



Maria Winkler, BSc

**Nutzung von Schadensbildern zur Überwachung von
Massenbewegungen - geotechnische Schadensbilder bei
Massenbewegungen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Bmst. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Matthias Rebhan, BSc

Eidesstattliche Erklärung

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.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Ausarbeitung meiner Masterarbeit und darüber hinaus während meiner gesamten Studienzeit unterstützt und motiviert haben. In erster Linie gilt ein besonderer Dank meinem Betreuer Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Roman Marte und meinem mitbetreuenden Assistenten Dipl. Dipl. -Ing. Matthias J. Rebhan. Ihre Unterstützung, Hilfestellung und Bereitstellung von Unterlagen hat einen großen Teil zur Fertigstellung meiner Arbeit beigetragen.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Kärnten, für die Übermittlung zahlreicher Unterlagen, sowie spannender Diskussionen, welche mir zu neuen Denkansätzen bei der Ausarbeitung meiner Arbeit verholfen haben. Außerdem gilt der GDP ZT GmbH Graz, im Besonderen Herrn Dr. phil. Gerhard Moyschewitz, für die gute Zusammenarbeit mein Dank.

Weiters gilt ein besonderer Dank meinem Studienkollegen Herrn Marek Vostrel BSc. mit dem ein Teil der Arbeit gemeinsam verfasst wurde. Der gegenseitige Erfahrungsaustausch und die vielen gemeinsam verbrachten produktiven und teils lustigen Stunden haben das Verfassen der Arbeit erleichtert.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und weiteren Studienkollegen, durch die es möglich war auch schwierige Zeiten des Studiums mit Mut und Spaß zu meistern. Im Besonderen hervorheben möchte ich dabei meine Eltern Erwin und Gertrude Winkler, die es mir ermöglicht haben mein Studium zu absolvieren und mir moralisch und finanziell stets zur Seite standen. Dadurch konnte ich eine unvergessliche Studienzeit in Graz verbringen.

Diese Arbeit wurde im Zuge des durch die FFG geförderten Forschungsprojektes SIBS – „Sicherheitsbewertung bestehender Stützbauwerke“ erstellt. Ein Teil dieses Forschungsprojektes ist die Erarbeitung eines Schadenskataloges. Mit der vorliegenden Arbeit soll ein Teil dieser Sammlung von Schäden abgehandelt werden. Hierbei im Speziellen geotechnische Schäden und deren Nutzung zur Beobachtung und Beurteilung von Massenbewegungen.

Der Dank für die Möglichkeit der Umsetzung und Behandlung dieses Themas ergeht an die Vereinigung österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmen (VÖBU), die Autobahn- und Schnellstraßen- Finanzierungs- Aktiengesellschaft (Asfinag) und die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) sowie die Wirtschaftspartner und Unterstützer dieses Forschungsprojektes.



Nachfolgende Arbeit wurden durch den Autor und die beiden Betreuer Univ. Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Roman Marte und Dipl.- Dipl.- Ing. Matthias J. Rebhan, BSc. erarbeitet.

Kurzfassung

Gravitative Massenbewegungen können weltweit auftreten und stellen eine Gefährdung für Menschen, Siedlungsräume und infrastrukturelle Einrichtungen dar. Besonders im alpinen Raum sind häufig Massenbewegungen und deren Folgen und Schäden vorzufinden.

Aufgrund der Komplexität der Bewegungsabläufe und der unterschiedlichen Auftrittsformen stellt diese Thematik eine große Herausforderung in der Begutachtung und Beurteilung dar. Meistens ist es das ungünstige Zusammenwirken mehrerer unterschiedlicher Einflussfaktoren, welches zur Entstehung von Bewegungsvorgängen im Untergrund führt. Die wirksamste Methode, um das Ausmaß an Gefahren und Schäden so gering wie möglich zu halten, ist das frühzeitige Erkennen von Bewegungen und das rechtzeitige Handeln zur Umsetzung erforderlichenfalls notwendiger Stabilisierungs- oder Sicherungsmaßnahmen. Das Erkennen von Bewegungsvorgängen in einem frühen Stadium ist jedoch keinesfalls eine leicht zu lösende Aufgabe. In dieser Masterarbeit wird der Lösungsansatz der Nutzung von Schadensbildern als (eine Art der) Beobachtungsmethode erarbeitet. Dabei wird in der nachfolgenden Arbeit auf geotechnische Schadensbilder verursacht durch Massenbewegungen eingegangen, um anschließend in einem gemeinsamen Kapitel mit meinem Kollegen Herrn Vostrel die Effizienz der Kombination geotechnischer und konstruktiver Schadensbilder zu veranschaulichen.

Einen der Hauptbestandteile dieser Arbeit bildet eine Sammlung geotechnischer Schadensbilder. Einleitend hierfür wird auf die unterschiedlichen Erscheinungsformen von Massenbewegungen und die hierzu vorhandene Terminologie eingegangen. Aufbauend auf diese wird die Diversität von Rutschungen sowie Kriechhängen erarbeitet, um eine mögliche Erleichterung bei der frühzeitigen Erkennung erster Bewegungsanzeichen bieten zu können. Abschließend werden in Ergänzung zur Beobachtungsmethode Messinstrumente zum Monitoring von Massenbewegungen behandelt.

Als Abschluss der Masterarbeit wird versucht, die Verknüpfung geotechnischer und konstruktiver Schadensbilder anhand einiger Beispiele zu verdeutlichen, um das Monitoring von Massenbewegungen auf einfache, rasche und kosteneffiziente Weise zu ergänzen.

Abstract

Mass movements are worldwide occurring events and pose a risk to people, settlement areas and infrastructure. Especially in the Alpine region, mass movements and their consequences and damages can often be found.

Due to the complexity of the movements and their different mechanisms for appearance, the topic represents a major challenge concerning their assessment. Most often, the converging of several unfavorable influence factors leads to the beginning of movements in the ground. The most effective way to reduce risk and damages to a minimum is the early detection of movements and the timely realization of necessary retaining or securing measures if necessary. However, the detection of movements at an early stage is not an easy task to solve. In this master thesis, the use of damage patterns for observation is shown. The thesis deals with geotechnical damage patterns caused by mass movements to present subsequent the efficiency of the combination of geotechnical and constructive damage patterns.

One main part of this master thesis is a collection of various geotechnical damage patterns. As an introduction, it deals with the different appearance forms of mass movements and the terminology used. Based on this the diversity of landslides and creeping slopes is shown to offer a relief in recognizing indications of movements at an early stage. Finally, as a complement to the observational method, measuring instruments used for monitoring reasons are explained.

As a conclusion, this master thesis presents the combination of geotechnical and constructive damage patterns by means of some examples, in order to carry out the monitoring of mass movements in an easy, quick and cost-efficient way.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Massenbewegungen	3
2.1	Definition einer Massenbewegung	3
2.2	Klassifikation von Massenbewegungen.....	5
2.2.1	Fallen.....	6
2.2.2	Kippen.....	8
2.2.3	Gleiten	8
2.2.4	Driften	13
2.2.5	Fließen.....	13
2.2.6	Kriechen.....	15
2.2.7	Komplexe Rutschungstypen.....	18
2.3	Ursachen/Auslöser von Massenbewegungen.....	19
2.3.1	Geologie	21
2.3.2	Veränderung der hydrogeologischen Bedingungen.....	22
2.3.3	Vegetation.....	24
2.3.4	Veränderung von Hangneigungen.....	24
2.3.5	Änderung der Lastverteilung	25
2.3.6	Erdbeben / Erschütterungen	26
3	Grenzzustände laut EUROCODE 7	28
3.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	29
3.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	31
3.3	Schüttung, Wasserhaltung	31
3.4	Anker	32
3.5	Gesamtstandsicherheit.....	33
3.6	Erddämme	35
4	Geotechnische Schadensbilder	37
4.1	Internationale Nomenklatur	37
4.2	Schadensbilder Rutschungen.....	41

4.2.1	Sackungszone.....	42
4.2.2	Akkumulationszone	51
4.3	Schadensbilder Kriechhang.....	57
4.3.1	Veränderung der Geländeform.....	59
4.3.2	Schäden an Bauwerken / Kunstbauten	63
4.3.3	Sonstige Schadensbilder.....	65
5	Beobachtungsmethoden.....	71
5.1	Untersuchungsmethoden / Erkundung	71
5.1.1	Ingenieurgeologische Untersuchung	71
5.2	Überwachung/Monitoring von Massenbewegungen	75
5.2.1	Messgrößen	77
5.2.2	Messinstrumente zur Überwachung	79
5.2.2.1	Risskartierung.....	80
5.2.2.2	Rissbeobachtung.....	80
5.2.2.3	Fluchtstangen.....	80
5.2.2.4	Webcam-Bildaufnahme	80
5.2.2.5	Drahtextensometer	80
5.2.2.6	Geodätische Messpunkte	81
5.2.2.7	Laserdistanzmesser.....	82
5.2.2.8	Kraftmesszellen	82
5.2.2.9	Theodolit / Tachymeter (terrestrische Vermessung).....	83
5.2.2.10	GNSS – Globale Positionierungssysteme.....	83
5.2.2.11	Bohrloch Extensometer	83
5.2.2.12	Inklinometer	85
5.2.2.13	Trivec Sonde	87
5.2.2.14	Time Domain Reflectometry	87
5.2.2.15	Piezometer	87
5.2.2.16	Luftbildauswertung	88
5.2.2.17	Radarinterferometrie.....	90

5.2.2.18	Laserscanbefliegung	91
5.2.2.19	Hydrologische Messeinrichtungen	91
5.2.3	Planung eines Monitorings	91
5.2.4	Positionierung eines Monitorings.....	92
5.2.5	Randbedingungen bei der Überwachung von Massenbewegungen	93
5.3	Fallbeispiel Großrutschung Höhenberg Großraming	93
5.4	Fallbeispiel Talzus Schub Eggerberg/Gradenbach	98
6	Schadensbilder zur Überwachung von Massenbewegungen.....	104
6.1	Einleitung	104
6.2	Beispiel 1	106
6.2.1	Beschreibung der Situation	106
6.2.2	Ausdehnung der Massenbewegung	106
6.2.3	Bewegungsrate der Massenbewegung	113
6.2.4	Aktive / inaktive Bewegung	116
6.3	Beispiel 2	116
6.3.1	Beschreibung der Situation	116
6.3.2	Ausdehnung der Massenbewegung	116
6.3.3	Bewegungsrate der Massenbewegung	124
6.4	Beispiel 3	125
6.4.1	Beschreibung der Situation	125
6.4.2	Ausdehnung der Massenbewegung	125
6.4.3	Bewegungsrate der Massenbewegung	132
6.5	Rutschung Pogerschitzen	134
6.5.1	Ursachen und Auslöser	135
6.5.2	Geotechnische Schadensbilder.....	136
6.5.3	Konstruktive Schadensbilder	151
6.5.4	Weiteres Vorgehen	159
7	Resümee.....	160
8	Literatur.....	161

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Zeit-Verformungsverhalten von Massenbewegungen. Die Abszisse stellt den Beobachtungszeitraum dar, die Ordinate die aufgetretenen Verschiebungen (adaptiert aus Breymann, 2014)	4
Abb. 2: links: schematische Darstellung eines Bergsturzes mit Darstellung von Abrissgebiet, Sturzbahn und Ablagerungsgebiet; rechts: Abrissgebiet sowie Teile der Sturzbahn des Bergsturzes am Dobratsch	7
Abb. 3: links: schematische Darstellung eines Kippversagens (Multilingual Landslide Glossary, 1993); rechts: Kippversagen in Hrensko, Tschechien	8
Abb. 4: links: Rotationsrutschung mit schalenförmiger Gleitfläche; rechts: Translationsrutschung mit ebener Gleitfläche	9
Abb. 5: links: schematische Darstellung einer Translationsrutschung; rechts: translatorische Bewegung mit konstanter Geschwindigkeitsverteilung v entlang einer gekrümmten Gleitfläche (Breymann, 2014)	10
Abb. 6: Starrkörperverschiebung einer translatorischen Bewegung (Breymann, 2014)	10
Abb. 7: links: schematische Darstellung einer Rotationsrutschung (Multilingual Landslide Glossary, 1993); rechts: rotatorische Bewegung mit linearer Geschwindigkeitsverteilung (Breymann, 2014).....	11
Abb. 8: Starrkörperverschiebung einer rotatorischen Bewegung (Breymann, 2014)	12
Abb. 9: Schematische Darstellung einer kombinierten Rutschung mit gekrümmter und ebener Gleitfläche (adaptiert aus Bunza, 1992).....	12
Abb. 10: Driften von Sandsteinblöcken; a = Sandsteinblöcke, b = Mergel, c = liegende Sandsteine, d = plastifizierter Mergel (Johnsen, 1984)	13
Abb. 11: links: schematische Darstellung einer Fließbewegung mit anfänglicher Gleitung (Multilingual Landslide Glossary, 1993); rechts: Hangmure	14
Abb. 12: Skizzierung der Massenbewegung in Vaerdalen, nördlich von Trondheim, im Jahr 1893; 1 – Bereich der Abrisskante, 2 - Vaerdalselven-Tal bedeckt mit verflüssigten Ton, 3 – temporärer See, 4 – Bauernhöfe (Mencl, Záruba, 1982).....	15
Abb. 13: links: Bewegung eines Bodenteilchens in einem Kriechhang; rechts: Geschwindigkeitsverteilung (v) einer Kriechbewegung (adaptiert aus Brandner et al., 2008)	16
Abb. 14: Übersicht über den Bewegungsbereich der Großhangbewegung Eggerberg-Gradenbach (links: Lienhart, 2016; rechts:)	18

Abb. 15: Darstellung einer potentiellen Gleitfläche mit den einwirkenden Kräften und Spannungen (adaptiert aus McColl, 2015).....	20
Abb. 16: Aufnahme der Katastrophe in Vajont unmittelbar nach der Rutschung im Jahr 1963.	23
Abb. 17: Rapide Stauzielabsenkung: (a) vor der Absenkung; (b) nach der Absenkung mit angrenzendem undurchlässigen Boden; (c) nach der Absenkung: vorübergehender Porenwasserdruck kann mit Fließnetz ermittelt werden; (d) hydrostatischer Porenwasserdruck (adaptiert aus Kieffer, 2016).....	24
Abb. 18: Darstellung unterschiedlicher Lastverteilungen: Oben: Originale Hanggeometrie; Mitte: Destabilisierung durch zusätzliche Auflast; Unten: Destabilisierung durch Versteilung zufolge Einschnitt am Hangfuß (Kieffer, 2016).....	26
Abb. 19: Einwirkende Kräfte auf ein infinites Bodenelement auf einer geneigten Fläche ausgelöst durch ein Erdbeben (Kieffer, 2016).....	27
Abb. 20: Nachweisführung gemäß ÖNORM B 1997-1-1 (ÖN B 1997, 2013)	28
Abb. 21: Rutschungsmerkmale – Strichliert der ungestörte Boden oder Fels; schraffierter Bereich bildet die verlagerte Masse (adaptiert aus Multilingual Landslide Glossary, 1993).....	38
Abb. 22: Rutschungsdimensionen – Strichliert der ungestörte Boden oder Fels; schraffierter Bereich bildet die verlagerte Masse (Multilingual Landslide Glossary 1993)	40
Abb. 23: schematische Darstellung einer Rotationsrutschung mit aufgetretenen Schäden	41
Abb. 24: Schematische Darstellung einer Rutschung mit möglichen Schadensbildern. Der markierte Bereich stellt die Akkumulationszone dar.	42
Abb. 25: Rutschung Fischergraben mit Blick auf den oberen Bereich der Rutschung und rot markierter Anrisskante; feines lehmiges Material vermischt mit groben stark zerklüfteten Blöcken liefert ungünstige Bedingungen für die Hangstabilität (adaptierte Quelle: WLV Kärnten)	43
Abb. 26: Hauptanrisskante mit Blick von oben: Oberhalb der Anrisskante befindet sich der bestehende Wald, darunter die abgerutschte Fläche. (adaptierte Quelle: WLV Kärnten)	43
Abb. 27: Rutschung Grafendorf: Die Abbildung zeigt das Rutschungsgebiet mit einer steilen Anrisskante (WLV Kärnten).....	44
Abb. 28: Rutschung Grafendorf: Darstellung der Anrisskante und Übergang zum unbewegten Bereich (WLV Kärnten)	44

Abb. 29: Rutschung Guggenberg-Süd: Am Foto ist die Anrisskante der Hangrutschung (rot markiert) erkennbar; der Hang besteht aus einem inhomogenen Gemisch von grobkörnigen Material und Feinanteilen. (WLV Kärnten)	45
Abb. 30: Rutschung Guggenberg-Süd: Deutlich erkennbare Anrisskante durch Höhenversatz des Geländes. (WLV Kärnten).....	45
Abb. 31: Rutschung Wernberg: Abbildung der Anrisskante mit der sehr steilen Abbruchfläche. (WLV Kärnten).....	46
Abb. 32: Links: Aufnahme der Rutschung Wernberg während durchgeführter Sanierungsarbeiten. Gut erkennbare Steilstufe der Rutschung. Rechts: Rutschungsgebiet mit feinkörnigem Material mit Blick auf die Anrisskante und Steilstufe (WLV Kärnten)	46
Abb. 33: Rutschung Krauth: Trotz der Schneedecke ist die Anrisskante gut erkennbar. (WLV Kärnten)	47
Abb. 34: Rutschung Krauth: Entlang der Anrisskante ist ein deutlicher Höhenversatz zwischen bestehendem und fließendem Gelände sichtbar. (WLV Kärnten).....	47
Abb. 35: Rutschung Radegundergraben: Das Foto zeigt einen Blick von oben auf den abgerutschten Bereich. Durch die bestehenden und umgekippten Bäume wird der Verlauf der Anrisskante verdeutlicht. (WLV Kärnten).....	48
Abb. 36: Rutschung Letten-Obergail links: Das Foto zeigt eine Rutschbewegung im Anfangsstadium mit bereits ausgebildeter Anrisskante. Rechts sind die Schäden in Rot nachgezeichnet. (WLV Kärnten).....	48
Abb. 37: Rutschung Letten-Obergail: Die Abbildung zeigt eine bereits eingetretene Translationsrutschung mit gut sichtbarer Anrisskante. (WLV Kärnten)	49
Abb. 38: Rutschung Mondsee: Die Anrisskante der Rutschung verläuft durch eine Straße wodurch ein Teil der Straße mit den bewegten Massen wegrutschte. (Steinbacher, 2014).....	49
Abb. 39: Rutschung Pogerschitzen: Anrisskante (rot markiert) mit darüberliegender Siedlung (WLV Kärnten).....	50
Abb. 40: Rutschung Pogerschitzen: Krone der Rutschung mit Blick von der seitlichen Flanke (WLV Kärnten).....	50
Abb. 41: Schematische Darstellung einer Rutschung mit möglichen Schadensbildern. Der markierte Bereich stellt die Akkumulationszone dar.	51
Abb. 42: Rutschung Krauth: Wasseraustritte (rot markierter Bereich) im Fußbereich der Rutschung. (WLV Kärnten).....	52
Abb. 43: Rutschung Letten-Obergail: Bucklige Aufschiebungen im unteren Bereich der Hangbewegung. Oberhalb des Bereichs der unruhigen Hangoberfläche sind Querrisse am Hang (rote Markierung) erkennbar. (WLV Kärnten)	52

Abb. 44: Rutschung Letten-Obergail: Bucklige Aufschiebungen mit Wasseraustritt im Fußbereich. (WLV Kärnten)	53
Abb. 45: Aufschiebungen und verlagertes Material im unteren Rutschungsbereich. (WLV Kärnten)	53
Abb. 46: Rutschung Pogerschitzen (Kapitel 6.5). Unterhalb der ersten Anrissfläche kommt es am Plateau zur Bildung von Querrissen in der Wiese. (WLV Kärnten)	54
Abb. 47: Rutschung Pogerschitzen (Kapitel 6.5). Die entstandenen Querrisse sind zum Teil mit Wasser gefüllt und weisen eindeutig auf eine Durchnässung des Hanges hin. (WLV Kärnten).....	54
Abb. 48: Querrisse im Hang bei einer Rutschung (Steinbacher, 2014)	55
Abb. 49: Rutschung Höhenberg: Abbildung der Rutschungsstirn mit Stirnwulst und Aufschiebungen (Gasperl, Tartarotti, 2014).....	55
Abb. 50: Rutschung Leisach: Die Rutschmassen zerstörten die Landesstraße und verschütteten die Drau.	56
Abb. 51: Schematische Darstellung eines Kriechhanges mit möglichen Schadensbildern.....	57
Abb. 52: Schematische Darstellung eines Kriechhanges mit möglichen Schadensbildern.....	58
Abb. 53: Schematischer Längsschnitt eines Kriechhanges mit Schadensbildern	58
Abb. 54: Entnahme von Schürfen und Bohrungen an einem Hang mit unruhiger Oberfläche (Steinbacher, 2014).....	59
Abb. 55: Buckelbildung an einem Hang	60
Abb. 56: Wasseraustritte und Tümpel als Hinweis auf eine starke Hangdurchfeuchtung	60
Abb. 57: Kriechhang mit bereits eingetretenen Rutschungen im unteren Hangbereich	61
Abb. 58: Hang mit deutlich erkennbarer Anrisskante deutet auf Bewegungen im Untergrund hin (rechts Anrisskante rot markiert)	61
Abb. 59: Der rot markierte Bereich zeigt eine unregelmäßige Hangmorphologie, durch Trittpfade von Weidevieh verursacht.....	62
Abb. 60: Buckelbildung und kleine Anrisskanten können fälschlicherweise als Kriechhang interpretiert werden, sind aber in diesem Fall durch Weidevieh entstanden.	62
Abb. 61: Einsturz einer Kirche sowie Risse im Boden und der Straße ausgelöst durch Bewegungen im Hang (Hofmann, Jaritz, 2005)	63
Abb. 62: Deutlich erkennbare Risse in der Straße verursacht durch Kriechen des angrenzenden Hanges (Steinbacher, 2014)	64

Abb. 63:	Stützmauerversagen durch den einwirkenden erhöhten Erddruck	64
Abb. 64:	Kriechhang im Bereich einer Zugtrasse (rechts: ; links: Leopold, 2012)	65
Abb. 65:	Gekrümmte Baumstämme als Hinweis auf mögliche Hangkriechbewegungen 66	
Abb. 66:	Bewegungen im Untergrund führen zur Verdrehung von Baumstämmen (Breymann, 2014)	67
Abb. 67:	Säbelwuchsförmige Baumstämme aufgrund einer kriechenden Hangbewegung	67
Abb. 68:	Schrägstellung eines Zauns zufolge Kriechhangbewegung	68
Abb. 69:	Verschobene Zaunelemente verursacht durch Hangkriechen	68
Abb. 70:	Links: Neigungsänderung Strommast (Breymann, 2014); rechts: geschädigte Entwässerungsrinne aufgrund von Kriechbewegungen im Untergrund ...	69
Abb. 71:	Kriechhang mit unterschiedlichen Schadensbildern an Oberfläche, Zaun und Straße 70	
Abb. 72:	Genauigkeit und Präzision (adaptiert von Dunnycliff, 1988)	77
Abb. 73:	Prinzip Drahtextensometer	81
Abb. 74:	Hydraulische Kraftmessdose mit Manometer direkt an der Messdose	82
Abb. 75:	Mehrfachextensometer	84
Abb. 76:	Links: Aufbau einer Inklinometermesseinrichtung; Rechts: Messprinzip zur Ermittlung der Horizontalverschiebung durch intervallartige Messung der Neigung. (Brandner et al., 2008)	85
Abb. 77:	links: Ergebnisse einer Inklinometermessung; rechts: unterschiedliche Verschiebungskurven (Marte, 2015).....	86
Abb. 78:	Aufbau eines Casagrande Piezometers (Kolymbas, 2011)	88
Abb. 79:	Luftbildaufnahmen der Rutschung Eggerberg-Gradenbach. 2 Aufnahmen aus den Jahren 1962 und 1996 werden überlagert und daraus die Verschiebung einer Hütte ermittelt. (Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme TU Graz, 2003)	89
Abb. 80:	Satellitenradarbilder von Rutschungen, die farbigen Flächen zeigen Bewegungsbereiche.....	90
Abb. 81:	Möglicher Aufbau eines Messkonzepts.....	92
Abb. 82:	Darstellung der geographischen Lage der Großrutschung Höhenberg Großraming im Osten Oberösterreichs.....	93
Abb. 83:	Monitoringsystem zur Überwachung der Großhangrutschung. (Gasperl, Tartarotti, 2014).....	94
Abb. 84:	Links: offene Risse im Boden; rechts: Anrisskanten mit Höhenversatz des Geländes im Meterbereich (Gasperl, Tartarotti, 2014).....	95

Abb. 85: Massenverlagerung durch die Rutschbewegung. (Gasperl, Tartarotti, 2014)	
	95
Abb. 86: Anwendung einfacher Messinstrumente zur sofortigen Überwachung der Bewegungen. (Gasperl, Tartarotti, 2014).....	96
Abb. 87: Ausdehnung der Rutschung an verschobenen Zaunstempeln erkennbar (Gasperl, Tartarotti, 2014)	96
Abb. 88: Innerhalb von 2 Tagen dehnte sich der Bewegungsbereich extrem aus (Gasperl, Tartarotti, 2014)	97
Abb. 89: Geländemodell der Rutschung erstellt durch Airborne Laser Scan Befliegung (Gasperl, Tartarotti, 2014).....	97
Abb. 90: Übersichtsplan des Bewegungsgebietes mit Positionierung der Messeinrichtungen	98
Abb. 91: Darstellung der geographischen Lage des Talzuschubs Eggerberg/Gradenbach im Nordwesten Kärntens	99
Abb. 92: Berchtoldhang: die rote Markierung stellt den Bewegungsbereich dar	100
Abb. 93: Durch Bewegungen im Untergrund kommt es immer wieder zu herabstürzenden Felsblöcken, die teilweise zu Schäden an Bäumen führen.....	101
Abb. 94: Abgerutschte Schuttmassen führen immer wieder zur Zerstörung von errichteten Geschiebesperren.	101
Abb. 95: Zeit-Verschiebungsdiagramm des Bercholthanges mit eingezeichnetem Grundwasserpegel (Lienhart, 2016)	102
Abb. 96: Monitoringsystem am Berchtoldhang (Lienhart, 2016)	103
Abb. 97: Übersicht Hangsituation.....	106
Abb. 98: Übersicht der Hangsituation mit den Schadensbildern zum Zeitpunkt der Erstaufnahme.....	107
Abb. 99: Setzungsrisse an einem Gebäude	108
Abb. 100: Risschäden im Mauerwerk infolge von Verformungen	108
Abb. 101: Verdrehung von Strommasten	109
Abb. 102: Unruhige Hangmorphologie.....	110
Abb. 103: Säbelwuchs.....	110
Abb. 104: Übersicht der Hangsituation mit entstandenen Schadensbildern im Zuge der Folgeuntersuchung. Die rote Strichlinie stellt die Bewegungszone zum Zeitpunkt der Erstaufnahme dar. Die aktuelle Bewegungszone ist durch den gelb strichlierten Bereich dargestellt.	112
Abb. 105: Neigungsänderung einzelner Stützmauerblöcke	113
Abb. 106: Überblick des Kriechhanges mit verschiedenen Messgrößen zur Ermittlung der Bewegungsrate	114

Abb. 107 Gipsmarker	115
Abb. 108 Prisma Abb. 109 Totalstation	115
Abb. 110 Wasserwaage	115
Abb. 111 Inklinometer	115
Abb. 112: Übersicht Hangsituation	116
Abb. 113: Übersicht der Hangsituation mit den ersichtlichen Schadensbildern zum Zeitpunkt der Erstaufnahme	117
Abb. 114: Verdrehungen des Strommasten, sowie Bodenunebenheiten und erste Anrisskanten erkennbar	118
Abb. 115: Verdrehungen der Zaunstempel (Gasperl, Tartarotti, 2014)	118
Abb. 116: Zuggleis angrenzend an einen Kriechhang mit erkennbaren Schäden. (Leopold, 2012)	119
Abb. 117: Linkes Bild: Verschiebung eines Brückenpfeilers; Rechtes Bild: Risschäden im Stützbereich	120
Abb. 118: Biegerisse am Tragwerk aufgrund des Ausfalls der Stützwirkung	120
Abb. 119: Auflagerverschiebungen an den Stützen der Brücke zufolge möglicher Kriechbewegungen.....	121
Abb. 120: Unebene Hangmorphologie verursacht durch mögliche Kriechbewegungen im Untergrund (Leopold, 2012)	121
Abb. 121: Übersicht der Hangsituation mit entstandenen Schadensbildern im Zuge der Folgeuntersuchung. Der rot strichlierte Bereich stellt die Bewegungszone zum Zeitpunkt der Erstaufnahme dar. Die aktuelle Bewegungszone ist durch den gelb strichlierten Bereich dargestellt.....	122
Abb. 122: Asphaltbrüche bzw. -risse an einer Fahrbahnübergangskonstruktion ..	123
Abb. 123: Überblick des Kriechhanges mit verschiedenen Messgrößen zur Ermittlung der Bewegungsrate	124
Abb. 124: Übersicht Hangsituation	125
Abb. 125: Übersicht der Hangsituation mit ersichtlichen Schadenbildern zum Zeitpunkt der Erstaufnahme	126
Abb. 126: Anrisskante mit erkennbaren Geländeversatz	127
Abb. 127: Anrisskante als Hinweis möglicher Hangbewegungen	127
Abb. 128: Verdrehter Lichtmast links ; Neigungsänderung einer einzelnen Liftstütze rechts	128
Abb. 129: Übersicht der Hangsituation mit entstandenen Schadensbildern im Zuge der Folgeuntersuchung. Der rot strichlierte Bereich stellt die Bewegungszone zum Zeitpunkt der Erstaufnahme dar. Die aktuelle Bewegungszone ist durch den gelb strichlierten Bereich dargestellt.....	129

Abb. 130: Risse am Parkhaus ausgelöst durch den erhöhten Kriechdruck, der auf das Gebäude einwirkt	130
Abb. 131: Risse und Verwerfungen am Parkplatz angrenzend an die Skipiste	131
Abb. 132: Verformungen an der Holzkonstruktion und Schäden am erdberührten Mauerwerk verursacht durch kriechende Bewegungen des Hanges (Jaritz, 2001) ...	131
Abb. 133: Wasserleitung (in blau eingezeichnet) zur Versorgung der Beschneiungsanlage. Durch die Kriechbewegung kommt es zur Entstehung undichter Stellen im Rohr	132
Abb. 134: Überblick des Kriechhanges mit verschiedenen Messgrößen zur Ermittlung der Bewegungsrate	133
Abb. 135: Geographische Lage der Rutschung Pogerschitzen (Google Maps) ...	134
Abb. 136: Satellitenaufnahme des Rutschungsgebietes. Blaue Markierung: oberes Rutschungsgebiet; rote Markierung: unteres Rutschungsgebiet	136
Abb. 137: Blickrichtung Nordosten auf die obere Steilstufe der Rutschung. Die rote Markierung stellt den Verlauf der Anrisskante dar. Die Bereiche A, B und C werden anschließend im Detail ausgearbeitet.....	137
Abb. 138: Gut erkennbare Anrisskante. Durch die Rutschung ergab sich ein Höhenversatz des Geländes von mehreren Metern.....	138
Abb. 139: Durch die Rutschung ist das Gelände um 2-3 m tiefer versetzt.	138
Abb. 140: Die Auflast des Baumstamms kann zum Nachbrechen der Anrisskante führen.	139
Abb. 141: Blick von oben auf den östlichen Bereich der Anrisskante.....	140
Abb. 142: Obere Steilstufe mit Blick auf die Anrisskante unmittelbar nach dem Rutschereignis (WLV Kärnten, 2014)	141
Abb. 143: Obere Steilstufe mit Blick auf die Anrisskante zum Zeitpunkt der Begehung, drei Jahre nach dem Rutschereignis	141
Abb. 144: Neogenschicht (rote Markierung) unterhalb des grobkörnigen Bodens bewässert den Hang permanent.....	142
Abb. 145: Geringe Wasseraustritte aus der Neogenschicht erkennbar.....	142
Abb. 146: Feuchtstellen im Boden deuten auf eine starke Durchnässung des Hanges hin	143
Abb. 147: Deutlich sichtbare Anrisskante der Rutschung	144
Abb. 148: Schrägstellung der Bäume durch die Verschiebungen der Bodenmasse	144
Abb. 149: Blickrichtung Süden von der oberen Steilstufe auf den anschließenden flachen Bereich	145

Abb. 150: Blickrichtung Nordosten vom unteren Bereich der dazwischenliegenden Wiese auf die obere Steilstufe. An der Wiese sind außer leichten Unebenheiten keine Schäden mehr ersichtlich.	146
Abb. 151: Risse in der Wiese unmittelbar nach der Rutschung (WLV Kärnten, 2014)	146
Abb. 152: Durch die starke Durchfeuchtung des Hangs sind die Risse teilweise mit Wasser gefüllt; Aufnahme direkt nach dem Rutschungsereignis (WLV Kärnten, 2014)	147
Abb. 153: Blickrichtung Süden auf den unteren Rutschungsbereich. An den schiefen Bäumen ist erkennbar, welcher Bereich von der Bewegung betroffen ist.	148
Abb. 154: Im Bereich der unteren Rutschzone sind Bäume durch die Rutschung teilweise umgebrochen, hängend an anderen Bäumen oder schiefgestellt.	148
Abb. 155: Unteres Ende der Rutschung im östlichen Bereich. Die aufgeschobene Rutschzunge bildet den Übergang zur unbewegten Zone.	149
Abb. 156: Inklinometerrohr	149
Abb. 157: Ungerader Verlauf des Weges deutet auf die Grenze der Bewegungszone und die Verschiebungen hin.	150
Abb. 158: Verlauf und Form des Weges liefern Hinweise über die Bewegungsrate und die Grenze zwischen bewegtem und unbewegtem Bereich.	150
Abb. 159: Satellitenaufnahme des Rutschungsgebietes	151
Abb. 160: Blick Richtung Norden: Aufnahme des südlichen Bauernhofes unter dem Rutschungsgebiet; eingezeichnet in grün das alte Rutschungsgebiet	152
Abb. 161: Blick Richtung Süden: Aufnahme des südlichen Bauernhofes nach dem Rutschungsereignis 2014 (WLV Kärnten, 2014)	152
Abb. 162: Traktorgarage mit auffälligen Rissen, Blick Richtung Osten	153
Abb. 163: Linkes Bild: Nachgezeichnete Rissmuster; Rechtes Bild: schematische Darstellung	153
Abb. 164: Traktorgarage mit Risssschäden Blick Richtung Nordwesten	154
Abb. 165: Linkes Bild: Nachgezeichnete Rissmuster; Rechtes Bild: Schematische Darstellung	154
Abb. 166: Aufnahme des nördlichen Bauernhofes in der Nähe des Hanges nach der Rutschung im Jahr 2014 (WLV Kärnten, 2014)	155
Abb. 167: Aufnahme der Traktorgarage in der Nähe des Rutschhangs	155
Abb. 168: Stallgebäude südlich unter dem Rutschungsende; Blick Richtung Westen; Darstellung der Neigungsunterschiede von Betonwand und Bauwerk im Detail	156
Abb. 169: Zweigeschossige Garage südlich vom Rutschhang; Blick Richtung Nordosten	157

Abb. 170:	Frontalansicht der Garage Blick Richtung Norden.....	157
Abb. 171:	Schematische Darstellung der Verdrehung der zweigeschossigen Garage; Blick Richtung Norden.....	158
Abb. 172:	Linkes Bild: Risse in der Bodenplatte aufgrund von Kippen der inneren Wand; Rechtes Bild: Risschaden im Detail.....	158

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Unterschiedliche Bezeichnungen des Sturzprozesses in Abhängigkeit des Volumens der Absturzmasse (adaptiert aus Prinz/Strauß, 2011).....	7
Tab. 2	Auslösende Faktoren für Massenbewegungen (Krauter, 2001)	21
Tab. 3	maximale Hangneigung in Abhängigkeit des Hangmaterials (adaptiert aus Niederschick, 2007).....	25
Tab. 4	Überblick über angewandte Monitoringmethoden (adaptiert aus Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, 2008)	79
Tab. 5	Beispiele für Messgrößen und jeweilige Messinstrumente	115

1 Einleitung

Massenbewegungen stellen weltweit eine Gefährdung für Menschen, Siedlungsräume und infrastrukturelle Einrichtungen dar. Vor allem die Nutzung alpiner Bereiche für Bebauungszwecke führt zu einer erhöhten Konfrontation mit Problemen und Schäden bedingt durch Massenbewegungen. Um sich mit dieser Thematik zu beschäftigen und um das mit dieser verbundene Risiko verringern zu können, ist es erforderlich die Vorgänge, welche im Zuge einer Bewegungen im Untergrund ablaufen, zu verstehen und die auslösenden Faktoren zu erkennen. Als Schwierigkeit stellt sich dabei heraus, dass jeder Bewegungsvorgang aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen ein individuelles Problem darstellt und eine Vergleichbarkeit mit anderen Massenbewegungen nur begrenzt möglich ist.

