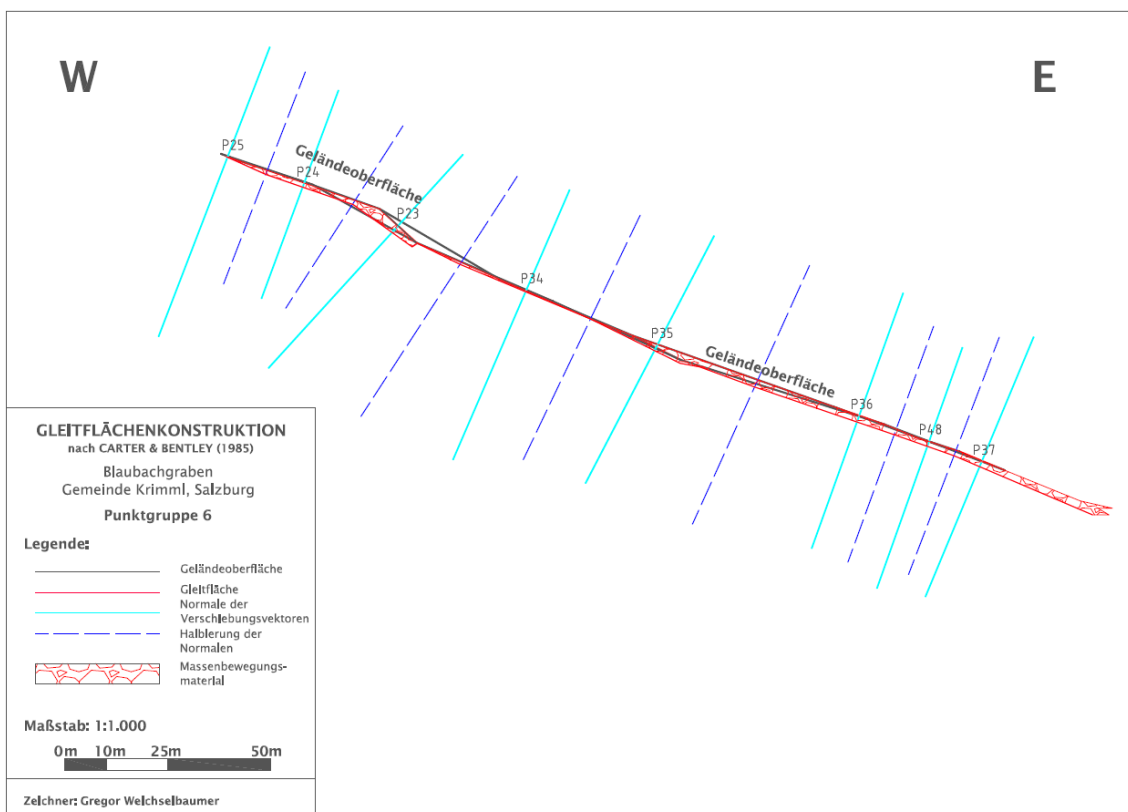


Abbildung 49: Konstruktion mittels *AutoCAD Civil 3D 2015* der oberflächlichen Rutschflächen innerhalb der Punktgruppe 6 nach der Methode von CARTER & BENTLEY (1985).

10. DISKUSSION

10.1. Problemstellung

Auf Grund der Tatsache, dass im Projektgebiet keine Bohrungen oder ähnliche künstliche Aufschlüsse wie Rammkernsondierungen oder Baggerschürfe vorhanden sind, welche als Vergleichsdatensätze fungieren könnten, ist es nicht möglich exakte Aussagen über die Tiefenverteilung der Gleitflächenhorizonte im Blaubachgraben zu treffen.

Generell kann aus geologischer Sicht eine genaue Bestimmung nicht erfolgen, da sowohl bei vorhandenen Bohrungen kaum so viele Aufschlüsse vorhanden wären um eine genaue Aussage diesbezüglich treffen zu können.

Dennoch ist es in dieser Arbeit durchaus gelungen ein deutliches Muster der räumlichen Tiefenvariation zu liefern, obwohl die berechneten und konstruierten Tiefenwerte mit einer gewissen Ungenauigkeit versehen sind.

Das am besten geeignete Modell wäre sicher jenes von BAUM, MESSERICH, & FLEMING (1998), welches jedoch auf Bohrlochdaten bzw. Bohrkerne angewiesen ist und deshalb verworfen wurde. Jene Modelle von BOOTH (2013a, 2013b), bei welchen hohe mathematische Fachkenntnisse zur Anwendung nötig sind, konnten ebenso in dieser Arbeit nicht angewendet werden.

Deshalb wurde versucht nach den Ansätzen von HANDWERGER, ROERING, SCHMIDT, & REMPEL (2015) sowie Carter & Bentley (1985) eine Einschätzung zu liefern.

10.2. Diskussion der Mess- und Kartierungsergebnisse sowie der Software- und Rechenauswertung

Anhand der Auswertung aus dem Monitoringprogramm sowie aus der Geländekartierung konnten durchaus aussagekräftige Berechnungen angestellt werden, welche in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Wie bereits im Kapitel 9.1 dargestellt wurde, belaufen sich die Tiefen der Massenbewegung, je nach Punktgruppe gesehen, im Bereich zwischen 16 und 28 m, wobei einige Meter Schwankungsbreite einberechnet werden müssen. Die geringsten Mächtigkeiten der Blaubachgrabenrutschung sind dabei sinngemäß in den oberen Regionen unterhalb der Schmal- und Breitscharte zu erwarten. Im talseitigen Bereich nahe der Jagdhütte und der großen Abbruchkante wurden im Gegensatz dazu Tiefen der Gleitfläche von ca. 30 Meter kalkuliert.

Im Vergleich zu den Eindrücken, welche im September 2016 bei der Feldkartierung gewonnen wurden, ist anzumerken, dass auf Grund der hohen Erosions- und Sedimentationsraten im Blaubachgraben keine Nachweise einer Gleitfläche erkennbar waren. Weder im oberen Bereich, wo zwar Spuren einer geologischen Verwerfung bzw. Störung erkennbar waren, noch im Graben oberhalb der Geschiebesperre war ein Ausbiss der Gleitfläche auffindbar.

Einzig im Erosionsgraben konnte anhand von anstehendem, völlig aufgeriebenem Störungsgestein eine mögliche Gleitbahn entdeckt werden. Diese kommt im Vergleich der Lage im Gelände mit den Tiefenberechnungen rund um die Jagdhütte sogar im Bereich der Rechenwerte zu liegen. Eine Korrelation ist dennoch auf Grund des geringen Datenbestands an Geländeinformation kaum als sinnvoll zu erachten.

Des Weiteren ist für eine noch genauere Auflösung der Tiefenberechnung eine genaue Laboranalyse des Geschiebematerials in den einzelnen Punktgruppen als absolut notwendig anzusehen. Bereits Versuchskalkulationen im Abschnitt 9.1.1. haben gezeigt, dass die Schwankung in der Mächtigkeit der Massenbewegung durchaus beträchtlich sein kann. Im Falle einer Planung einer möglichen Bohrkampagne, könnte eine solche Messungsgenauigkeit durchaus wirtschaftlich relevante Kostenbeträge annehmen, da ein solches Erkundungsprogramm auf Laufmeter kalkuliert werden würde. Dennoch sei noch ergänzt, dass solche Bohrprogramme zumeist bis ins anstehende Festgestein abgeteuft werden, was bei einer Massenbewegung mit mehreren Gleitflächen durchwegs Zunahmen von mehreren Zehnermetern bedeuten könnte. Bei den Berechnungen in dieser Arbeit wurden daher Dichtewerte angenommen, die durch spätere Schätzungen erstellt wurden. Der Wassergehalt wurde dabei nur grob dazu addiert, um auch diesen Faktor in die späteren Berechnungen miteinzubeziehen.

Vor allem im unteren Bereich nahe der Jagdhütte sind die erhaltenen Tiefenwerte hinsichtlich der Punktgruppen 1, 3 und 7 als relativ einleuchtend anzusehen, da die Mächtigkeit einer Massenbewegung gegen den Rand hin abnimmt. Weiters ist das Gebiet durch mehrere kleinräumigere Massenbewegungen übersät. Dies ist durch die Oberflächenmodelle sowie im Gelände selbst erkennbar, da sich mehrere lokale Abrisskanten mit unterschiedlichen Dimensionen gebildet haben. Aus diesem Grund ist auch anzunehmen, dass sich die Tiefen in den Punktgruppen 1, 3 und 7 auch auf solche sekundäre Rutschungen beziehen können. Eine genauere Aussage darüber, auf welche Gleitbahn sich die errechnete Tiefe schlussendlich bezieht, ist ohnehin nur durch einen direkten Aufschluss durch Kernbohrungen möglich.

Für die Punktgruppen 5 und 6 wurde nach der Methode von CARTER & BENTLEY (1985) der Versuch unternommen, die Gleitflächen der oberflächlichen Rutschungen zu konstruieren.

- Punktgruppe 5 (unterhalb der Breitscharte):
Dies ergab für das Profil innerhalb der Punktgruppe 5 im westlichen bzw. oberen Bereich eine Tiefe von wenigen Metern (bis 2-3 m). Unterhalb dem Messpunkt 16 steigt schließlich die Mächtigkeit in Richtung Osten an und erreicht eine Mächtigkeit von rund 5-6 m zwischen den Punkten 19 und 20.
- Punktgruppe 6 (unterhalb der Schmalscharte):
Im zweiten Profilschnitt in der weiter nördlich gelegenen Punktgruppe 6 zeigten sich im Vergleich zur zuvor genannten Punktgruppe 5 seichter liegende Gleitflächen, da kaum Mächtigkeiten über 2-3 m überschritten wurden. Im Gegensatz zum Rutschbereich unterhalb der Breitscharte konnten allerdings

durch die Analyse zwei einzelne oberflächliche Massenbewegungen betrachtet werden.

Die Analyse mittels der Methode nach CARTER & BENTLEY (1985) zeigt, dass sich das gesamte Rutschgebiet im Blaubachgraben durch mindestens zwei Gleitflächenhorizonte zusammensetzt. Zum einen kann knapp unterhalb der Geländeoberfläche ein sehr sensibles, dynamisches System beobachtet werden, das mit einer Mächtigkeit von wenigen Metern zu Tale geht. Diese einzelnen und kleinräumigen Rutschungen sind das Resultat aus Niederschlag und Schneeschmelze und fördern das, bereits aufgelockerte, Material der großen und älteren Massenbewegung im Blaubachgraben.

Der untere Gleitflächenhorizont konnte mittels der Modellierung nach HANDWERGER (2015) rechnerisch ermittelt werden. Mit Tiefen von 16 bis 20 m in den oberen Almbereichen sowie Mächtigkeiten von mehreren Zehnermetern in talnäheren Bereichen nahe der Jagdhütte unterscheiden sich diese Werte deutlich von jenen aus den oberflächlichen und lokal begrenzten Rutschungen.

10.3. Aussagen über Kinematik und Bewegungssinn der Massenbewegung

In Anbetracht der Verschiebungsvektoren aus dem Messprogramm seit 2001 ist ein deutliches Bild erkennbar. Im oberen Bereich unterhalb der Schmal- und Breitscharte sind durchwegs dominierende Vertikalbewegungen erkennbar. Im unteren Bereich im Umfeld der Jagdhütte sind im Gegensatz dazu eher horizontal-dominierende Verschiebungsbeträge dominierend. Auf Grund der Tatsache, dass an allen Punkten durch die geodätischen Vermessungen über Jahre hinweg Bewegungen registriert wurden, kann ausgesagt werden, dass sich der Hang als Ganzes bewegt.

Grundsätzlich beschränken sich die Rutschprozesse auf das Lockermaterial, welches sich über die Jahre hinweg unterhalb des Absturzbereiches östlich der Breit- und Schmalscharte gebildet hat. Eine Bewegung der steilen Felsbereiche, welche den Blaubachgraben begrenzen, wurde nicht bestätigt. Ähnlich der Beobachtungen aus der Dissertation von SCHNEIDER (1999) wird davon ausgegangen, dass sich die Verformungen im oberen Abrissbereich als bruchhaft und in der unteren Region als bruchlos bzw. plastisch verhalten. Wie auch SCHNEIDER (1999) feststellt, kann deshalb auch im Blaubachgraben von einer Rotationsbewegung im oberen Bereich ausgegangen werden, da sich am Plateau bereits Translationsbrüche, Nackentäler und Vernässungszonen ausbilden. Gestützt wird diese Annahme durch die dominierenden vertikalen Verschiebungen der einzelnen Messpunkte. Dieses Material wird schlussendlich talwärts verlagert, wobei sich die Bewegungsart auf Grund der horizontal dominierenden Verschiebungsraten auf eine Rutschbewegung umstellt.

Im dreidimensionalen Aspekt gesehen, kann daher davon ausgegangen werden, dass im oberen Abrissbereich eher rotierende Bewegungen vorherrschen. Das Gelände in diesem Bereich ist deutlich steiler als im unteren Bereich, was bei einem

angenommenen parallelen Verlauf der Gleitfläche zur Oberfläche eine steile Rutschfläche nach sich zieht. Im unteren Bereich nahe der Jagdhütte kann jedoch eine eher flache Geländemorphologie beobachtet werden. Hier dominieren die lateralen Verschiebungen deutlich, was auch an den Messwerten belegbar ist. Daher ist davon auszugehen, dass die Kinematik der Massenbewegung talwärts von rotierenden Mechanismen in translative kinematische Bewegungen übergeht. Die Gleitflächengeometrie ist demnach als flacher anzusehen und würde deutlich weniger steil einfallen.

Ob die erhöhten Porenwasserdrücke, wie sie in der Regel nach massiven oder andauernden Niederschlägen sowie der Schneeschmelze auftreten, die Bewegungen im Blaubachgraben verstärken, konnte auch durch Voruntersuchungen (vgl. ADLER, 2016) nicht einwandfrei geklärt werden. Dennoch liegt es nahe, dass, wie auch SCHNEIDER (1999) in ihrer Abschlussarbeit vermerkt, vor allem nach der Schneeschmelze die haltenden Kräfte stark herabgemindert werden und deshalb nach ergiebigen Wintern höhere Bewegungen auftreten.



Abbildung 50: Translationsrisse deuten auf neue Ausbildungen von Rotationsgleitflächen hin. Die Abbildung wurde nahe der Abbruchkante in die Erosionsmulde aufgenommen, ähnliche Szenarien wurden öfter im Alm- und Wiesenbereich angetroffen. Foto: privat

Zudem führen Veränderungen des Gleichgewichts von treibenden und rückhaltenden Kräften im Hang zu weiteren zyklischen Gleitbewegungen (vgl. SCHNEIDER, 1999). Im Falle des Blaubachgrabens zeigt sich dies in der Ausbildung von neuen Rutschungen im Oberhang an den Alm- und Wiesenbereichen (siehe Abbildung 50).

Als Ursachen können demnach die nachstehenden Parameter in Betracht gezogen werden GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2016). Bereits zuvor sei erwähnt, dass anthropogene Einflüsse im Blaubachgraben vernachlässigt werden können. Auch Erschütterungen aus Erdbeben und Sprengarbeiten spielen in Krimml keine Rolle.

(1) Tektonische Prozesse:

Primär muss an Hand der Kartierten Störungen (vgl. ZöBL, 2001) im Blaubachgraben von einer tektonischen Destabilisierung des Hanges ausgegangen werden. Solche Störungen können zu einer Veränderung der Hangneigungen beitragen und zu einer Verminderung der Standfestigkeit führen. Des Weiteren ist entlang solcher Störungen mit einer Auflockerung des Festgesteins zu rechnen, was die Bildung von Störungsgesteinen und -letten nach sich zieht. Solche aufgeriebenen Gesteinsbereiche stellen für Massenbewegungen optimale Gleitflächenhorizonte dar, da die Reibung in diesen Bereichen stark herabgesetzt wurde.

(2) Erosion:

Fortschreitende erosive Tätigkeit am Hangfuß führt zur Wegnahme des Widerlagers und zur Verminderung der Hangstabilität. Als treibende Erosionsmotoren sind im Blaubachgraben sicherlich die Oberflächengerinne sowie Quellaustritte anzusehen, welche Material verlagern und den Graben zusehends unterschneiden und eintiefen.

(3) Verwitterung:

Die Auflockerung und Entfestigung des Gebirges kann entlang der steilen Felswände, welche den Blaubachgraben begrenzen, festgestellt werden. Grund für Verwitterung stellen vor allem die äußerlichen physikalischen Prozesse wie Frost-Tau-Ereignisse, Klima und Niederschlag sowie mögliche innere chemische Vorgänge, wie zum Beispiel das Quellen von Tonmineralen oder deren Umwandlung dar. Die klimatischen Gegebenheiten in Krimml, mit starken Gegensätzen aus Sommer und Winter, treiben die Verwitterung stark voran.

(4) Veränderung des Bergwasserstandes und Durchfeuchtung:

Obwohl anhand der Voruntersuchungen aus vorangegangenen Arbeiten nicht einwandfrei ersichtlich, ist mit großer Wahrscheinlichkeit ein untergeordneter Einfluss des hydrologischen Dargebots auf die Bewegung im Graben anzunehmen. Der Einfluss des Grundwassers kann weitreichende Folgen aufweisen, welche über die Herabsetzung der Reibung hinausgeht. So kann die Bodenkonsistenz, der Strömungsdruck, der Kluftwasserdruck oder Auftrieb bei zunehmender Durchfeuchtung hervorgerufen werden. Zudem hängt das Quellen von Mineralen sowie die physikalische und chemische Verwitterung direkt mit dem Poren- und Grundwasser zusammen.

(5) Schwerkraft:

Als treibende Hauptkraft ist die Gravitation schlussendlich für die Massenverlagerung in Richtung Tal verantwortlich. Im Blaubachgraben sind die Prozesse aus den zuvor genannten Punkten gegeben.

10.4. Stellungnahme zu möglichen Sicherungs- und Beobachtungseinrichtungen für den Blaubachgraben

Zur Sicherung von Infrastruktur wie der Gerlos Alpenstraße samt Brücken sowie der zivilen Bevölkerung können folgende Vorschläge eingebracht werden, welche sich jedoch alle als wirtschaftlich kostenintensiv darstellen sowie mit hohem Materialaufwand verbunden sind. Weiters sind zahlreiche Richtlinien hinsichtlich der Agrarmarkt Austria, welche die Bewirtschaftung der Almbereiche im Blaubachgraben regelt, zu beachten. Auch der Schutz der Wanderwege muss weiterhin gewährleistet sein, da diese im Sommer stark frequentiert sind und für touristische Zwecke genutzt werden.

10.4.1. Drainagesysteme sowie Ableitung von Oberflächenwasser durch Verrohrung:

Das bereits bestehende Drainagesystem unterhalb der Jagdhütte muss hierfür deutlich erweitert werden. Der Eintrag von Wasser in den Untergrund durch Regenfälle sollte deshalb bereits im steilen Bereich oberhalb der großen Abbruchkante vermieden werden. Der Oberflächenabfluss sollte demnach bereits früh durch eine Verrohrung abgeleitet werden, um die fortschreitende Erosion von Material nachhaltig einzudämmen. Der Materialein- und -abtrag durch Oberflächenwasser scheint vor allem im unteren Bereich oberhalb der Geschiebesperre immer noch als Hauptquelle für Geschiebetransport.

Laut LARCHER (2009) kommt für Versickerung von Oberflächenwasser eine Vielzahl an Maßnahmen in Frage, welche sich vor allem im Platzangebot sowie deren Speicherart stark differenzieren. Im Falle des Blaubachgrabens wird von einer Flächenversickerung abgeraten und eine Versickerung mit unterirdischer Speicherung (wie Schachtversickerung oder Rigolen- sowie Rohrrigolenversickerung) empfohlen. Im Falle einer Schachtversickerung könnte dabei an das bestehende Drainagesystem unterhalb der Jagdhütte angeschlossen werden.

Bestehende Quellen oberhalb der Abbruchkanten müssten ohnehin bei solchen Maßnahmen nach Standards der geltenden Normen gefasst und abgeleitet werden. Bei geeigneter Qualität der Wasser wäre eine Nutzung dieser Quelle für die Trinkwasserversorgung der Gemeinde Krimml anzudenken. Einer ausreichenden Schüttleistung der Quellen vorausgesetzt, würde über den jährlichen Ertrag an Trinkwasser durchaus eine effiziente Versorgung möglich sein. Natürlich wären im Zuge einer möglichen Trinkwassernutzung Quellschutzgebiete auszuweisen, was mit einer almwirtschaftlichen sowie touristischen Nutzung (als Wandergebiet) des Blaubachgrabens nicht im Einklang stehen würde. Ein Alternativplan für den Blaubachgraben wäre in diesem Fall absolut im Vorfeld anzudenken.

Weiters würde diese Maßnahme den Erddruck auf die Geschiebesperre deutlich entlasten, da weniger Material von oben nachgeliefert wird. Der Bereich oberhalb der Geschiebesperre wurde seit deren Errichtung von 1997 bis 2003 bereits völlig gefüllt.

Abschließend wird darauf verwiesen, dass alle baulichen Maßnahmen in Abstimmung mit dem gültigen Wasserrechtsgesetz (WRG) der Republik Österreich erfolgen müssen und von den wasserrechtlichen Behörden genehmigt werden müssen.

10.4.2. Erweiterung des Retentionsvolumens oberhalb der Geschiebesperre

Als weitere Maßnahme kann die Erweiterung des Retentionsvolumens angesehen werden, welches oberhalb der Geschiebesperre aufschließt. Da der Stauraum, wie bereits zuvor erwähnt, bereits völlig mit Material verfüllt ist, muss dieser ohnehin in den nächsten Jahren wieder freigelegt werden, um neuen Rückhalteraum zu schaffen.

Wichtig ist dabei die Berücksichtigung einer geeigneten Böschung, um ein Nachrutschen des Materials in das Rückhaltebecken einzudämmen. Der Nachschub an Material sollte dabei hauptsächlich vom oberen Massenbewegungsbereich kommen und nicht von den seitlichen Bereichen rund um die Jagdhütte.

Laut ÖNORM B 2205 (2005) müssen Baugruben ab einer Tiefe von 1,25 m ab deren Sohle mit einer abgeböschten Wand hergestellt werden. Die Neigung dieser Böschung ist dabei abhängig von der Materialzusammensetzung sowie der äußeren Einflüsse wie Witterung und Wasser. Auf Grund der großen Böschungsfächen wird empfohlen, den Winkel relativ flach zu halten, um ein Nachrutschen zu vermeiden.

Eine Überlegung dabei wäre die Erweiterung des Stauraumes nach Süden, wo das steil anstehende Festgestein eine mögliche Begrenzung darstellen würde. Weiters könnte man diese Maßnahme mit einer im Punkt 10.4.1. bereits diskutierten Verrohrung der Oberflächenwässer bzw. einer Quelfassung kombinieren. Der kostentechnische Aufwand würde in einem solchen Bauverfahren nicht wie bei zwei einzelnen Maßnahmen explodieren.

Im Zuge aller Erdbauarbeiten muss immer im Rahmen der geltenden Normen und Richtlinien gehandelt werden. Im Falle einer Bautätigkeit betrifft dies die aktuelle Version der ÖNORM B 2205 „Erdbauarbeiten“. Generell müssen für Erweiterungsarbeiten externe Planungen und gutachterliche Stellungnahmen eingeholt werden.

Abschließend sei das Potential erwähnt, welches bei Wegnahme von Material gegeben ist, das zurzeit als Widerlager für die Massenbewegung dient. Ein solches Widerlager stellt die Geschiebesperre, mit deren Rückverfüllung dar. Bei Wegnahme dieses Materials oberhalb der Geschiebesperre kann es zu einer Zunahme der Bewegungsraten im Blaubachgraben kommen. In diesem Sinne sollte ohnehin nur ein geringer Teil ab der Dammkante ausgehoben werden, um ein abruptes Ansteigen der Bewegung auszuschließen.

10.4.3. Langzeitmonitoring

Aus geotechnischer Sicht ist eine Fortführung des Monitorings im Blaubachgraben anzuraten. Eine Überwachung der Verschiebeträge ist für die langfristige Planung angedachter Sanierungsmaßnahmen unerlässlich.