Einleitend befasst sich die Arbeit allgemein mit der Terminologie der Massenbewegung, den unterschiedlichen Erscheinungsformen und Bewegungsursachen. Dieses Kapitel der Arbeit soll dem Leser ermöglichen sich mit der Thematik auseinanderzusetzen und ein Grundverständnis zu erhalten.

Im darauffolgenden Kapitel 3 werden die geotechnischen Grenzzustände erarbeitet, welche im Zusammenhang mit der Stabilität und Standsicherheit von Böschungen stehen.

Kapitel 4 beinhaltet eine Sammlung geotechnischer Schadensbilder an Rutsch- und Kriechhängen. Anhand der Schadensbilder wird die Vielfältigkeit der auftretenden Schäden gezeigt und im Speziellen auf erste Bewegungsanzeichen aufmerksam gemacht. Weiters soll eine kosteneffiziente Art der Beobachtungsmethode durch Nutzung vorhandener Schadensbilder aufgezeigt werden. Zusätzlich eingesetzte Messinstrumente zur Überwachung von Massenbewegungen werden in Kapitel 5 näher behandelt und deren Anwendung wird anhand zweier Fallbeispiele veranschaulicht.

In Kapitel 6 soll in detaillierter Weise auf die Nutzung von Schadensbildern für Monitoringzwecke eingegangen werden. Dieses Kapitel stellt eine Zusammenarbeit mit meinem Kollegen Hrn. Vostrel dar, welcher sich mit dem Thema „*Nutzung von Schadensbildern zur Überwachung von Massenbewegungen – konstruktive Schadensbilder an Bauwerken*“ beschäftigt hat. Es soll die Effizienz der kombinierten Betrachtungsweise geotechnischer und konstruktiver Schadensbilder als Überwachungsmethode verdeutlichen.

Ziel der Arbeit ist die Wichtigkeit der Nutzung von Schadensbildern als ergänzende Monitoringmethode zu zeigen, da hierdurch eine Möglichkeit besteht, Risiko, mögliche Schäden und Folgeschäden erheblich zu reduzieren. Durch die Arbeit wird versucht, bereits auf Schadensbilder im Anfangsstadium aufmerksam zu machen und deren Entwicklung über einen längeren Zeitraum zu überwachen, damit frühzeitig erkannt werden kann, ob ein Entgegenwirken erforderlich ist.

2 Massenbewegungen

2.1 Definition einer Massenbewegung

Um das Thema Massenbewegungen behandeln zu können, ist es zunächst erforderlich die Frage zu beantworten, was genau unter dem Begriff Massenbewegung verstanden wird. Für den Begriff der Massenbewegung finden sich in der Literatur eine Vielzahl an Definitionen. Aus diesem Grund werden im Folgenden einige für die weiteren Ausführungen als aussagekräftige zu bezeichnenden Definitionen aus der Literatur angeführt:

„Als Massenbewegungen werden all jene natürlich ablaufenden geomorphologischen¹ Prozesse im Gebirge verstanden, die folgenden Einschränkungskriterien genügen: Es handelt sich dabei um bruchlose und/oder bruchhafte hangabwärts gerichtete, schwerkraftbedingte Verlagerungen von Festgesteinsmassen und/oder Lockergesteinsmassen, bei welchen Wasser, Eis und Luft als Transportmedium vernachlässigt werden können.“ (Geologische Bundesanstalt Wien, S. 2) Es wird somit von einer Verlagerung von Locker- oder Festgestein von höherer zu tieferer Lage verursacht durch Schwerkraft und beeinflusst von anderen Effekten wie z.B. Porenwasserdrücken im Untergrund ausgegangen.

„Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man Abtragungs-, Transport- und Ablagerungsvorgänge, die auf schwach geneigten bis steilen Hängen überwiegend unter dem Einfluss der Schwerkraft erfolgen.“ (Zepp, 2002, S. 99) Diese Definition ist sehr ähnlich der zuvor angeführten Erläuterung. Auch hierbei wird wiederum die Gravitation für eine hangabwärts ausgerichtete Transportbewegung hervorgehoben.

Massenbewegungen müssen aber nicht immer durch den Einfluss der Gravitation in Bewegung gesetzt werden. So können zusätzliche Transportmedien wie Wasser, Eis oder Luft gemeinsam mit Gravitationskräften auftreten, dabei spricht man folglich von Erosion oder Massentransport.

Laut Davies (2015) repräsentieren Massenbewegungen die durch Gravitation bedingte treibende Komponente einer Erosion. Die Größenordnung von Massenbewegungen reicht von einzelnen Steinschlägen bis hin zum Versagen von ganzen Berghängen. Bei dieser Begriffsdefinition wird auf den Begriff der Erosion Bezug genommen, was

¹ Geomorphologisch: die oberflächliche Form/Gestalt der Erde betreffend

bedeutet, dass hierbei zusätzlich zur Gravitation weitere Transportmedien in Betracht gezogen werden.

Neben den angeführten Definitionen gibt es diesbezüglich unzählige weitere Begriffserklärungen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei Massenbewegungen von einem hangabwärtsausgerichteten Transport von Gesteinsmaterial gesprochen wird, bei dem die Gravitation eine bedeutende Rolle spielt. Um eine missverständliche Anwendung des Terminus Massenbewegung zu vermeiden, ist es erforderlich das Verformungsverhalten von Bewegungen über die Zeit zu berücksichtigen. Nicht jede in einem Hang auftretende Verformung bedeutet, dass es sich um eine Massenbewegung handelt. Aus diesem Grund ist es zumeist notwendig, Deformationen an einem Hang über längere Zeit zu beobachten, da erst dadurch genauere Aussagen über das zugrundeliegende Phänomen getroffen werden können. Treten über längere Zeit nur sehr geringe Verschiebungen mit abnehmender Tendenz auf, so sind diese meist das Resultat eines Konsolidierungsvorgangs². Bleiben die Deformationen über die Zeit konstant, kann es sich um eine Kriechhangbewegung (siehe Kapitel 2.2.6) handeln. Nehmen die Verschiebungen innerhalb kurzer Zeit stark zu, tritt der Fall eines Schuttstroms, einer Rutschung oder eines Bruchs ein. Die unterschiedlichen Formen von Massenbewegungen werden in Kapitel 2.2 eingehender behandelt. Abb. 1 zeigt das zeitabhängige Verformungsverhalten von Massenbewegungen.

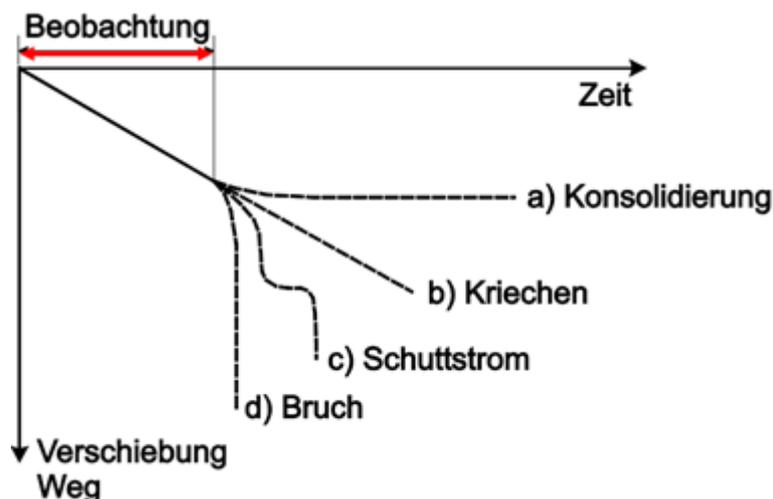


Abb. 1: Zeit-Verformungsverhalten von Massenbewegungen. Die Abszisse stellt den Beobachtungszeitraum dar, die Ordinate die aufgetretenen Verschiebungen (adaptiert aus Breymann, 2014)

² Konsolidierungsvorgang: „Wenn die Belastung auf einer hochgradig zusammendrückbaren, porösen, wassergesättigten Bodenschicht, wie beispielsweise einer Tonschicht erhöht wird, wird die Schicht zusammengedrückt und das überschüssige Wasser tritt aus der Schicht aus. (...) Mit der Zeit nimmt der Wasserüberdruck ab und der entsprechende mittlere effektive Druck in der Schicht nimmt zu.“ (Terzaghi/Peck, 1961, Seite 243)

2.2 Klassifikation von Massenbewegungen

Massenbewegungen treten in vielen unterschiedlichen Formen auf. Zur Klassifizierung von Massenbewegungen gibt es verschiedenste Ansätze. Laut Ingenieurgeologie von Prinz und Strauß (2011) erfolgt die Unterscheidung nach:

- der Art des bewegten Materials (Fels oder Bodenmasse),
- der Art des Bewegungsvorgangs (z.B. Steinschlag, Rutschung), oder
- der Bewegungsgeschwindigkeit.

Letzteres unterscheidet zwischen Bewegungen mit sehr hohen Geschwindigkeiten, welche z.B. bei Steinschlägen auftreten, und langsamen Bewegungsabläufen wie Talzuschub (siehe Kapitel 2.2.6) oder Bodenkriechen. Oftmals wird in der Literatur auch der Terminus „Rutschung“ verwendet. Dabei handelt es sich um Massenbewegungen bei denen es zu keinem Fallprozess (z.B. Fels- oder Bergsturz; siehe Kapitel 2.2.1) kommt.

In den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.7 werden die folgenden hier kurz angeführten Arten von Massenbewegungen unter Verwendung der Literaturquelle Ingenieurgeologie von Prinz und Strauß (2011) genauer klassifiziert (weitere Quellen wurden im Text angeführt):

- **Fallen**
Beschreibt einen Sturzprozess von Berg- oder Felsmassen mit sehr hohen Geschwindigkeiten. (Kapitel 2.2.1)
- **Kippen**
Fällt die Haupttrennfläche eines Kluffkörpers steil in den Hang ein, kann es durch eine Vorwärtsrotation des Kluffkörpers zum Herauskippen kommen. (Kapitel 2.2.2)
- **Gleiten**
Abwärtsbewegung einer zusammenhängenden Bodenmasse entlang einer Gleitfläche, bei welcher der Kontakt mit dem Untergrund während des gesamten Prozesses erhalten bleibt. (Kapitel 2.2.3)
- **Driften**
Eine laterale Bewegung von Fels oder Bodenmassen durch Einsinken in darunterliegende weniger kompetente Bodenschichten. (Kapitel 2.2.4)

- **Fließen**
Ein Bewegungsablauf von aufgeweichten Bodenmassen, vermischt mit Geröll und Gestein, wobei die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse einer viskosen Flüssigkeit gleicht. (Kapitel 2.2.5)
- **Kriechen**
Eine Sonderform von Fließen (mit sehr geringen Geschwindigkeiten) bei welcher es bei gleichbleibenden Spannungen und Lasteinwirkungen zu plastischen Verformungen kommt. (Kapitel 2.2.6)
- **Komplexe Rutschungstypen**
Überlagerung mehrere Formen von Hangbewegungen. (Kapitel 2.2.7)

2.2.1 Fallen

Beim Fallen handelt es sich um Bewegungen mit sehr hohen Geschwindigkeiten. Im Zuge des Sturzprozesses verlieren die Berg- oder Felsmassen den inneren Zusammenhalt und zumindest für kurze Zeit besteht kein Kontakt mehr mit dem darunter anstehenden Material. Häufig in Erscheinung tritt diese Bewegungsart im Bereich von Steilböschungen, steilen Felswänden oder tiefen Baugruben. Der Abriss tritt vorwiegend an vorgegebenen Trennflächen auf. In den meisten Fällen kommt es vor dem Abbruch zu einem erhöhten Auftreten von Steinschlägen. Bis es schließlich zum fallenden Sturzprozess kommt, bewegt sich das Material kippend, gleitend, rollend, springend oder fließend fort.

Sehr häufig treten Sturzprozesse in den jahreszeitlichen Frost-Tau-Zyklen auf, sowie als Folge von Starkniederschlägen oder Erdbeben. Eine erhöhte Zunahme derartiger Massenbewegungen ist zusätzlich im alpinen Bereich durch den Rückgang der Gletscher ersichtlich. Durch das Fehlen der seitlichen Stützwirkung durch den Gletscher kommt es zu einer Änderung des Belastungszustandes in der Felswand, was zu einer zunehmenden Rissbildung im Fels führt und somit die Entwicklung von Felsstürzen fördert.

Die unmittelbaren Folgen von Sturzprozessen reichen von Veränderungen der Landschaft bis hin zu Verschüttung von besiedelten Gebieten oder infrastrukturellen Einrichtungen. Darüber hinaus können zusätzlich schwerwiegende Schäden auftreten, wenn die enormen Massen in Wasserrückstaubecken oder Flüsse stürzen und dort zur Entstehung von Flutwellen führen, welche wiederum Überflutungen oder Vermurungen auslösen können.

Tab. 1 Unterschiedliche Bezeichnungen des Sturzprozesses in Abhängigkeit des Volumens der Absturzmasse (adaptiert aus Prinz/Strauß, 2011)

Bezeichnung	Gesamtabsturzmasse
Steinschlag	Einzelne Steine und Blöcke mit einer Gesamtabsturzmasse $< 5 \text{ m}^3$
Felssturz	Gesamtabsturzmasse von 100 bis 100.000 m^3
Kleiner Bergsturz	Gesamtabsturzmasse bis 10 Mio. m^3
Großer Bergsturz	Gesamtabsturzmasse von 10 bis 50 Mio. m^3
Sehr großer Bergsturz	Gesamtabsturzmasse $> 50 \text{ Mio. m}^3$

Bei einem Sturzprozess wird das betroffene Gebiet in drei Bereiche unterteilt. Dem sogenannten Abrissgebiet, von welchem sich Material löst, der Sturzbahn, entlang welcher das Material nach unten stürzt und dem Ablagerungsgebiet, der Bereich in welchem das Material zum Liegen kommt. In Abb. 2 (links) sind die unterschiedlichen Bereiche des Sturzgebietes schematisch dargestellt, sowie anhand einer Aufnahme (Abb. 2 rechts) eines Bergsturzes erkennbar. Der Bergsturz in Abb. 2 rechts, bei welchem 150 Mio. m^3 Material ins Tal stürzten, ereignete sich zufolge eines Erdbebens im Jahr 1348 an der Südseite des Dobratsch in Kärnten.

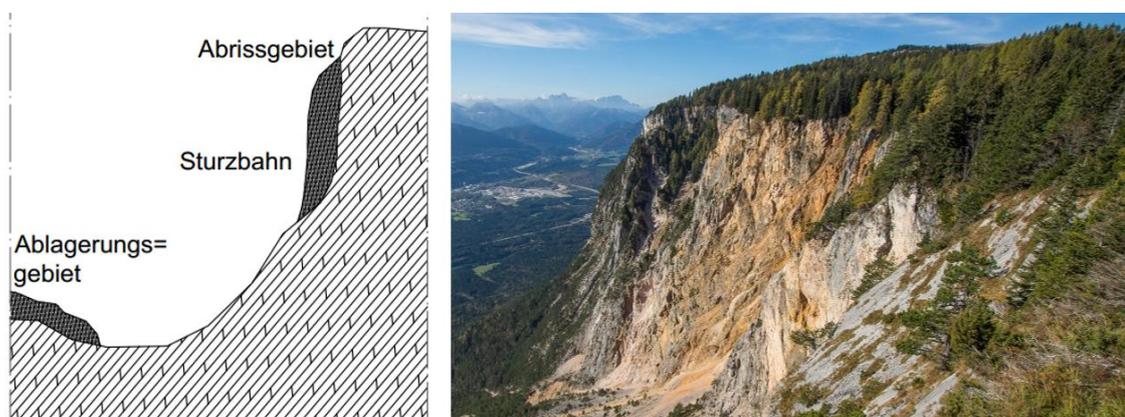


Abb. 2: links: schematische Darstellung eines Bergsturzes mit Darstellung von Abrissgebiet, Sturzbahn und Ablagerungsgebiet³; rechts: Abrissgebiet sowie Teile der Sturzbahn des Bergsturzes am Dobratsch⁴

³ Quelle: adaptiert aus <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bergsturz/1594> aufgerufen am 20.06.2017

⁴ Quelle: <http://www.woerthersee.tv/Dobratsch-Villacheralpe.html> aufgerufen am 19.03.2017

2.2.2 Kippen

An Steilwänden kann es dazu kommen, dass ganze Gebirgskomplexe zu Folge einer Vorwärtsrotation aus dem Hang herauskippen. Besonders häufig tritt dieses Versagen ein, wenn sich hartes Gestein auf weichem z.B. tonig-mergeligem Untergrund befindet. Kippt ein Kluffkörper⁷ aus dem Gestein heraus, kommt es häufig dazu, dass weitere Blöcke nachkippen, welche als Auslöser für Großhangrutschungen dienen können.

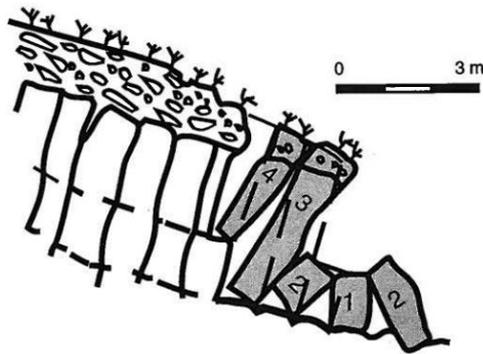


Abb. 3: links: schematische Darstellung eines Kippversagens (Multilingual Landslide Glossary, 1993); rechts: Kippversagen in Hrensko, Tschechien ⁸

Abb. 3 links zeigt die schematische Darstellung eines Kippversagens, bei dem Kluffkörper 1 vom übrigen Gestein wegrutschte und dadurch Kluffkörper 2,3 und 4 die Möglichkeit hatten herauszukippen. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit dem Dominoeffekt. In Abb. 3 rechts ersichtlich ein Kippversagen, welches in Tschechien auftrat. Mehrere Blöcke kippten aus einer Felsböschung heraus und kamen an einer darunterliegenden Straße zum Stillstand.

2.2.3 Gleiten

Beim Gleiten bewegt sich ein relativ dünner Gebirgsbereich abwärts entlang einer Gleitfläche fort, wobei die Rutschungsoberfläche oftmals ungestört bleibt und die gesamte Masse als Block gleitet oder in mehrere Schollen zerbricht. In zerklüftetem Felsgestein entsteht die Gleitung vorwiegend entlang von bestehenden Trennflächen (Kluffflächen, Schichtflächen, ...), in Böden kann sich diese Gleitfläche frei ausbilden

⁷ Kluffkörper: Gesteinskörper, der an allen Seiten durch Trennflächen vom restlichen Gestein abgegrenzt ist

⁸ Quelle: http://moveblast.de/downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/tae_2010.pdf aufgerufen am 30.03.2017

(Genske, 2006). Die Gleitfläche entsteht größtenteils in Bereichen, in welchen die Scherfestigkeit sehr gering ist und/oder ungünstige Grundwasserverhältnisse (beispielsweise Hangströmen, Wechsel zwischen durchlässigen und undurchlässigen Schichten, ...) herrschen. Im Unterschied zum Fallen bleibt beim Gleiten während des gesamten Prozesses der Kontakt mit dem Untergrund aufrecht. Je nach Art der sich ausbildenden Gleitfläche wird zwischen einer Translationsrutschung (ebene Gleitfläche), einer Rotationsrutschung (schalenförmige Gleitfläche) sowie einer kombinierten Rutschung (zusammengesetzte Gleitflächen) differenziert.

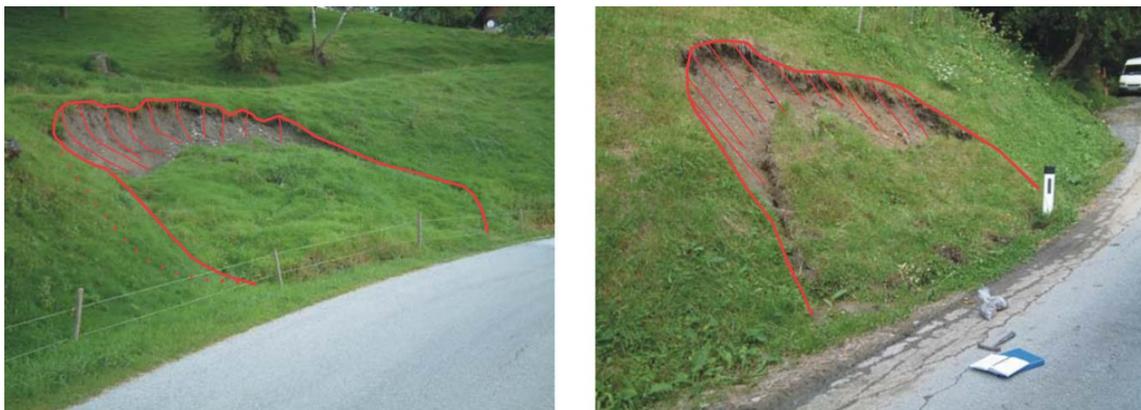


Abb. 4: links: Rotationsrutschung mit schalenförmiger Gleitfläche; rechts: Translationsrutschung mit ebener Gleitfläche ¹⁰

Translationsrutschung (ebene Gleitfläche)

Translationsrutschungen treten entlang definierter Scherflächen auf, welche meist durch einen inhomogenen Untergrundaufbau verursacht werden. Dabei kann es sich um vorgegebene Trennflächen (Schichtungen, Schieferung), Schwächezonen oder um Übergangsbereiche von kompetenten zu weniger kompetenten Gesteinen (z.B. Tonsteinschichten) handeln. Abb. 5 veranschaulicht die Verschiebung einer translatorischen Bewegung. Punkt A stellt einen Punkt oberhalb der Geländeoberkante dar, Punkt B wenig darunter und C_T den Berührungspunkt des Starrkörpers mit der Gleitfläche. Die Punkte A' , B' und C_T' sind Punkte des Verschiebungskörpers. Da bei einer translatorischen Bewegung in der Bewegungszone von der Geländeoberkante bis zur Gleitfläche eine konstante Geschwindigkeitsverteilung (v) herrscht, erfahren alle 3 Punkte die gleiche Verschiebung in Richtung parallel zur Gleitfläche. Es kommt zu keiner Rotation und der Abstand der Punkte zur Geländeoberkante bleibt vor und nach der Verschiebung unverändert.

¹⁰ Quelle: https://bfw.ac.at/050/pdf/ADAPTSIDE_ZF_fin_20111010.pdf aufgerufen am 19.03.2017

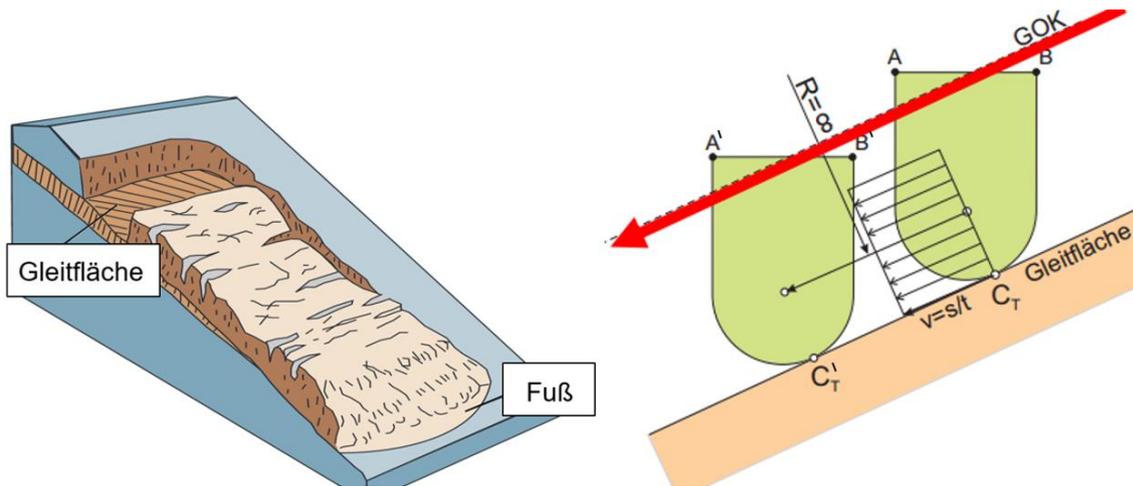


Abb. 5: links: schematische Darstellung einer Translationsrutschung¹²; rechts: translatorische Bewegung mit konstanter Geschwindigkeitsverteilung v entlang einer gekrümmten Gleitfläche (Breymann, 2014)

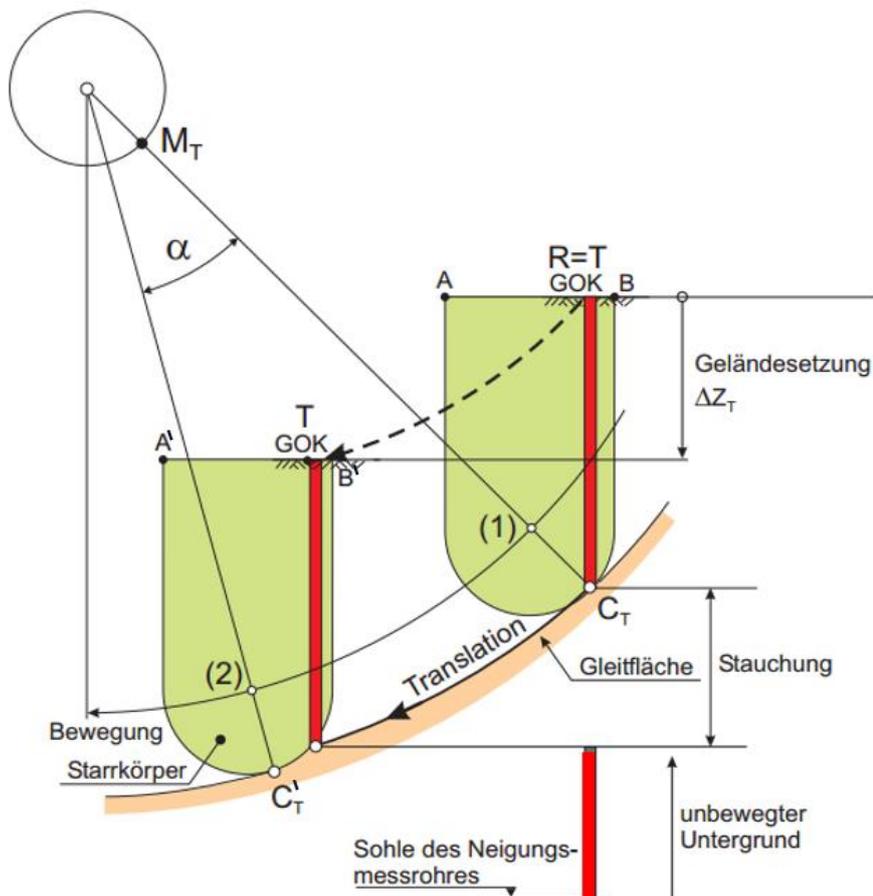


Abb. 6: Starrkörperverschiebung einer translatorischen Bewegung (Breymann, 2014)

In Abb. 6 ist die Starrkörperverschiebung einer Translationsbewegung erkennbar. Die Abbildung beinhaltet die Darstellung eines Neigungsmessrohres. Dieses bleibt bei einer ausschließlich translatorischen Bewegung auch nach der Verschiebung ungeneigt,

¹² Adaptierte Quelle: <http://noeslide.at/index.php/gravitative-massenbewegungen/rutschungen> aufgerufen am 19.03.2017

lediglich die Sohle des Messrohres liegt zufolge der Geländesetzung im verschobenen Körper weiter unten. Bei diesem Modell handelt es sich um eine sehr theoretische Betrachtung, da ein derartiges Verformungsverhalten nur durch eine praktisch unendliche Anzahl von vertikalen Scherflächen im Gleitkörper entstehen könnte.