Dennoch wäre ein Wechsel der Messrunden vom Spätsommer bzw. Herbst in den Spätwinter bzw. Frühling anzuraten, da der Einfluss der Schneeschmelze auf die Rutscheträge aus Sicht des Verfassers nicht außer Acht gelassen werden sollte. Da hierfür keine Daten aus Messungen vorliegen, scheint eine Aussage hierfür nicht möglich, dennoch haben schneereiche Winter deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse im Blaubachgraben.

Zusätzlich zu den herkömmlichen geodätischen Messungen wäre eine hydrogeologische Überwachung der Schüttungen an den einzelnen Quellen nützlich. Vor allem bei einer weiteren Nutzung zur Trinkwassergewinnung, sind zudem hydrochemische Analysen notwendig.

Von einer Überwachung mit permanenten, stationären Überwachungssystemen, wie GBInSAR, rät der Verfasser ab, da eine akute Bedrohung der Bevölkerung sowie der Infrastruktur aus derzeitiger Sicht nicht vorliegt. Auf Grund der Datenlage wurden in den letzten Jahren weiters keine großen Vermurungen registriert, was sicherlich auch mit der Installation der Geschiebesperre zusammenhängt.

Eine langfristige Überwachung der Geschiebesperre ist, bei weiterhin bestehender Verfüllung des Retentionsraumes, durchaus als notwendig anzusehen. Da sich der Druck auf die Staumauer durch die Materiallast erhöht, können Risse oder Schäden entstehen, was die Stabilität des Systems herabsetzt. Eine Wartung in regelmäßigen Abständen ist deshalb anzuraten.

LITERATURVERZEICHNIS

ÖNORM B 2205, 2005. *Erdarbeiten - Werksvertragsnorm*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

Adler, G., 2016. *Saisonales Erdbeben in Abhängigkeit zu Niederschlagsereignissen am Beispiel der Massenbewegung Blaubachgraben bei Krimml*. unpublizierte Masterarbeit an der Technischen Universität Graz: s.n.

Baum, R. L., Messerich, J. & Fleming, R., 1998. Surface Deformation as a Guide to Kinematics and Three-Dimensional Shape of Slow-Moving, Clay-Rich Landslides, Honolulu, Hawaii. *Environmental & Engineering Geoscience*, 4(3), pp. 283-306.

Booth, A. M., Lamb, M. P., Avouac, J.-P. & Delacourt, C., 2013a. Landslide Velocity, Thickness and Rheology from Remote Sensing: La Clapière, France. *Geophysical Research Letters*, Band Vol. 40, pp. 4299-4301.

Booth, A. M., Roering, J. J. & Rempel, A. W., 2013b. Topographic Signatures and a General Transport Law for Deep-Seated Landslides in a Landscape Evolution Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Band Vol. 118, pp. 603-624.

Briglmeir, M., Sander, E. & Nejat, N., 2010. *The Geospatial Navigator: News, Tipps und Tricks zu den Autodesk Infrastruktur Lösungen*. [Online] Available at: http://geospatialnavigator.typepad.com/geospatial_navigator/2010/05/punktwolken.html [Zugriff am 06 März 2017].

Carter, M. & Bentley, S. P., 1985. The Geometry of Slip Surfaces beneath Landslides: Predictions from Surface Measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, Band Vol. 22, pp. 234-238.

Chacòn, J., Irigaray, C., Fernández, T. & El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ*.

Cruden, D. M., 1991. A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin Of the International Association of Engineering Geology*, Issue 43, pp. 27-29.

Dietrich, W. E., McKean, J., Bellugi, D. & Perron, T., kein Datum *The prediction of shallow landslide location and size using a multidimensional landslide analysis in a digital terrain model*. Berkley(CA): s.n.

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Bundesamt für Umwelt), 2015. *Rutschungen: Faktenblätter Gefahrenprozesse*, s.l.: Schweizerische Eidgenossenschaft.

Figdor, H. et al., 1990. Geodätische und geophysikalische Untersuchungen am NW-Hang des Graukogels bei Badgastein. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, Issue 78 Jahrgang (Heft 2), pp. 59-76.

- Figdor, H., Roch, K.-H. & Scheidegger, A. E., 1990. Geophysikalische und geodätische Untersuchungen an einer Hangrutschung im Flysch. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, Band 4, pp. 212-220.
- Franz, M. et al., 2016. Use of targets to track 3D displacements in highly vegetated areas affected by landslides. *Landslides*.
- Genske, D. D., 2006. *Ingenieurgeologie - Grundlagen und Anwendung*. Bern: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Genske, D. D., 2008. *Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Kapitel 12: Massenbewegungen*. 7. Auflage Hrsg. Berlin: Ernst und Sohn.
- Geologische Bundesanstalt, 2016. *Allgemeine Information zu Massenbewegungen*. Wien: s.n.
- Großmann, W., 1975. *Vermessungskunde II: Winkel- und Streckenmessgeräte, Polygonierung, Triangulation und Trilateration*. 12. Auflage Hrsg. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Großmann, W., 1976. *Vermessungskunde I: Stückvermessung und Nivellieren*. 15. Auflage Hrsg. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Großmann, W., 1979. *Vermessungskunde III: Trigonometrische und barometrische Höhenmessung, Tachymetrie und Ingenieurgeodäsie*. 11. Auflage Hrsg. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Gullà, G. et al., 2016. Geometric and kinematic characterization of landslides affecting urban areas: the Lungro case study (Calabria, Southern Italy). *Landslides*.
- Handwerger, A. L., Roering, J. J., Schmidt, D. A. & Rempel, A. W., 2015. Kinematics of earthflows in the Northern California Coast Ranges using satellite interferometry. *Geomorphology*, Band 246, pp. 321-333.
- Handwerger, A. L., Roering, J. J., Schmidt, D. A. & Rempel, A. W., 2015. Supplementary Material for "Kinematics of Earthflows in the Northern California Coast Ranges using Satellite Interferometry".
- Jaboyedoff, M. et al., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards*, Band 61, pp. 5-28.
- Joyce, K. E. et al., 2014. Mapping and monitoring geological hazards using optical, LIDAR and synthetic aperture RADAR image data. *Nat Hazards*, Band 73, pp. 137-163.
- Kamp, N., 2012. *Using High-Resolution Airborne LiDAR Data for Landslide Mapping in the Eastern Alps*. Graz: Karl-Franzens Universität Graz.
- Karl, F. & Schmidegg, O., 1964. Exkursion I/1: Hohe Tauern, Großvenedigerbereich. *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, Band 57, pp. 11-13.
- Karl, F. & Schmidegg, O., 1979. 151 Krimml. In: G. Bundesanstalt, Hrsg. *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000*. Wien: s.n.

- Kaufmann, V., 2002. Morphometric Documentation and Computer-Based Visualization of Slope Deformation and Slope Creep of the Blaubach Landslide (Salzburg, Austria). *Kartographische Bausteine*, Band 28, pp. 99-107.
- Kaufmann, V., 2008. Zur Kinematik der Massenbewegung im Talschluss des Blaubaches, Gemeinde Krimml. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, Issue Heft 158, pp. 122-129.
- Kaufmann, V., 2012. *Geodätische Wiederholungsmessung 2012 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., 2013. *Geodätische Wiederholungsmessung 2013 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., 2014. *Geodätische Wiederholungsmessung 2014 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., 2015. *Geodätische Wiederholungsmessung 2015 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., 2016. *Geodätische Wiederholungsmessung 2016 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V. & Gramm, G., 2008. *Geodätische Wiederholungsmessung 2008 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V. & Gramm, G., 2009. *Geodätische Wiederholungsmessung 2009 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V. & Gramm, G., 2010. *Geodätische Wiederholungsmessung 2010 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V. & Gramm, G., 2011. *Geodätische Wiederholungsmessung 2011 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., Kienast, G. & Ladstädter, R., 2002. *Geodätische Wiederholungsmessung 2002 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., Kienast, G. & Ladstädter, R., 2003. *Geodätische Wiederholungsmessung 2003 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., Kienast, G. & Ladstädter, R., 2004. *Geodätische Wiederholungsmessung 2004 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.
- Kaufmann, V., Kienast, G., Ladstädter, R. & Fleckl, J., 2005. *Geodätische Wiederholungsmessung 2005 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.

Kaufmann, V. & Ladstädter, R., 2007. *Geodätische Wiederholungsmessung 2007 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.

Kaufmann, V. & Ladstädter, R., 2007. Photogrammetrische und geodätische Dokumentation der Hangrutschung Blaubachgraben (Gemeinde Krimml, Salzburg) für den Zeitraum 1953-2006. *Ingenieurvermessung 07 - Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*, pp. 317-322.

Kaufmann, V., Ladstädter, R. & Kienast, G., 2006. *Geodätische Wiederholungsmessung 2006 am Rutschhang im Blaubachgraben bei Krimml, Salzburg*, Graz: s.n.

Kaufmann, V. & Lieb, G., 2003. Mapping the Kinematics of the Blaubach Landslide (Austria) using Digital Photogrammetry. *Geophysical Research Abstracts*, Issue 5.

Krainer, K., 2013. *Skript und Vorlesungsunterlagen zur Lehrveranstaltung "Regionale Geologie" an der Leopold-Franzens Universität Innsbruck*. Innsbruck(Tirol): Universität Innsbruck.

Land Salzburg, 2016. *SAG/Online*. [Online] Available at: <https://www.salzburg.gv.at/sagisonline/> [Zugriff am 20 09 2016].

Larcher, H., 2009. *Planungshilfen für die Bemessung und Hinweise zur Sanierung von dezentralen Versickerungsanlagen für Niederschlagswässer*. Innsbruck: s.n.

Liew, S. C., 2001. *Principles of Remote Sensing. Online Tutorial*. [Online] Available at: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/rsmain.htm> [Zugriff am 15 Februar 2017].

Lotter, M. & Haberler, A., 2013. *Geogene Naturgefahren - gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen*, Wien: Österreichische Geologische Bundesanstalt.

Marsella, M., D'Aranno, P. J. V. & Corsetti, M., 2015. Terrestrial laser scanning survey in support of unstable slope analysis: the case of Vulcano Island (Italy). *Nat Hazards*, Band 78, pp. 443-459.

Mavrouli, O., Corominas, J. & Jaboyedoff, M., 2015. Size Distribution for Potentially Unstable Rock Masses and In Situ Rock Blocks Using LIDAR-Generated Digital Elevation Models. *Rock Mech Rock Eng*, Band 48, pp. 1589-1604.

Melzer, K.-J., Bergdahl, U. & Fecker, E., 2008. *Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Kapitel: Baugrunduntersuchungen im Feld*. 7. Auflage Hrsg. Berlin: Ernst und Sohn.

Murawski, H. & Meyer, W., 2010. *Geologisches Wörterbuch*. Bonn: Spektrum Akademischer Verlag.

Niederschick, M. A., 2007. *Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen*. Wien: Universität für Bodenkultur Wien.

- Petschko, H., Bell, R. & Galade, T., 2015. Effectiveness of visually analysing LiDAR DTM derivatives for earth and debris slide inventory mapping for statistical susceptibility modeling. *Landslides*.
- Prinz, H. & Strauss, R., 2011. *Ingenieurgeologie*. 5. Auflage Hrsg. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Rabonza, M. L. et al., 2016. Shallow landslide susceptibility mapping using high-resolution topography for areas devastated by super typhoon Haiyan. *Landslides*, Band 13, pp. 201-210.
- Rathofer, M., 2012. *Deformationsmessungen am Rutschhang Blaubachgraben bei Krimml mit dem Laserscanner Riegl LMS-Z620*. Graz: s.n.
- Schneider, U., 1999. *Geotechnische Untersuchungen, satellitengestützte (GPS) Bewegungsanalysen und Standsicherheitsüberlegungen an einem Kriechhang in Ebnet, Vorarlberg*. Karlsruhe: s.n.
- The International Geotechnical Society & Canadian Geotechnical Society, 1993. *UNESCO Working Party for World Landslide Inventory: Multilingual Landslide Glossary*. Richmond(B.C.): BiTech Publishers Ltd..
- Thut, A., 2008. *Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Kapitel 11: Geotechnische Messverfahren..* 7. Auflage Hrsg. Berlin: Ernst und Sohn.
- Tirol Atlas, 2016. *Tirol Atlas*. [Online] Available at: <http://www.tirolatlas.uibk.ac.at> [Zugriff am 24 November 2016].
- Tofani, V., Del Ventisette, C., Moretti, S. & Casagli, N., 2014. Integration of Remote Sensing Techniques for Intensity Zonation within a Landslide Area: A Case Study in the Northern Apennines, Italy. *Remote Sensing*, 23 Jänner, 6(2), pp. 907-924.
- USGS, 2004. *USGS - science for a changing world*. [Online] Available at: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html> [Zugriff am 15 März 2016].
- von Wolffersdorff, P. A. & Schweiger, H. F., 2008. Numerische Verfahren in der Geotechnik. In: K. J. Witt, Hrsg. *Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen*. 7. Auflage Hrsg. Weimar: Ernst & Sohn.
- Wang, G. et al., 2013. Delineating and defining the boundaries of an active landslide in the rainforest of Puerto Rico using a combination of airborne and terrestrial LIDAR data. *Landslides*, Band 10, pp. 503-513.
- Zangerl, C. et al., 2008. Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo.Alp*, Band 4, pp. 1-51.
- Zhong, C. et al., 2012. Comprehensive Study of Landslides through the Integration of Multi Remote Sensing Techniques: Framework and Latest Advances. *Journal of Earth Sciences*, April, 23(2), pp. 243-252.

Zobl, F., 2001. *Abschätzung der Hangstabilitätsverhältnisse im Bereich der Krimmler Ache/Blaubach auf Basis einer geologisch-geomorphologischen Detailkartierung und GIS-Analyse*. Graz: s.n.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Elemente einer Massenbewegung; (entnommen aus THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETY & CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY (1993)	14
Abbildung 2: Ausdehnung einer Massenbewegung (entnommen aus THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETY & CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY, 1993)	14
Abbildung 3: Die Abbildung beschreibt die verschiedenen Bewegungsmechanismen bei Rutschungen. Entnommen aus ZANGERL ET AL. (2008).	16
Abbildung 4: Schema einer Kippbewegung - bedingt durch eine Rotation (aus ZANGERL ET AL., 2008)	18
Abbildung 5: Stürzen wird durch eine Teilbewegung im freien Fall charakterisiert (aus ZANGERL ET AL., 2008)	18
Abbildung 6: Beispiel von idealviskosem Fließverhalten (ZANGERL ET AL., 2008).....	19
Abbildung 7 und 8: Fließverhalten im Fest und Lockergestein aus ZANGERL et al. (2008)	19
Abbildung 9: Modell nach BAUM et al. (1998) zur oben genannten Formel (1).....	23
Abbildung 10: Erläuterung des Modells nach CARTER & BENTLEY (1985).....	29
Abbildung 11: Die Abbildung zeigt die Genauigkeit bei der Tiefeneinschätzung bzw. Gleitflächenorientierung einer Massenbewegung durch das Modell von Carter & Bentley. Die durchgezogene Linie ist als tatsächliche Gleitfläche anzusehen, während die unterbrochene Linie den konstruierten Rutschhorizont wiedergibt. (entnommen aus CARTER & BENTLEY, 1985).	30
Abbildung 12: Prinzip der terrestrischen Laserscanvermessung im Gelände. (Jaboyedoff, et al., 2012)	36
Abbildung 13: Funktionsprinzip von Synthetic Aperture Radar Systemen in stark vereinfachter Form entnommen nach LIEW (2001)	38
Abbildung 14: Photogrammetrische Erkundung eines Aufschlusses in Niederwölz aus dem Jahr 2015. Foto: privat	40
Abbildung 15: Durchführung einer RTK-GPS Vermessung im Gelände in Krimml, Salzburg. Foto: Kaufmann	43
Abbildung 16: Bohrrapparat zum Abteufen von Kernbohrungen im Zuge eines Tunnelprojekts an der Grenze von Wien und Niederösterreich. Foto: privat	45
Abbildung 17: Abteufen einer Kernbohrung von einem Ponton in der Donau bei Linz. Um einen Kernverlust zu vermeiden, musste hier das Material in einem Liner erbohrt werden. (Foto: Ziviltechnik Geologie Mag. Oliver Montag).....	45

Abbildung 18: Abteufen einer Rammsondierung im Zuge einer geologischen Baugrunderkundung. Foto: Ziviltechnik Geologie Mag. Oliver Montag).....	47
Abbildung 19: Kern der oberen 3 Meter unterhalb der Geländeoberkante aus einer Rammkernsondierung im Zuge einer Baugrunderkundung in der Linzer Hafestraße. (Foto: Ziviltechnik Geologie Mag. Oliver Montag)	48
Abbildung 20: Baggerstich während einer Baugrunderkundung in Steinbach an der Steyr, Oberösterreich. Gut erkennbar sind die einzelnen Schichten (braun-grau) unterhalb des Mutterbodens sowie der anstehende Flysch als Festgestein (grau). Foto: ZT Weichselbaumer	50
Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Zonenplan der Wildbach- und Lawinenverbauung im Raum Krimml (Salzburg) im Maßstab 1:50.000. (Quelle: SAGIS)	55
Abbildung 22: Installation eines Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radars (GBInSAR) zur Beobachtung einer Massenbewegung in den Apenninen (Italien). Diese Vorrichtung kann ebenso als protektive Maßnahme dienen und bei einer Grenzwertüberschreitung als Zivilschutzmedium verwendet werden. (Quelle: TOFANI ET AL. (2014); www.mdpi.com)	56
Abbildung 23: Bereich eines Drainagesystems im Blaubachgraben in Krimml (Salzburg) zur langfristigen Hangstabilisierung. Foto: privat.....	58
Abbildung 24: Installierung einer Ankerwand zum Schutz von Infrastruktur. Foto: PORR AG (www.porr.at)	60
Abbildung 25: Rutschkörper im Blaubachgraben vom Ortszentrum von Krimml aus gesehen. Foto: privat	61
Abbildung 26: Ausschnitt aus der Österreichischen Karte 1:50.000 und dem Raum Krimml mit dem rot umrandeten Projektgebiet im Blaubachgraben. (SAGIS, 2016; Druckmaßstab 1:20.000).....	63
Abbildung 27: Klimadiagramm von der Wetterstation Krimml entnommen aus TIROL ATLAS (2016)	64
Abbildung 28: Geologische Übersichtskarte des Tauernfensters mit den wichtigsten Deckensystemen. Im roten Kreis ist das Untersuchungsgebiet situiert. (entnommen aus KRÄINER, 2013).....	66
Abbildung 29: Geologische Übersichtskarte vom Ortsgebiet der Gem. Krimml sowie der Hangbewegung im Bereich Schönmoos-Hochalm. Entnommen aus der ÖK Geologischen Karte, Mappenblatt Krimml (M 1:50.000) (Karl & Schmidegg, 1979)	68
Abbildung 30: Schummerung bzw. Geländemodell im Maßstab 1:20.000 vom Projektgebiet Schönmoos-Hochalm (Blaubachgraben). Entnommen aus SAGIS (2016).....	69

Abbildung 31: Orthofoto aus dem Jahr 2015 zeigt die Baumaßnahmen im Bereich Schönmoos-Hochalm. (SAGIS, 2016; Druckmaßstab 1:5.000)	73
Abbildung 32: Blick vom Gegenhang auf den Übergang von der Erosionsmulde in den oberen Almbereich und der Breitscharte. Foto: privat.....	75
Abbildung 33: Mehrere Meter mächtige Abrisskante im Bereich der Breitscharten Massenbewegung. Gut erkennbar ist hier die völlig heterogene Krönung des Materials, welche von Ton bis Blöcken reicht. (Zahlstab entspricht 1 m). Foto: privat.....	76
Abbildung 34: Oberhalb der Hauptabrisszone bilden sich am Bergkamm bereits neue Nackentäler samt Dehnungsrissen sowie Vernässungszonen aus (Blick nach Süden). Foto: privat.....	77
Abbildung 35: Quellaustritt mit leicht rinnender Schüttung (< 0,5 l/s) sowie vereinzelt okkerfarbenen Mineralausfällungen. Foto: privat	78
Abbildung 36: Typischer Vegetationsbereich unterhalb der Schmalscharte mit vereinzelt stark gekrümmten Nadelbäumen. Foto: privat.....	79
Abbildung 37: Starke erosive Tätigkeit prägt die Morphologie im unterhalb der großen Abbruchkante im Blaubachgraben. Foto: Kaufmann	80
Abbildung 38: Blick empor auf die große Abbruchkante der Erosionsmulde.	81
Abbildung 39: Stark heterogene Material- sowie Korngrößenzusammensetzung prägt den Ablagerungsraum der Blaubachgrabenrutschung.....	82
Abbildung 40: Bachlauf im südlichen Bereich der Erosionsmulde mit Blick auf die Geschiebesperre der Wildbach- und Lawinenverbauung.	83
Abbildung 41: Historisches Orthofoto mit Flugdatum vom 5. August 1953 (entnommen aus SAGIS, 20.12.2016).	85
Abbildung 42: Aktuellstes öffentlich zugängliches Orthofoto vom Blaubachgraben aus dem Jahr 2015 (entnommen aus SAGIS, 20.12.2016)	86
Abbildung 43: Durchschnittliche jährliche Bewegungsraten im Blaubachgraben im Zeitraum von 1991-1999, ermittelt durch Photogrammetrie (KAUFMANN, 2002)	87
Abbildung 44: Foto mit meinen beiden Betreuern Prof. Qian Liu (links) und Prof. Viktor Kaufmann (rechts) während der Kartierungs- und Messarbeiten im Blaubachgraben Ende September 2016. Foto: Kaufmann	95
Abbildung 45: Digitales Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 0,5 m erstellt mit <i>Surfer11</i> . Eingefärbt sind hier die einzelnen Profilsuren, die Messpunkte von Prof. Kaufmann, GPS Punkte aus der Geländekartierung sowie die Abrisskanten von deutlich erkennbaren Rutschungen.....	100
Abbildung 46: Unbearbeitete Spuren der geologischen Profilschnitte in unterschiedlichem Maßstab, erstellt mit dem Programm <i>Surfer11</i>	102

- Abbildung 47: Ausschnitt aus der Hangneigungskarte, welche mit Surfer11 erstellt wurde. Die Intervalle sind in diesem Ausschnitt mit 5 Grad Neigungsunterschied versehen, wurden aber im Analyseverfahren auf 1 Grad Unterschied herabgesetzt. Die Farbe Grün spiegelt hier die flachen Bereiche wieder (0 bis 15°), während die gelb- bis orangefarbenen Bereiche bereits Neigungen von 15 bis 45° entsprechen. 103
- Abbildung 48: Konstruktion mittels *AutoCAD Civil 3D 2015* der oberflächlichen Rutschflächen innerhalb der Punktgruppe 5 nach der Methode von CARTER & BENTLEY (1985). 111
- Abbildung 49: Konstruktion mittels *AutoCAD Civil 3D 2015* der oberflächlichen Rutschflächen innerhalb der Punktgruppe 6 nach der Methode von CARTER & BENTLEY (1985). 111
- Abbildung 50: Translationsrisse deuten auf neue Ausbildungen von Rotationsgleitflächen hin. Die Abbildung wurde nahe der Abbruchkante in die Erosionsmulde aufgenommen, ähnliche Szenarien wurden öfter im Alm- und Wiesenbereich angetroffen. Foto: privat 115

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Rutschungsbezeichnung bezugnehmend auf die Tiefe der Gleitfläche (NIEDERSCHICK, 2007).....	22
Tabelle 2: Tabellarische Auflistung der Werte für die Konstanten der Inversionsmethode.....	26
Tabelle 3: Jährliche gemittelte Horizontalverschiebung vom Zeitraum von 2001 bis 2008	88
Tabelle 4: Jährliche gemittelte Horizontalverschiebung vom Zeitraum von 2008 bis 2016	88
Tabelle 5: Beschreibung und Lage der einzelnen Punktgruppen mit den zugehörigen Messpunkten.....	88
Tabelle 6: Angenommene Werte für die Konstanten in der oben genannten Gleichung.	104
Tabelle 7: Änderung der Gleitflächentiefe bei veränderter Dichte.....	105
Tabelle 8: Auswirkung einer Veränderten Hangneigung auf die Tiefe der Gleitfläche	106
Tabelle 9: Einfluss der oberflächlichen Geschwindigkeit der Messpunkte auf die Tiefe der Gleitfläche	107
Tabelle 10: Gemittelte Tiefen der Gleitflächen unterhalb der einzelnen Punktgruppen.	108
Tabelle 11: Ergebnisse der Gleitflächenkonstruktion nach CARTER & BENTLEY (1985)	109

ANHANGVERZEICHNIS

Fotodokumentation	Anhang 01
Tiefenberechnungen nach HANDWERGER et al. (2015)	Anhang 02
Gleitflächenkonstruktion nach CARTER & BENTLEY (1985)	Anhang 03

ANHANG 01

ANHANG 01

Fotodokumentation

Geländebegehung

Blaubachgraben – Gemeinde Krimml

28.-30. September 2016

Überblick



Abbildung 1: Blick vom Ortszentrum von Krimml nach Westen auf das Rutschgebiet.