Rotationsrutschung (schalenförmige Gleitfläche)

Rotationsrutschungen treten in homogenen Bodenmaterialien auf, wobei die Rutschungsmasse entlang einer kreis- oder schalenförmigen Gleitfläche abgleitet. Abb. 7 veranschaulicht die Verschiebung einer rotatorischen Bewegung. Punkt A stellt einen Punkt oberhalb der Geländeoberkante dar, Punkt B wenig darunter und C_R den Berührungspunkt des Starrkörpers mit der Gleitfläche. Die Punkte A' , B' und C_R' sind Punkte des Verschiebungskörpers. Da bei einer Rotationsbewegung eine lineare Geschwindigkeitsverteilung (v) herrscht, die im Bereich der Gleitfläche am größten und an der Geländeoberkante am kleinsten ist, erfahren alle 3 Punkte eine unterschiedliche Verschiebung. Der Berührungspunkt mit der Gleitfläche C_R' legt den längsten Weg zurück, gefolgt von B. Die kürzeste Verschiebung erfährt Punkt A. Dadurch kommt es zusätzlich zur Verschiebung des Starrkörpers zu einer Rotationsbewegung.

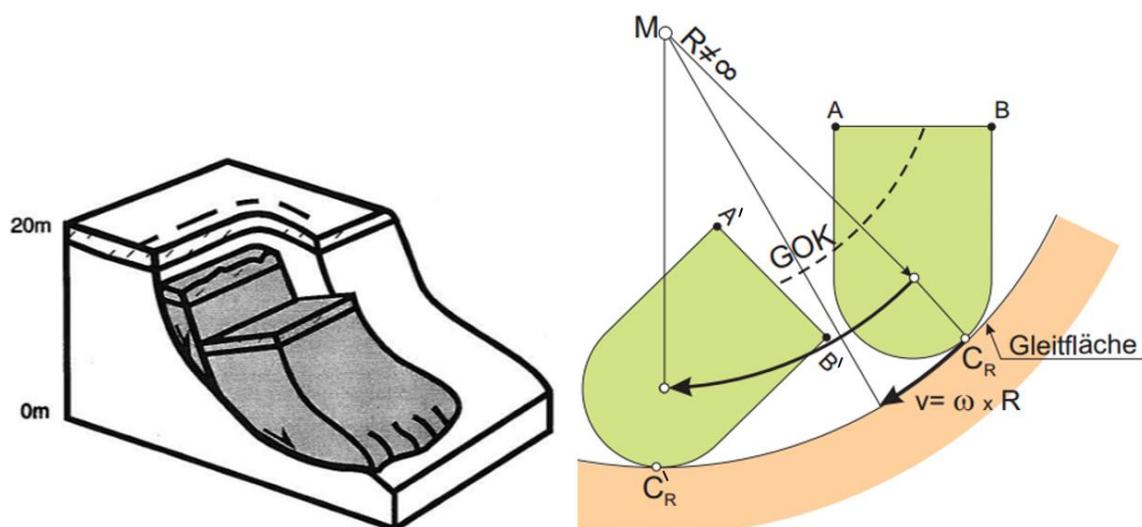


Abb. 7: links: schematische Darstellung einer Rotationsrutschung (Multilingual Landslide Glossary, 1993); rechts: rotatorische Bewegung mit linearer Geschwindigkeitsverteilung (Breymann, 2014)

In Abb. 8 ist die Starrkörperverschiebung einer Rotationsbewegung erkennbar. Die Abbildung beinhaltet die Darstellung eines Neigungsmessrohres. Dieses erfährt nach einer rotatorischen Bewegung eine Neigungsänderung.

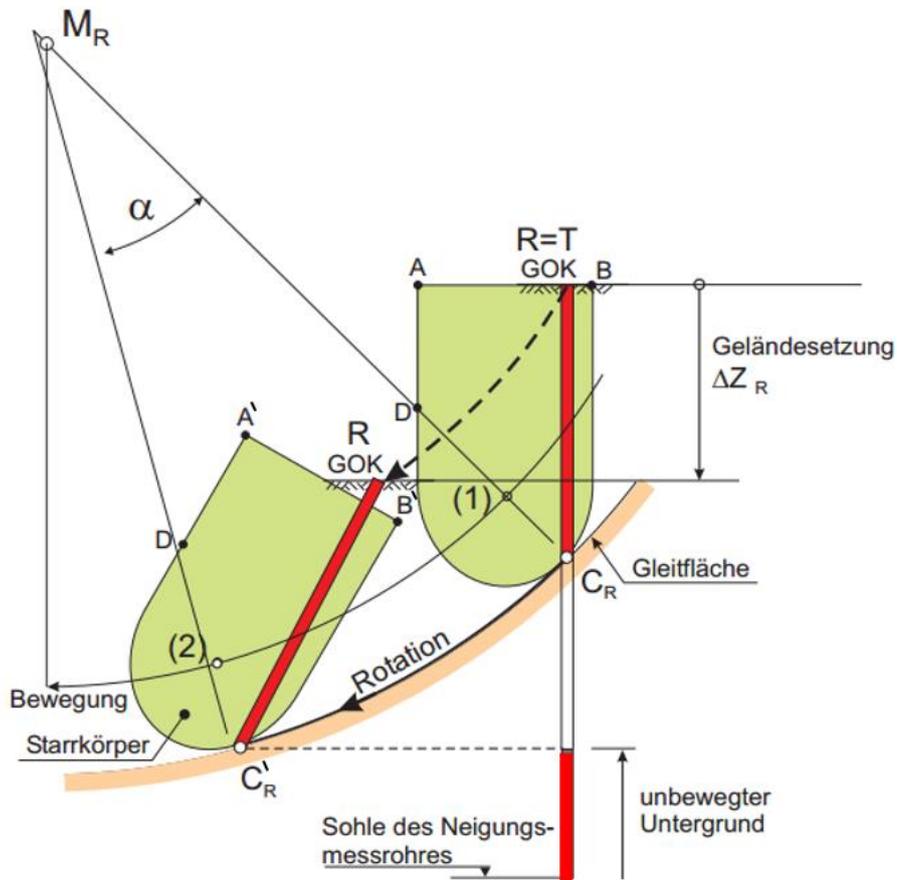


Abb. 8: Starrkörperverschiebung einer rotatorischen Bewegung (Breymann, 2014)

Kombinierte Rutschung

Bei kombinierten Rutschungen setzt sich die Gleitfläche aus ebenen und konkaven Flächen zusammen (Abb. 9). Gerade bei Großrutschungen tritt häufig die Form der kombinierten Rutschung auf.

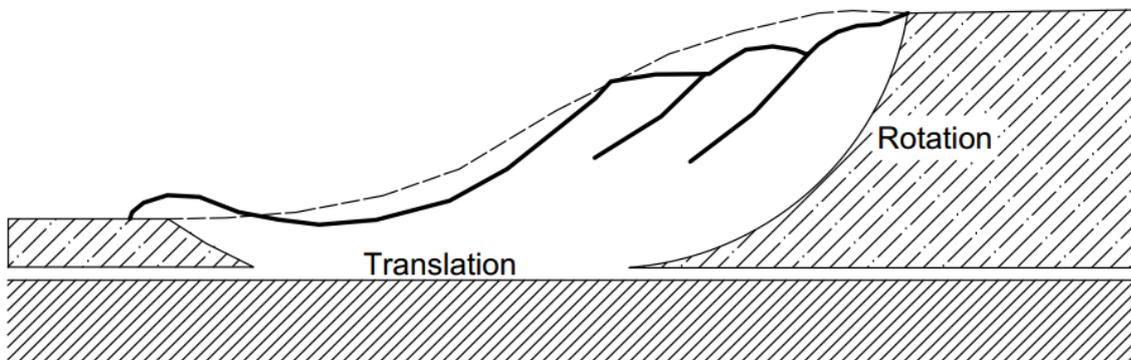


Abb. 9: Schematische Darstellung einer kombinierten Rutschung mit gekrümmter und ebener Gleitfläche (adaptiert aus Bunza, 1992)

2.2.4 Driften

Unter Driften versteht man eine laterale (seitwärts verlaufende) Bewegung von Fels oder zusammenhängenden Bodenmassen auf weniger kompetenten Schichten wobei auch ein Einsinken in die darunterliegenden Bodenschichten möglich ist. Meist tritt dies bei tonigen Untergründen auf. Die Blöcke lösen sich an vorgegeben Trennflächen vom übrigen Gestein und driften anschließend hangabwärts. Driften folgt meistens auf eine Kippbewegung (Arp et al., 2011). Abb. 10 veranschaulicht das Driften von Sandsteinblöcken auf mergeligem Untergrund. Mergel setzt sich hauptsächlich aus Tonen und Carbonaten zusammen und hat eine feinkörnige Konsistenz. Die Sandsteinblöcke sinken in die darunterliegende Mergelschicht ein und driften davon.

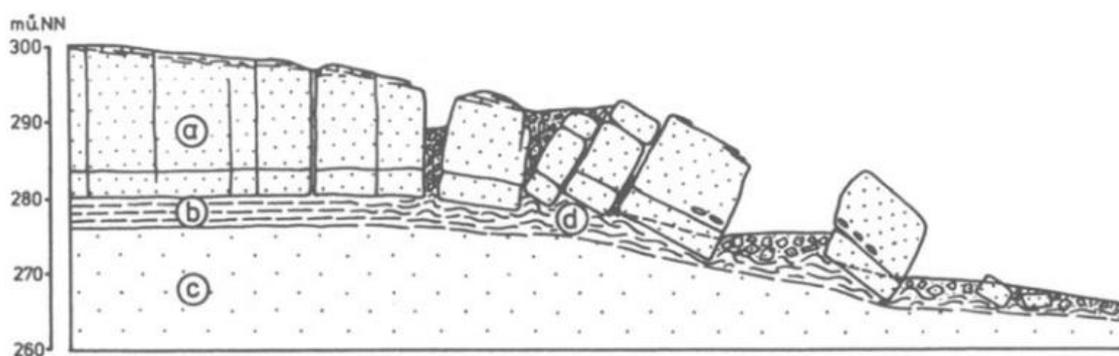


Abb. 10: Driften von Sandsteinblöcken; a = Sandsteinblöcke, b = Mergel, c = liegende Sandsteine, d = plastifizierter Mergel (Johnsen, 1984)

2.2.5 Fließen

Im Multilingual Landslide Glossary (1993) wird Fließen folgendermaßen definiert:

„Fließen (flow) ist eine räumliche, kontinuierliche Bewegung bei der Scherflächen nur kurzzeitig vorhanden, dicht angeordnet und gewöhnlich nicht erhalten sind. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht der einer viskosen Flüssigkeit.“
 (Multilingual Landslide Glossary, 1993, Kapitel 6)

Fließen ist ein Bewegungsablauf, bei dem sich aufgeweichte Bodenmassen, gemischt mit Geröll und Gestein aller Fraktionen, fortbewegen. Je nach Zusammensetzung gibt es unterschiedliche Bezeichnungen wie Schuttstrom, Schlammstrom, Erdstrom oder Mure. Schutt- oder Geröllströme haben eine durchwegs grobkörnige Konsistenz (80% grobkörnige Anteile), Schlamm- oder Erdströme bestehen zur Hälfte aus feinkörnigen Materialien wie Sand, Schluff und Ton. Mure ist die Bezeichnung für Massenbewegungen im alpinen Bereich. Abb. 11 links zeigt die schematische Darstellung einer Fließbewegung, sowie rechts eine Hangmure.



Abb. 11: links: schematische Darstellung einer Fließbewegung mit anfänglicher Gleitung (Multilingual Landslide Glossary, 1993); rechts: Hangmure ¹³

Zu fließenden Bewegungen kommt es häufig im Anschluss an Kriech- oder Gleitbewegungen, welche erforderlich sind, um die Massen erstmals vom Untergrund zu lösen und sich mit wesentlich geringeren Geschwindigkeiten als Fließbewegungen fortzubewegen. Im Allgemeinen treten Fließbewegungen in Kombination mit einem hohen Wassergehalt auf (Verhältnis Wasser : Feststoff = 1 : 1). Dieser hohe Wassergehalt ist für den fließenden Bewegungsablauf nicht immer zwingend erforderlich. Die Fließströme setzen sich aus Feststoffen, Wasser und Luft zusammen. In einigen Fällen kommt es zu einem komprimierten Luftkissen unterhalb des Fließstroms, auf welchem die bewegte Masse abgleiten und somit auch ohne hohen Wassergehalt enorme Geschwindigkeiten erreichen kann.

Auslöser von fließenden Massenbewegungen sind in vielen Fällen starke Regenfälle, zu Folge derer sich leicht verdichtetes Material ausspülen kann. Ein besonderes Risiko haben dabei entwaldete Hänge, da durch die fehlende Verwurzelung der Oberfläche die Hangstabilität geschwächt ist. Im alpinen Bereich können Frost-Tauwechsel und die Schneeschmelze Ursache für Muren sein. Darüber hinaus stellen Erdbeben und die Eruption von Vulkanen ein gewisses Gefahrenpotential für die Entstehung solcher Schuttströme dar. (Genske, 2006)

Eine Sonderform des Fließens stellt die Liquifizierung (Bodenverflüssigung) von Quicktonen dar. In Norwegen, England und Kanada kann es zum Auftreten dieses Mechanismus kommen, bei dem sensitive Tone bereits bei geringen Erschütterungen ihre innere Stabilität verlieren und sich verflüssigen. Laut Genske (2006) ist für das Phänomen der Liquifizierung keine Wasserzufuhr erforderlich, sondern ausschließlich Erschütterungen, die im Zuge von Baumaßnahmen oder Erdbeben auftreten. Solche Quicktone sind hauptsächlich junge, schwach konsolidierte unter ehemals marinen

¹³ Quelle: <https://www.meinbezirk.at/themen/mure.html> aufgerufen am 30.06.2017

Milieu abgelagerte Tone. Durch ein nachfolgendes Auftreten dieser Tonschichten über dem Meeresspiegel (z.B. Hebung Skandinaviens nach dem Abschmelzen des Eispanzers der letzten Eiszeit) und durch Regenfälle kommt es zum Auswaschen von deren Salzgehalt und dadurch zu einer Abnahme der Bindungskräfte zwischen den einzelnen Feinkornpartikeln. Wird einem solchen verflüssigten Quickton wieder Salz hinzugefügt, kommt es innerhalb von kurzer Zeit erneut zu einer Verfestigung. Zu einer derartigen Bodenverflüssigung kam es im Jahr 1893 nördlich von Trondheim, in Norwegen. Innerhalb einer halben Stunde verflüssigten sich 55 Mio. m³ eines Hanges. Im Zuge dieser Massenbewegung kam es zur Zerstörung von 22 Bauernhöfen und 111 Menschen wurden getötet. (Genske, 2006)

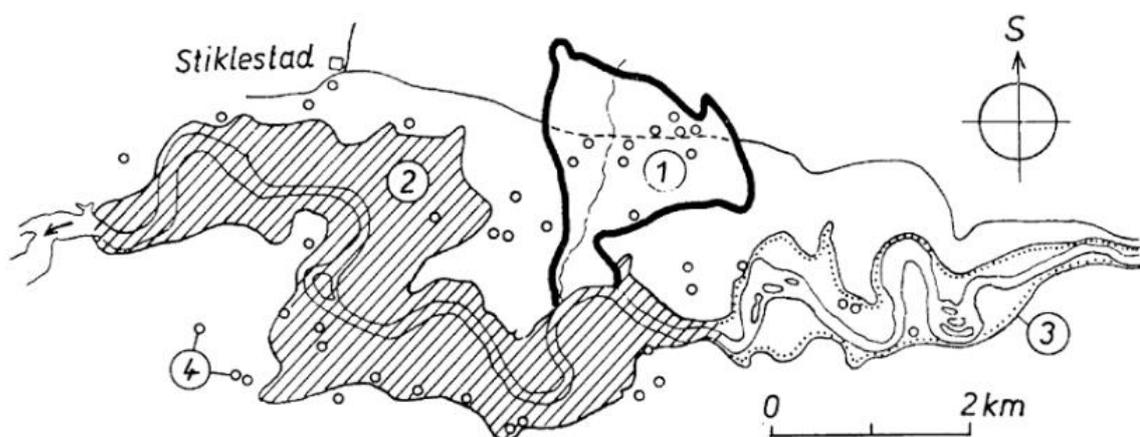


Abb. 12: Skizzierung der Massenbewegung in Vaerdalen, nördlich von Trondheim, im Jahr 1893; 1 – Bereich der Abrisskante, 2 - Vaerdalselven-Tal bedeckt mit verflüssigten Ton, 3 – temporärer See, 4 – Bauernhöfe (Mencl, Záruba, 1982)

2.2.6 Kriechen

Laut Prinz und Strauß versteht man unter Kriechen eine Sonderform des Fließens. Sowohl in Locker- als auch in Festgestein kann es zu Kriechbewegungen kommen. Dabei entstehen sehr langsam plastische Verformungen bei gleichbleibenden Spannungen und sich nicht ändernden Einwirkungen über längere Zeiträume. Die Geschwindigkeit bei Kriechbewegungen ist sehr gering im Allgemeinen im Bereich von mm bis wenigen cm/Jahr.

Sind Kriechbewegungen rein schwerkraftbedingt, kommt es zu einer konstanten Bewegungsrate. Saisonale Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen können zu einer Veränderung der Bewegungsrate führen, sodass nicht mehr von einem kontinuierlichen Kriechen ausgegangen werden kann. Bodenteilchen unterliegen bei Frost, Feuchtigkeit oder großen Temperaturänderungen einer Volumensänderung. Die Bewegungsrichtung zufolge einer Volumenzunahmen (Ausdehnung) ist orthogonal zur Geländeoberfläche. Bei einer Volumensabnahme (Schwinden) fallen die Teilchen in

Richtung Schwerkraft zurück nach unten (siehe Abb. 13 links). Dieser Dehn- und Schwindzyklus wiederholt sich ständig und bei jeder Wiederholung wird ein minimaler Weg hangabwärts zurückgelegt, wodurch sich die Kriechbewegung ergibt. (One Geology, 2017)

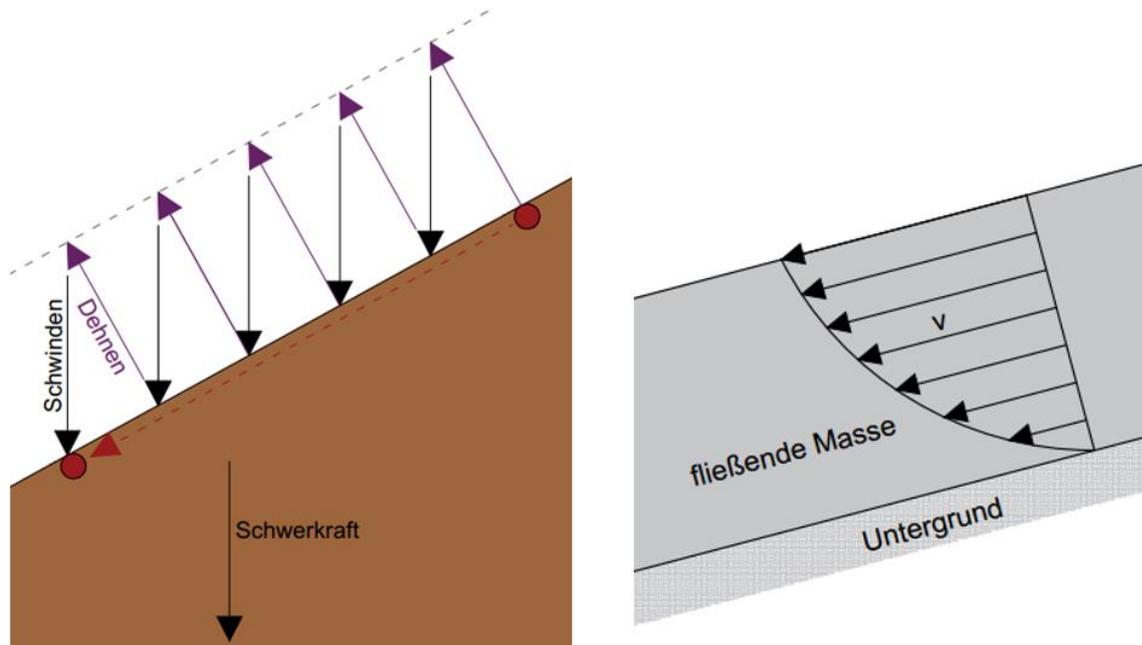


Abb. 13: links: Bewegung eines Bodenteilchens in einem Kriechhang; rechts: Geschwindigkeitsverteilung (v) einer Kriechbewegung (adaptiert aus Brandner et al., 2008)

In Abb. 13 rechts ist die Geschwindigkeitsverteilung einer Kriechbewegung erkennbar. Die Geschwindigkeit ist an der Oberfläche am größten und im Bereich der Gleitfläche herrschen beinahe keine Bewegungen. Der Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung ist quadratisch und ähnelt jener einer viskosen Flüssigkeit.

An der Oberfläche kann diese Bewegungsart an Hand von Buckelwiesen, schräggestellten Strukturen (z.B. Zäunen und Masten) oder am säbelwuchsartigen Baumwuchs erkannt werden. (Genske, 2006). Aufgrund der Krümmung eines Baumstammes können Hinweise auf Art und Alter der Bewegung gewonnen werden. (Kapitel 4.3.3)

Prinz und Strauß unterscheiden verschiedene Kriecharten. Zum einen gibt es das Tiefkriechen von Festgesteinen instabiler Talflanken, dazu zählen Kriechbewegungen von Schuttmassen, sowie Talzusub und Bergzerreißung.

Kriechbewegungen von Schuttmassen treten nahe an der Oberfläche auf und betreffen auch die oberste Auflockerungs- oder Verwitterungszone. Durch Temperaturwechsel, Änderungen im Wasserhaushalt oder Frosthörungen kommt es durch Quell- oder

Schrumpfvorgängen zu Volumsänderungen. Durch diese zusätzliche ständige Einwirkung von Schubspannungen in der oberflächennahen Zone wird Schuttstromkriechen ausgelöst. Bei dieser Art des Kriechens treten sehr geringe Bewegungsgeschwindigkeiten auf (<1 m/Jahr) und vorwiegend toniges Gestein ist davon betroffen.

Kommt es zu großräumigen, tiefreichenden Kriech- und Scherbewegungen entlang vorgegebener Gleitflächen tritt das Phänomen der Bergzerreißung und des Talzschubs auf. Auslöser für derartige zeitverzögerte Deformationen kann eine glaziale Überprägung sein. Durch den Rückzug der Gletscher verlieren die Hänge an lateraler Stabilisierung und es kommt zu langsamen horizontalen Verformungen (Genske, 2006). An der Hangmorphologie lässt sich dies durch auftretende Risse und Spalten erkennen. Die geologischen Voraussetzungen für derartige Bewegungen, in größerer Form Großhangbewegungen genannt, liefern stark zerklüftete Gebirge und ungünstig einfallende Schicht- und Schieferungsflächen. Besonders häufig tritt dies in metamorphen und feinkorndominierten Sedimentgesteinen auf. Zu Großhangbewegungen kommt es vor allem im alpinen Bereich unter gewisser geologischer Randbedingung, aber auch in tieferliegenden Regionen. Sofern mit keinem plötzlichen Versagen zu rechnen ist, stellen derartige Großhangbewegungen aufgrund der geringen Bewegungsgeschwindigkeit i.A. keine große Gefahr dar. Es gibt jedoch Fälle, bei denen sich Hänge direkt auf Siedlungen oder infrastrukturelle Einrichtungen hinbewegen bzw. Großhangbewegungen (Talzuschübe) durch Siedlungsräume und/oder Infrastrukturanlagen bebaut sind und somit in wirtschaftlicher Hinsicht relevante Auswirkungen haben können.

Als Beispiel einer Kriechhangbewegung kann die Großhangbewegung Eggerberg-Gradenbach in Kärnten angeführt werden. Ein Kriechhang mit einer Fläche von ca. $1,8$ km² bewegt sich kontinuierlich hangabwärts und verengt das darunterliegende Bachbett des Gradenbachs. Nach zahlreichen durchgeführten Sanierungsmaßnahmen wie Drainagen und Verbauungen ist die Bewegungsrate rückläufig aber ein Stillstand konnte nicht erreicht werden. Die Großhangbewegung Eggerberg-Gradenbach wird in Kapitel 5.4 ausführlicher als Fallbeispiel behandelt. Die folgende Abb. 14 zeigt zwei Fotoaufnahmen des Bewegungsbereichs.

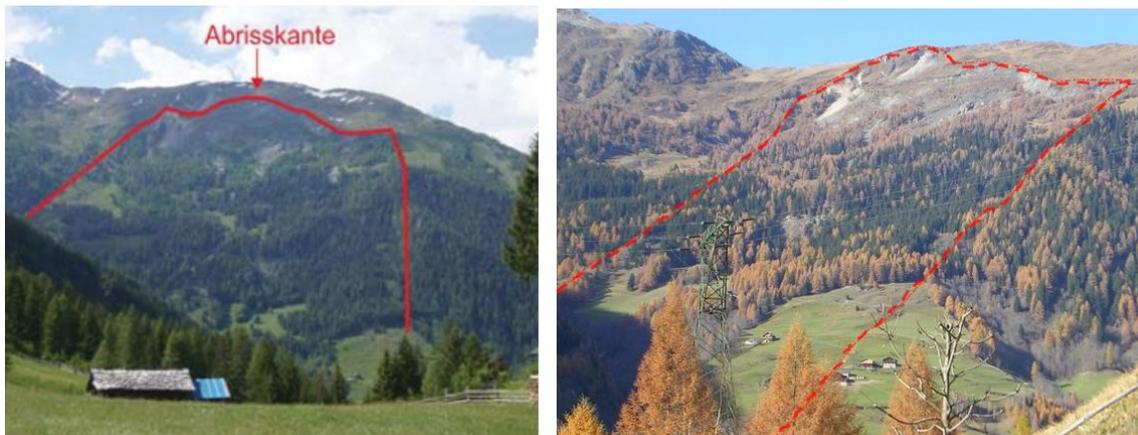


Abb. 14: Übersicht über den Bewegungsbereich der Großhangbewegung Eggerberg-Gradenbach (links: Lienhart, 2016; rechts:¹⁴)

2.2.7 Komplexe Rutschungstypen

In vielen Fällen kommt es dazu, dass sich im Zuge einer Massenbewegung mehrere Formen von Hangbewegungen zeitlich und räumlich überlagern. In derartigen Fällen wird von komplexen Rutschungstypen gesprochen. Die Untersuchung der Ursache derartiger Bewegungen stellt sich als schwierig heraus, da hierbei oftmals unterschiedliche Körperkonstellationen auftreten.

¹⁴ Quelle: <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=6810> aufgerufen am 01.07.2017

2.3 Ursachen/Auslöser von Massenbewegungen

Um Massenbewegungen zu analysieren und diesen gezielt entgegenwirken zu können ist es notwendig, die Ursachen und Auslöser zu verstehen. In den meisten Fällen lässt sich die Ursache auf geologische Bedingungen zurückführen. In jeder Böschung treten sowohl stabilisierende als auch destabilisierende Kräfte auf. Solange die stabilisierenden, rückhaltenden Kräfte größer als die destabilisierenden, treibenden Kräfte sind, befindet sich die Böschung in einem stabilen Zustand. Unterschiedliche Faktoren (zeitabhängig oder zeitunabhängig) wirken sich auf die vorhandenen Kräfte in der Böschung aus und beeinflussen deren Größe. Derartige Faktoren, wie z.B. Grundwasserspiegelschwankungen, Erdbeben, Verwitterung, usw. führen zur Entstehung neuer Kräfte bzw. einer Veränderung maßgebender Bodenparameter innerhalb einer potentiellen Gleitfläche. Überschreiten die treibenden die rückhaltenden Kräfte, so führt dies zum „Versagen der Böschung“ und eine Massenbewegung wird ausgelöst. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den meisten Fällen nicht ein einzelner Faktor die Massenbewegung auslöst, sondern verschiedene Faktoren in ungünstiger Weise zusammenwirken und ein Versagen verursachen. (McColl, 2015)

Das Verhältnis von rückhaltenden zu einwirkenden Kräften ergibt den Sicherheitsfaktor (*Factor of Safety FOS*). Zuzufolge des globalen Sicherheitskonzepts darf dieser Faktor einen bestimmten Wert nicht unterschreiten, damit die Stabilität mit ausreichender „Sicherheit“ gewährleistet ist. Die Minimalwerte sind in der nationalen ÖNORM B 4433 (Erd- und Grundbau Böschungsberechnung) gemeinsam mit Eurocode 7 geregelt. Diese Methode, bei welcher die Stabilität einer Böschung mittels eines Sicherheitsfaktors bewertet wird, zählt zu den Grenzgleichgewichtsanalysen (*limit equilibrium analysis*).

$$FOS_{\eta} = \frac{\Sigma \text{rückhaltende Kräfte}}{\Sigma \text{einwirkende Kräfte}} \geq \eta_{min}$$

Bezüglich der Stabilität einer Böschung ist die Gravitation von großer Bedeutung. Die aus dem Eigengewicht der Bodenmasse entstehende Last, lässt sich in Anteile parallel zur potentiellen Gleitfläche und in Anteile normal auf diese Fläche aufteilen. Die daraus entstehenden Normalspannungen und Schubspannungen beeinflussen die Stabilität maßgeblich. Je größer diese Normalspannungen sind, umso höher ist die Scherfestigkeit in der Gleitfläche. Die Scherfestigkeit ergibt sich zuzufolge der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung und hängt von der Kohäsion, dem Reibungswinkel und der Normalspannung ab. In indirektem Verhältnis mit der Scherfestigkeit stehen die Spannungen, die parallel zur Gleitfläche wirken (McColl, 2015). Höhere Schubspannungen verringern die Stabilität. Abb. 15 links zeigt die auftretenden Normal-

und Schubspannungen eines infiniten Bodenelements. In Abhängigkeit der Böschungsneigung β lässt sich erkennen, dass der Normalspannungsanteil bei flacheren Böschungen größer ist als bei steileren. Dies bedeutet, dass die Scherfestigkeit bei gleichen Scherparametern φ' und c' und somit auch die Stabilität einer flacheren Böschung wesentlich höher sind. In Abb. 15 rechts sind die einwirkenden Kräfte und Spannungen auf eine potentielle Gleitfläche erkennbar. Zusätzlich zu den bereits zuvor erwähnten Komponenten ist ebenfalls der Wasserdruck dargestellt, welcher normal auf die Gleitfläche wirkt und den Normalspannungsanteil des Eigengewichts abmindert, was im weiteren eine Abnahme der Scherfestigkeit indiziert.

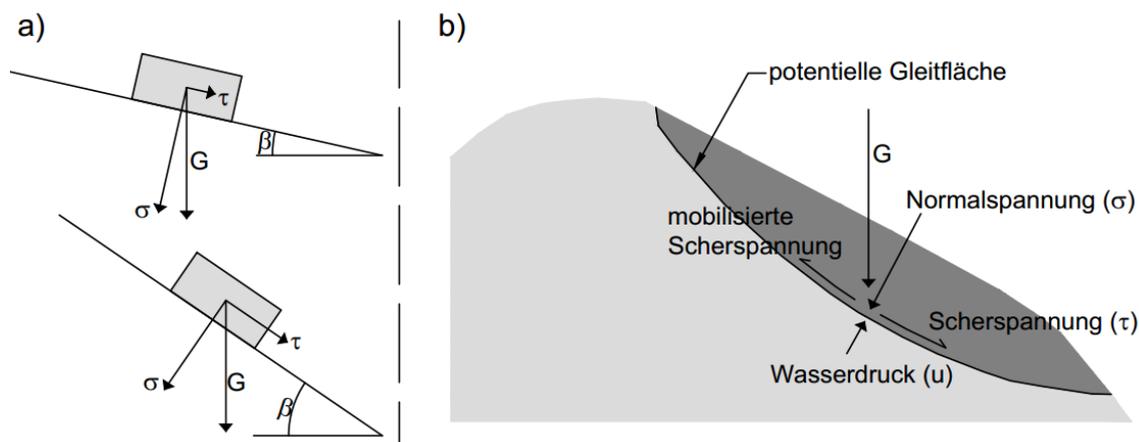


Abb. 15: Darstellung einer potentiellen Gleitfläche mit den einwirkenden Kräften und Spannungen (adaptiert aus McColl, 2015¹⁵)

Laut McColl (2015) können die unterschiedlichen Einflussfaktoren (Auslöser) in grundlegende, vorbereitende und auslösende Faktoren unterteilt werden.

- Grundlegende Faktoren beeinflussen die Böschungsfestigkeit und sind größtenteils unverändert über die Zeit,
- Vorbereitende Faktoren reduzieren die Stabilität mit zunehmender Zeit, lösen allerdings noch kein Versagen aus
- Faktoren, welche die Böschung in einen instabilen Zustand versetzen, werden zu den auslösenden Faktoren gezählt.