Abbildung 2: Unterteilung des Rutschgebiets in eine obere Zone (Alm- und Wiesenbereich) sowie in einen unteren Bereich (Akkumulationszone).

Oberer Bereich (Alm- und Wiesenbereich)



Abbildung 3: Blick vom Gegenhang auf den Übergang des Alm- und Wiesenbereichs in die Akkumulationszone.



Abbildung 4: Die Abrisskanten im Alm- und Wiesenbereich können mehrere Meter Mächtigkeit erreichen.



Abbildung 5: Die Materialzusammensetzung umfasst lithologisch hauptsächlich Graphitphyllit; das Korngrößenspektrum reicht von Schluff bis Kies, vereinzelt können auch Steine auftreten.



Abbildung 6: Typisches Handstück eines silbrig-grauen, feingeschiefernten Graphitphyllits.



Abbildung 7: In den Abrissbereichen sind neben Graphitphylliten auch Gneise aufgeschlossen, welche eine gröbere Korngröße aufweisen.



Abbildung 8: Nördliche Begrenzung der Massenbewegung mit bis zu 2m mächtigen Abrissen ohne Grundwasseraustritt.



Abbildung 9: Blick vom Anstieg zur Breitscharte auf den obersten Bereich der Massenbewegung.

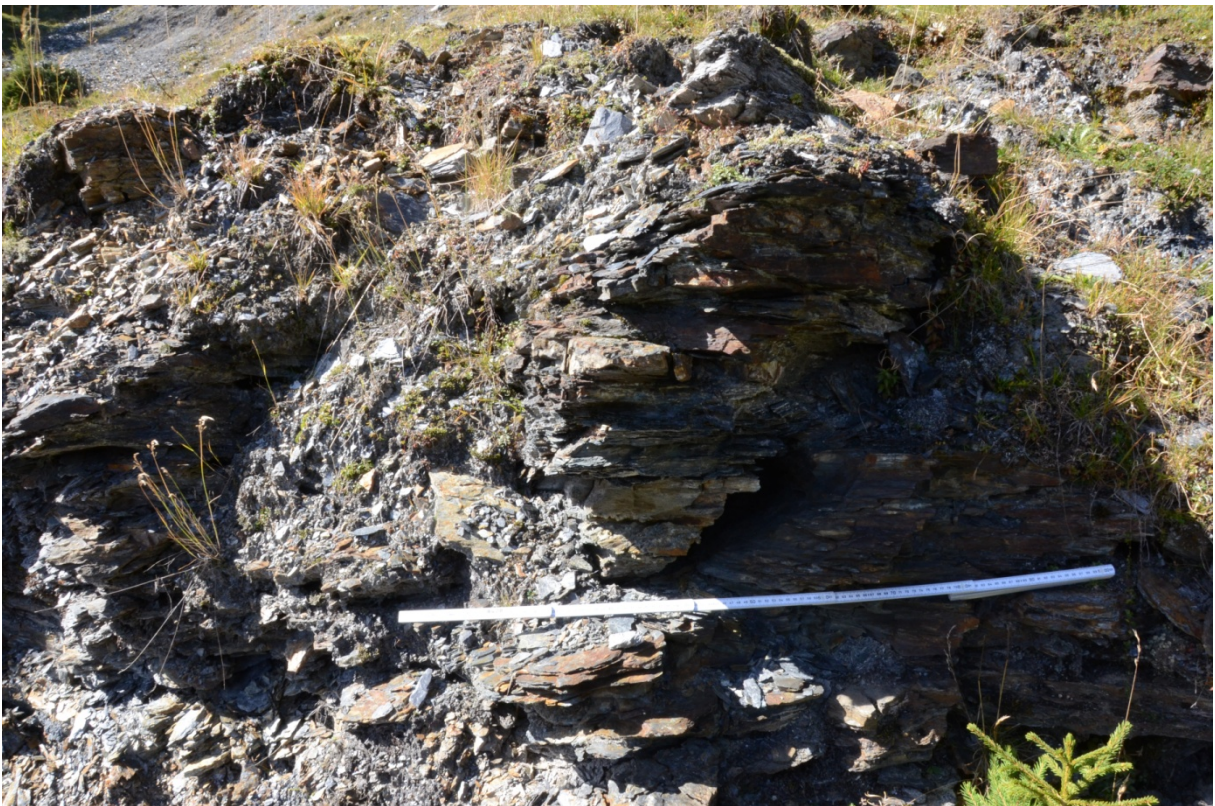


Abbildung 10: Übergang von Graphitphyllit zum hangenden Gneiskörper mit deutlich mächtigerer Schieferung und höherer Verwitterungsbeständigkeit.



Abbildung 11: Am Anstieg zum Kammereich finden sich immer wieder lokale Rutschkörper vor.



Abbildung 12: Grundwasseraustritt im Abrissbereich oberhalb der Schönmoos-Alm.



Abbildung 13: Quellaustritt bräunlich-okkerfarbener Mineralausfällung.



Abbildung 14: Im oberen Bereich ist die Baumgrenze sowie die unruhige Morphologie besonders deutlich erkennbar.



Abbildung 15: Gekrümmte Bäume und lokale Rutschungen sind deutliche Zeichen für größere Massenbewegungen.



Abbildung 16: Die Bäume im oberen Bereich weisen eine deutliche Krümmung auf.



Abbildung 17: Blick über den Alm- und Wiesenbereich mit kleineren Subbrutungen.



Abbildung 18: Loses Blockwerk im Mittelbereich um Vermessungspunkt 31.



Abbildung 19: Schuttfächer im steilen Gelände deuten zudem auf Steinschlagaktivität hin.



Abbildung 20: Stark verwitterter, teilweise bröseliger Graphitphyllit.



Abbildung 21: Viele kleinere Abrisskanten können im Kammereich festgestellt werden. Dabei ist vor allem die Durchgängigkeit über die gesamte Hangbreite zu erwähnen.



Abbildung 22: Subrutschungen im steilen Gelände. Im oberen Bildbereich sind vertikal stehende Felswände zu sehen.



Abbildung 23: Frische Zugklüfte bzw. Dehnungsrisse im weichen Grasbereich als Indiz für eine aktive Bewegung im Untergrund. Die Öffnungsweiten erreichen dabei Ausdehnungen bis mehrere Dezimeter.



Abbildung 24: Entlang des Wanderwegs am Kamm können die Hauptabrissbereiche des Rutschkörpers erahnt werden.



Abbildung 25: Blick über den Kammbereich über die Rutschung ins Tal nach Krimml.



Abbildung 26: Auch am Kamm selbst bilden bereits Nackentälchen und starke Vernässungszonen aus.



Abbildung 27: Die flache Morphologie mit starke Vernässung und veränderte Vegetation markiert den Talübergang zum Stausee Durlassboden.

Unterer Bereich (Wald- und Akkumulationsbereich)



Abbildung 28: Blick in den stark erodierten Bereich unterhalb des Schönmoos-Hochalm.



Abbildung 29: Nahe der Schönmoos-Hochalm wird die Mächtigkeit der Akkumulationszone deutlich.



Abbildung 30: Oberflächenwässer wie hier auf der rechten Seite führen zu starkem talwärts gerichteten Materialtransport.



Abbildung 31: Immer wieder kommt es durch die erosive Tätigkeit der GERinne zu lokalen Nachbrüchen im Akkumulationsbereich.



Abbildung 32: Eine geologische Störung durchzieht die Erosionsmulde nahe der Schönmoos-Hochalm.



Abbildung 33: Locker gelagerte Graphitphyllite sind der lithologische Hauptanteil des Ablagerungsmaterials im Blaubachgraben. Die vertikale Mächtigkeit vom Standpunkt zur Abrisskante beträgt rund 40m.



Abbildung 34: Unterhalb der Schönmoos-Hochalm wurden Drainage-Vorrichtungen errichtet um das Oberflächenwasser gezielt abzuleiten und die Hangbewegungen zu entschärfen.



Abbildung 35: Im Mittelbereich des Grabens ist die Material- sowie Korngrößenzusammensetzung stark heterogen.



Abbildung 36: Die Grenze zwischen geschiebelieferndem zum Ablagerungsbereich kann unmittelbar unterhalb des großen Nadelbaums in der Bildmitte gezogen werden.



Abbildung 37: Blick in Richtung Geschiebesperre der WLIV.



Abbildung 38: Blick in einen Gerinnegraben. Auffallend ist die geringe Vegetation in diesem Bereich, was auf eine hohe Aktivität hindeutet.



Abbildung 39: Nachbrechen sowie Steinschlag im übersteilten Bereich des Ablagerungsraumes.



Abbildung 40: Im Ablagerungsbereich finden sich auch mehrere Meter mächtige Blöcke wider.



Abbildung 41: Starke Korngrößenvariabilität im Ablagerungsraum.

ANHANG 02

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
1	2001	0.049	3	2000	7.5	26.42
1	2002	0.041	3	2000	7.5	25.27
1	2003	0.069	3	2000	7.5	28.78
1	2004	0.043	3	2000	7.5	25.57
1	2005	0.050	3	2000	7.5	26.55
1	2006	0.048	3	2000	7.5	26.28
1	2007	0.032	3	2000	7.5	23.75
1	2008	0.050	3	2000	7.5	26.55
1	2009	0.060	3	2000	7.5	27.79
1	2010	0.046	3	2000	7.5	26.00
1	2011	0.048	3	2000	7.5	26.28
1	2012	0.107	3	2000	7.5	32.11
1	2013	0.070	3	2000	7.5	28.88
1	2014	0.118	3	2000	7.5	32.91
1	2015	0.068	3	2000	7.5	28.67
1	2016	0.045	3	2000	7.5	25.86
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
2	2001	0.228	3	2000	22.5	17.32
2	2002	0.529	3	2000	22.5	21.37
2	2003	0.149	3	2000	22.5	15.57
2	2004	0.427	3	2000	22.5	20.26
2	2005	0.477	3	2000	22.5	20.83
2	2006	0.755	3	2000	22.5	23.36
2	2007	0.368	3	2000	22.5	19.52
2	2008	1.420	3	2000	22.5	27.36
2	2009	1.734	3	2000	22.5	28.76
2	2010	0.633	3	2000	22.5	22.35
2	2011	0.239	3	2000	22.5	17.52
2	2012	1.587	3	2000	22.5	28.13
2	2013	1.791	3	2000	22.5	28.99
2	2014	1.112	3	2000	22.5	25.73
2	2015	0.629	3	2000	22.5	22.32
2	2016	0.835	3	2000	22.5	23.95

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
5	2001	0.082	3	2000	7.5	30.05
5	2002	0.067	3	2000	7.5	28.57
5	2003	0.062	3	2000	7.5	28.02
5	2004	0.065	3	2000	7.5	28.35
5	2005	0.059	3	2000	7.5	27.67
5	2006	0.062	3	2000	7.5	28.02
5	2007	0.031	3	2000	7.5	23.56
5	2008	0.071	3	2000	7.5	28.98
5	2009	0.052	3	2000	7.5	26.81
5	2010	0.055	3	2000	7.5	27.19
5	2011	0.056	3	2000	7.5	27.31
5	2012	0.046	3	2000	7.5	26.00
5	2013	0.115	3	2000	7.5	32.70
5	2014	0.069	3	2000	7.5	28.78
5	2015	0.067	3	2000	7.5	28.57
5	2016	0.052	3	2000	7.5	26.81
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
13	2001	0.507	3	2000	22.5	21.15
13	2002	0.524	3	2000	22.5	21.32
13	2003	0.406	3	2000	22.5	20.00
13	2004	0.760	3	2000	22.5	23.40
13	2005	0.530	3	2000	22.5	21.38
13	2006	0.952	3	2000	22.5	24.75
13	2007	0.252	3	2000	22.5	17.76
13	2008	1.217	3	2000	22.5	26.32
13	2009	1.166	3	2000	22.5	26.04
13	2010	0.416	3	2000	22.5	20.13
13	2011	0.348	3	2000	22.5	19.25
13	2012	1.187	3	2000	22.5	26.16
13	2013	0.845	3	2000	22.5	24.03
13	2014	0.501	3	2000	22.5	21.08
13	2015	0.255	3	2000	22.5	17.81
13	2016	0.617	3	2000	22.5	22.21

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
14	2001	0.527	3	2000	22.5	21.35
14	2002	0.554	3	2000	22.5	21.62
14	2003	0.411	3	2000	22.5	20.06
14	2004	0.804	3	2000	22.5	23.73
14	2005	0.548	3	2000	22.5	21.56
14	2006	0.972	3	2000	22.5	24.88
14	2007	0.268	3	2000	22.5	18.03
14	2008	1.243	3	2000	22.5	26.46
14	2009	1.156	3	2000	22.5	25.98
14	2010	0.429	3	2000	22.5	20.28
14	2011	0.328	3	2000	22.5	18.96
14	2012	1.196	3	2000	22.5	26.21
14	2013	0.878	3	2000	22.5	24.26
14	2014	0.442	3	2000	22.5	20.43
14	2015	0.270	3	2000	22.5	18.06
14	2016	0.619	3	2000	22.5	22.23
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
15	2001	0.401	3	2000	22.5	19.94
15	2002	0.496	3	2000	22.5	21.03
15	2003	0.365	3	2000	22.5	19.48
15	2004	0.711	3	2000	22.5	23.01
15	2005	0.503	3	2000	22.5	21.10
15	2006	0.871	3	2000	22.5	24.21
15	2007	0.244	3	2000	22.5	17.61
15	2008	1.168	3	2000	22.5	26.05
15	2009	1.034	3	2000	22.5	25.27
15	2010	0.372	3	2000	22.5	19.57
15	2011	0.263	3	2000	22.5	17.95
15	2012	1.087	3	2000	22.5	25.59
15	2013	0.861	3	2000	22.5	24.14
15	2014	0.364	3	2000	22.5	19.46
15	2015	0.230	3	2000	22.5	17.35
15	2016	0.550	3	2000	22.5	21.58

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
16	2001	0.263	3	2000	22.5	17.95
16	2002	0.424	3	2000	22.5	20.22
16	2003	0.228	3	2000	22.5	17.32
16	2004	0.553	3	2000	22.5	21.61
16	2005	0.377	3	2000	22.5	19.64
16	2006	0.623	3	2000	22.5	22.26
16	2007	0.166	3	2000	22.5	16.00
16	2008	1.276	3	2000	22.5	26.63
16	2009	0.797	3	2000	22.5	23.68
16	2010	0.247	3	2000	22.5	17.67
16	2011	0.128	3	2000	22.5	14.99
16	2012	1.624	3	2000	22.5	28.29
16	2013	1.015	3	2000	22.5	25.15
16	2014	0.285	3	2000	22.5	18.31
16	2015	0.178	3	2000	22.5	16.28
16	2016	0.487	3	2000	22.5	20.93

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
17	2001	0.865	3	2000	22.5	24.17
17	2002	0.370	3	2000	22.5	19.54
17	2003	0.143	3	2000	22.5	15.41
17	2004	0.456	3	2000	22.5	20.59
17	2005	0.291	3	2000	22.5	18.41
17	2006	0.463	3	2000	22.5	20.67
17	2007	0.141	3	2000	22.5	15.36
17	2008	1.243	3	2000	22.5	26.46
17	2009	0.687	3	2000	22.5	22.81
17	2010	0.175	3	2000	22.5	16.21
17	2011	0.064	3	2000	22.5	12.60
17	2012	1.539	3	2000	22.5	27.91
17	2013	0.916	3	2000	22.5	24.52
17	2014	0.204	3	2000	22.5	16.84
17	2015	0.165	3	2000	22.5	15.97
17	2016	0.437	3	2000	22.5	20.37

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
18	2001	0.140	3	2000	22.5	15.33
18	2002	0.327	3	2000	22.5	18.95
18	2003	0.110	3	2000	22.5	14.43
18	2004	0.368	3	2000	22.5	19.52
18	2005	0.221	3	2000	22.5	17.18
18	2006	0.394	3	2000	22.5	19.85
18	2007	0.101	3	2000	22.5	14.13
18	2008	1.078	3	2000	22.5	25.53
18	2009	0.571	3	2000	22.5	21.78
18	2010	0.142	3	2000	22.5	15.38
18	2011	0.041	3	2000	22.5	11.28
18	2012	1.332	3	2000	22.5	26.92
18	2013	0.793	3	2000	22.5	23.65
18	2014	0.155	3	2000	22.5	15.72
18	2015	0.140	3	2000	22.5	15.33
18	2016	0.376	3	2000	22.5	19.62
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
19	2001	0.118	3	2000	32.5	11.39
19	2002	0.261	3	2000	32.5	13.89
19	2003	0.076	3	2000	32.5	10.20
19	2004	0.270	3	2000	32.5	14.00
19	2005	0.153	3	2000	32.5	12.15
19	2006	0.302	3	2000	32.5	14.40
19	2007	0.075	3	2000	32.5	10.17
19	2008	0.897	3	2000	32.5	18.91
19	2009	0.424	3	2000	32.5	15.68
19	2010	0.095	3	2000	32.5	10.79
19	2011	0.016	3	2000	32.5	6.91
19	2012	1.095	3	2000	32.5	19.87
19	2013	0.549	3	2000	32.5	16.72
19	2014	0.156	3	2000	32.5	12.21
19	2015	0.106	3	2000	32.5	11.09
19	2016	0.289	3	2000	32.5	14.25

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
20	2001	0.053	3	2000	22.5	12.02
20	2002	0.220	3	2000	22.5	17.16
20	2003	0.056	3	2000	22.5	12.19
20	2004	0.218	3	2000	22.5	17.12
20	2005	0.127	3	2000	22.5	14.96
20	2006	0.250	3	2000	22.5	17.72
20	2007	0.062	3	2000	22.5	12.50
20	2008	0.800	3	2000	22.5	23.70
20	2009	0.367	3	2000	22.5	19.50
20	2010	0.072	3	2000	22.5	12.98
20	2011	0.009	3	2000	22.5	7.72
20	2012	0.975	3	2000	22.5	24.90
20	2013	0.545	3	2000	22.5	21.53
20	2014	0.109	3	2000	22.5	14.40
20	2015	0.122	3	2000	22.5	14.81
20	2016	0.261	3	2000	22.5	17.91

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
21	2001	0.038	3	2000	22.5	11.06
21	2002	0.237	3	2000	22.5	17.48
21	2003	0.063	3	2000	22.5	12.55
21	2004	0.239	3	2000	22.5	17.52
21	2005	0.132	3	2000	22.5	15.10
21	2006	0.266	3	2000	22.5	18.00
21	2007	0.073	3	2000	22.5	13.03
21	2008	0.888	3	2000	22.5	24.33
21	2009	0.343	3	2000	22.5	19.18
21	2010	0.080	3	2000	22.5	13.33
21	2011	0.012	3	2000	22.5	8.29
21	2012	1.006	3	2000	22.5	25.10
21	2013	0.531	3	2000	22.5	21.39
21	2014	0.192	3	2000	22.5	16.59
21	2015	0.126	3	2000	22.5	14.93
21	2016	0.270	3	2000	22.5	18.06

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
23	2001	0.242	3	2000	22.5	17.58
23	2002	0.388	3	2000	22.5	19.78
23	2003	0.109	3	2000	22.5	14.40
23	2004	0.362	3	2000	22.5	19.44
23	2005	0.355	3	2000	22.5	19.34
23	2006	0.706	3	2000	22.5	22.97
23	2007	0.310	3	2000	22.5	18.70
23	2008	1.507	3	2000	22.5	27.77
23	2009	1.739	3	2000	22.5	28.78
23	2010	0.531	3	2000	22.5	21.39
23	2011	0.237	3	2000	22.5	17.48
23	2012	1.696	3	2000	22.5	28.60
23	2013	1.869	3	2000	22.5	29.30
23	2014	0.959	3	2000	22.5	24.80
23	2015	0.667	3	2000	22.5	22.65
23	2016	0.657	3	2000	22.5	22.56

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
24	2001	0.159	3	2000	17.5	18.96
24	2002	0.293	3	2000	17.5	22.09
24	2003	0.067	3	2000	17.5	15.28
24	2004	0.212	3	2000	17.5	20.37
24	2005	0.275	3	2000	17.5	21.74
24	2006	0.537	3	2000	17.5	25.70
24	2007	0.246	3	2000	17.5	21.15
24	2008	1.111	3	2000	17.5	30.83
24	2009	0.648	3	2000	17.5	26.94
24	2010	0.075	3	2000	17.5	15.71
24	2011	0.036	3	2000	17.5	13.08
24	2012	0.438	3	2000	17.5	24.43
24	2013	0.308	3	2000	17.5	22.37
24	2014	0.031	3	2000	17.5	12.60
24	2015	0.068	3	2000	17.5	15.33
24	2016	0.282	3	2000	17.5	21.88

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
25	2001	0.115	3	2000	17.5	17.49
25	2002	0.279	3	2000	17.5	21.82
25	2003	0.056	3	2000	17.5	14.61
25	2004	0.202	3	2000	17.5	20.13
25	2005	0.250	3	2000	17.5	21.23
25	2006	0.500	3	2000	17.5	25.25
25	2007	0.222	3	2000	17.5	20.61
25	2008	0.973	3	2000	17.5	29.82
25	2009	0.558	3	2000	17.5	25.95
25	2010	0.069	3	2000	17.5	15.39
25	2011	0.019	3	2000	17.5	11.15
25	2012	0.405	3	2000	17.5	23.95
25	2013	0.214	3	2000	17.5	20.42
25	2014	0.069	3	2000	17.5	15.39
25	2015	0.039	3	2000	17.5	13.34
25	2016	0.246	3	2000	17.5	21.15

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
26	2001	0.292	3	2000	7.5	41.27
26	2002	0.066	3	2000	7.5	28.46
26	2003	0.025	3	2000	7.5	22.33
26	2004	0.036	3	2000	7.5	24.46
26	2005	0.033	3	2000	7.5	23.93
26	2006	0.042	3	2000	7.5	25.42
26	2007	0.031	3	2000	7.5	23.56
26	2008	0.076	3	2000	7.5	29.48
26	2009	0.046	3	2000	7.5	26.00
26	2010	0.029	3	2000	7.5	23.17
26	2011	0.031	3	2000	7.5	23.56
26	2012	0.044	3	2000	7.5	25.72
26	2013	0.093	3	2000	7.5	31.01
26	2014	0.102	3	2000	7.5	31.73
26	2015	0.029	3	2000	7.5	23.17
26	2016	0.039	3	2000	7.5	24.95

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
27	2001	0.334	3	2000	12.5	29.21
27	2002	0.089	3	2000	12.5	20.99
27	2003	0.047	3	2000	12.5	17.89
27	2004	0.051	3	2000	12.5	18.26
27	2005	0.105	3	2000	12.5	21.87
27	2006	0.079	3	2000	12.5	20.37
27	2007	0.047	3	2000	12.5	17.89
27	2008	0.161	3	2000	12.5	24.34
27	2009	0.090	3	2000	12.5	21.05
27	2010	0.055	3	2000	12.5	18.61
27	2011	0.049	3	2000	12.5	18.08
27	2012	0.083	3	2000	12.5	20.62
27	2013	0.114	3	2000	12.5	22.33
27	2014	0.136	3	2000	12.5	23.33
27	2015	0.051	3	2000	12.5	18.26
27	2016	0.064	3	2000	12.5	19.33