In der folgenden Tab. 2 sind unterschiedliche Faktoren, natürlichen oder anthropogenen Ursprungs, und deren Wirkung aufgelistet.

¹⁵ Überarbeitet von Selby (1993) unter Erlaubnis von Oxford University Press

Tab. 2 Auslösende Faktoren für Massenbewegungen (Krauter, 2001)

Faktor	Ursache natürlich	Ursache anthropogen	Wirkung
Veränderung des Bergwasserstandes, hohe Durchfeuchtung	anomale Niederschläge, Frostverschluss, Schneeschmelze	Defekte in Wasserleitungen oder Kanalisation, gestörte Drainage, Aufstau	Konsistenzänderung, Plastifizierung von Kluftfüllungen, Strömungsdruck, Kluftwasserdruck, Auftrieb, Verwitterung, Hydrolyse
Erschütterungen	Erdbeben	Sprengungen, Ramm- und Bohrarbeiten, rollender Verkehr	Porenwasserüberdruck, Thixotropie-Effekt, Auflockerung, Spannungsänderung
Belastungsänderungen	anomale Niederschläge, Schmelzwasser, Frostverschluss	Aufschüttungen, Kippen, Halden, Bauwerke	Spannungsänderung
Änderung der äußeren Form	Unterspülung	Hanganschnitte und Hangeinschnitte	Spannungsänderung

2.3.1 Geologie

Die Geologie kann als Ur-Ursache für Massenbewegungen genannt werden und bildet somit die Voraussetzung, dass es in geneigtem Gelände zu Bewegungsvorgängen kommen kann. Da sich diese Masterarbeit auf geotechnische Fragestellungen bei Massenbewegungen konzentriert und keine geologischen Expertenmeinungen beinhaltet, wird auf dieses Kapitel nur oberflächlich eingegangen und auf weiterführende Literatur verwiesen.

Zufolge Prinz und Strauß (2011) spielen geologische Strukturen und Grenzflächen vor allem für das Auftreten von Großrutschungen eine wichtige Rolle. Es ist von großer Bedeutung welche Gesteinsvorkommen im Boden auftreten. Kommen wasserdurchlässige Schichten (Kies, Sand, Basalt, Sandstein, ...) auf tonigem oder mergeligem Untergrund vor, ist mit einer erhöhten Rutschungsanfälligkeit zu rechnen. Treten mächtige tonige oder schluffige Schichten auf, so ist ebenfalls mit erhöhter Gefahr einer Destabilisierung zu rechnen, da diese Materialien relativ niedrige Scherparameter aufweisen. Im Festgestein sind Schicht- und Schieferungsflächen, sowie Klüfte, Verwerfungen und Störungszonen bedeutend, da diese Flächen, sofern sie ungünstig einfallen, als Abrissflächen oder Gleitflächen wirken können. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Stabilität von Hängen durch tiefgründige Verwitterung oder Verkarstungs- und Versturzmassen geschwächt sein können und somit die Voraussetzungen für ein Versagen gegeben sind. Für detailliertere Informationen zu rutschungsanfälligen Schichten wird auf Kapitel 15.6 in Ingenieurgeologie von Prinz und Strauß (2011) verwiesen.

2.3.2 Veränderung der hydrogeologischen Bedingungen

Wasser, auftretend in Form von Niederschlag, Schmelzwasser oder Bergwasser, ist einer der hauptauslösenden Faktoren für Massenbewegungen. Dabei wird laut Prinz und Strauß (2011) zwischen verschiedenen hydrologischen Einflussgrößen unterschieden, welche teils auf natürliche Weise und teils auf anthropogene Weise verursacht werden:

- Grundwasserverhältnisse (gespanntes Grundwasser, Strömungsdruck)
- Niederschläge, Schneeschmelze
- Wasserverluste durch Leitungsecks, Kanalisation
- Bewässerung
- Rapide Stauzielabsenkung in Wasserspeicher

Wasser im Boden kann sehr vielfältige Auswirkungen haben. Starke, langanhaltende Niederschläge dringen in die Poren des Lockergesteins ein und verändern den Grundwasserspiegel und den Porenwasserdruck und können auch Strömungsdrücke verursachen was zu einer Abnahme der Standsicherheit führt. Durch den Porenwasserdruck werden die effektiven Korn zu Korn Spannungen und somit auch die Festigkeit des Bodens reduziert.

Erhöhte Rutschungsanfälligkeit herrscht bei Böden mit einem hohen Anteil an Tonmineralien. Zuzolge Durchnässung quellen die Tonminerale auf, es kann zu einer Reduktion der Scherfestigkeit und somit zu einem erhöhten Rutschungsrisiko kommen.

Im Festgestein dringt das Wasser in Felsklüfte ein und führt zu einer Veränderung des Bergwasserspiegels. Dieses Kluftwasser führt zu einer Destabilisierung, da durch den erzeugten hydrostatischen Druck, sowie durch den Strömungsdruck, die Normalkraft in der Kluft reduziert wird und somit auch die Scherfestigkeit verringert wird. (Rapp, 2011). Laut Prinz und Strauß (2011) reicht bereits ein dünner Wasserfilm auf einer vorgegebenen potentiellen Gleitfläche aus, um die Scherfestigkeit wesentlich abzumindern.

Gesättigte Hänge zeigen im oberen Hangbereich eine Lastzunahme durch Wasser auf, welches rutschungsfördernd wirkt. Im unterem Hangbereich ist Grundwasser kritisch, da es durch die Auftriebswirkung die stabilisierenden Kräfte abmindert.

Eine weitere wesentliche Eigenschaft des Wassers darf in Bezug auf Massenbewegungen nicht unberücksichtigt bleiben: die Wirkung des Bodenfrostes. Beim Übergang vom Aggregatzustand flüssig auf fest vergrößert sich das Volumen von

Wasser um ca. 10%. Tritt dieses Phänomen in Klüften und Rissen von Festgestein auf, kommt es infolge der Sprengwirkung des Wassers zur Entstehung neuer Risse. Je stärker das Gestein zerklüftet ist, desto geringer ist die Stabilität. Instabile Gebirgsbereiche sind teilweise das Resultat dieses Phänomens, welches während der Eiszeit besonders häufig aufgetreten ist. Durch die dicken Eisschichten reichte der Frost bis tief ins Innere der Gebirge und verursachte eine mechanische Zerlegung des Gesteins. (Prinz/Strauß, 2011)

Zu einer Veränderung der hydrogeologischen Bedingungen kommt es außerdem bei einer rapiden Stausee- oder Flussabsenkung. Laut Kieffer (2016) kommt es in angrenzenden nicht durchlässigen Schichten dazu, dass der Boden zufolge der Absenkung nicht ausreichend schnell entwässern kann, vor allem wenn es sich um Böden mit hohem Tongehalt handelt. Hierdurch entstehen Porenwasserüberdrücke wie auch Strömungsdrücke, welche ein Versagen auslösen können. Besteht der angrenzende Boden aus stärker durchlässigem Material, können in Abhängigkeit der Absenkgeschwindigkeit und der Durchlässigkeit k_f des Untergrundes vorübergehend Grundwasserströmungen entstehen, welche die Hangstabilität ebenfalls verringern. Derartige plötzliche Stauzielabsenkungen haben bereits mehrfach Massenbewegungen ausgelöst. Eines der wohl schlimmsten derartigen Ereignisse geschah im Jahr 1963 im Vajont-Tal im Norden Italiens. Aufgrund einer Stauzieländerung trat ein Hangversagen ein und 250 Mio. m³ Gestein rutschten plötzlich in den Speicher. (Genske, 2006)



Abb. 16: Aufnahme der Katastrophe in Vajont unmittelbar nach der Rutschung im Jahr 1963.¹⁶

¹⁶ Quelle: <http://thomil.blogspot.co.at/2013/07/vom-tod-einer-stadt-die-vergessene.html> aufgerufen am 21.06.2017

Abb. 17 veranschaulicht eine rapide Stauzielabsenkung mit Darstellung des Grundwasserspiegels vor und nach der Absenkung.

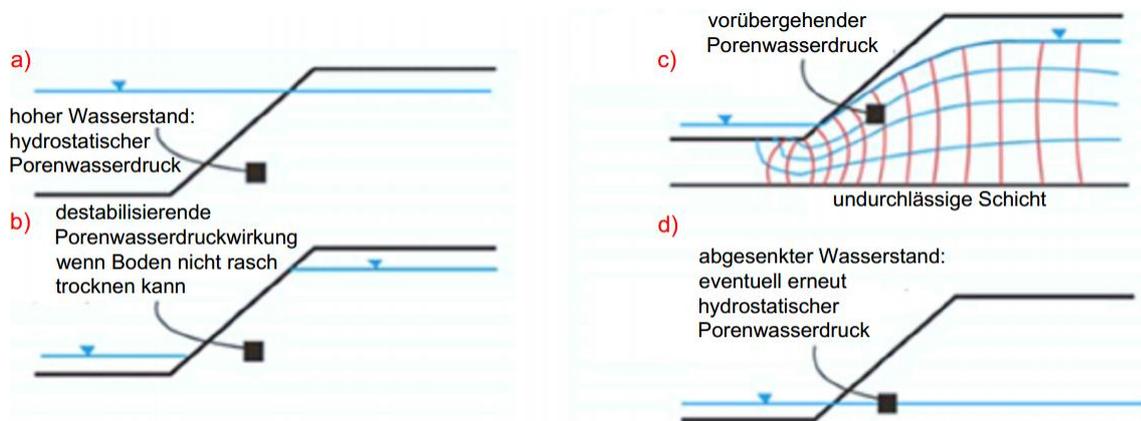


Abb. 17: Rapide Stauzielabsenkung: (a) vor der Absenkung; (b) nach der Absenkung mit angrenzendem undurchlässigen Boden; (c) nach der Absenkung: vorübergehender Porenwasserdruck kann mit Fließnetz ermittelt werden; (d) hydrostatischer Porenwasserdruck (adaptiert aus Kieffer, 2016)

2.3.3 Vegetation

Veränderungen der Vegetation können Massenbewegungen auslösen. Werden Bäume oder Pflanzen an Hängen und Böschungen entfernt, kann sich dies negativ auf die Böschungstabilität auswirken. Durch das Fehlen des Baumbestandes ergibt sich eine Veränderung der Evatranspiration und es erhöht sich i.A. auch die Erosionsproblematik. Vor allem das Abholzen großer Flächen (Kahlschläge) kann sich problematisch auswirken. Bäume und Pflanzen verwurzeln sich im Boden und erhöhen dadurch die Kohäsion. Werden diese entfernt, nimmt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Bodenerosion wiederum zu. Außerdem benötigen Pflanzen für das Wachstum einen bestimmten Wasserbedarf. Wenn diese entfernt werden, wird das von den zuvor bestehenden Pflanzen benötigte Wasser nicht mehr verbraucht und es kommt zu einer Veränderung des Wasserhaushalts im Boden. (Prinz, 2011)

2.3.4 Veränderung von Hangneigungen

Die Veränderung der Hangneigung kann einerseits die Folge von natürlichen Prozessen sein, andererseits aber auch durch anthropogene Einflüsse verursacht werden. Auf natürliche Weise können Veränderungen durch fluviale Erosion oder durch tektonische Hebungen erfolgen. Bei der fluvialen Erosion (Seitenerosion) wird der Unterwasserbereich des Ufers unterschritten und die Böschung instabil. (Freie Universität Berlin, 2017). Der Mensch verursacht Veränderungen vor allem im Zuge von baulichen Tätigkeiten. Für den Bau von infrastrukturellen Anlagen (Straßen, Eisenbahnstrecken, ...) sind oftmals Einschnitte am Hangfuß erforderlich, welche eine

Erhöhung der Böschungsneigung bewirken und somit zu höheren Schubspannungen führen. (Prinz/Strauß, 2011). Wie weit eine Erhöhung der Hangneigung möglich ist, ohne dass es zu einem Böschungsversagen kommt, hängt vom Böschungsmaterial und dessen Festigkeitsparameter ab.

Tab. 3 maximale Hangneigung in Abhängigkeit des Hangmaterials (adaptiert aus Niederschick, 2007)

Hangmaterial	Hangneigung [°]
Felsblockmaterial, augenscheinlich kohäsionslos aber mit hoher Lagerungsdichte	43 – 45
Material wie oben aber geringe Lagerungsdichte	33 – 38
Aluviale Hänge (stark gemischte Korngröße), in denen ein hoher Porenwasserdruck herrschen kann	25 – 38
Sandiges Material	19 – 21
Tone	8 - 11

2.3.5 Änderung der Lastverteilung

Eine Änderung der Lastverteilung entsteht häufig durch zusätzliche Belastungen am Hang durch die Errichtung von Bauwerken, ist aber auch durch eine Entlastung des Hangfußes möglich. Die Auflasten von Bauwerken an der Hangkrone führen zu einer Veränderung der Spannungsverteilung im Hang. Befindet sich eine Böschung neben einem Staubecken und kommt es zum Einstau, so wird zufolge der entstehenden Auftriebskraft der Böschungsfuß entlastet. Durch diese Entlastung wird die Scherfestigkeit reduziert und die Stabilität nimmt ab. (Prinz/Strauß, 2011). Laut Rapp (2011) können zusätzliche Auflasten auf Böschungen im Locker- wie auch im Festgestein zu einer Überschreitung der aufnehmbaren Scherkräfte führen. Im feinkörnigen Lockergestein hat eine schnelle Lastaufbringung Auswirkungen auf den Porenwasserdruck. Es kann vorübergehend zu einem Porenwasserüberdruck kommen. Bis dieser wieder abgebaut ist, kann die Scherfestigkeit der Böschung deutlich reduziert werden.

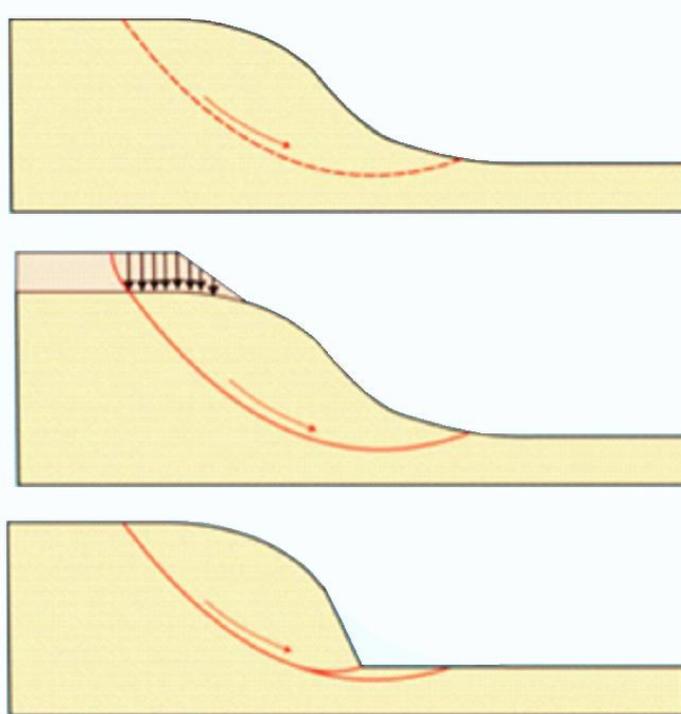


Abb. 18: Darstellung unterschiedlicher Lastverteilungen: Oben: Originale Hanggeometrie; Mitte: Destabilisierung durch zusätzliche Auflast; Unten: Destabilisierung durch Versteilung zufolge Einschnitt am Hangfuß (Kieffer, 2016)

Auch natürliche Ursachen können zu einer Lastveränderung führen. So kann zum Beispiel Gletscherschmelze dazu führen, dass die stabilisierenden seitlich einwirkenden Kräfte der Eisschicht verschwinden und es dadurch zu einer Änderung des Spannungszustandes im Hang kommt.

2.3.6 Erdbeben / Erschütterungen

Laut Genske (2006) entstehen durch Erdbeben oder durch Erschütterungen aus Baumaßnahmen (Sprengungen, Maschinen, ...) dynamische Einwirkungen, die Massenbewegungen auslösen können.

Durch die Erschütterung kann es in Festgesteinen zu Veränderungen des Bergwasserspiegels kommen und bei gesättigten Lockergesteinsböden kann im ungünstigsten Fall eine Bodenverflüssigung eintreten (Rapp, 2011).

Das Versagen kann somit einerseits durch eine Veränderung des Porenwasserdrucks zufolge der Erschütterung ausgelöst werden, andererseits entsteht durch die dynamische Einwirkung eine plötzliche Bodenbeschleunigung, welche zur unmittelbaren Bildung von Schubspannungen führt. Überschreiten diese Schubspannungen die mobilisierte Scherfestigkeit, kann es zum Eintreten eines Versagens kommen. (McColl, 2015)

Eine besondere Gefahr stellen Erdbeben oder sonstige Erschütterungen für Kriechhänge dar, da durch die Vibration die Bewegung beschleunigt oder ausgelöst werden kann. (Prinz/Strauß, 2011)

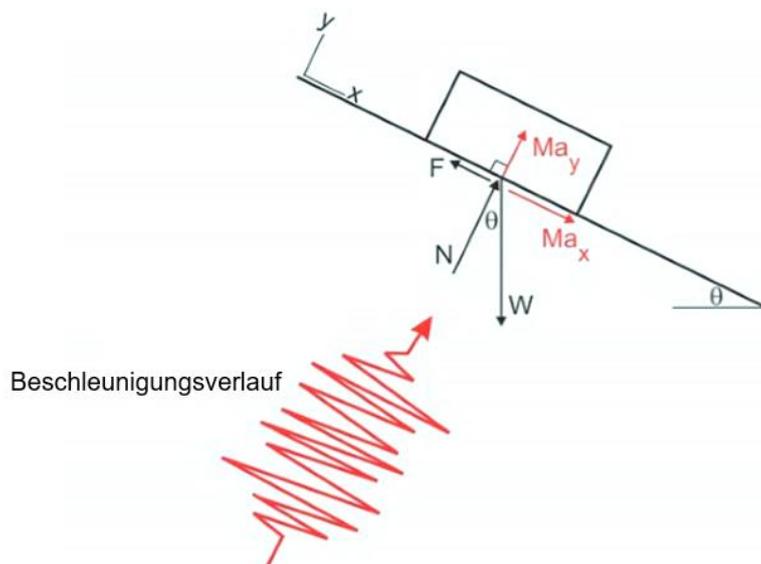


Abb. 19: Einwirkende Kräfte auf ein infinites Bodenelement auf einer geneigten Fläche ausgelöst durch ein Erdbeben (Kieffer, 2016)

In Abb. 19 ist ein infinites Bodenelement einer Böschung mit auftretenden Kräften unter Einwirkung eines Erdbebens dargestellt. Im Falle eines Erdbebens wirkt die Erdbebenbeschleunigung als Belastung auf das Element ein, wodurch es zur Entstehung zusätzlicher Kräfte kommt (Ma_x und Ma_y in der Abbildung). Die Komponente in X-Richtung kann dabei die Standsicherheit einer Böschung erheblich beeinträchtigen. (Kolymbas, 2011)

3 Grenzzustände laut EUROCODE 7

Der Eurocode 7 (2014) ist die europäische Norm für Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Er beinhaltet die erforderlichen Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, um Versagen von Bauwerken oder Baugrund zu vermeiden. Im folgenden Kapitel sind die einzelnen Punkte des Eurocodes 7 zufolge der aktuellsten Ausgabe ÖNORM EN 1997-1, Teil 1 (Ausgabe: 2014-11-15) angeführt. Alle Versagensmechanismen, welche im engeren Zusammenhang mit Massenbewegungen stehen, sind dabei ausführlicher dargelegt. Zusätzlich zum Eurocode 7 verwendete Quellen sind im Textverlauf angeführt.

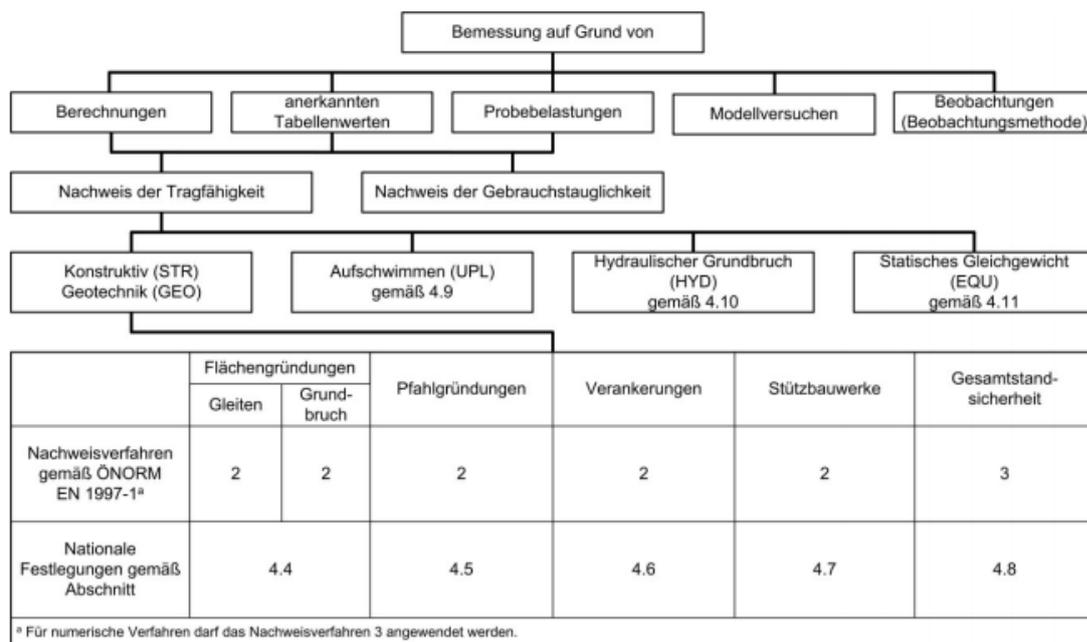


Abb. 20: Nachweisführung gemäß ÖNORM B 1997-1-1 (ÖN B 1997, 2013)

Für die Führung der Nachweise sind die repräsentativen Werte für Beanspruchung und Widerstand mit den Teilsicherheitsbeiwerten, welche in den nationalen Anhängen des Eurocodes definiert sind, zu beaufschlagen, um die benötigten Bemessungswerte zu erhalten.

3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Um die Tragfähigkeit eines Bauwerks oder des Baugrunds normgemäß nachzuweisen, dürfen die folgenden im EC 7 definierten Grenzzustände nicht überschritten werden:

- *„EQU: Verlust der Lagesicherheit des als starrer Körper angesehenen Bauwerks oder des Baugrunds, wobei die Festigkeiten der Baustoffe und des Baugrunds für den Widerstand nicht entscheidend sind“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 2.4.7)*

Damit die Lagesicherheit gewährleistet ist, muss der folgende Nachweis erfüllt sein:

$$E_{dst;d} \leq E_{stb;d} + T_d \quad (1)$$

$E_{dst;d}$ Bemessungswert der destabilisierenden Beanspruchung

$E_{stb;d}$ Bemessungswert der stabilisierenden Beanspruchung

T_d Bemessungswert des gesamten Scherwiderstandes in einer Fuge zwischen Baugrund und Bauwerk

- *„STR: inneres Versagen oder sehr große Verformung des Bauwerks oder seiner Bauteile, einschließlich der Fundamente, Pfähle, Kellerwände usw., wobei die Festigkeit der Baustoffe für den Widerstand entscheidend ist“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 2.4.7)*

$$E_d \leq R_d \quad (2)$$

E_d Bemessungswert der Beanspruchung

R_d Bemessungswert des Widerstandes gegen eine Einwirkung

- *„GEO: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrunds, wobei die Festigkeit der Locker- und Festgesteine für den Widerstand entscheidend ist“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 2.4.7)*

$$E_d \leq R_d \quad (3)$$

E_d Bemessungswert der Beanspruchung

R_d Bemessungswert des Widerstandes gegen eine Einwirkung

- *„UPL: Verlust der Lagesicherheit des Bauwerks oder Baugrunds infolge Aufschwimmens (Auftrieb) oder anderer vertikaler Einwirkungen.*

Der Nachweis gegen Aufschwimmen (UPL) muss so geführt werden, dass der Bemessungswert der Kombination von destabilisierenden ständigen und

veränderlichen vertikalen Einwirkungen ($V_{dst,d}$) kleiner oder gleich der Summe des Bemessungswertes der stabilisierenden ständigen vertikalen Einwirkungen ($G_{stb,d}$) und gegebenenfalls des Bemessungswertes eines zusätzlichen Widerstandes gegen Aufschwimmen (R_d) ist.“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 2.4.7)

$$V_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad (4)$$

$$V_{dst,d} = G_{dst,d} + Q_{dst,d} \quad (5)$$

$V_{dst,d}$	Bemessungswert der ständigen und veränderlichen destabilisierenden vertikalen Einwirkung
$G_{stb,d}$	Bemessungswert der ständigen vertikalen stabilisierenden Einwirkung
$G_{dst,d}$	Bemessungswert der ständigen vertikalen destabilisierenden Einwirkung
R_d	Bemessungswert des zusätzlichen Auftriebswiderstands
$Q_{dst,d}$	Bemessungswert der veränderlichen destabilisierenden vertikalen Einwirkungen

- „HYD: hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping im Boden, verursacht durch Strömungsgradienten“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 2.4.7)

$$u_{dst,d} \leq \sigma_{stb,d} \quad (6)$$

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb,d} \quad (7)$$

$u_{dst,d}$	Bemessungswert des destabilisierenden gesamten Porenwasserdruckes
$\sigma_{stb,d}$	Bemessungswert der stabilisierenden totalen Vertikalspannung
$S_{dst,d}$	Bemessungswert einer destabilisierenden Strömungskraft im Boden
$G'_{stb,d}$	Bemessungswert der ständigen stabilisierenden vertikalen Einwirkungen beim Nachweis der hydraulischen Grundbruchsicherheit

3.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Um die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks oder eines Baugrunds zu gewährleisten, muss laut Eurocode 7 der folgende Nachweis erfüllt sein:

$$E_d \leq C_d \quad (8)$$

E_d Bemessungswert der Beanspruchungen

C_d Bemessungswert der Gebrauchstauglichkeitskriterien

Sofern die Teilsicherheitsbeiwerte in den nationalen Anhängen nicht anders festgelegt sind, sind die Beiwerte beim Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit in der Regel gleich 1,0.

3.3 Schüttung, Wasserhaltung

Kapitel 5 der ÖNORM EN 1997 (2014) beinhaltet die erforderlichen Bedingungen bezüglich Schüttungen und Wasserhaltung. Diese Fälle treten auf wenn Schüttungen unter Fundamenten und Sohlplatten notwendig sind, Hinterfüllungen bei Baugruben und Stützbauwerken erforderlich sind oder Geländeaufhöhungen sowie Aufschüttungen für kleine Erddämme und infrastrukturelle Einrichtungen umgesetzt werden. Vor allem zuletzt angeführte, ergo Aufhöhungen und Aufschüttungen, stehen im Kontext mit Massenbewegungen, da hierbei künstlich angelegte Böschungen entstehen und deren Standsicherheit sichergestellt werden muss. Der dazu verwendete Baugrund muss imstande sein allen äußeren Einwirkungen, sowohl umweltbedingten als auch funktionellen Ursprungs, zu widerstehen. Bei der Wahl des Schüttmaterials, des Einbau- und Verdichtungsverfahrens sowie deren Überprüfung sind genaue Kriterien einzuhalten.

Da Wasser in unterschiedlichen Formen vorkommend der wohl häufigste Auslöser von Massenbewegungen ist, ist das Thema Wasserhaltung von großer Bedeutung. Laut ÖNORM EN 1997 sind Ergebnisse einer geotechnischen oder hydrogeologischen Untersuchung erforderlich, bevor Maßnahmen, welche die Wasserverhältnisse bzw. Porenwasserdrücke im Boden verändern, durchgeführt werden können.

Das Entziehen von Wasser aus dem Untergrund kann zufolge ÖNORM EN 1997 durch offene Wasserhaltung, Abpumpen, Flachbrunnen, gebohrten Brunnen oder Elektroosmose erfolgen. Eine Wasserhaltung ist dabei so zu planen, dass es möglich ist die geplanten Wasserspiegelhöhen und Porenwasserdrücke ohne größere Schwankungen einzuhalten. Vor allem bei wasserempfindlichen Böden (z.B. lockerer

Sand) ist darauf zu achten, dass es bei einem Anstieg des Wasserspiegels auf die ursprüngliche Höhe nicht zu Erscheinungen wie Sackungen kommt.

Um die Wirksamkeit einer Wasserhaltung zu gewährleisten, müssen Messungen der Piezometerhöhen, Porenwasserdrücke und Bodenbewegungen durchgeführt und regelmäßig kontrolliert werden.

3.4 Anker

In ÖNORM EN 1997 ist die Bemessung von Kurzzeit- und Dauerankern geregelt. Deren Einsatz erfolgt um zum Beispiel ein Stützbauwerk zu verankern, die Standsicherheit von Böschungen, Einschnitten und Tunneln zu erreichen, den auf Tragwerke wirkenden Auftriebskräften zu widerstehen, das Abrutschen oder Kippen zu verhindern oder zur Verankerung von Spannseilen. Dabei wird eine Zugkraft in eine tragfähige Boden- oder Felsschicht eingeleitet.

Im folgenden Absatz sind die erforderlichen Nachweise laut der Norm angeführt:

„(1)P Folgende Grenzzustände (sowohl einzeln als auch in Kombination) sind bei allen Ankern nachzuweisen:

- *Materialversagen des Zuggliedes oder Ankerkopfes infolge der angewandten Spannungen;*
- *Versagen der Verbindung zwischen dem Zugglied und dem Verpresskörper/ dem lastaufnehmenden Element im Boden;*
- *Verlust der Ankerkraft oder übermäßiges Nachgeben des Ankerkopfes durch Kriechen und Entspannung;*
- *Versagen oder übermäßige Verformung von Ankerteilen infolge der angesetzten Ankerkraft;*
- *Verlust der Geländebruchsicherheit des verankerten Bodens samt Stützbauwerk (siehe Abschnitt 11);*
- *Grenzzustände in gestützten oder angrenzenden Bauteilen, einschließlich derjenigen, die sich aus Vorspannkräften ergeben;*
- *Instabilität oder übermäßige Verformung eines Bodenbereichs, in den die Zugkräfte aus einer Ankergruppe übertragen werden sollen;*
- *Versagen des Verbundes zwischen dem Verpresskörper/ lastaufnehmenden Element und dem Baugrund*

(2)P Neben den in 8.2(1)P aufgeführten Grenzzuständen sind die folgenden Grenzzustände (sowohl einzeln als auch in Kombination) bei allen Verpressankern nachzuweisen:

- *Versagen des Verbundes zwischen Verpresskörper und Baugrund;*
- *Versagen des Verbundes an den Kontaktflächen zwischen Zugglied, Umhüllung und Verpressmörtel;*
- *Versagen des Verbundes zwischen Zugglied und Verpressmörtel.*

(3)P Bei Ankergruppen sollte die kritischste Gleitfläche nachgewiesen werden.“
(ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 8.2)

Bei der Bemessung und Konstruktion von Ankern ist eine Untersuchungs- und Eignungsprüfung durchzuführen, damit die Anker tatsächlich die geforderte Wirkung haben. Zusätzlich ist der Untergrund, in dem die Zugkräfte eingeleitet werden, in die Baugrunderkundung miteinzubeziehen. Befinden sich mehrere Anker nebeneinander, ist darauf zu achten, dass es zu keinen ungünstigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Ankern kommt.

Im Zusammenhang mit Massenbewegungen werden Anker vor allem verwendet, um die Standsicherheit von Böschungen zu erhöhen. Auch bei Felsblöcken, die abzustürzen drohen und eine Felssturz- oder Steinschlaggefahr auslösen, kann eine Verankerung der gefährdeten Bereiche als Schutzmaßnahme dienen.

3.5 Gesamtstandsicherheit

In ÖNORM EN 1997 beinhaltet das Kapitel Gesamtstandsicherheit die Vorgaben, welche auf die Gesamtstandsicherheit und die Bewegungen bei Fundamenten, Stützbauwerken, Hängen, Dämmen oder Baugruben anzuwenden sind. Bezogen auf Massenbewegungen wird in dieser Arbeit genauer auf Hänge und Dämme eingegangen.