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
28	2001	0.286	3	2000	32.5	14.21
28	2002	0.103	3	2000	32.5	11.01
28	2003	0.031	3	2000	32.5	8.15
28	2004	0.063	3	2000	32.5	9.73
28	2005	0.076	3	2000	32.5	10.20
28	2006	0.088	3	2000	32.5	10.58
28	2007	0.047	3	2000	32.5	9.05
28	2008	0.192	3	2000	32.5	12.86
28	2009	0.091	3	2000	32.5	10.67
28	2010	0.052	3	2000	32.5	9.28
28	2011	0.048	3	2000	32.5	9.09
28	2012	0.139	3	2000	32.5	11.86
28	2013	0.131	3	2000	32.5	11.69
28	2014	0.064	3	2000	32.5	9.77
28	2015	0.057	3	2000	32.5	9.49
28	2016	0.068	3	2000	32.5	9.92

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
30	2001	0.240	3	2000	22.5	17.54
30	2002	0.105	3	2000	22.5	14.26
30	2003	0.068	3	2000	22.5	12.80
30	2004	0.080	3	2000	22.5	13.33
30	2005	0.097	3	2000	22.5	13.99
30	2006	0.111	3	2000	22.5	14.46
30	2007	0.053	3	2000	22.5	12.02
30	2008	0.225	3	2000	22.5	17.26
30	2009	0.116	3	2000	22.5	14.62
30	2010	0.063	3	2000	22.5	12.55
30	2011	0.063	3	2000	22.5	12.55
30	2012	0.155	3	2000	22.5	15.72
30	2013	0.110	3	2000	22.5	14.43
30	2014	0.122	3	2000	22.5	14.81
30	2015	0.049	3	2000	22.5	11.79
30	2016	0.089	3	2000	22.5	13.69

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
31	2001	0.222	3	2000	17.5	20.61
31	2002	0.345	3	2000	17.5	23.01
31	2003	0.078	3	2000	17.5	15.87
31	2004	0.240	3	2000	17.5	21.02
31	2005	0.327	3	2000	17.5	22.71
31	2006	0.573	3	2000	17.5	26.12
31	2007	0.281	3	2000	17.5	21.86
31	2008	1.198	3	2000	17.5	31.41
31	2009	0.627	3	2000	17.5	26.72
31	2010	0.087	3	2000	17.5	16.31
31	2011	0.039	3	2000	17.5	13.34
31	2012	0.470	3	2000	17.5	24.86
31	2013	0.292	3	2000	17.5	22.07
31	2014	0.071	3	2000	17.5	15.50
31	2015	0.055	3	2000	17.5	14.54
31	2016	0.284	3	2000	17.5	21.92

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
32	2001	0.313	3	2000	22.5	18.74
32	2002	0.443	3	2000	22.5	20.44
32	2003	0.124	3	2000	22.5	14.87
32	2004	0.332	3	2000	22.5	19.02
32	2005	0.395	3	2000	22.5	19.87
32	2006	0.799	3	2000	22.5	23.69
32	2007	0.366	3	2000	22.5	19.49
32	2008	1.677	3	2000	22.5	28.52
32	2009	1.669	3	2000	22.5	28.48
32	2010	0.607	3	2000	22.5	22.12
32	2011	0.268	3	2000	22.5	18.03
32	2012	2.205	3	2000	22.5	30.54
32	2013	2.818	3	2000	22.5	32.47
32	2014	1.579	3	2000	22.5	28.09
32	2015	1.015	3	2000	22.5	25.15
32	2016	0.858	3	2000	22.5	24.12

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
33	2001	0.160	3	2000	17.5	18.99
33	2002	0.338	3	2000	17.5	22.89
33	2003	0.093	3	2000	17.5	16.58
33	2004	0.265	3	2000	17.5	21.54
33	2005	0.318	3	2000	17.5	22.55
33	2006	0.630	3	2000	17.5	26.75
33	2007	0.299	3	2000	17.5	22.20
33	2008	1.373	3	2000	17.5	32.50
33	2009	1.134	3	2000	17.5	30.98
33	2010	0.387	3	2000	17.5	23.68
33	2011	0.277	3	2000	17.5	21.78
33	2012	1.825	3	2000	17.5	34.90
33	2013	2.138	3	2000	17.5	36.31
33	2014	1.191	3	2000	17.5	31.37
33	2015	0.759	3	2000	17.5	28.03
33	2016	0.769	3	2000	17.5	28.12

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
34	2001	0.241	3	2000	17.5	21.04
34	2002	0.562	3	2000	17.5	26.00
34	2003	0.143	3	2000	17.5	18.46
34	2004	0.442	3	2000	17.5	24.48
34	2005	0.497	3	2000	17.5	25.21
34	2006	0.815	3	2000	17.5	28.53
34	2007	0.393	3	2000	17.5	23.77
34	2008	1.555	3	2000	17.5	33.53
34	2009	1.776	3	2000	17.5	34.66
34	2010	0.642	3	2000	17.5	26.88
34	2011	0.238	3	2000	17.5	20.97
34	2012	1.766	3	2000	17.5	34.61
34	2013	2.009	3	2000	17.5	35.75
34	2014	1.119	3	2000	17.5	30.88
34	2015	0.699	3	2000	17.5	27.45
34	2016	0.899	3	2000	17.5	29.24

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
35	2001	0.241	3	2000	22.5	17.56
35	2002	0.566	3	2000	22.5	21.74
35	2003	0.149	3	2000	22.5	15.57
35	2004	0.448	3	2000	22.5	20.50
35	2005	0.492	3	2000	22.5	20.99
35	2006	0.818	3	2000	22.5	23.83
35	2007	0.382	3	2000	22.5	19.70
35	2008	1.489	3	2000	22.5	27.68
35	2009	1.741	3	2000	22.5	28.79
35	2010	0.633	3	2000	22.5	22.35
35	2011	0.222	3	2000	22.5	17.20
35	2012	1.636	3	2000	22.5	28.34
35	2013	1.852	3	2000	22.5	29.23
35	2014	1.038	3	2000	22.5	25.29
35	2015	0.656	3	2000	22.5	22.55
35	2016	0.829	3	2000	22.5	23.91

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
36	2001	0.265	3	2000	17.5	21.54
36	2002	0.540	3	2000	17.5	25.74
36	2003	0.135	3	2000	17.5	18.20
36	2004	0.448	3	2000	17.5	24.56
36	2005	0.477	3	2000	17.5	24.95
36	2006	0.769	3	2000	17.5	28.12
36	2007	0.374	3	2000	17.5	23.48
36	2008	1.439	3	2000	17.5	32.89
36	2009	1.729	3	2000	17.5	34.43
36	2010	0.642	3	2000	17.5	26.88
36	2011	0.220	3	2000	17.5	20.56
36	2012	1.628	3	2000	17.5	33.92
36	2013	1.800	3	2000	17.5	34.78
36	2014	1.103	3	2000	17.5	30.77
36	2015	0.664	3	2000	17.5	27.10
36	2016	0.866	3	2000	17.5	28.97
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
39	2001	0.259	3	2000	27.5	15.53
39	2002	0.140	3	2000	27.5	13.31
39	2003	0.162	3	2000	27.5	13.81
39	2004	0.085	3	2000	27.5	11.75
39	2005	0.105	3	2000	27.5	12.39
39	2006	0.111	3	2000	27.5	12.56
39	2007	0.073	3	2000	27.5	11.31
39	2008	0.129	3	2000	27.5	13.05
39	2009	0.142	3	2000	27.5	13.36
39	2010	0.154	3	2000	27.5	13.64
39	2011	0.103	3	2000	27.5	12.33
39	2012	0.170	3	2000	27.5	13.98
39	2013	0.144	3	2000	27.5	13.41
39	2014	0.170	3	2000	27.5	13.98
39	2015	0.073	3	2000	27.5	11.31
39	2016	0.097	3	2000	27.5	12.15

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
40	2001	0.933	3	2000	52.5	14.26
40	2002	0.746	3	2000	52.5	13.48
40	2003	0.650	3	2000	52.5	13.02
40	2004	0.212	3	2000	52.5	9.84
40	2005	0.350	3	2000	52.5	11.16
40	2006	0.450	3	2000	52.5	11.88
40	2007	0.311	3	2000	52.5	10.83
40	2008	0.708	3	2000	52.5	13.30
40	2009	1.150	3	2000	52.5	15.02
40	2010	1.070	3	2000	52.5	14.75
40	2011	0.306	3	2000	52.5	10.79
40	2012	0.431	3	2000	52.5	11.75
40	2013	0.838	3	2000	52.5	13.88
40	2014	1.122	3	2000	52.5	14.93
40	2015	0.292	3	2000	52.5	10.66
40	2016	0.629	3	2000	52.5	12.92

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
41	2001	0.906	3	2000	22.5	24.45
41	2002	0.715	3	2000	22.5	23.04
41	2003	0.610	3	2000	22.5	22.15
41	2004	0.200	3	2000	22.5	16.76
41	2005	0.289	3	2000	22.5	18.37
41	2006	0.432	3	2000	22.5	20.32
41	2007	0.284	3	2000	22.5	18.29
41	2008	0.511	3	2000	22.5	21.19
41	2009	0.832	3	2000	22.5	23.93
41	2010	1.507	3	2000	22.5	27.77
41	2011	0.452	3	2000	22.5	20.55
41	2012	0.368	3	2000	22.5	19.52
41	2013	0.310	3	2000	22.5	18.70
41	2014	0.195	3	2000	22.5	16.65
41	2015	0.101	3	2000	22.5	14.13
41	2016	0.378	3	2000	22.5	19.65

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
42	2001	0.814	3	2000	22.5	23.80
42	2002	0.630	3	2000	22.5	22.33
42	2003	0.560	3	2000	22.5	21.68
42	2004	0.166	3	2000	22.5	16.00
42	2005	0.233	3	2000	22.5	17.41
42	2006	0.372	3	2000	22.5	19.57
42	2007	0.226	3	2000	22.5	17.28
42	2008	0.405	3	2000	22.5	19.99
42	2009	0.491	3	2000	22.5	20.98
42	2010	0.485	3	2000	22.5	20.91
42	2011	0.200	3	2000	22.5	16.76
42	2012	0.211	3	2000	22.5	16.98
42	2013	0.118	3	2000	22.5	14.69
42	2014	0.165	3	2000	22.5	15.97
42	2015	0.038	3	2000	22.5	11.06
42	2016	0.269	3	2000	22.5	18.05
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
43	2001	0.842	3	2000	22.5	24.00
43	2002	0.677	3	2000	22.5	22.73
43	2003	0.613	3	2000	22.5	22.17
43	2004	0.186	3	2000	22.5	16.46
43	2005	0.269	3	2000	22.5	18.05
43	2006	0.364	3	2000	22.5	19.46
43	2007	0.241	3	2000	22.5	17.56
43	2008	0.450	3	2000	22.5	20.52
43	2009	0.496	3	2000	22.5	21.03
43	2010	0.498	3	2000	22.5	21.05
43	2011	0.173	3	2000	22.5	16.16
43	2012	0.252	3	2000	22.5	17.76
43	2013	0.098	3	2000	22.5	14.02
43	2014	0.135	3	2000	22.5	15.19
43	2015	0.071	3	2000	22.5	12.94
43	2016	0.288	3	2000	22.5	18.36

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
44	2001	0.844	3	2000	22.5	24.02
44	2002	0.663	3	2000	22.5	22.61
44	2003	0.584	3	2000	22.5	21.91
44	2004	0.187	3	2000	22.5	16.48
44	2005	0.243	3	2000	22.5	17.59
44	2006	0.347	3	2000	22.5	19.23
44	2007	0.272	3	2000	22.5	18.10
44	2008	0.448	3	2000	22.5	20.50
44	2009	0.460	3	2000	22.5	20.64
44	2010	0.515	3	2000	22.5	21.23
44	2011	0.175	3	2000	22.5	16.21
44	2012	0.227	3	2000	22.5	17.30
44	2013	0.160	3	2000	22.5	15.85
44	2014	0.111	3	2000	22.5	14.46
44	2015	0.079	3	2000	22.5	13.29
44	2016	0.279	3	2000	22.5	18.21