Für jeden Baugrund müssen alle in Frage kommenden Grenzzustände untersucht werden. Im folgenden Absatz sind einige der Grenzzustände angeführt:

„Einige der möglichen Grenzzustände sind folgende:

- *Verlust der Gesamtstandsicherheit des Bodens und damit verbundener Tragwerke;*
- *übermäßige Bodenbewegungen infolge von Scherverformungen, Setzung, Schwingungen oder Hebung;*

- *Schaden oder Einbuße der Gebrauchstauglichkeit bei Nachbargebäuden, Straßen oder Leitungen durch Bewegungen im Untergrund.*“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 11.2)

Um die Gesamtstandsicherheit nachzuweisen sind bei der Berücksichtigung der Einwirkungen unterschiedliche Faktoren in Betracht zu ziehen. Dazu zählen frühere oder andauernde Bodenbewegungen aus verschiedenen Ursachen, Schwingungen, Klimawechsel mit Temperaturveränderungen, Dürren, starke Niederschläge, Bewuchs und dessen Entfernung, Aktivität von Menschen und Tieren, Änderung des Porenwasserdrucks und Wellenbewegungen. All diese Faktoren können als Auslöser für Massenbewegungen dienen und zum Versagen der Gesamtstandsicherheit von Hängen führen.

Werden künstliche Böschungen angelegt und sind diese möglicherweise der Gefahr einer Erosion ausgesetzt, so ist eine Stabilisierung dieser Böschungen erforderlich, damit ihre Standsicherheit gewährleistet ist. Außerdem sollen Böschungen versiegelt und bepflanzt werden, sowie notwendigerweise entwässert, um ihre Stabilität zu verbessern.

Für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GEO und STR) müssen alle in Frage kommenden Versagensformen der Gesamtstandsicherheit miteinbezogen werden. Laut ÖNORM EN 1997 gilt es das entsprechende Berechnungsverfahren zur Nachweisführung anhand verschiedener Kriterien zu wählen. Dazu zählen der Schichtaufbau des Untergrundes, das Vorkommen und der Einfallswinkel von Diskontinuitäten, Sickerwässer und die Verteilung des Porenwasserdrucks, kurzfristige und langfristige Standsicherheit, Kriechen durch Scherverformung, Bruchmechanismen und die Anwendung numerischer Verfahren. Bei der Berechnung ist die Fels- oder Bodenmasse, welche die Gleitfläche umgibt, als starrer Körper oder als Zusammensetzung mehrere starrer Körper zu behandeln. Je nach Material der Böschung sind unterschiedliche Annahmen bezüglich der Gleitflächenform zu treffen. Handelt es sich um einen homogenen, isotropen Boden kann von einer kreisförmigen Gleitfläche ausgegangen werden, wohingegen bei geschichteten Böden mit unterschiedlichen Scherfestigkeiten eher eine nicht kreisförmige Gleitfläche anzunehmen ist.

Bei Felsböschungen und Einschnitten sieht ÖNORM EN 1997 eine Überprüfung von einzelnen Gesteinsblöcken oder größeren Gesteinsmassen anhand von translatorischen oder rotatorischen Bruchvorgängen vor. Um eine Standsicherheitsuntersuchung im

Felsgestein durchführen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Kluftcharren und Diskontinuitäten im Gestein erforderlich. Je nach Felsböschungsausrichtung und dem Verhältnis der Diskontinuitäten, tritt bei Felsböschungen hauptsächlich Versagen in Form von abgerutschten Blöcken oder Felsteilen sowie abgekippten Blöcken oder Platten, oder eine Kombination der beiden Fälle auf. Die Norm empfiehlt das Rutschen von Blöcken und Felskeilen zu verhindern, indem die Hangneigung durch Bermen reduziert wird, Anker oder Felsnägel angebracht werden oder eine innere Entwässerung umgesetzt wird. Ist eine Umsetzung dieser vorkehrenden Maßnahmen nicht möglich, muss abgestürztes Felsmaterial mittels Netzen oder anderen Vorkehrungen abgefangen werden.

Bei der Berechnung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit geht es um Verformungen und Senkungen des Bodens. Dabei sind Senkungen ausgelöst durch folgende Ursachen zu berücksichtigen:

- *„Veränderungen der Grundwasserverhältnisse und der entsprechenden Porenwasserdrücke;*
- *Langfristiges Kriechen unter drainierten Verhältnissen;*
- *Volumenverluste tiefliegender löslicher Schichten;*
- *Bergbau und ähnliche Aktivitäten wie eine Gasgewinnung“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 11.6)*

3.6 Erddämme

Zufolge ÖNORM EN 1997 sind für Aufschüttungen folgende Grenzzustände nachzuweisen.

- *„Gesamtstandsicherheit;*
- *Versagen der Böschung oder Krone der Aufschüttung;*
- *Versagen durch innere Erosion;*
- *örtliches Versagen durch Erosion der Oberfläche oder Kolke;*
- *Verformungen der Aufschüttung, die zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit führen, z. B. übermäßige Setzungen oder Risse;*
- *Setzungen und Kriechverformungen, die zu Schäden oder zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit bei Nachbargebäuden oder Leitungen führen;*
- *übermäßige Verformungen in Übergangszonen, z. B. der Rampe eines Brückenwiderlagers;*
- *Verlust der Gebrauchstauglichkeit von Verkehrsanlagen durch Klimaeinflüsse wie Frost und Tauen oder extreme Trockenheit;*

- *Böschungskriechen in Zeiten des Frostes und des Tauwetters;*
- *Beeinträchtigung der Frostschuttschicht unter Straßen durch Schwerverkehrslasten;*
- *Verformungen durch hydraulische Einwirkungen;*
- *Veränderungen der Umweltverhältnisse, etwa durch Schadstoffeintrag an der Oberfläche oder ins Grundwasser, Lärm oder Schwingungen.“ (ÖNORM EN 1997, 2014, Kapitel 12.2)*

Bei der Ermittlung der Einwirkungsbemessungswerte ist es erforderlich, die ungünstigsten Bedingungen zu erfassen, die in der betrachteten Bemessungssituation auftreten können. Dabei muss außerdem berücksichtigt werden, dass möglicherweise angebrachte Drainagen, Filter oder Abdichtungen versagen. Für Uferdämme ist die ungünstigste hydraulische Bedingung, dass es bei höchstem Grundwasserstand zu einer raschen Spiegelabsenkung kommt, zu untersuchen. Diese Situation ist dabei als Bemessungssituation in Betracht zu ziehen, um ein Versagen zu vermeiden. Für den Entwurf und die Ausführung von Dammschüttungen soll laut Norm Untergrund und Schüttmaterial ähnlich sein. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit sind alle Versagensarten der Gesamtstandsicherheit (Kapitel 3.5) zu berücksichtigen. Werden Dämme abschnittsweise hergestellt, sind die Nachweise Abschnitt für Abschnitt zu führen. Für die Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind die Verformungen und Setzungen des Damms zu kontrollieren. Die Dammverformungen dürfen keinen Grenzzustand in der Aufschüttung oder in naheliegenden Tragwerken wie Gebäuden oder infrastrukturellen Einrichtungen verursachen. Bezüglich der Setzungen gilt es vor allem die zeitabhängigen Konsolidations- und sekundären Setzungen zu berücksichtigen.

4 Geotechnische Schadensbilder

Um einen Überblick über mögliche geotechnische Schäden verursacht durch Massenbewegungen zu erhalten, soll das nachfolgende Kapitel eine Sammlung verschiedener Schadensbilder liefern. Jede Massenbewegung ist für sich individuell zu bewerten, da Einflussparameter, wie Geländeform, Bodenaufbau, Geologie, menschlicher Einfluss, hydrogeologische Bedingungen und weitere Faktoren bei jedem Hang in verschiedensten Kombinationen auftreten. Aus diesem Grund kann keine exakte Vergleichbarkeit zwischen entstandenen Massenbewegung und den angeführten Schadensbildern erwartet werden. Vielmehr dient die Schadensbildersammlung dazu, die unterschiedlichen Formen von Schäden zu verstehen und Anzeichen sowie Veränderungen der Hangmorphologie richtig zu deuten, um Rutschungsereignisse und Schadensfälle zu vermeiden und besser beurteilen zu können. Der Inhalt dieser Arbeit beschränkt sich vorwiegend auf Schadensbilder von in Österreich aufgetretenen Massenbewegungen. Eine Sammlung weltweit entstandener Schäden würde das Ausmaß der Arbeit überschreiten, da es bei den Randbedingungen aufgrund der unterschiedlichen geografischen Einflussfaktoren zu großen Abweichungen kommt. Ein Großteil der verwendeten Schadensbilder wurde freundlicherweise von der Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Kärnten, zur Verfügung gestellt. Weitere Bildquellen sind angeführt. Um Informationen über konstruktive Schadensbilder im Kontext mit Massenbewegungen zu erhalten, möchte ich an dieser Stelle auf die Masterarbeit meines Kollegen Hrn. Vostrel verweisen.

Verwendete Fachbegriffe zur Beschreibung der Schadensbilder werden zunächst in Kapitel 4.1 laut internationaler Nomenklatur definiert.

4.1 Internationale Nomenklatur

Zur Untersuchung und ingenieurgeologischen Erkundung von Massenbewegungen ist eine einheitliche Terminologie und Darstellungsform erforderlich. Ansonsten ist eine Vergleichbarkeit mit anderen Bewegungen sowie eine Risikobewertung schwierig. Die UNESCO (Working Party for World Landslide Inventory) hat das Multilingual Landslide Glossary (1993) verfasst, in welchem eine internationale Nomenklatur enthalten ist. Die nachfolgenden Definitionen wurden diesem wortwörtlich entnommen, zur einfacheren Lesbarkeit aber als normaler Text formatiert. Gemäß diesem Glossar werden Rutschungsmerkmale folgendermaßen charakterisiert:

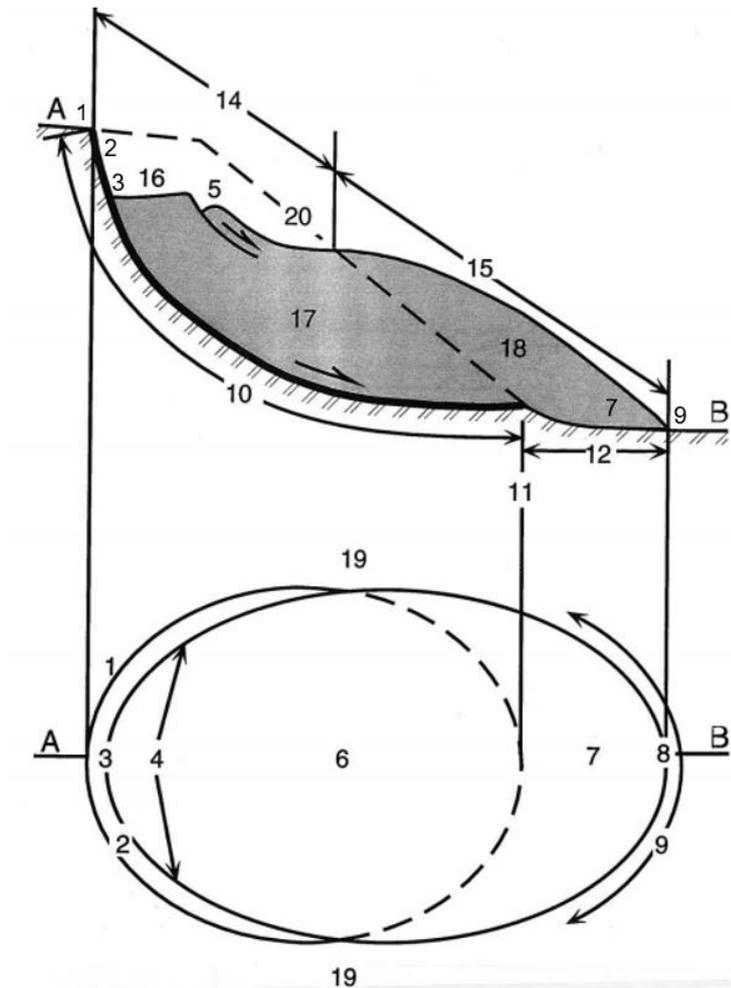


Abb. 21: Rutschungsmerkmale – Strichliert der ungestörte Boden oder Fels; schraffierter Bereich bildet die verlagerte Masse (adaptiert aus Multilingual Landslide Glossary, 1993)

- (1) **Krone:** Nicht oder gering verlagertes Material unmittelbar oberhalb des Hauptabrisses (2).
- (2) **Hauptabriss:** Steil einfallende durch die Bewegung der Rutschmasse (13) entstandene hangabwärts gerichtete Fläche auf dem nicht bewegten Boden oder Fels am oberen Teil der Rutschung. Er ist der deutlich sichtbare Teil der Gleitfläche (10).
- (3) **Top:** Höchster Punkt des Kontaktes zwischen verlagertem Material (13) und Hauptabriss (2).
- (4) **Kopf:** Oberer Rand der Rutschung entlang dem Kontakt zwischen verlagertem Material und Hauptabriss (2).
- (5) **Sekundärabriss:** Durch unterschiedliche Bewegungen innerhalb des verlagerten Materials der Rutschmasse entstandene steil einfallende Fläche.
- (6) **Haupttrutschkörper:** Teil des verlagerten Materials der Rutschung über der Gleitfläche (10) zwischen Hauptabriss (2) und Gleitflächenfront (11).

- (7) **Fuß:** Unterer Teil der Rutschmasse, der über die Gleitfläche hinausreicht (11) und über der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) liegt, auch als Rutschungszunge bezeichnet.
- (8) **Fußspitze:** Teil der Front (9), der am weitesten vom Top (3) der Rutschung entfernt ist.
- (9) **Front:** Vordere, meist gekrümmte Begrenzung des verlagerten Materials der Rutschung, die am weitesten vom Hauptabriss (2) entfernt ist.
- (10) **Gleitfläche:** Fläche, welche die untere Grenze des verlagerten Material (13) unter der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) bildet (oder gebildet hat).
- (11) **Gleitflächenfront:** Grenzlinie (meist verdeckt) zwischen dem unteren Teil der Gleitfläche (10) und der ursprünglichen Geländeoberfläche (20).
- (12) **Überschiebungsfläche:** Teil der ursprünglichen Geländeoberfläche, die vom Fuß der Rutschung überlagert wird.
- (13) **Verlagertes Material:** Von der Rutschung erfasste und aus ihrer ursprünglichen Position verlagerte Masse. Sie umfasst sowohl die Sackungsmasse (17) als auch die Akkumulation (18).
- (14) **Sackungszone:** Bereich der Rutschung, in der das verlagerte Material tiefer liegt als die ursprüngliche Geländeoberfläche (20).
- (15) **Akkumulationszone:** Bereich der Rutschung, in dem das verlagerte Material über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
- (16) **Sackungsraum:** Volumen, das vom Hauptabriss (2), von der Sackungsmasse (17) und der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) begrenzt wird.
- (17) **Sackungsmasse:** Teil des verlagerten Materials, das über der Gleitfläche (10) und unter der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
- (18) **Akkumulation:** Volumen des verlagerten Materials (13), das über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
- (19) **Flanke:** Das in-situ liegende Material, das unmittelbar an die seitlichen Abrisse anschließt. Die Beschreibung mit Kompassrichtung wird bevorzugt; falls mit rechts oder links bezeichnet, bezieht sich dies aus der Sicht von oben nach unten.
- (20) **Ursprüngliche Geländeoberfläche:** Oberfläche des Hanges, die vor Beginn der Rutschung bestand.

Die Dimensionen einer Rutschung werden laut Multilingual Landslide Glossary (1993) folgendermaßen definiert:

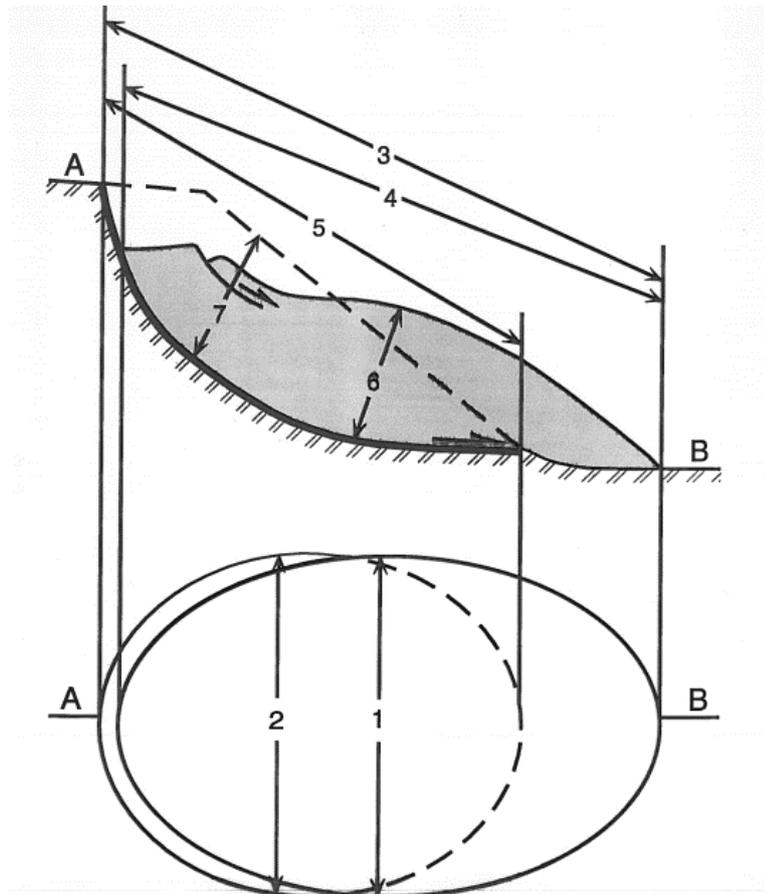
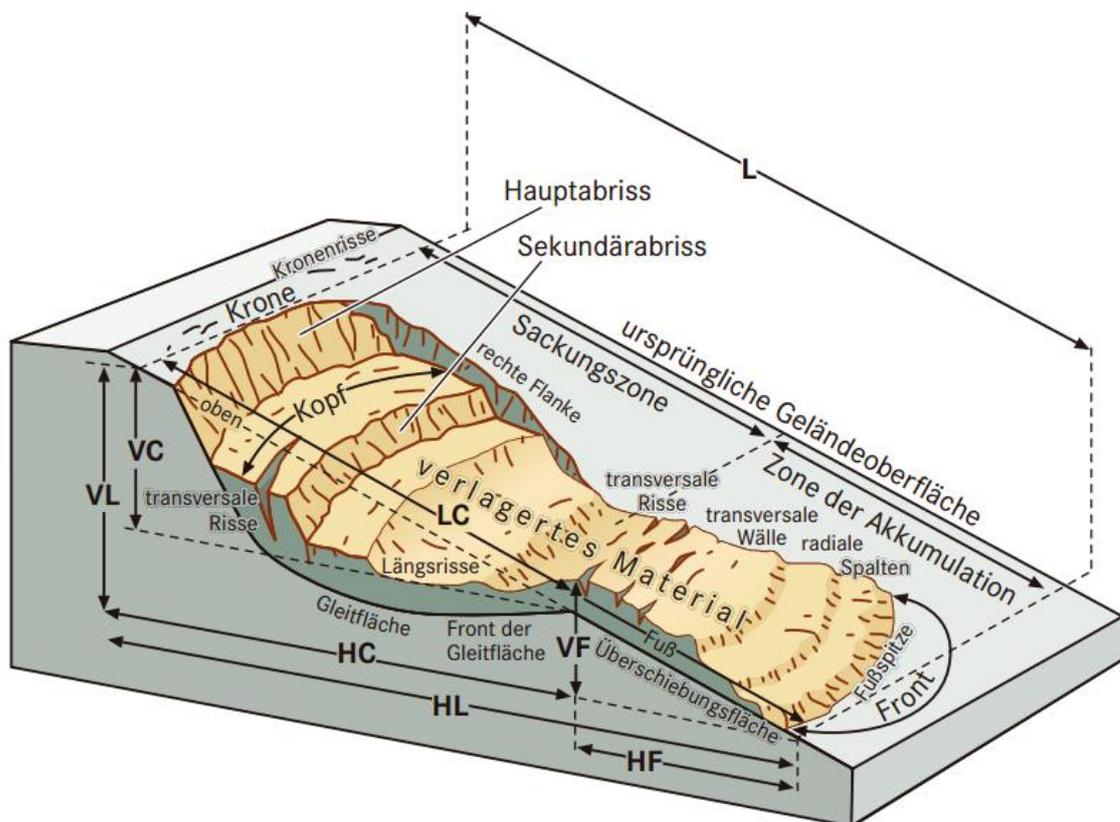


Abb. 22: Rutschungsdimensionen – Strichliert der ungestörte Boden oder Fels; schraffierter Bereich bildet die verlagerte Masse (Multilingual Landslide Glossary 1993)

- (1) Die **Breite der Rutschmasse, W_d** , ist die maximale Breite der Rutschmasse senkrecht zur Längsachse, L_d .
- (2) Die **Breite der Gleitfläche, W_r** , ist die maximale Breite zwischen den Flanken der Rutschung, senkrecht zur Längsachse, L_T .
- (3) Die **Gesamtlänge, L** , ist der kleinste Abstand zwischen Fußspitze und Krone der Rutschung.
- (4) Die **Länge der Rutschmasse, L_d** , ist der kleinste Abstand zwischen Fußspitze und Top.
- (5) Die **Gleitflächenlänge, L_T** , ist der kleinste Abstand zwischen Gleitflächenfront und Krone.
- (6) Die **Mächtigkeit der Rutschmasse, D_d** , ist die maximale Tiefe der Gleitfläche unter der ursprünglichen Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur Ebene W_d und W_L .
- (7) Die **Tiefe der Gleitfläche, D_r** , ist die maximale Tiefe der Gleitfläche unter der ursprünglichen Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur Ebene W_r und L_T .

4.2 Schadensbilder Rutschungen

Rutschungen treten an Hängen auf, welche sich bereits nahe dem Grenzgleichgewicht befinden und somit einen Sicherheitsfaktor von $\eta \approx 1,0$ aufweisen. Durch unterschiedliche Auslöser wird dieses Grenzgleichgewicht überschritten, die Bewegungsrate erhöht und die Rutschung verursacht. Abb. 23 illustriert die schematische Darstellung einer Rotationsrutschung mit entstandenen Schadensbildern in der Sackungszone und der Akkumulationszone. Die durch Rutschungen verursachten Schadensbilder werden in den folgenden Kapiteln zufolge diesen beiden Zonen unterteilt.



L = Schrägdistanz

LC = Schrägdistanz der Sackungszone

HL = Horizontale Gesamtlänge

HF = Horizontale Fußlänge

HC = Horizontale Sackungslänge

VL = Vertikale Gesamthöhe

VF = Vertikale Fußhöhe

VC = Vertikale Sackungshöhe

Abb. 23: schematische Darstellung einer Rotationsrutschung mit aufgetretenen Schäden¹⁷

¹⁷ Quelle: <https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/Publications/Glade2007a.pdf> aufgerufen am 24.03.2017

4.2.1 Sackungszone

Die Sackungszone ist der obere Bereich einer Rutschung, von welchem Material durch den Bewegungsprozess wegtransportiert wird. Diese Zone ist am oberen Ende durch die Abrisskante und seitlich durch die Flanken begrenzt. Oberhalb des Hauptabrisses, an der sogenannten Krone, kann es zur Entstehung von halbkreisförmigen Rissen kommen. Die Hauptabrissfläche ist eine steile konkave Fläche, welche nach unten hin an Gefälle abnimmt. Der Hauptabriss ist in den meisten Fällen halbkreisförmig ausgebildet, die Flanken schließen an diesen an. In der Literatur ist auch der Begriff Anrisskante gebräuchlich. Dieser Begriff umfasst die gesamte Kante, gebildet durch die beiden Flanken und die Krone. Die maximale Mächtigkeit erreicht die Rutschung am Ende der Sackungszone vor dem Übergang zur Akkumulationszone.

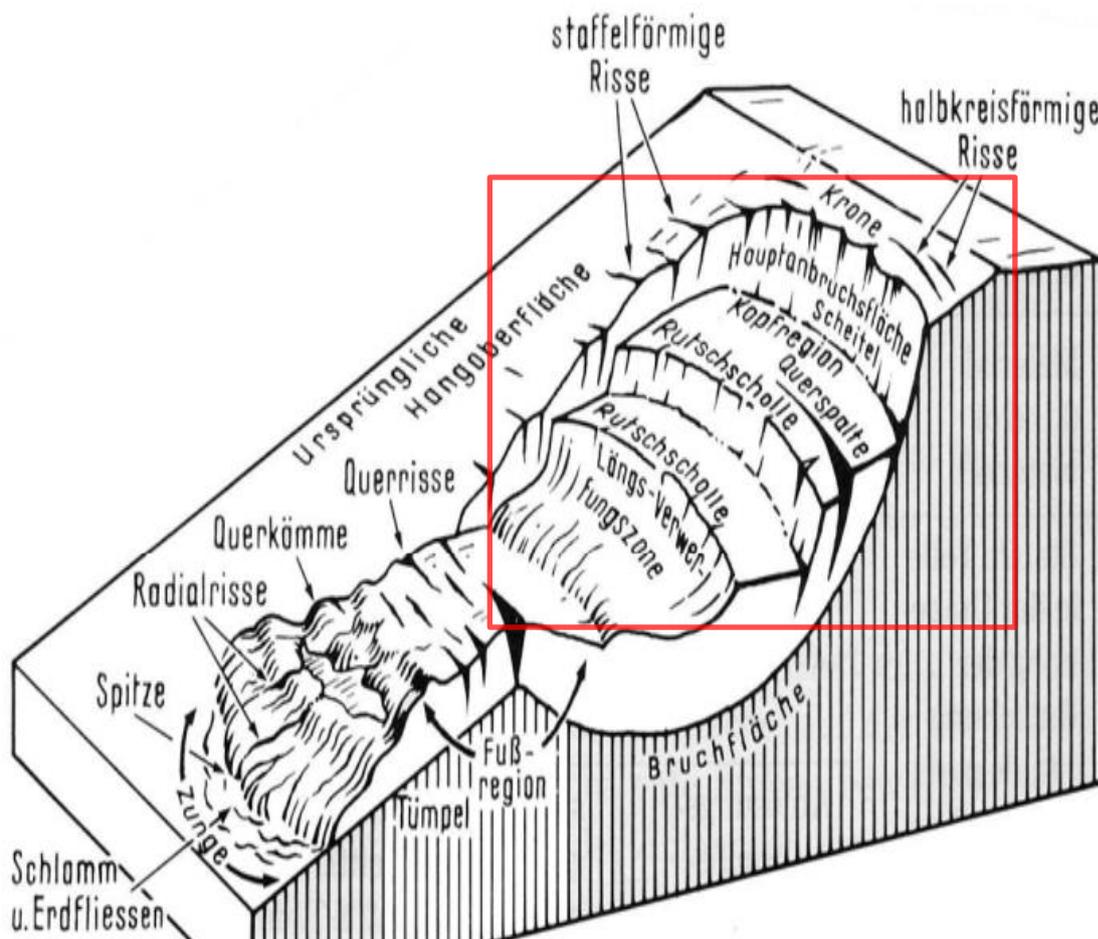


Abb. 24: Schematische Darstellung einer Rutschung mit möglichen Schadensbildern. Der markierte Bereich stellt die Akkumulationszone dar.¹⁸

¹⁸Adaptiert von Quelle: <http://www.ig.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-ingenieurgeo/Bilder/Lehre/MB2.pdf> aufgerufen am 06.04.2017

Abb. 25 bis Abb. 26 zeigen die Hauptanrisskante der Rutschung Fischergraben in Kärnten (Gemeinde Lesachtal). Im April 2009 ereignete sich im Fischergraben eine Rutschung aus kleinstückig zerlegtem Felsmaterial. Dabei rutschten die obersten aufgewitterten und aufgelockerten Bereiche ins Tal. Am Fußbereich der Rutschung ist der Fels sehr kompakt. Ursache für die Rutschung war Verwitterung, welche zur starken Zerklüftung und Rissbildung des Gesteins führte, sowie der Zutritt von Wasser, wodurch es schließlich zum Versagen des Hanges kam. (Goldschmidt, 2010)



Abb. 25: Rutschung Fischergraben mit Blick auf den oberen Bereich der Rutschung und rot markierter Anrisskante; feines lehmiges Material vermischt mit groben stark zerklüfteten Blöcken liefert ungünstige Bedingungen für die Hangstabilität (adaptierte Quelle: WLV Kärnten)



Abb. 26: Hauptanrisskante mit Blick von oben: Oberhalb der Anrisskante befindet sich der bestehende Wald, darunter die abgerutschte Fläche. (adaptierte Quelle: WLV Kärnten)

Abb. 27 und Abb. 28 zeigen eine Rutschung im Südwesten Kärntens (Grafendorf). In den Abbildungen erkennt man die Anrisskante der Rutschung und den obersten sichtbaren Bereich der Gleitfläche. Die Abgrenzung zum unbewegten Hangbereich ist durch die stehenden Bäume deutlich erkennbar.



Abb. 27: Rutschung Grafendorf: Die Abbildung zeigt das Rutschungsgebiet mit einer steilen Anrisskante (WLV Kärnten)



Abb. 28: Rutschung Grafendorf: Darstellung der Anrisskante und Übergang zum unbewegten Bereich (WLV Kärnten)

Die folgenden zwei Schadensbilder wurden bei einer Rutschung in Kärnten (Bezirk Hermagor) aufgenommen. Es handelt sich um eine flachgründige Translationsrutschung, bei welcher die Gleitfläche nahe an der Oberfläche lag. Abb. 29 und Abb. 30 zeigen den geschädigten Bereich.

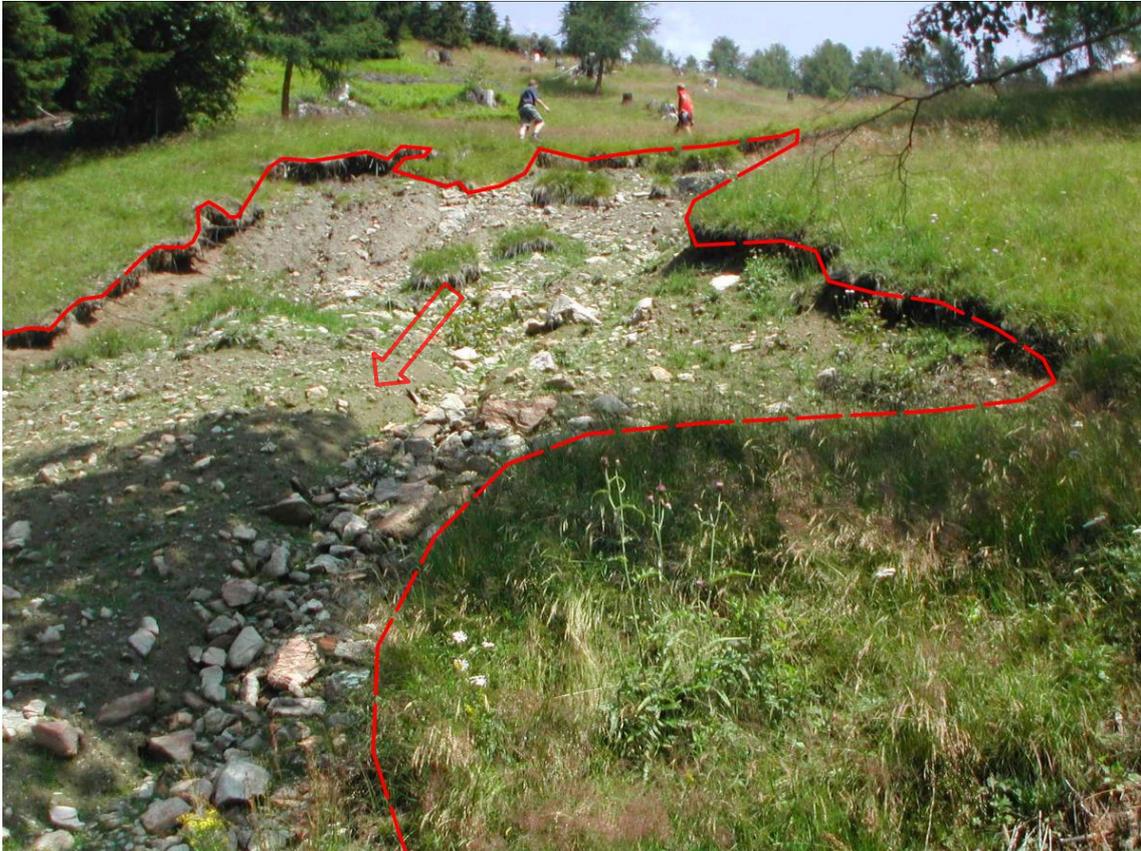


Abb. 29: Rutschung Guggenberg-Süd: Am Foto ist die Anrisskante der Hangrutschung (rot markiert) erkennbar; der Hang besteht aus einem inhomogenen Gemisch von grobkörnigen Material und Feinanteilen. (WLV Kärnten)



Abb. 30: Rutschung Guggenberg-Süd: Deutlich erkennbare Anrisskante durch Höhenversatz des Geländes. (WLV Kärnten)

Abb. 31 bis Abb. 32 zeigen eine Rutschung, welche sich im Jahr 2013 in Wernberg in Kärnten ereignete. Der Hang besteht aus Moränematerial mit feinkörniger Matrix, welches bei Durchnässung erosions- und rutschungsanfällig wird. Durch das Eintreten von Oberflächenwässern und der Niederschlagsituation im Frühjahr 2013 erfolgte eine derartige Durchnässung des Hanges, dass das Gelände abrutschte. Der Hang war bereits zuvor durch Holzkrainerwände gesichert, welche aber nicht ausreichten, um das Rutschereignis zu verhindern. Der entstandene Anbruch hat eine Neigung von ca. 50° und ist ca. 10 bis 15 m hoch. (Goldschmidt, 2013)



Abb. 31: Rutschung Wernberg: Abbildung der Anrisskante mit der sehr steilen Abbruchfläche. (WLV Kärnten)



Abb. 32: Links: Aufnahme der Rutschung Wernberg während durchgeführter Sanierungsarbeiten. Gut erkennbare Steilstufe der Rutschung. Rechts: Rutschungsgebiet mit feinkörnigem Material mit Blick auf die Anrisskante und Steilstufe (WLV Kärnten)

In Feistritz/Bleiburg machte sich im April 2017 an einem eher flachen Hang mit einer Neigung von ca. 5-6° eine Hangbewegung erkennbar. Es handelte sich um ein Hangfließen verursacht zufolge Durchnässung. Die Erdmassen bewegen sich in Richtung des naheliegenden Bachs. Abb. 33 und Abb. 34 illustrieren die Hangrutschung.