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
45	2001	0.204	3	2000	22.5	16.84
45	2002	0.136	3	2000	22.5	15.22
45	2003	0.147	3	2000	22.5	15.52
45	2004	0.087	3	2000	22.5	13.61
45	2005	0.088	3	2000	22.5	13.65
45	2006	0.124	3	2000	22.5	14.87
45	2007	0.061	3	2000	22.5	12.45
45	2008	0.118	3	2000	22.5	14.69
45	2009	0.121	3	2000	22.5	14.78
45	2010	0.130	3	2000	22.5	15.05
45	2011	0.096	3	2000	22.5	13.95
45	2012	0.171	3	2000	22.5	16.11
45	2013	0.131	3	2000	22.5	15.08
45	2014	0.131	3	2000	22.5	15.08
45	2015	0.051	3	2000	22.5	11.91
45	2016	0.084	3	2000	22.5	13.49

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
46	2001	0.237	3	2000	22.5	17.48
46	2002	0.163	3	2000	22.5	15.92
46	2003	0.181	3	2000	22.5	16.35
46	2004	0.116	3	2000	22.5	14.62
46	2005	0.102	3	2000	22.5	14.16
46	2006	0.130	3	2000	22.5	15.05
46	2007	0.078	3	2000	22.5	13.24
46	2008	0.146	3	2000	22.5	15.49
46	2009	0.131	3	2000	22.5	15.08
46	2010	0.138	3	2000	22.5	15.27
46	2011	0.116	3	2000	22.5	14.62
46	2012	0.141	3	2000	22.5	15.36
46	2013	0.137	3	2000	22.5	15.25
46	2014	0.111	3	2000	22.5	14.46
46	2015	0.064	3	2000	22.5	12.60
46	2016	0.109	3	2000	22.5	14.40
Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
47	2001	0.122	3	2000	12.5	22.71
47	2002	0.061	3	2000	12.5	19.10
47	2003	0.080	3	2000	12.5	20.43
47	2004	0.063	3	2000	12.5	19.25
47	2005	0.052	3	2000	12.5	18.35
47	2006	0.043	3	2000	12.5	17.50
47	2007	0.079	3	2000	12.5	20.37
47	2008	0.080	3	2000	12.5	20.43
47	2009	0.057	3	2000	12.5	18.77
47	2010	0.055	3	2000	12.5	18.61
47	2011	0.086	3	2000	12.5	20.81
47	2012	0.064	3	2000	12.5	19.33
47	2013	0.081	3	2000	12.5	20.50
47	2014	0.059	3	2000	12.5	18.94
47	2015	0.075	3	2000	12.5	20.11
47	2016	0.058	3	2000	12.5	18.86

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
48	2010	0.640	3	2000	22.5	22.41
48	2011	0.227	3	2000	22.5	17.30
48	2012	1.622	3	2000	22.5	28.28
48	2013	1.918	3	2000	22.5	29.49
48	2014	1.040	3	2000	22.5	25.31
48	2015	0.643	3	2000	22.5	22.44

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
49	2010	0.623	3	2000	17.5	26.68
49	2011	0.223	3	2000	17.5	20.63
49	2012	1.604	3	2000	17.5	33.79
49	2013	1.845	3	2000	17.5	34.99
49	2014	1.019	3	2000	17.5	30.17
49	2015	0.654	3	2000	17.5	27.00

Punkt	Jahr	3D-Geschwindigkeit [m/a]	Exponent [-]	Dichte Material [kg/m ³]	Hangneigung [°]	Tiefe [m]
50	2010	0.573	3	2000	17.5	26.12
50	2011	0.211	3	2000	17.5	20.35
50	2012	1.527	3	2000	17.5	33.38
50	2013	1.662	3	2000	17.5	34.09
50	2014	0.965	3	2000	17.5	29.76
50	2015	0.583	3	2000	17.5	26.24

ANHANG 03






GLEITFLÄCHENKONSTRUKTION

nach CARTER & BENTLEY (1985)

Blaubachgraben
Gemeinde Krimml, Salzburg

Punktgruppe 5

Legende:

-  Geländeoberfläche
-  Gleitfläche
-  Normale der Verschiebungsvektoren
-  Halbierung der Normalen
-  Massenbewegungsmaterial

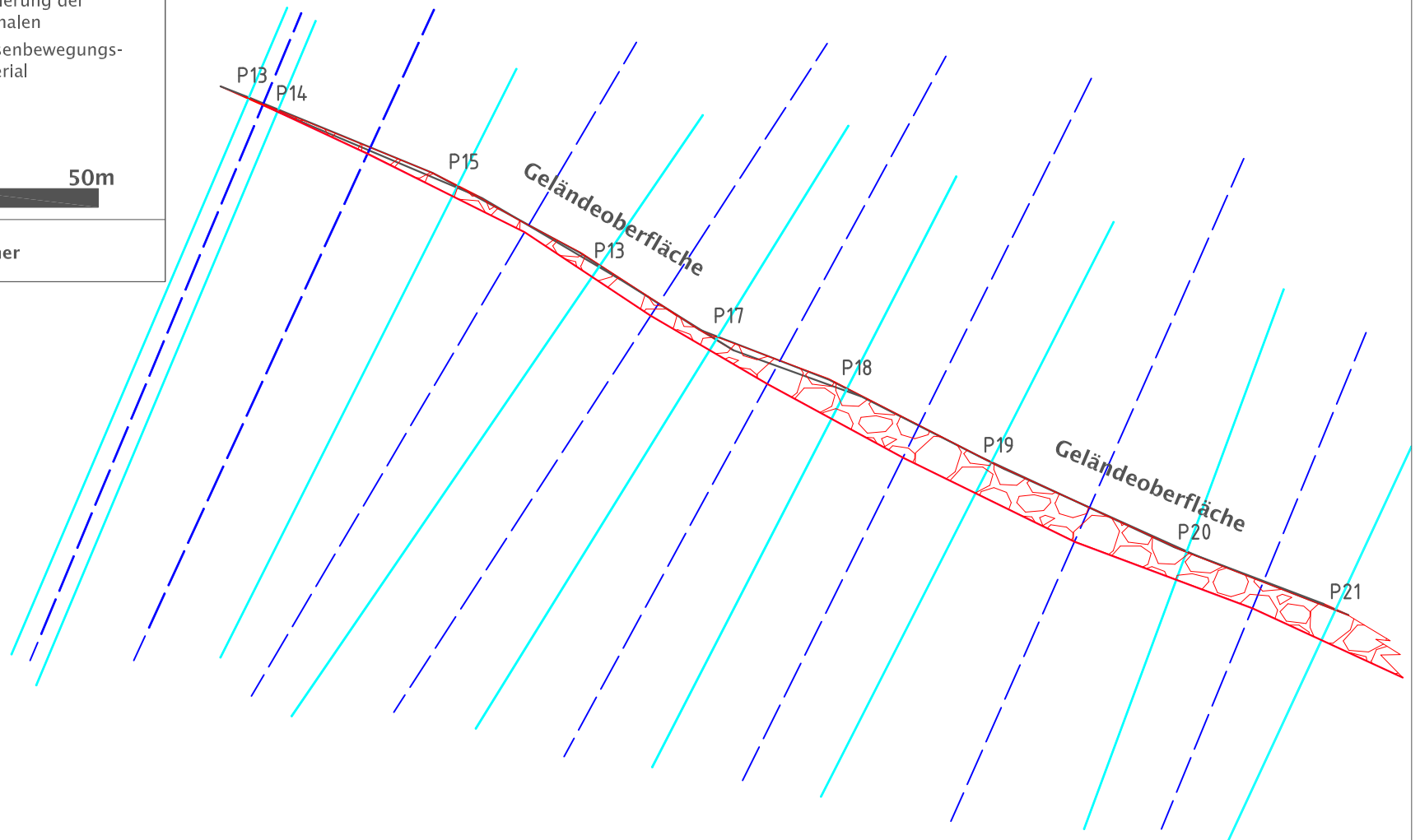
Maßstab: 1:1.000



Zeichner: Gregor Weichselbaumer

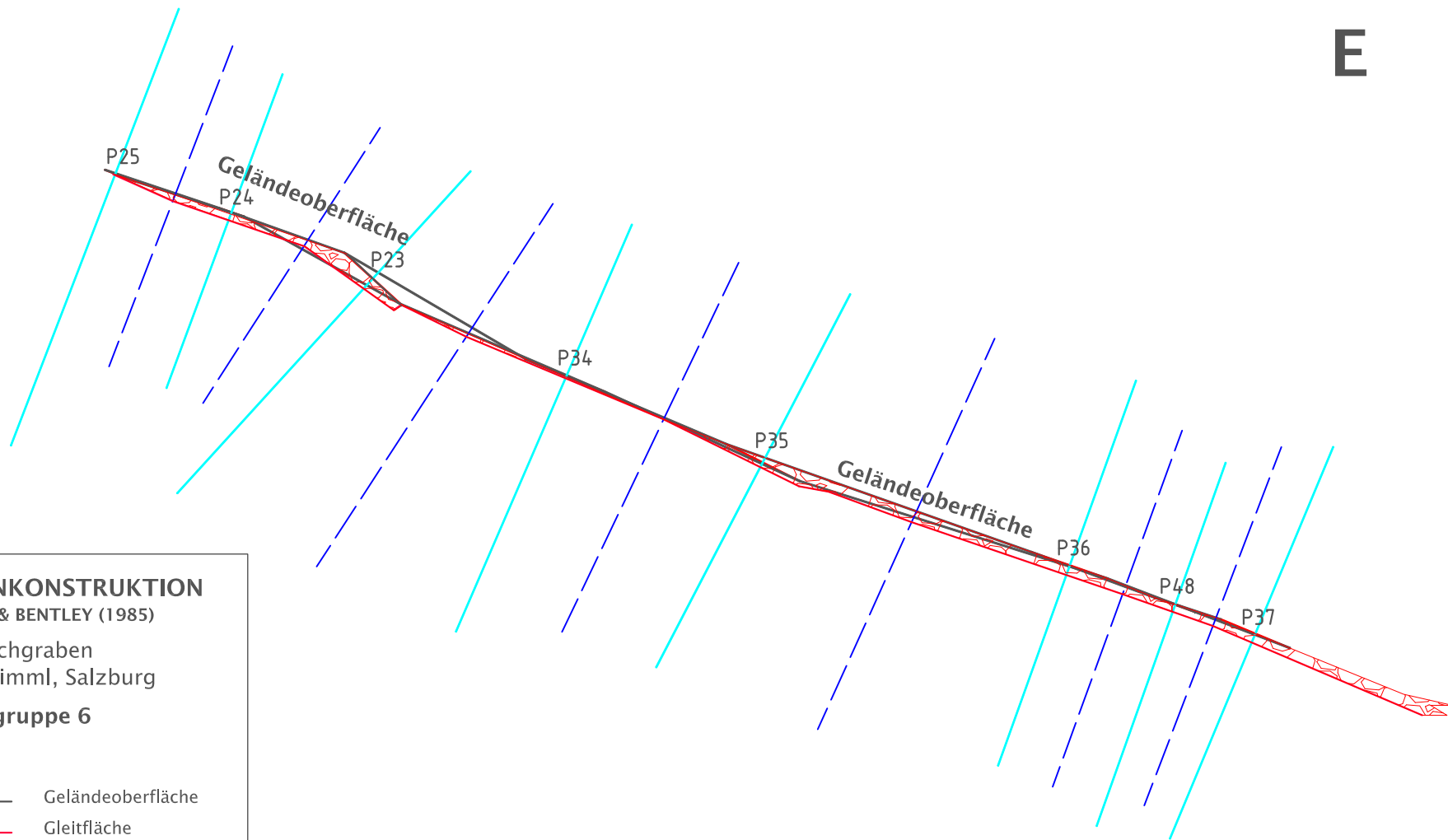
WSW

ENE



W

E







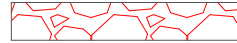
GLEITFLÄCHENKONSTRUKTION

nach CARTER & BENTLEY (1985)

Blaubachgraben
Gemeinde Krimml, Salzburg

Punktgruppe 6

Legende:

-  Geländeoberfläche
-  Gleitfläche
-  Normale der Verschiebungsvektoren
-  Halbierung der Normalen
-  Massenbewegungsmaterial

Maßstab: 1:1.000



Zeichner: Gregor Weichselbaumer