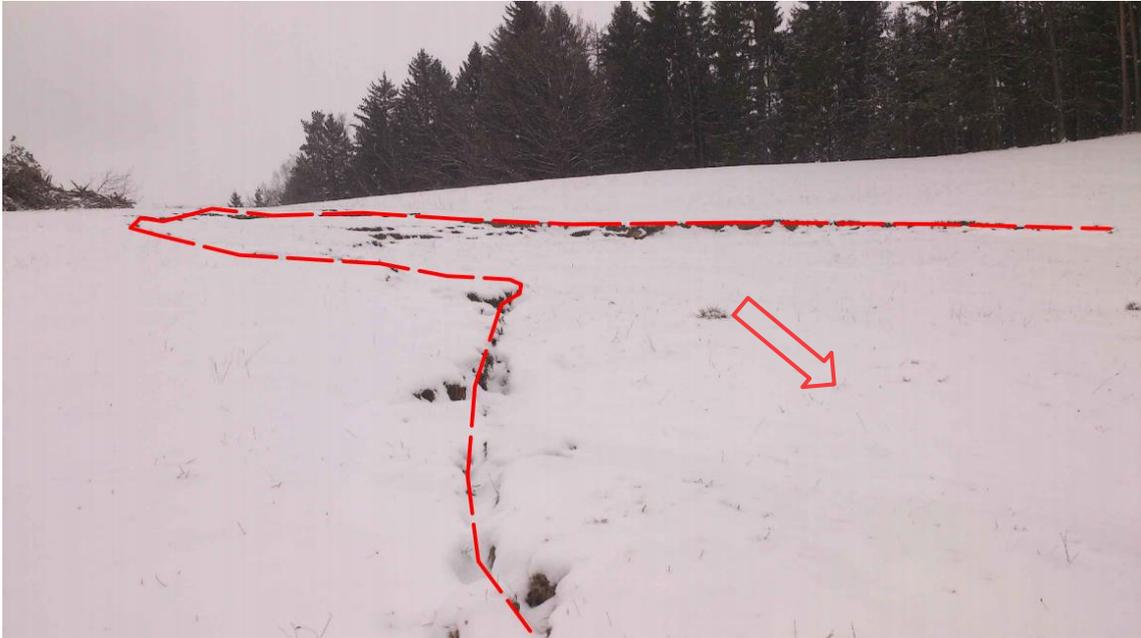


Abb. 33: Rutschung Krauth: Trotz der Schneedecke ist die Anrisskante gut erkennbar. (WLV Kärnten)



Abb. 34: Rutschung Krauth: Entlang der Anrisskante ist ein deutlicher Höhenversatz zwischen bestehendem und fließendem Gelände sichtbar. (WLV Kärnten)

Anrisskanten müssen auf den ersten Blick nicht gleich erkennbar sein. Bei manchen Rutschungen kann es vorkommen, dass diese wesentlich unübersichtlicher ausgeprägt sind als bei den zuvor angeführten Schadensbildern. Eine derartige unübersichtliche

Anrisskante lässt sich in Abb. 35 erkennen. Der Verlauf der Kante ist nur durch den Übergang von bestehenden Bäumen zu beschädigten, umgekippten Bäumen erkennbar.



Abb. 35: Rutschung Radegundergraben: Das Foto zeigt einen Blick von oben auf den abgerutschten Bereich. Durch die bestehenden und umgekippten Bäume wird der Verlauf der Anrisskante verdeutlicht. (WLV Kärnten)

Abb. 36 und Abb. 37 sind Schadensbilder einer oberflächennahen Rutschung im Bezirk Hermagor in Kärnten. Die Rutschung Letten-Obergail wurde durch eine Durchfeuchtung des Hanges ausgelöst. Das Rutschmaterial bewegte sich in Richtung eines darunterliegenden Bachs. Bevor die Rutschung eintrat, bewegte sich der Hang bereits kriechend.



Abb. 36: Rutschung Letten-Obergail links: Das Foto zeigt eine Rutschbewegung im Anfangsstadium mit bereits ausgebildeter Anrisskante. Rechts sind die Schäden in Rot nachgezeichnet. (WLV Kärnten)



Abb. 37: Rutschung Letten-Obergail: Die Abbildung zeigt eine bereits eingetretene Translationsrutschung mit gut sichtbarer Anrisskante. (WLV Kärnten)

Rutschungen führen häufig zu Schäden an infrastrukturellen Einrichtungen oder Bauwerken. Dabei können Schäden dadurch entstehen, dass Anrisskanten, wie in Abb. 38, direkt durch ein Bauwerk, in diesem Fall einer Straße, gehen oder dass Bauwerke sich auf der Massenbewegung selbst befinden, weiterbewegt und dadurch beschädigt werden.



Abb. 38: Rutschung Mondsee: Die Anrisskante der Rutschung verläuft durch eine Straße wodurch ein Teil der Straße mit den bewegten Massen wegrutschte. (Steinbacher, 2014)

Im Osten von Kärnten kam es im Jahr 2014 zu einer Rutschung. Auslöser dafür war die Durchnässung des Hanges, wodurch sich Material auf einer Fläche von 50.000 m² in Bewegung setzte. Abb. 39 und Abb. 40 zeigen Schadensbilder der Rutschung Pogerschitzen. Die Fotos stellen den oberen Bereich der Rutschung mit der Anrisskante und der steilen Abbruchfläche dar. Auf diese Massenbewegung wird in Kap. 6.5 dieser Arbeit näher eingegangen.



Abb. 39: Rutschung Pogerschitzen: Anrisskante (rot markiert) mit darüberliegender Siedlung (WLV Kärnten)



Abb. 40: Rutschung Pogerschitzen: Krone der Rutschung mit Blick von der seitlichen Flanke (WLV Kärnten)

4.2.2 Akkumulationszone

Die Akkumulationszone schließt unterhalb der Sackungszone an und bildet den Bereich der Rutschung, in welchem es zu einer Ablagerung von bewegtem Material kommt. Die Geländeoberfläche wird durch die Anhäufung der Ablagerungen im Vergleich zum ursprünglichen Geländeverlauf erhöht. In der Akkumulationszone kommt es zum Auftreten von Quer- und Radialrissen. Beim Rutschungsfuß entstehen durch die Aufschiebungen Bodenaufwülbungen und Rutschbuckel, woraus sich eine unruhige Hangmorphologie ergibt. Außerdem kann es im Ablagerungsbereich der Rutschung zur Entstehung von Eintiefungen und Senken kommen und zu dort situierten Quellaustritten und Vernässungsstellen.

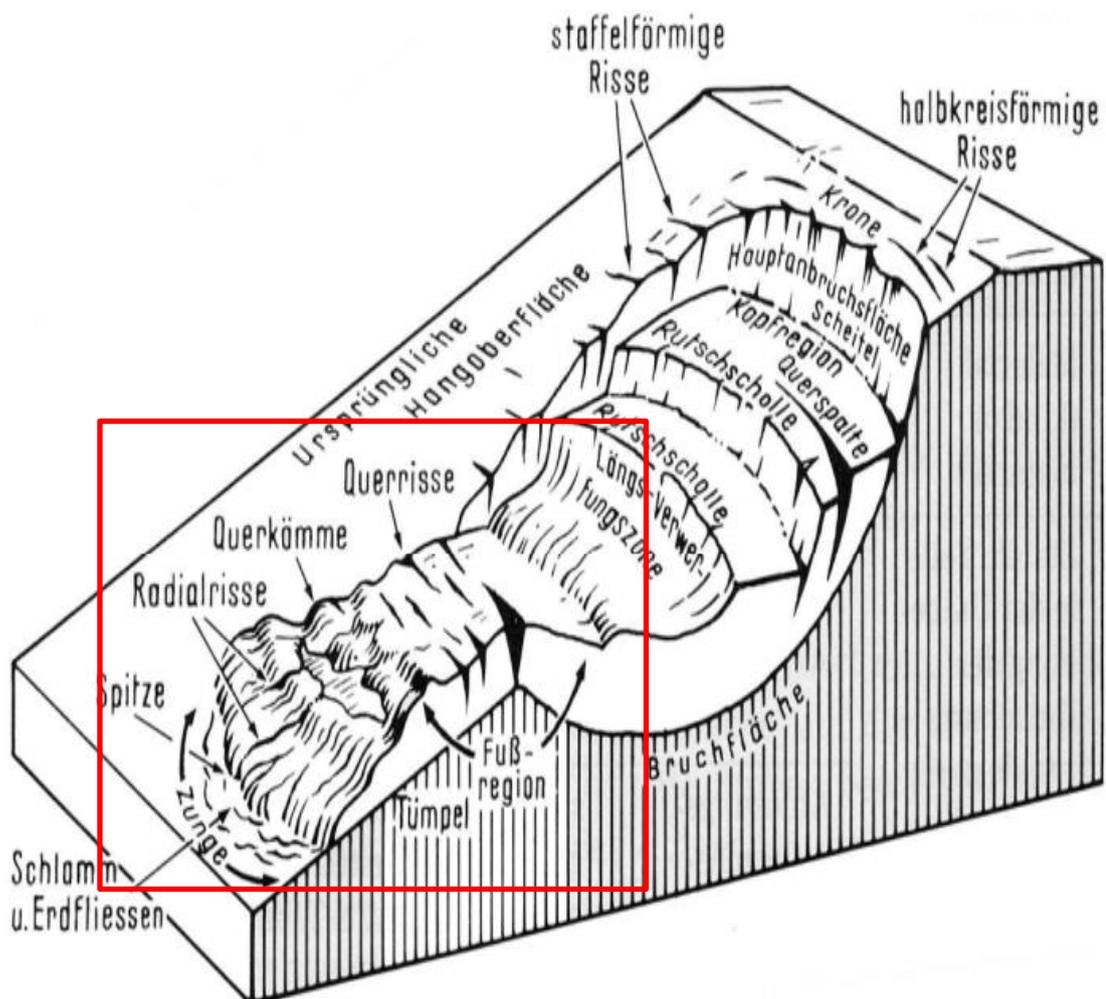


Abb. 41: Schematische Darstellung einer Rutschung mit möglichen Schadensbildern. Der markierte Bereich stellt die Akkumulationszone dar.¹⁹

Abb. 42 bis Abb. 44 zeigen Schadensbilder des unteren Bereichs der Akkumulationszone. Aufschiebungen und Buckelbildungen, sowie Quellaustritte sind

¹⁹Quelle: <http://www.ig.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-ingenieurgeologie/Bilder/Lehre/MB2.pdf> aufgerufen am 06.04.2017

erkennbar. Die unruhige Hangmorphologie ist eine typische Erscheinungsform für den Bereich nahe des Rutschungsfußes.



Abb. 42: Rutschung Krauth: Wasseraustritte (rot markierter Bereich) im Fußbereich der Rutschung. (WLV Kärnten)



Abb. 43: Rutschung Letten-Obergail: Bucklige Aufschiebungen im unteren Bereich der Hangbewegung. Oberhalb des Bereichs der unruhigen Hangoberfläche sind Querrisse am Hang (rote Markierung) erkennbar. (WLV Kärnten)



Abb. 44: Rutschung Letten-Obergail: Bucklige Aufschiebungen mit Wasseraustritt im Fußbereich. (WLV Kärnten)

Im Bereich der Akkumulationszone kommt es nicht nur zur Ablagerung von weggerutschten Bodenmaterialien, sondern auch mitgerissene Bäume und Teile von Bauwerken kommen in dieser Zone zum Liegen. Die folgenden zwei Schadensbilder (Abb. 45) zeigen diesen Bereich eines Hanges.



Abb. 45: Aufschiebungen und verlagertes Material im unteren Rutschungsbereich. (WLV Kärnten)

Im oberen Bereich einer Akkumulationszone, anschließend an die Sackungszone, entstehen bei Rutschungen oftmals Querrisse. In seltenen Fällen kommt es zu einer sehr starken Ausprägung dieser Risse. Die folgenden Schadensbilder (Abb. 46 bis Abb. 48) zeigen enorme Querrisse.



Abb. 46: Rutschung Pogerschitzen (Kapitel 6.5). Unterhalb der ersten Anrissfläche kommt es am Plateau zur Bildung von Querrissen in der Wiese. (WLV Kärnten)



Abb. 47: Rutschung Pogerschitzen (Kapitel 6.5). Die entstandenen Querrisse sind zum Teil mit Wasser gefüllt und weisen eindeutig auf eine Durchnässung des Hanges hin. (WLV Kärnten)



Abb. 48: Querrisse im Hang bei einer Rutschung (Steinbacher, 2014)

Das untere Ende der Rutschung wird als Rutschungsfuß oder Rutschungsstirn bezeichnet. Dieser bildet den Übergang von der letzten Aufschiebung zum unveränderten Gelände. In der folgenden Abbildung ist die Stirn einer Rutschung in Oberösterreich dargestellt. Diese bewegte sich in Richtung einer kleinen Straße – ein Fall welcher sehr häufig eintritt. Oftmals kommt es durch diese Veränderungen zu Schäden (Rissbildung, Aufwölbungen ...) im Straßenbelag (Abbildungen dazu beinhaltet Kapitel 4.3.2). In diesem Fall blieb die Straße trotz der angrenzenden Rutschungsstirn unbeschädigt.



Abb. 49: Rutschung Höhenberg: Abbildung der Rutschungsstirn mit Stirnwulst und Aufschiebungen (Gasperl, Tartarotti, 2014)

Abb. 50 stellt ebenfalls eine Rutschung mit Bewegung zu einer angrenzenden Straße dar. Allerdings blieb bei dieser Rutschung die Straße nicht unbeschädigt, sondern wurde von den Erdmassen verschüttet. Ca. 800.000 m³ Material rutschten ins Tal und verschütteten die Drau und die danebenliegende Landesstraße.



Abb. 50: Rutschung Leisach: Die Rutschmassen zerstörten die Landesstraße und verschütteten die Drau.²⁰

²⁰ Quelle: http://www.geoforum-umhausen.at/aktuelles2010/Tagungsband_2010.pdf aufgerufen am 02.02.2017

4.3 Schadensbilder Kriechhang

Kriechen ist eine Bewegungsform, welche über einen längeren Zeitraum von mehreren Jahren bis hin zu Jahrzehnten abläuft. Durch die geringen Bewegungsgeschwindigkeiten (mm/Jahr bis mm/Tag) ist diese Form der Massenbewegung schwer erkennbar, da es an der Hangoberfläche nicht sofort zur Entstehung von sichtbaren Schadensbildern kommt bzw. kommen muss, sondern erst über einen längeren Zeitraum Anzeichen einer Bewegung bemerkbar werden. Eine unruhige sich mit der Zeit verändernde Hangmorphologie, Schrägstellungen von Strommasten oder Zäunen, säbelwuchsartige Bäume (Kapitel 4.3.3), Schäden an infrastrukturellen Einrichtungen (Wasserleitungen, Stromleitungen, Bahngleisen, ...), Wasseraustritte aus dem Boden oder leichte Bodenrisse können Hinweise einer Kriechbewegung sein. Oftmals können Kriechhangbewegungen auch an Kunstbauten oder Bauwerken, welche sich direkt am Hang oder in der näheren Umgebung befinden, in Form von konstruktiven Schadensbildern erkennbar machen. Im Folgenden werden unterschiedliche Schadensbilder bei Kriechhangbewegungen dargestellt.

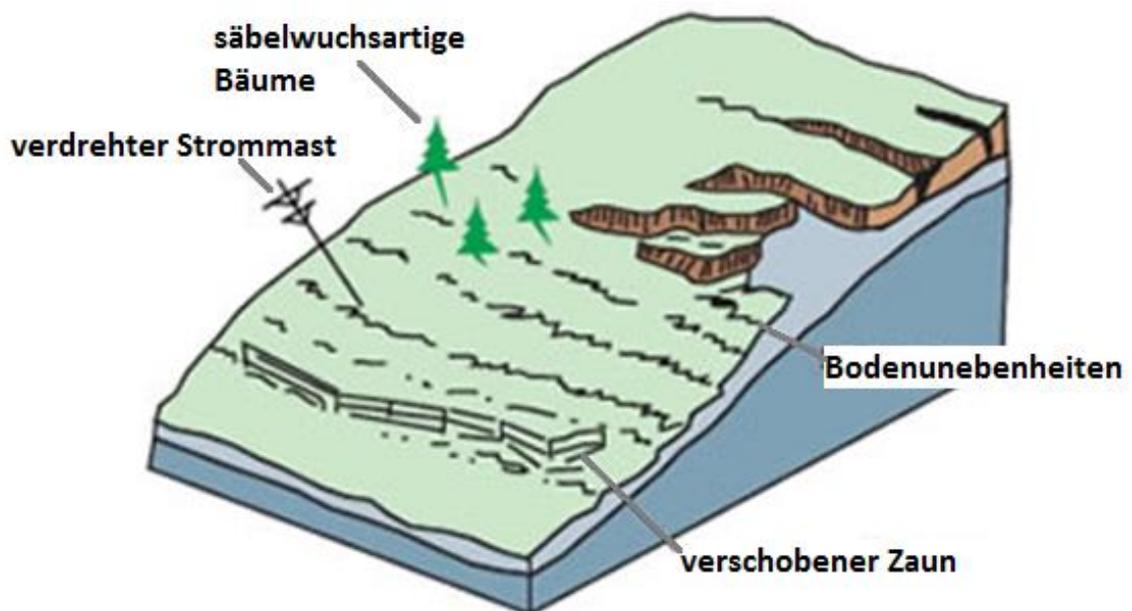


Abb. 51: Schematische Darstellung eines Kriechhanges mit möglichen Schadensbildern²¹

²¹ Adaptiert von Quelle: http://www.weatherwizkids.com/?page_id=1326 aufgerufen am 12.05.2017

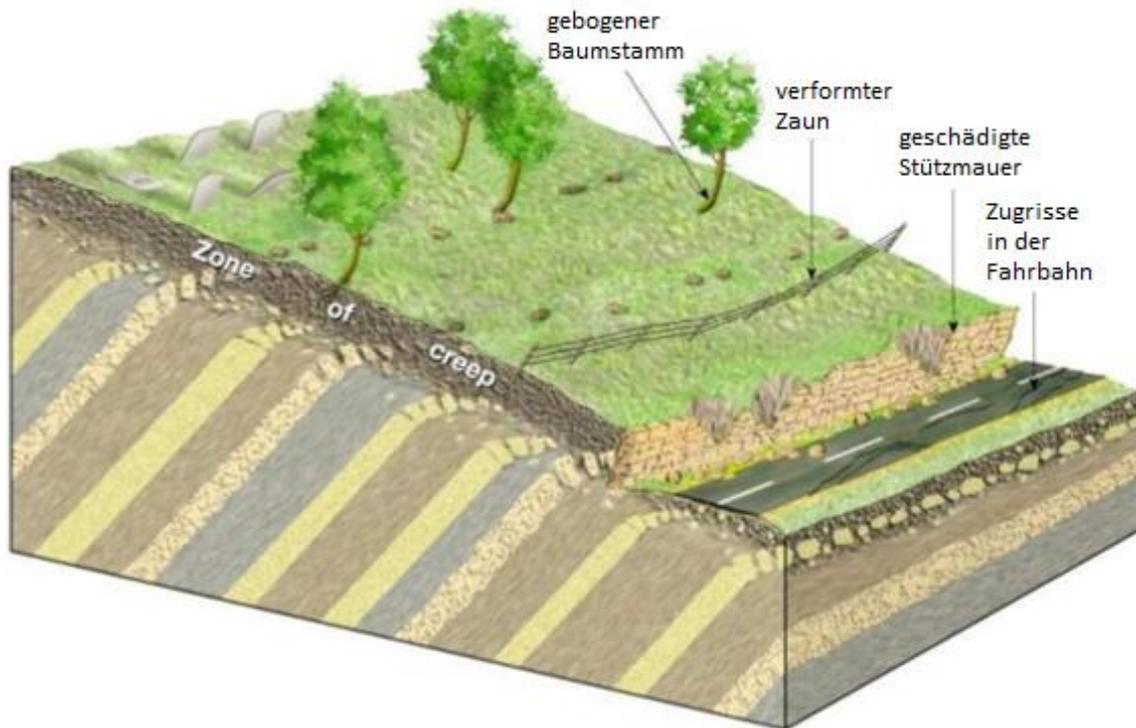


Abb. 52: Schematische Darstellung eines Kriechhanges mit möglichen Schadensbildern²²

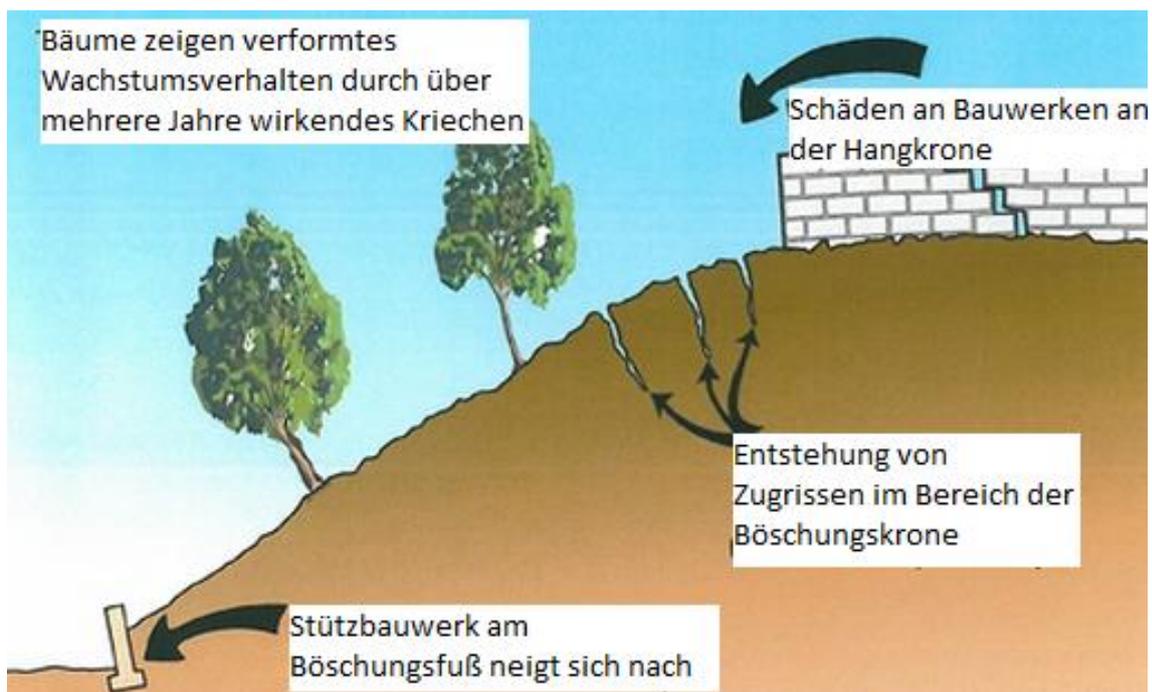


Abb. 53: Schematischer Längsschnitt eines Kriechhanges mit Schadensbildern²³

²² Adaptiert von Quelle: <https://image.slidesharecdn.com/massmovementslideshare-131110113301-phpapp02/95/mass-movement-19-638.jpg?cb=1401115836> aufgerufen am 15.05.2017

²³ Adaptiert von Quelle: https://gabion1.com/retaining_wall_site_profile.htm aufgerufen am 15.05.2017

4.3.1 Veränderung der Geländeform

Unruhige Geländeoberflächen mit Buckelbildungen und Eintiefungen oder kleine Risse können aufgrund von langsamen Bewegungen im Hang entstehen. Derartige Schadensbilder reichen allerdings keineswegs aus, um genaue Aussagen über den Zustand des Hanges zu treffen und / oder um festzustellen, ob es sich tatsächlich um einen Kriechhang handelt. Zur Abklärung müssen weitere Schadensbilder in der Umgebung berücksichtigt werden oder Bodenuntersuchungen und Überwachungen durchgeführt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen Schadensbilder, bei welchen die Hangmorphologie Anzeichen für eine Kriechbewegung liefert. In Abb. 54 ist ein Hang mit unruhiger Geländeoberfläche zu erkennen, an welchem Schürfen und Bohrungen entnommen werden, um genauere Informationen über die Bewegungen im Hang zu erhalten.



Abb. 54: Entnahme von Schürfen und Bohrungen an einem Hang mit unruhiger Oberfläche (Steinbacher, 2014)

Abb. 55 und Abb. 56 zeigen einen stark durchfeuchteten Hang mit Buckelbildung und Feuchtstellen. Im unteren Bereich des Hanges sind Wasserstellen erkennbar. Diese können Hinweise für eine mögliche Kriechbewegung des Hanges sein.



Abb. 55: Buckelbildung an einem Hang



Abb. 56: Wasseraustritte und Tümpel als Hinweis auf eine starke Hangdurchfeuchtung
Kriechbewegungen an Hängen können durch das Einwirken ungünstiger Faktoren (z.B. Niederschlag, Erdbeben, zusätzliche Belastungen, ...) zu Rutschungen führen. Abb. 57 stellt einen Kriechhang dar, bei welchem es im unteren Bereich zum Abrutschen von

Erdmassen kam. Oberhalb des Rutschungsbereichs erkennt man bereits an der Hangoberfläche, dass eventuell Bewegungen im Hang vorherrschen.



Abb. 57: Kriechhang mit bereits eingetretenen Rutschungen im unteren Hangbereich²⁴

Anrisskanten bilden den Übergangsbereich von bewegter zu unbewegter Zone. Durch das Vorliegen ungünstiger Faktoren, wie z.B. starken Niederschlägen, kann es dazu kommen, dass die Bodenmasse unterhalb der Anrisskante zu rutschen beginnt. Bei Abb. 58 handelt es sich um einen Kriechhang mit deutlich ausgeprägten Rissen im Hang. Die Risse stellen eine Anrisskante dar. Derartige Risse in einem Hang liefern eindeutige Hinweise auf Bewegungen im darunterliegenden Boden.

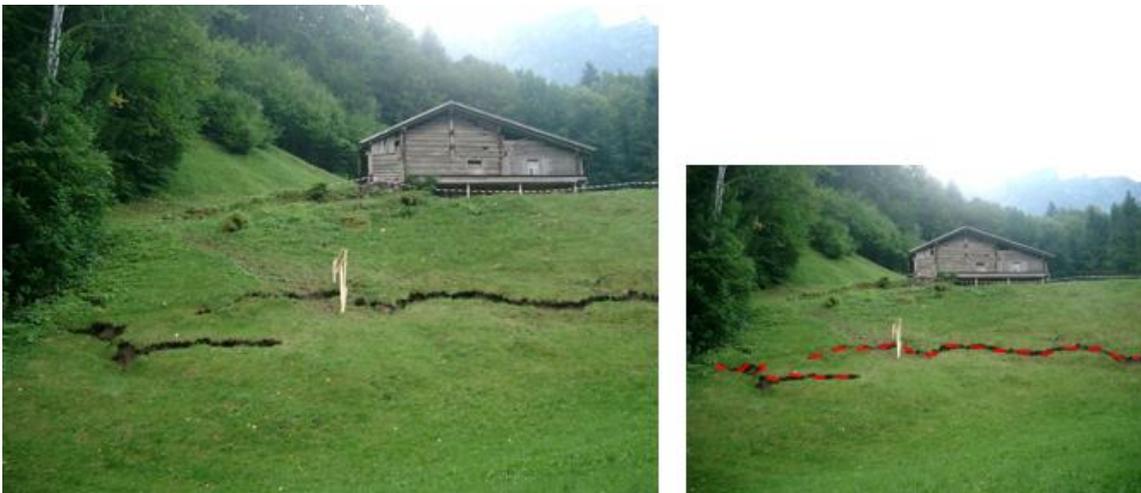


Abb. 58: Hang mit deutlich erkennbarer Anrisskante deutet auf Bewegungen im Untergrund hin (rechts Anrisskante rot markiert)²⁵

Speziell auf Almen findet man immer wieder Hänge mit einer unregelmäßigen Oberfläche. In höheren Lagen nimmt der Baumbewuchs ab oder fällt oberhalb der

²⁴ Quelle: <http://ktmc.info/soil-creep> aufgerufen am 14.05.2017

²⁵ Quelle: <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/erdrutsch/entstehung-er/> aufgerufen am 10.05.2017

Waldgrenze vollkommen weg, wodurch die Stabilisierung durch Verwurzelung fehlt. Unebenheiten im Almbereich müssen aber nicht zwingendermaßen durch eine Massenbewegung verursacht werden, sondern können andere Faktoren zur Ursache haben. Abb. 59 und Abb. 60 zeigen Hangoberflächen, deren Unregelmäßigkeit nicht durch Bewegungen hervorgerufen wurden, sondern durch Trampelpfade von Weidevieh. Aus diesem Grund ist die Interpretation derartiger Schadensbilder mit Vorsicht durchzuführen, um eine Fehlinterpretation zu vermeiden.

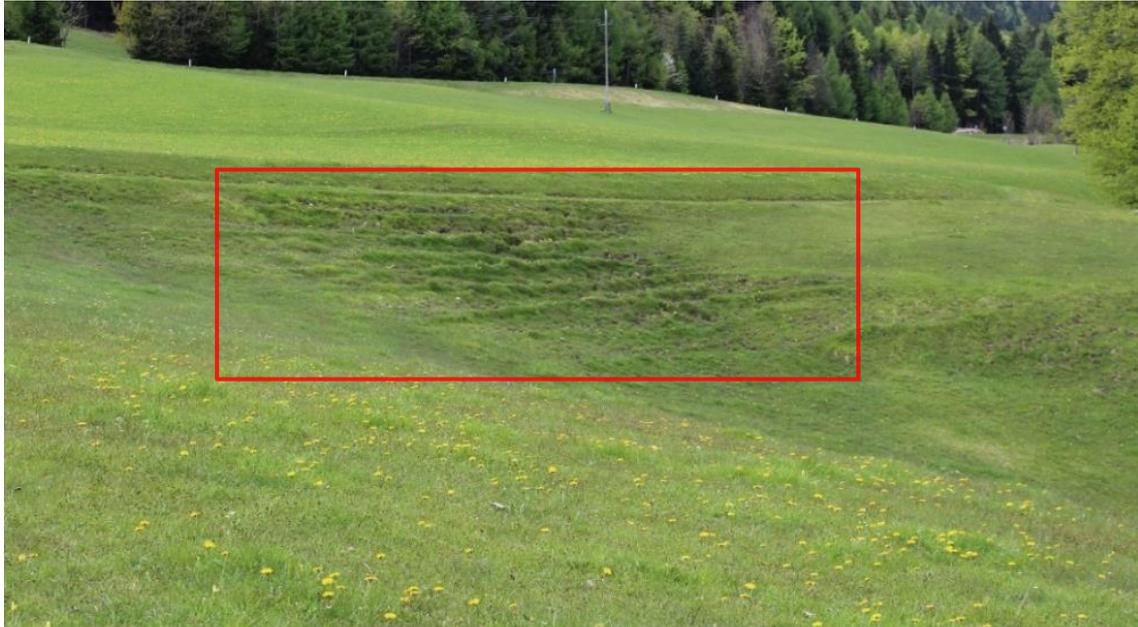


Abb. 59: Der rot markierte Bereich zeigt eine unregelmäßige Hangmorphologie, durch Trittpfade von Weidevieh verursacht.



Abb. 60: Buckelbildung und kleine Anrisskanten können fälschlicherweise als Kriechang interpretiert werden, sind aber in diesem Fall durch Weidevieh entstanden.

4.3.2 Schäden an Bauwerken / Kunstbauten

Befinden sich Bauwerke, wie z.B. Häuser oder Straßen, direkt auf einem Kriech- bzw. Rutschhang oder im angrenzenden Bereich, so können sich die Bewegungen im Boden durch konstruktive Schadensbilder an den Objekten bemerkbar machen. Zuzufolge der Bewegungen im Untergrund kann es zu Setzungsschäden kommen, welche an Bauwerken möglicherweise zur Entstehung von Rissen oder im schlimmsten Fall zu einem totalen Bauwerksversagen führen können. Abb. 61 bis Abb. 64 zeigen konstruktive Schäden, verursacht durch Hangbewegungen. In der vorliegenden Arbeit werden diesbezüglich lediglich einige Schadensbilder angeführt, für eine ausführlichere konstruktive Schadensbildersammlung verursacht durch Massenbewegungen möchte ich auf die Arbeit von Hrn. Vostrel (2017) verweisen.



Abb. 61: Einsturz einer Kirche sowie Risse im Boden und der Straße ausgelöst durch Bewegungen im Hang (Hofmann, Jaritz, 2005)



Abb. 62: Deutlich erkennbare Risse in der Straße verursacht durch Kriechen des angrenzenden Hanges (Steinbacher, 2014)



Abb. 63: Stützmauerversagen durch den einwirkenden erhöhten Erddruck²⁶

²⁶ Quelle: <http://kaernten.orf.at/news/stories/2557240/> aufgerufen am 20.06.2017

Abb. 64 links veranschaulicht einen Kriechhang, welcher sich auf ein darunterliegendes Zuggleis hinbewegt. Anhand der Randsteinleiste entlang des Böschungsfußes ist die Bewegung erkennbar. Diese weist keinen geradlinigen Verlauf auf. An den Gleisen selbst sind nur selten Änderungen der Gleislage erkennbar, da minimale Veränderungen bei den regelmäßig durchgeführten Kontrollarbeiten (Durcharbeitung) ausgebessert werden. Sind aber an bestimmten Stellen Nachbesserungsarbeiten sehr häufig notwendig, kann dies ein mögliches Indiz für eine angrenzende Hangbewegung sein. Abb. 64 rechts illustriert einen Abschnitt der Raaberbahn im Burgenland, wo direkt an das Zuggleis ein Kriechhang angrenzt. In diesem Fall sind die Bewegungen sogar an den Verstellungen der Gleise zu erkennen.



Abb. 64: Kriechhang im Bereich einer Zugtrasse (rechts: ²⁷; links: Leopold, 2012)

4.3.3 Sonstige Schadensbilder

Hangbewegungen können ebenfalls an der Wuchsform von Bäumen bzw. an verschobenen Zäunen oder Strommasten erkannt werden. Bei Bäumen spricht man vom sogenannten Säbelwuchs. Darunter versteht man eine auffällige gekrümmte Wachstumsform des Baumstamms auf bewegten Hängen. Krümmung und Alter der Bäume liefern Informationen über die Bewegungen im Hang. Allerdings ist bei der Interpretation mit Vorsicht vorzugehen, da die Verformung des Stamms andere Ursachen als Kriechbewegungen im Untergrund haben kann. Bei sehr steilen Hängen kann gekrümmtes Wachstum nicht nur durch die Hangneigung bedingt sein, außerdem kann der Druck von Schnee im unteren Bereich eines Baumstamms zu Verformungen

²⁷ Quelle: <http://nora.nerc.ac.uk/513294/1/jgeen%252E14%252E00152.pdf> aufgerufen am 21.06.2017

führen (Spektrum, 15.05.2017). Oberflächennahe Kriechbewegungen können außerdem zum Abscheren von Baumwurzeln und somit zum Absterben der Bäume führen. Es kann also auch ein fehlender oder schadhafter Baumbestand als Hinweis für Kriechbewegungen dienen. Die folgende Abb. 65 stellt unterschiedlich gekrümmte Baumstämme dar, die auf mögliches Kriechen im Untergrund deuten können.



Abb. 65: Gekrümmte Baumstämme als Hinweis auf mögliche Hangkriechbewegungen ²⁸

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen wie sich Hangbewegungen an der Wuchsform von Bäumen äußern können. Abb. 66 zeigt verschobene und verdrehte Baumstämme. Derartige Situationen werden als „betrunkenen Wald“ bezeichnet und deuten auf schnellere Bewegungen im Untergrund hin. In Abb. 67 sind säbelwuchsförmige Bäume erkennbar, die durch langsamere Bewegungen entstehen.

²⁸ Quelle:

https://www.geologie.ac.at/fileadmin/user_upload/dokumente/pdf/service/webapplikation/allgemeine_info_mass_end_h.pdf aufgerufen am 20.03.2017



Abb. 66: Bewegungen im Untergrund führen zur Verdrehung von Baumstämmen (Breymann, 2014)



Abb. 67: Säbelwuchsförmige Baumstämmе aufgrund einer kriechenden Hangbewegung²⁹

Bei Zäunen, welche bereits über mehrere Jahre aufgestellt sind, können Kriechbewegungen zu Verschiebungen führen. Befindet sich der Zaun somit nicht mehr in der ursprünglichen Anordnung, so kann dies als Hinweis für mögliche Bewegungen

²⁹ Quelle Abb. links: http://www.bayerwaldwandern.de/sonstiges/treffokt05_17.jpg aufgerufen am 14.05.2017

Quelle Abb. rechts: <http://www.sagen.at/fotos/data/506/medium/Saebelwuchs.jpg> aufgerufen am 01.05.2017

im Untergrund gedeutet werden. Die folgenden Abbildungen (Abb. 68 bis Abb. 69) stellen Schadensbilder von Zäunen an Kriechhängen dar.



Abb. 68: Schrägstellung eines Zauns zufolge Kriechhangbewegung³⁰



Abb. 69: Verschobene Zaunelemente verursacht durch Hangkriechen³¹

³⁰ Quelle: <http://keywordsuggest.org/gallery/1019915.html> aufgerufen am 14.05.2017

³¹ Quelle: <http://www.onegeology.org/extra/kids/earthprocesses/massMovements.html> aufgerufen am 14.05.2017

Weiters können verdrehte Strommasten durch Untergrundbewegungen hervorgerufen werden. Derartige Verdrehungen sind mit dem freien Auge nicht leicht erkennbar, sondern oftmals erst durch den Einsatz von Messinstrumenten. Verdeutlicht werden diese Anzeichen aber durch eine veränderte Durchbiegung der Stromleitungen. Müssen Leitungen ständig nachgespannt werden, bzw. sind diese zu stark gespannt, kann dies auf Verdrehungen der Masten hindeuten. (Abb. 70 links)

Neben linienförmigen Einrichtungen wie Stromleitungen, Zäunen und Wasserleitungen können wie in Abb. 70 rechts erkennbar auch ältere Entwässerungsrinnen bzw. -kanäle Anzeichen für Kriechhangbewegungen liefern. Ist der Kanal geschädigt und einzelne Bestandteile davon verschoben, so kann dies auf Bewegungen im Untergrund hindeuten.



Abb. 70: Links: Neigungsänderung Strommast (Breyman, 2014); rechts: geschädigte Entwässerungsrinne aufgrund von Kriechbewegungen im Untergrund ³²

Abb. 71 stellt eine Kombination unterschiedlicher Schadensbilder eines Kriechhanges dar. Die Bewegungen im Untergrund machen sich einerseits durch die unregelmäßige Hangmorphologie erkennbar, andererseits aber auch durch den leicht verschobenen Zaun und den Hangfuß, der sich auf die Straße hinbewegt. An der Straßenoberfläche ist erkennbar, dass es im Bereich unterhalb des Kriechhanges bereits zu Sanierungsarbeiten gekommen ist, da sich der Asphalt an dieser Stelle farblich vom übrigen unterscheidet.

³² Quelle: http://www.geo-international.info/BASt_Schlussbericht.pdf aufgerufen am 22.06.2017



Abb. 71: Kriechhang mit unterschiedlichen Schadensbildern an Oberfläche, Zaun und Straße³³

³³ Quelle: <http://www.geograph.org.uk/photo/152258> aufgerufen am 21.06.2017

5 Beobachtungsmethoden

Zur Überwachung von Massenbewegungen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden. Der Ablauf einer ingenieurgeologischen Untersuchung sowie die verschiedenen Messinstrumente, welche beim Monitoring von Hangbewegungen zum Einsatz kommen können, werden im vorliegenden Kapitel behandelt.

5.1 Untersuchungsmethoden / Erkundung

5.1.1 Ingenieurgeologische Untersuchung

Zur ingenieurgeologischen Untersuchung zählen zufolge Genske (2006) die Auswertung vorhandener Geologieunterlagen des jeweiligen Gebietes, die geologischen in-situ Verhältnisse, die anthropogene Überprägung³⁴, die Analyse von Bodenproben, die Darstellung der Ergebnisse in Lageplänen und Längenschnitten und eine verständliche Erläuterung in einem Bericht. Unterteilt wird die Untersuchung in Voruntersuchung, Hauptuntersuchung, projektbegleitende Untersuchung und Nachuntersuchung. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Untersuchungsetappen gemäß *Ingenieurgeologie* von Genske (2006) genauer beschrieben.

- **Voruntersuchung:**

Im Rahmen der Voruntersuchung wird eine erste grundlegende Analyse des Geländes dargestellt. Somit bildet die Voruntersuchung bereits einen sehr wichtigen Bestandteil der Untersuchungsetappen, da zufolge deren Ergebnisse bereits Entscheidungen getroffen werden, ob zum Beispiel Bauprojekte in diesem Gebiet grundsätzlich möglich sind und wie die Situation und die Gefahr bezüglich Massenbewegungen aussieht. Anschließend an die Resultate der Voruntersuchung wird entschieden, ob weitere, umfangreichere Untersuchungen im Zuge einer Hauptuntersuchung durchgeführt werden sollen. Die Voruntersuchung wird unterteilt in die Vorauswertung und die Vorerkundung.

Bei der Vorauswertung werden verfügbare Unterlagen von Landesämtern, Archiven, Fachveröffentlichungen und Interessensverbände ausgewertet. Dabei werden vorliegende Kartenwerke, Luftbilder und Archive verwendet, um eine erste Einschätzung über den Zustand des Gebietes, die geologischen Verhältnisse und die anthropogene Überprägung zu erhalten. Topographische Karten liefern Informationen über Höhenlinien, Geländeform, Gewässervorkommen, usw. Der

³⁴ Anthropogene Überprägung: durch menschlichen Einfluss werden die natürlichen Bodeneigenschaften verändert (z.B. Versiegelung oder Umlagerung von Bodenmaterial)

Vergleich von Karten verschiedenen Alters kann Informationen über Geländeänderungen liefern (Prinz/Strauß, 2011). Informationen aus topographischen Karten alleine sind jedoch oftmals nicht ausreichend, können aber als Kombination mit weiteren Unterlagen nützlich sein. Darüber hinaus werden geologische Karten ausgewertet, welche die geologischen Verhältnisse beschreiben und Auskunft über Art und Alter des Gesteins, sowie die Mächtigkeit der vorkommenden Schichten geben. Hydrogeologische Karten liefern Informationen über die Grundwassersituation und das Vorkommen von Grundwasserleitern und Aquiferen. Sind weitere Spezialkarten, wie Baugrundkarten, Gefährdungskarten, Biotopkartierungen, usw. vorhanden, sollten diese ebenfalls ausgewertet und für die Vorauswertung herangezogen werden. Neben den Informationen aus den unterschiedlichen Kartenwerken, liefern Luftbilder wichtige Hinweise über das Gelände. Durch Aufnahmen aus der Vogelperspektive ist die Hangmorphologie besser erkennbar, als im Zuge einer örtlichen Begehung. Außerdem lassen sie die Grauton-Luftbilder gut interpretieren, um daraus ingenieurgeologische Informationen zu erhalten. Helle Grautöne deuten auf trockene, durchlässige Böden, während dunkle Grautöne auf feuchte, bindige Materialien schließen lassen. Einheitliche Grautöne zeigen eine einheitliche Geologie, fleckige Muster liefern Hinweise für variierende Bodenverhältnisse oder Variationen der Bodenfeuchte.

Bei der Vorerkundung, dem zweiten Teil der Voruntersuchung, werden im Zuge von Geländebegehungen Daten aufgenommen und anschließend in Lageplan und Profil dargestellt. Die Übersichtskartierung schließt an die Erstbegehung an und dokumentiert Aufschlussverhältnisse, geomorphologische Besonderheiten, Naturräume, Gewässer, anthropogene Überprägung, Zugangsrechte und Begehung und Befahrbarkeit des Geländes. Die Übersichtskartierung vervollständigt die zu Beginn der Untersuchung erstellte Status-quo Karte und bildet die Grundlage für besondere projektrelevante Untersuchungen, welche in der thematischen Kartierung aufgezeichnet werden. Einige Inhalte der thematischen Kartierung, wie geomorphologische Ansprache, Bodenansprache, Gebirgsansprache und hydrogeologische, biologische und anthropogene Ansprache werden im Folgenden kurz angeführt.

Geomorphologische Ansprache

Im Zuge der geomorphologischen Kartierung werden die unterschiedlichen Landformen kartiert. Besondere Beachtung erhalten dabei die exogenen Kräfte, insbesondere Verwitterung, Erosion und Transport.

Bodenansprache

Bei einer bodenkundlichen Ansprache wird die Bildung und Zusammensetzung der im Gelände vorkommenden Bodenarten beschrieben. Um Aufschlüsse zu den Bodenprofilen zu erhalten, werden Schürfe durchgeführt, da diese einen guten Einblick in die Untergrundverhältnisse ermöglichen. Die bodenmechanische Ansprache konzentriert sich auf die mechanischen Eigenschaften des Bodens. Reibungswinkel, Kohäsion, spezifische Wichte und Durchlässigkeit sind Parameter, welche für die Beurteilung der Standsicherheit zwingend erforderlich sind. Diese können mit einfachen Feldversuchen abgeschätzt werden, sollten jedoch durch die Entnahme von Bodenproben und Untersuchungen im Labor ergänzt werden.

Gebirgsansprache

Die Gebirgsansprache umfasst die felsmechanische und die gefügekundliche Ansprache. Im Rahmen der felsmechanischen Ansprache werden die Zusammensetzung des Gesteins, die mechanischen Eigenschaften und die Schichtenfolgen des anstehenden Gebirges untersucht. Die Deutung des Trennflächengefüges ist Teil der gefügekundlichen Ansprache. Klüfte, Schichtung und Schieferung zerteilen das Gebirge in ein Diskontinuum und sind maßgeblich für das mechanische und hydraulische Verhalten des Gebirges verantwortlich.

Hydrogeologische Ansprache

Bei der hydrogeologischen Ansprache werden Oberflächengewässer und die Bergwasserverhältnisse kartiert. Porenwasserdruck bzw. Kluftwasserdruck haben eine destabilisierende Wirkung auf Hänge und können Massenbewegungen auslösen. Auch Quellaustritte müssen aufgezeichnet werden, da diese Hinweise auf wasserführende Schichten liefern können. (Genske, 2008)

Biologische Ansprache

Pflanzen geben Auskunft über die Untergrundverhältnisse und haben darüber hinaus eine besondere Bedeutung für die Stabilität von Hängen. Im Rahmen der Kartierung werden bodenkennzeichnende Pflanzen (Pflanzen, welche bestimmte Bodenarten anzeigen) und grundwasserkennzeichnende Pflanzen unterschieden. Zuletzt genannte geben Hinweis auf den Grundwasserstand, die Bewegung des Grundwassers und dessen chemische Zusammensetzung. Außerdem gibt es reliefkennzeichnende Pflanzen, diese zeigen Bewegungen der Erdoberfläche an.

Anthropogene Ansprache

Menschliche Eingriffe in Hänge müssen kartiert werden, da diese negative Auswirkungen auf die Standsicherheit haben können. Veränderungen der Hanggeometrie, Schwächungen des Hangfußes und das Aufbringen von zusätzlichen Lasten an der Hangkrone können destabilisierend wirken und müssen in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

- **Hauptuntersuchung:**

Nachdem die Voruntersuchungen abgeschlossen sind, wird anhand der Untersuchungsergebnisse die Entscheidung getroffen, ob geplante Projekte umsetzbar sind oder ob eventuell auftretende Risiken zu hoch sind. Kommt es zur Entscheidung, dass ein Projekt umgesetzt wird, werden im Zuge der Hauptuntersuchung aufwendigere Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt. Bisher abgeschätzte Bodenparameter werden auf präzisere Weise im Labor bestimmt, da geringe Abweichungen bereits große Unterschiede bei der Berechnung der Standsicherheit ergeben können. Bohrungen, Schürfe, Aufschlussbohrungen, Sondierungen und dergleichen liefern Ergebnisse für Geologie, Hydrogeologie, Festigkeit und Steifigkeit.

Ebenso wie die Voruntersuchung wird diese Etappe mit Lageplan, Profilen und einem verständlichen und ausführlichen Bericht abgeschlossen.

- **Projektbegleitende Untersuchungen:**

Wird im Zuge von Bauprojekten in den Untergrund eingegriffen, ergeben sich neue Aufschlüsse, welche die Prognosen der Vor- und Hauptuntersuchungen bestätigen oder widerlegen können. Die freigelegten Aufschlüsse (z.B. Baugruben, Bohrpfähle, ...) liefern vollständige Informationen über den Untergrundaufbau. Im Zuge einer projektbegleitenden Untersuchung werden daher freigelegte Aufschlüsse fotografisch aufgenommen, kartiert und für neue Proben verwendet. Mögliche Fehlerprognosen, in der Vor- und Hauptuntersuchung, können somit korrigiert werden und angepasste Maßnahmen für die Projektrealisierung können getroffen werden.

- **Nachuntersuchungen:**

Nachuntersuchungen werden in vereinzelt Fällen nach Abschluss eines Projektes durchgeführt. Dabei werden prognostizierte Werte mit tatsächlich auftretenden

Werten verglichen. Diese Untersuchungen sind für jedes Projekt individuell und können über Jahre, aber auch über Jahrzehnte andauern.

5.2 Überwachung/Monitoring von Massenbewegungen

Die Überwachung bzw. das Monitoring von Hangbewegungen sind äußerst wichtig, um die Gefahr und mögliche Schäden von Massenbewegungen frühzeitig zu erkennen. Oftmals treten Massenbewegungen, wie Rutschungen oder Sturzprozesse zwar ohne Vorankündigen auf, in den meisten Fällen gibt es aber im Vorhinein Bewegungsanzeichen, welche mittels einer Überwachung oder eines Monitorings erfasst werden können. Je früher Bewegungen erkannt und überwacht werden, umso höher ist die Chance diesen entgegenzuwirken und größere Schäden zu vermeiden.

Um die Nomenklatur in dieser Arbeit zu vereinfachen, werden in den nachfolgenden Ausführungen die Begriffe Monitoring, Überwachung und Beobachtung gleichgestellt. Die Aufgabe des Monitorings wird im Folgenden anhand einiger aussagekräftiger Definitionen aus der Literatur angeführt:

„Monitoringsysteme beruhen auf dem Erfassen von Verschiebungen und Verformungen an der Oberfläche und/oder in der Tiefe einer potentiell instabilen Masse.“ (Brandner et al.; S. 20; 2008)

„Intensive Monitoring-Programme beinhalten bei gravitativen Massenbewegung einerseits Messungen bestimmter Charakteristika des Untergrunds, z. B. Porenwasserdruck, Grundwasserstand etc., sowie Aufweitungen von Klüften und Spalten durch Extensiometer (sic!). Andererseits werden aber auch automatisierte Videoüberwachungen (z. B. für Sturzprozesse und Rutschungen) oder Geophone im Untergrund (z. B. für Muren) eingesetzt, um vor herannahenden Massenbewegungen warnen zu können.“ (Glade, Stötter; 2007; Seite 160)

Zufolge der angeführten Definitionen geht es somit darum Deformationen aufzuzeichnen, um die Kinematik und die wesentlichen Einflussgrößen oder sonstige relevante Kenngrößen des Hanges zu erkennen. Dies muss i.A. über einen längeren Zeitraum erfolgen, um Aussagen über die zeitliche Entwicklung eines Hanges treffen zu können. Geomorphologische Hinweise können als erste Information über den Bewegungszustand im Hang genutzt werden. Um jedoch den genauen Bewegungszustand festzustellen, sind Deformationsmessungen erforderlich. Mit Deformationsmessungen werden die räumliche Verteilung und die Geschwindigkeitsvektoren der instabilen Masse, die zeitliche

Geschwindigkeitsentwicklung sowie die räumliche Abgrenzung der bewegten zur unbewegten Masse bekannt.

In welcher Häufigkeit Messungen an einer Massenbewegung durchzuführen sind, ist für jede Massenbewegung individuell zu entscheiden und hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Dabei ist in erster Linie wesentlich, welches Ziel mit dem Überwachungssystem erreicht werden soll. Außerdem sind die Hangaktivität, die Ausdehnung der Massenbewegung, die Genauigkeit der Messmethode, die verfügbaren finanziellen Mittel sowie logistische Faktoren wichtige Entscheidungskriterien. (Brandner et al., 2008)

Jede Messung ist mit Messungenauigkeiten und Messfehlern behaftet. Wie die Minimierung von Fehlern erfolgt, welche Messungen beeinflussen, und wie mit Messungenauigkeiten umzugehen ist, wird im Folgenden behandelt. Dazu wird die Literaturquelle Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance von John Dunncliff verwendet, weitere Quellen sind im Textverlauf angeführt.

Zunächst ist die Definition einiger Begriffe erforderlich. Die Bedeutung von Genauigkeit und Präzision wird im Sprachgebrauch fälschlicherweise oftmals gleichgesetzt. Unter Genauigkeit versteht man ein Maß für die Übereinstimmung zwischen einem gemessenen Wert und dem wahren Wert der Messgröße. Die Genauigkeit eines Geräts wird im Zuge der Kalibrierung ermittelt und kann als \pm Wert angegeben werden. So bedeutet beispielsweise eine Genauigkeit von ± 2 mm, dass sich der gemessene Wert in einem Abstand von maximal 2 mm vom wahren Wert befindet. Präzision hingegen ist ein Maß für den Abstand mehrerer Messungen zum arithmetischen Mittelwert. Von einer hohen Präzision wird gesprochen, wenn mehrere Werte dicht beieinanderliegen. Abb. 72 stellt den Unterschied zwischen Genauigkeit und Präzision dar. Der wahre Wert befindet sich dabei im Kreismittelpunkt. In a) spricht man von hoher Präzision aber geringer Genauigkeit, derartige Fälle werden als systematische Fehler bezeichnet. Fall b) zeigt Messergebnisse mit geringer Präzision und auch geringer Genauigkeit der Einzelmessungen. Steht jedoch eine ausreichende Anzahl an Messergebnissen zur Verfügung, können diese durch Mittelwertbildung zu einem genauen Ergebnis führen. Deren arithmetisches Mittel weist eine hohe Genauigkeit auf sofern die Messungenauigkeit der Einzelmessung durch „zufällige“ Fehler und nicht durch systematische Fehler verursacht wird. In c) sind die Messergebnisse sowohl sehr präzises als auch sehr genau.

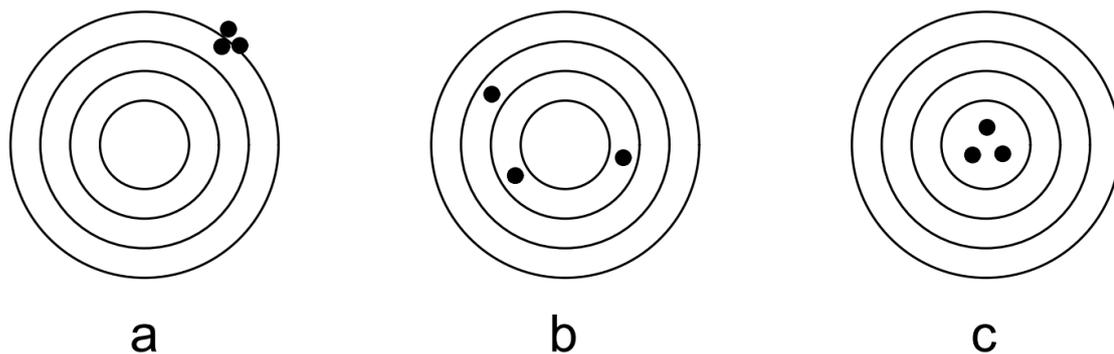


Abb. 72: Genauigkeit und Präzision (adaptiert von Dunncliff, 1988)

5.2.1 Messgrößen

Bei der Durchführung verschiedener Messverfahren kommt es zur Erfassung und Aufzeichnung bestimmter Messgrößen. Der ermittelte Wert einer Messung, der sogenannte Messwert, ist das Produkt der Maßzahl und der Maßeinheit. Zur Ermittlung der Messwerte wird zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden. Bei einem direkten Messverfahren erfolgt der Vergleich des Messwerts mit einem Bezugswert derselben Messgröße. Beim indirekten Messverfahren wird der Messwert durch Rückführung auf andere physikalische Größen ermittelt. (Käser, 2001)

Im vorliegenden Kapitel werden die wichtigsten Messgrößen gemäß der Literaturquelle Handbuch Geotechnik (2012) – Kapitel Geotechnische Messverfahren von Marte, Paulus-Grill und Scharinger beschrieben. Weitere Quellen sind im Text angeführt.

- **Verschiebungen:**

Verschiebungen stellen eine der wichtigsten Messgrößen in der Geotechnik dar. Deren Ermittlung kann direkt (z.B. mittels geodätischer Messungen) oder indirekt erfolgen. Eine indirekte Verschiebungsermittlung kann beispielsweise durch Ableitung aus Inklinometerergebnissen durchgeführt werden.

- **Verdrehungen:**

Verdrehungen können bei Bauwerken als Ergänzung zu Verschiebungsmessungen von Bedeutung sein, aber auch entlang einer Achse (z.B. einer Schlitzwand) erforderlich sein. Die Ermittlung kann beispielsweise auf direkte Weise mittels Inklinometer erfolgen.

- **Verformung / Deformation:**

Unter Verformung versteht man eine Kombination aus Verdrehung und Verschiebung. Dabei kommt es zu einer Verzerrung des Körpers, da unterschiedliche Punkte innerhalb des Körpers verdreht oder verschoben werden.

- **Dehnungen:**

Dehnungen, in Form von Zerrung oder Stauchung, sind die Folge von Spannungs- und Temperaturänderungen. Im Untergrund kann die Dehnungsmessung z.B. mit Gleitmikrometer oder Extensometer erfolgen.

- **Spannungen / Kräfte:**

Eine Veränderung des Primärspannungszustandes erfolgt durch zusätzliche Belastung (z.B. Schüttung, Bauwerk, ...) oder Entlastung (z.B. Baugrubenaushub), wobei erstere zu einer Erhöhung und letztere zu einer Reduktion der Initialspannungen führt. Vor allem im Baugrund ist eine direkte Überwachung einzelner Punkte problematisch, da der Einbau von Sensoren, ohne dabei den umliegenden Bodenbereich zu stören, kaum durchführbar ist. Spannungen und Kräfte werden daher vorwiegend aus Messungen von Reaktionskräften in Strukturelementen abgeleitet, oder durch die Erddruckkontrolle in Trennflächen zwischen Bauwerken und Baugrund ermittelt.

- **Porenwasserdrücke:**

Porenwasserdrücke sind in der Geotechnik von besonderer Bedeutung, da diese die Ursache vieler geotechnischer Schadens- und Versagensfälle sind. Der Porenwasserdruck hat einen großen Einfluss auf das mechanische Verhalten eines Baugrunds. Ändert sich der Porenwasserdruck, so ändert sich auch das mechanische Verhalten des Bodens. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der Wasserdruck im Boden oftmals die wesentliche Kraftkomponente bildet, die auf Bauteile, Erd- oder Felskörper einwirkt. Die Ermittlung des Porenwasserdrucks erfolgt beispielsweise durch den Einbau von Grundwasserpegeln oder Porenwasserdruckaufnehmern und sollte bereits in der Phase der Baugrunderkundung durchzuführen.

- **Temperatur:**

Temperaturmessungen können erforderlich sein, da Temperaturänderungen die zu messenden Größen (z.B. Spannungen) beeinflussen und verändern können. Außerdem können Temperaturschwankungen Einfluss auf die verwendeten Messgeräte haben. Aus diesem Grund ist bei der Auswertung von Messergebnissen oftmals die Berücksichtigung eines Temperaturkorrekturfaktors erforderlich.

- **Beschleunigungen / Schwingungen:**

Wirken zeitlich veränderliche Kräfte auf ein Bauwerk oder den Baugrund, so kann eine Schwingungsmessung erforderlich werden. Gerade bei Bauwerken, die

aufgrund der Konstruktionsart die Möglichkeit haben zu schwingen, müssen solche Messungen durchgeführt werden. Die Schwingungen können dabei direkt auf das Bauwerk einwirken (z.B. Windlast auf ein schlankes Gebäude) oder über den Untergrund in ein Bauwerk eingeleitet werden (z.B. Rammarbeiten, Verkehr, ...).

5.2.2 Messinstrumente zur Überwachung

Zur Überwachung von Massenbewegungen gibt es eine Vielzahl an Messinstrumenten, die zum Einsatz kommen. Tab. 4 liefert einen Überblick über die gebräuchlichsten angewandten Messmethoden, welche im Anschluss an die Tabelle genauer beschrieben werden. Dazu folgt eine Unterteilung nach Instrumente zur Oberflächenaufnahme, Tiefenaufnahme, Fernerkundung und zur Erkundung der Hydrologie.

Tab. 4 Überblick über angewandte Monitoringmethoden (adaptiert aus Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, 2008)

ANGEWANDTE MONITORINGMETHODEN	
Oberflächenaufnahme	Risskartierung
	Rissbeobachtung
	Fluchtstangen
	Webcam-Bildaufnahmen
	Drahtextensometer
	Geodätische Messpunkte
	Laserdistanzmesser
	Kraftmesszellen
	Terrestrische Vermessung
	GNSS - Messungen
Tiefenaufnahme	Bohrloch Extensometer
	Inklinometermessungen
	Trivec Sonde
	TDR-Messungen
	Brunnenpegel- und Piezometermessungen
Fernerkundung	Luftbildauswertung
	Radarinterferometrie
	Laserscanbefliegung
Hydrologie	Niederschlag, Temperatur
	Abflussmengen

5.2.2.1 Risskartierung

Die Risskartierung bildet eine der einfachsten Methoden der Oberflächenaufnahmen. Dabei werden Risse an der Geländeoberfläche in einer Karte aufgenommen und deren Größe (Breite, Tiefe, Ausdehnung) dokumentiert.

5.2.2.2 Rissbeobachtung

Zusätzlich zur Risskartierung ist es vorteilhaft, die Risse über längeren Zeitraum zu beobachten. Zur Rissbeobachtung zählt die Dokumentation der Veränderung der Rissform und Rissgröße. Deren zeitliche Veränderung kann Hinweise auf die Ausdehnung und Bewegungsrate der Hangbewegung liefern und bildet aus diesem Grund eine einfache Messmethode zur groben Abschätzung der Hangaktivität.

5.2.2.3 Fluchtstangen

Die Anwendung von Fluchtstangen ist eine sehr einfache Oberflächenmessmethode zur Lagemessung von Punkten. Eine Fluchtstange ist ein 2-3 m langer Vermessungsstab mit wechselnder rot-weißer Lackierung. Sie werden zur Erstellung von Fluchtungs- und Messungslinien eingesetzt und können aufgrund ihrer abwechselnden Lackierung auch zur Abschätzung von Distanzen verwendet werden. (Spektrum, 23.08.2017)

5.2.2.4 Webcam-Bildaufnahme

Die Webcam-Bildaufnahme ermöglicht durch Fotoaufnahmen an der gleichen Stelle zu verschiedenen Zeitpunkten die Erstellung eines Zeitraffers. Anhand von Zeitraffern ist es möglich Veränderungen zu erkennen, die bei Betrachtung mit dem freien Auge oder von nur einzelnen Bildaufnahmen nicht zur Geltung kommen würden. Diese einfache Monitoringmethode bietet sich idealerweise an, um zu erkennen, ob sich ein Bewegungsbereich ausdehnt und es zu oberflächlichen Veränderungen kommt oder die Hangsituation unverändert bleibt.

5.2.2.5 Drahtextensometer

Oberflächendrahtextensometer werden verwendet, um die Längenänderung zwischen zwei Punkten an der Oberfläche zu messen. Der Aufbau eines Drahtextensometers ist in Abb. 73 dargestellt. Um die Rissbreitenänderung zu messen, wird ein Draht gespannt, der an einem Ende im unbewegten Hangbereich fixiert ist. Das andere Ende des Drahts wird am gegenüberliegenden Hangbereich des Risses über eine Umlenkrolle mittels Gewicht gespannt. Am Draht befindet sich eine Messskala auf der die Längenänderung abgelesen werden kann. Es gibt sowohl mechanische als auch elektrische Drahtextensometer. Elektrische Geräte bestehen aus einem Wegaufnehmergehäuse,

einem Messdraht und einem Verbindungsanker. Im Wegaufnehmergehäuse befindet sich ein Drehweggeber, der je nach Winkelverstellung der Drahtwickelrolle, die Längenänderung aufnimmt.

Drahtextensometer sind sehr einfach, flexibel montierbar und robust. Die Drahtspannweite reicht bis zu einigen 10er-Metern und es wird je nach Länge des Messdrahts eine Genauigkeit von ± 1 mm erreicht. Werden die Messungen kontinuierlich abgelesen, ist der Einsatz dieses Messgeräts als Monitoring- bzw. Frühwarnsystem möglich. (Rapp, 2011)

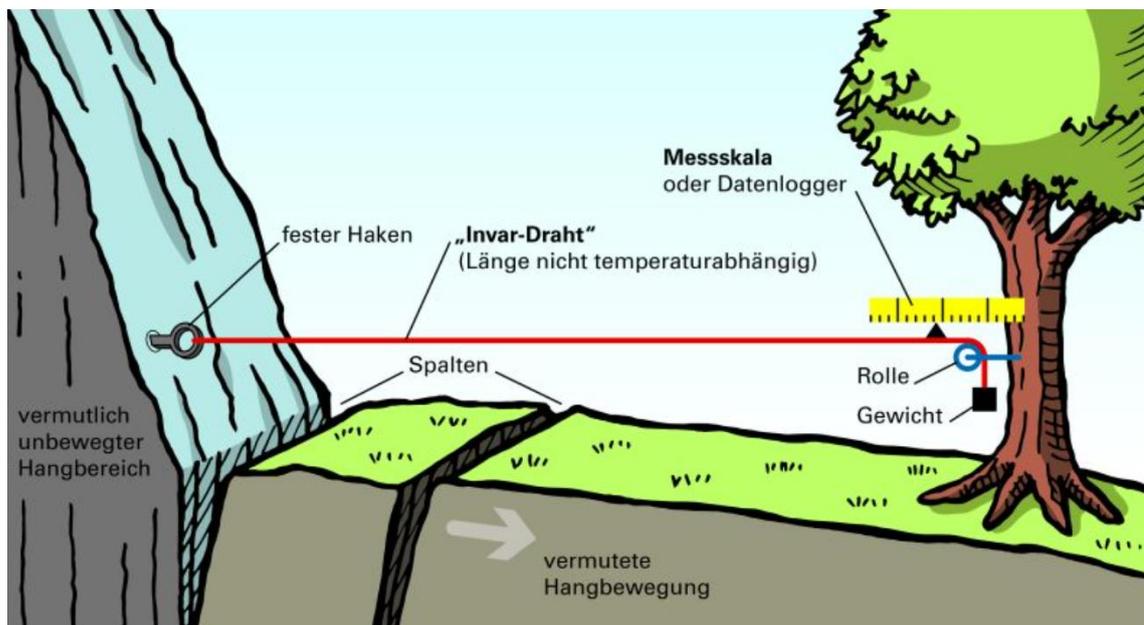


Abb. 73: Prinzip Drahtextensometer³⁵

5.2.2.6 Geodätische Messpunkte

Zur Überwachung von Hangbewegungen können an der Geländeoberfläche im rutschungsgefährdeten Gelände geodätische Messpunkte installiert werden. Dadurch kann die Bewegungsrate oberflächennaher Verformungen ermittelt werden. Bei der Platzierung der Messpunkte ist es notwendig einige Kriterien zu berücksichtigen. Messpunkte müssen in entsprechender Tiefe eingebaut werden, sodass sie sich in frostfreier Lage und unterhalb des Bereichs, welcher saisonalen Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt ist, befinden. Frosthebungen oder Quellen von Tonmineralien können beispielsweise zu vertikalen Verformungen führen und das Ergebnis beeinflussen.

³⁵ Quelle: <https://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/hangbewegungen/index.htm> aufgerufen am 22.05.2017

5.2.2.7 Laserdistanzmesser

Laserdistanzmesser werden zur Messung von Relativverschiebungen verwendet. Die Messung erfolgt dabei berührungslos zwischen dem Standort des Lasers und einem Reflektor. Es gibt Handlasermessgeräte, welche bei Distanzen von bis zu 200 m eingesetzt werden, wobei höhere Entfernungen Ergebnisse mit geringer Genauigkeit liefern. Fest installierte Laserdistanzmesser ermöglichen auch für Messtrecken von mehreren 100 Metern präzise Ergebnisse. (Rapp, 2011)

5.2.2.8 Kraftmesszellen

Kraftmesszellen werden auf dem Markt in verschiedenen Bauarten und Baugrößen, je nach Einsatzbereich, angeboten. Beim Monitoring von Hangbewegung kommen Kraftmesszellen vorwiegend zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit von Ankern zum Einsatz. Die Messung der Zugkraft erfolgt in Achsrichtung.

Unterschieden wird zwischen hydraulischen Kraftmessdosen und Kraftmesszellen mit Dehnungsmesstreifen (DMS). Bei hydraulischen Kraftmessdosen ist der Druckraum mit einer Hydraulikflüssigkeit gefüllt und aufgrund der exakt definierten Grundfläche der Messdose kann auf die wirkende Kraft rückgerechnet werden.

Kraftmesszellen mit DMS nehmen die Verformung, verursacht durch die einwirkende Kraft, auf. Dadurch ist eine Rückrechnung auf die Zugkraft möglich. (Marte, 2015)



Abb. 74: Hydraulische Kraftmessdose mit Manometer direkt an der Messdose³⁶

³⁶ Quelle:
<http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/1%20Messwertaufnehmer/2%20Kraft%20und%20Ankerkraft/P%200041.00%20Ankerkraftgeber%20KN%20de.pdf> aufgerufen am 19.08.2017

5.2.2.9 Theodolit / Tachymeter (terrestrische Vermessung)

Theodolit und Tachymeter dienen zur Bestimmung der Lage von Punkten im Raum in Form von Koordinaten. Die beiden Messgeräte unterscheiden sich dadurch, dass mittels Tachymeter die direkte Entfernungsmessung möglich ist. Sind die Geräte zusätzlich mit Laserdistanzmessern ausgestattet, wird von Totalstationen gesprochen.

Tachymeter messen die Richtung, den Horizontal- und Vertikalwinkel sowie die Distanz. Bereits 2 Messungen ermöglichen die Ermittlung eines dreidimensionalen Verschiebungsvektors. Anhand der Messung mehrere Punkte ist eine genaue Modellierung der Massenbewegung möglich.

Werden die Messungen zu verschiedenen Zeiten durchgeführt, so können durch die Änderung im Vergleich zur vorhergehenden Messung Rückschlüsse über die kinematische Entwicklung der Bewegung gewonnen werden. Eine Automatisierung der Messungen ist möglich, wodurch sich diese Art der Messgeräte gut für Monitoringzwecke einsetzen lässt. (Brandner et al., 2008)

5.2.2.10 GNSS – Globale Positionierungssysteme

GNSS basiert auf dem Prinzip der Distanzmessung zu Satelliten und wird bei Monitoring von Massenbewegungen zur hochpräzisen Vermessung von Einzelpunkten eingesetzt. Damit die Vermessung einzelner Punkte möglich ist, muss dieser Sicht auf 4 Satelliten haben. Für Monitoringzwecke erfolgt die Transformation in ein lokales Koordinatensystem und die Anwendung eines differentiellen Messverfahrens (DGPS). Vorteile der GNSS – Methode gegenüber terrestrischer Messverfahren (z.B. Tachymeter) sind, dass keine Sichtverbindung zwischen den Messpunkten bestehen muss, sowie außerdem Wetter und Tageszeit kaum Einfluss auf die Messgenauigkeit haben. Allerdings können bei der Anwendung eines GNSS- Monitorings über mehrere Jahre Schwierigkeiten mit der Positionierung der Referenzstation entstehen. Diese muss sich auf einem unbewegten Bereich befinden, was bei einer Zeitspanne von mehreren Jahren zu Problemen führen kann. (Brandner et al., 2008)

5.2.2.11 Bohrloch Extensometer

Stangen- oder Drahtextensometer werden in einem Bohrloch installiert und dienen zur Messung der Relativverschiebungen zwischen dem Kopfpunkt der Messeinrichtung (z.B. Geländeoberfläche) und einem Verankerungspunkt im Untergrund. Mindestens ein Verankerungspunkt, das Messgestänge bzw. der Messdraht und der Messkopf bilden die Bestandteile des Messgeräts. Das Messgestänge bzw. der Draht kann aus Stahl,

Glasfaser oder Karbon bestehen und wird beweglich in einem Kunststoffrohr geführt. Die Verschiebungen, welche in Achsrichtung des Messinstruments gemessen werden, werden am Messkopf manuell mittels Messuhr oder automatisch mittels Wegaufnehmer erfasst.

Um die Verschiebungen mehrerer Punkte innerhalb eines Bohrlochs zu erfassen, können Mehrfachextensometer angewendet werden. Durch die gemessenen Relativverschiebungen zwischen den einzelnen Verankerungspunkten der Extensometer und den Kopfpunkten ist die Berechnung der Verschiebungsdifferenzen der Punkte im Untergrund möglich. Die Messlänge ist durch die Bohrlochtiefe begrenzt und kann bis zu 100 m und mehr erreichen.

Sondenextensometer, auch genannt Gleitmikrometer, bestehen aus einer mobilen Sonde in der Extensometerhülle. Die Sonde misst die Dehnungsverteilung des Messrohrs in Meterschritten. Die erzielbare Messsonden-Genauigkeit liegt bei $\pm 0,001$ mm pro Meter. (Marte, 2015)

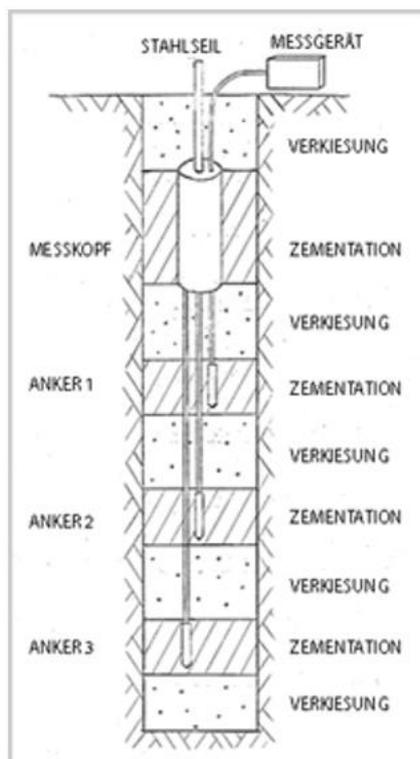


Abb. 75: Mehrfachextensometer³⁷

³⁷ Quelle: <http://www.bst-messtechnik.de/de/services/baubegleitendemessungen/extensometer/> aufgerufen am 21.08.2017

5.2.2.12 Inklinometer

Inklinometer (Neigungsmesser) zählen zu den wichtigsten Messgeräten, die zur Überwachung und beim Monitoring eingesetzt werden. Der Einsatz von Inklinometermessungen ist vielfältig und wird bei der Überwachung von Rutsch- und Kriechhängen vor allem zur Ermittlung der Lage der Gleitfuge eingesetzt. Bei einer Inklinometermessung wird die vertikale Neigung zwischen zwei senkrecht stehenden Richtungen gemessen. Durch die Bestimmung der horizontalen Verschiebung entlang einer vertikalen Bohrung werden Informationen über die Mächtigkeit und interne Deformation einer labilen Masse erreicht. Erfolgen die Messungen in mehreren Episoden, können die Bewegungsgeschwindigkeiten der bewegten Masse bestimmt werden. Die Inklinometermesseinrichtung (Abb. 76) besteht aus einem Führungsrohr, welches in einer vertikalen Bohrung eingebaut und so tief in den Untergrund eingeführt wird, dass sich der Fußpunkt in der unbewegten Zone befindet. Zusätzlich zählt eine hochpräzise Messsonde, ein Verbindungskabel und ein Datenaufzeichnungsgerät zu den Bestandteilen. (Brandner et al., 2008)

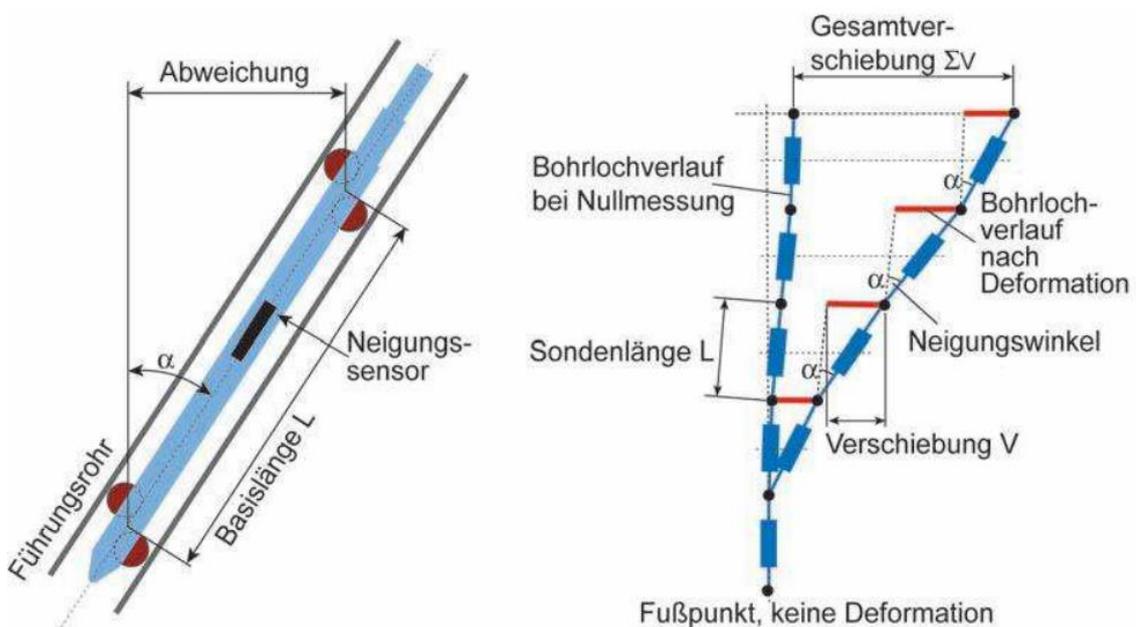


Abb. 76: Links: Aufbau einer Inklinometermesseinrichtung; Rechts: Messprinzip zur Ermittlung der Horizontalverschiebung durch intervallartige Messung der Neigung. (Brandner et al., 2008)

Bei der Durchführung der Messung wird die Sonde in das Führungsrohr eingesetzt und in Messintervallen (Basislänge L) meistens vom Fußpunkt ausgehend nach oben geführt. Die Verschiebung jedes Messintervalls lässt sich durch die gemessene Neigungsänderung mit der Beziehung $L \cdot \sin(\alpha)$ errechnen, α ist dabei der gemessene Neigungswinkel. Die erste Messung, die sogenannte Nullmessung, dient zur Ermittlung des genauen Verlaufs des Messrohrs. Kommt es in Folge zu Hangdeformationen, so

verbiegt sich das Messrohr und Neigungsänderungen treten auf. Bei den Folgemessungen werden wiederum die Verschiebungen für jedes Intervall ermittelt und durch den Vergleich der Werte mit jenen der Nullmessung werden Informationen über die Kinematik der Hangbewegung bekannt. Bei der Inklinometermessung ist zu beachten, dass es zum Auftreten von systematischen Messfehlern kommen kann, sowie in sehr aktiven Hängen zum Abscheren der Bohrung und des Führungsrohrs. Außerdem ist es erforderlich den Fußpunkt des Messrohrs in ausreichender Tiefe zu fixieren, um alle potentiellen Gleitflächen zu erfassen, ansonsten werden lediglich Informationen über interne Deformationen in der bewegten Masse erreicht, nicht aber die über die tatsächliche Gleitfuge. Mit üblich eingesetzten Messgeräten sind Messlängen bis 100 m möglich, wobei eine Messgenauigkeit von $\pm 1 - 2$ mm pro 10 m erreicht wird. (Brandner et al., 2008). Abb. 77 links zeigt Ergebnisse einer Inklinometermessung im Zeitraum von 3 Jahren. Zwischen 11 und 28 m Tiefe sind an der Verschiebungslinie 6 potentielle Gleitflächen erkennbar. Je nach Form der Verschiebungskurven einer Inklinometermessung können Aussagen über die Art und Anzahl der Gleitflächen getroffen werden. Abb. 77 rechts stellt verschiedene Verschiebungskurven dar. Dabei ist a) eine Massenbewegung mit einer beschränkten Bewegungszone b) eine eindeutige Gleitfuge, c) mehrere eindeutige Gleitfugen in unterschiedlicher Tiefe und d) kontinuierliche Scherverformung des Bodens.

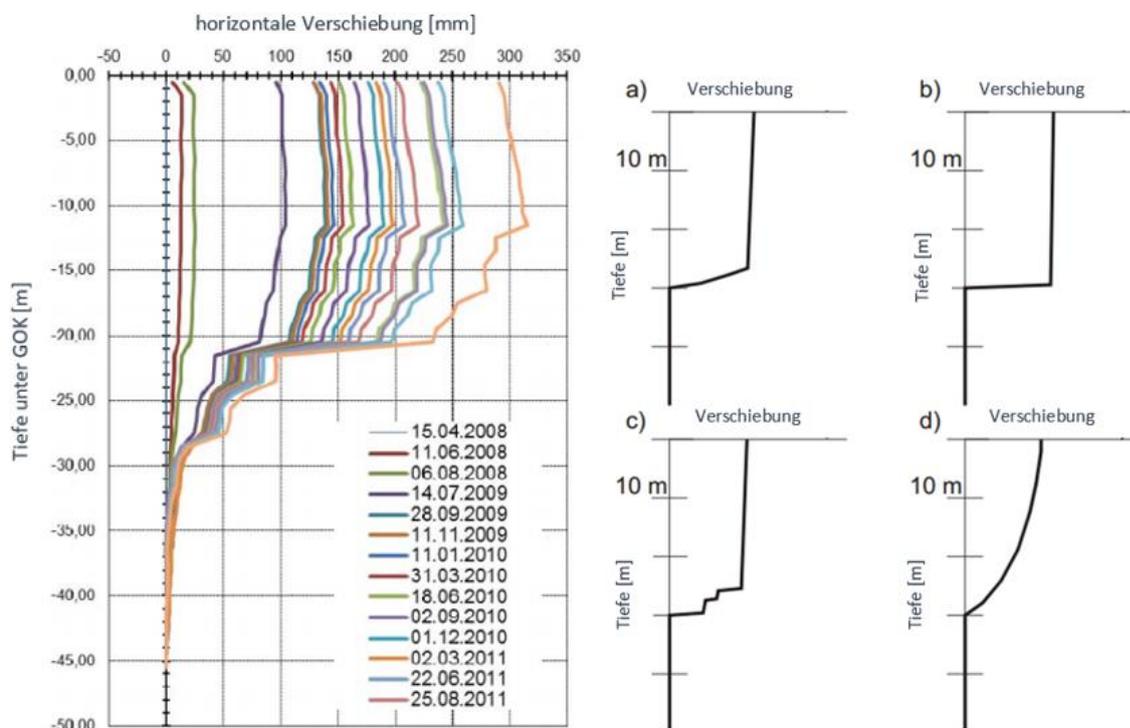


Abb. 77: links: Ergebnisse einer Inklinometermessung; rechts: unterschiedliche Verschiebungskurven (Marte, 2015)

5.2.2.13 Trivec Sonde

Die Trivec Sonde ermöglicht die Messung von Verschiebungen in Bohrlochrichtung sowie außerdem normal auf die Bohrlochrichtung, es handelt sich dabei um eine Kombination aus Inklinometer und Extensometer. Die Funktionsweise ist ähnlich eines Sondenextensometers und einer Inklinometermessung. Das Führungsrohr ist mit Messmarkierungen in Meterintervallen ausgestattet. In den kegelförmigen Messmarken ist ein Verspannen der Sonde möglich, wodurch eine hohe Genauigkeit erreicht wird.

Die Anwendung der Trivec Sonde ermöglicht die Messung aller 3 Verschiebungskomponenten einer vertikalen Bohrung, somit ist dieses Messsystem für komplexe Hangdeformationsmechanismen gut geeignet. (Rapp, 2011)

5.2.2.14 Time Domain Reflectometry

Die TDR (Time Domain Reflectometry) Messmethode wird zur Bestimmung der Tiefe von Bewegungszonen verwendet. Zur Messung wird ein Koaxialkabel, welches mit einem Messgerät verbunden ist, in ein Bohrloch einzementiert. Das Messgerät sendet elektrische Impulse aus. Kommt es zu Deformationen des Kabels, so werden die Impulse an den verformten Stellen zurückgesendet. Durch die Laufzeitmessung der Impulse kann die Tiefenlage der Bewegungszone bestimmt werden. Probleme können bei sehr langsamen Bewegungsraten im Boden auftreten, da langsame Biegungen des Kabels über längere Strecken nicht erkannt werden. Hingegen können bei stark bewegten Gleitungen größere Verschiebungen als bei Inklinometermessungen gemessen werden. Oftmals werden abgescherte Inklinometerrohre nachträglich mit einem Koaxialkabel ausgestattet, um weiterhin Messungen durchzuführen und Kosten für neue Bohrungen zu sparen. (Rapp, 2011)

5.2.2.15 Piezometer

Kräfte und Spannungen können Auswirkungen auf die Kinematik von Massenbewegungen haben, wodurch deren Messung für Monitoringzwecke erforderlich ist. Vor allem Grund- und Kluftwässer spielen dabei eine bedeutende Rolle. Piezometer, auch Wasserdruckaufnehmer genannt, können punktuell das Potential des Grund- oder Bergwassers feststellen. Sie bestehen aus einem Standrohr (Steigrohr), welches senkrecht in einem Bohrloch eingebracht wird und im perforierten Bereich mit Filterkies umgeben ist. Zur Verhinderung des Einfließens von Oberflächenwässern ist der obere Bereich des Rohrs mit Ton-Zement-Suspensionen oder anderen Materialien verfüllt. Am Rohrdeckel ist ein Ventil angebracht, damit das freie Fließen des Wassers möglich ist. Ein Kabel mit Lichtlot wird in das Standrohr gesenkt. Durch die Berührung des Lichtlots

mit dem Wasserspiegel kann der Wasserpegel gemessen werden. Dabei spricht man von offenen Systemen, einer Methode bei der die Lage der freien Oberfläche gemessen wird, ähnlich einem Brunnen. Bei geschlossenen Systemen erfolgt die Messung des Druckunterschieds durch Manometer oder Sensoren, wodurch kein Wassertransport notwendig ist. Durch Installation mehrerer Standrohre in einem Bohrloch ergibt sich die Möglichkeit, die Pegel mehrerer wasserführender Schichten zu bestimmen. (Rapp, 2011)

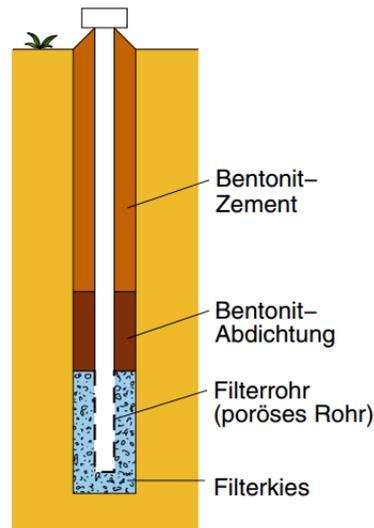


Abb. 78: Aufbau eines Casagrande Piezometers (Kolymbas, 2011)

5.2.2.16 Luftbildauswertung

Die Auswertung von Luftbildern ist eine gute Möglichkeit, um einen Überblick über die Ausdehnung und Verformungen einer Massenbewegung zu erhalten. Durch die Vogelperspektive ist eine Abgrenzung zwischen bewegten und unbewegten Bereichen aufgrund morphologischer Hinweise (Anrisskanten, Buckelbildung, ...) gut erkennbar. Die Messmethode ist für Bereiche mit geringem Bewuchs geeignet, die schwer zugänglich sind oder für großflächige Gebiete. Die Luftbildaufnahmen werden mit einem Fluggerät, an dem eine Kamera mit GNSS Funktion befestigt wird, aufgenommen. Durch den Vergleich von Orthofotos des gleichen Gebietes zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten ist es möglich Verschiebungsvektoren zu ermitteln. Dafür ist es erforderlich Fixpunkte auf den Fotos auszuwählen (z.B. Bauwerke, Bäume, Anrisskanten, ...) und deren Lageänderung zu messen. Eine wesentliche Voraussetzung zur Anwendung dieser Messmethode ist ein Zeitintervall der Luftbildaufnahmen, welches passend zur jeweiligen Bewegungsrate ist. Für langsame Kriechbewegungen kann der Zeitabstand zwischen den Aufnahmen mehrere Jahre betragen, wohingegen bei Rutschungen weitere Fotos nach einigen Stunden bis Tagen erforderlich sind, um die Verschiebungskinetik analysieren zu können. (Rapp, 2011)

Abb. 79 zeigt 2 Luftbildaufnahmen der Rutschung Eggerberg-Gradenbach (genauere Ausarbeitung in Kapitel 5.4). Zwischen den Aufnahmen liegen 34 Jahre. Trotzdem ist es möglich die beiden zu überlagern und Deformationsmessungen durchzuführen. Als Fixpunkt wurde eine Hütte gewählt und deren Lageverschiebung im betrachteten Zeitraum ermittelt.

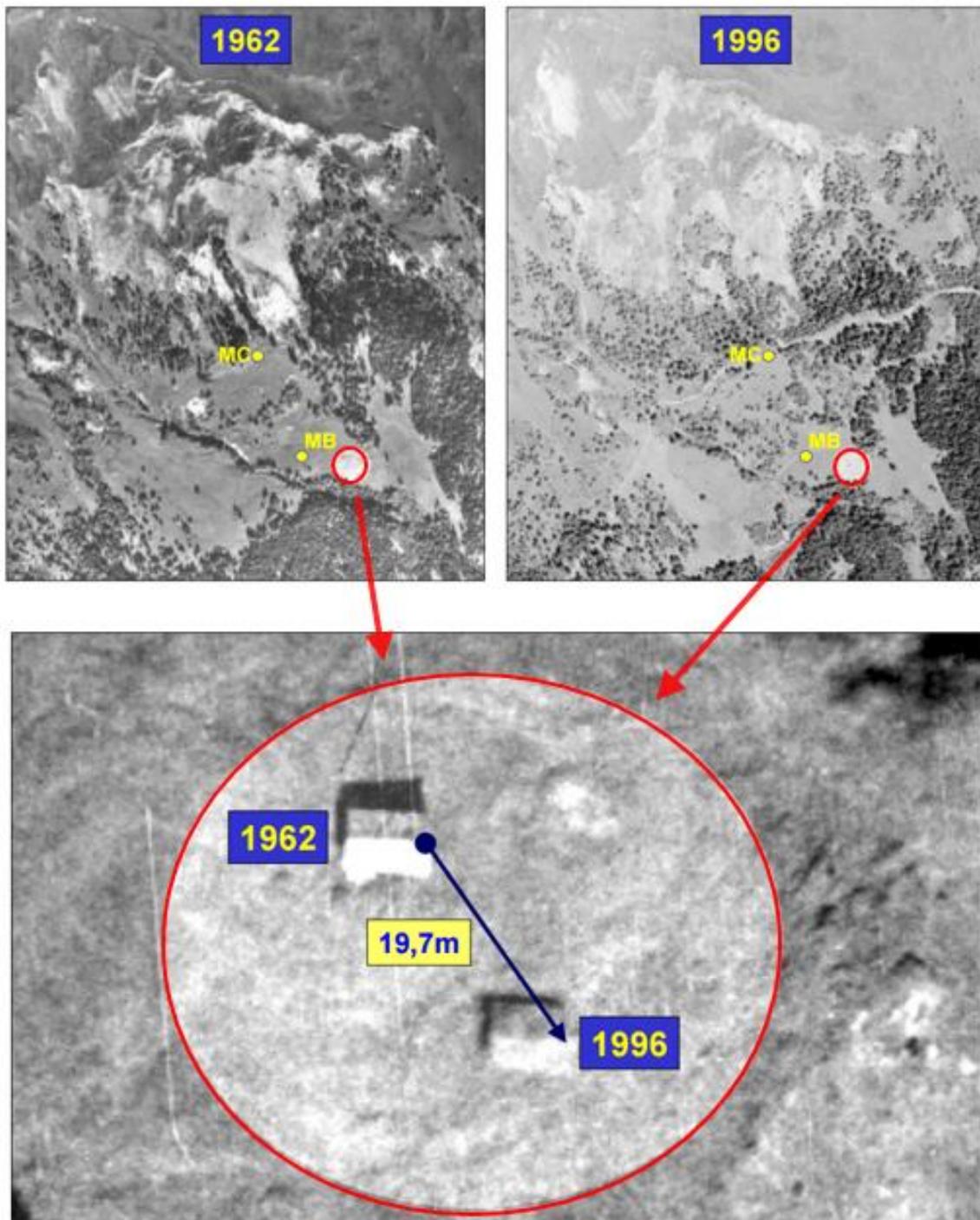


Abb. 79: Luftbildaufnahmen der Rutschung Eggerberg-Gradenbach. 2 Aufnahmen aus den Jahren 1962 und 1996 werden überlagert und daraus die Verschiebung einer Hütte ermittelt. (Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme TU Graz, 2003)

5.2.2.17 Radarinterferometrie

Unter Radarinterferometrie wird eine Methode zur Beobachtung von Geländebewegungen unter Anwendung von Radar- oder Mikrowellen verstanden. Um die Lage von Punkten im Untersuchungsgebiet zu bestimmen, ist es erforderlich das Gebiet von zwei verschiedenen Positionen aus aufzunehmen. Erfolgt die Aufnahme in zeitlichen Abständen, so ist es möglich aus der Phasendifferenz Oberflächenverschiebungen im Gelände zu ermitteln. Unterschieden wird zwischen satellitengestützten und terrestrischen Radaraufnahmen. Im Zuge der satellitengestützten Radaraufnahme senden Satelliten Radarwellen an die Erdoberfläche. Von dort aus werden diese reflektiert. Wenn sich ein Hang in Bewegung befindet, ändert sich die Distanz zwischen Geländeoberfläche und Satelliten innerhalb der Messperioden. Vorteile der Methode sind die flächendeckende Anwendbarkeit, sowie außerdem die mögliche Überwachung schwer zugänglicher Gebiete. Zu erwähnen sind aber auch die mit der Methode verbundenen Nachteile. Aufgrund der Umlaufbahnen der Satelliten ist die Erfassung von Bewegungen in westöstlicher Richtung besser als in nordsüdlicher Richtung. Außerdem ist die Anwendung in sehr steilen Gebieten nicht immer möglich und bei schneebedeckten Flächen treten oftmals Störungen der Radarwellen auf. Zur Anwendung terrestrischer Radaraufnahmen ist ein günstiger Standpunkt erforderlich. Die bodengestützten Systeme bilden den Vorteil, dass diese sehr flexibel einsetzbar und schnell verfügbar sind. Vorwiegend werden terrestrische Aufnahmen zur lokalen Überwachung von Rutschungen oder Felswänden angewendet. Je nach den zu messenden Bewegungsraten werden unterschiedliche Sensoren eingesetzt. Bei den Messergebnissen kann von einer hohen Genauigkeit im Millimeterbereich, sowie außerdem einer guten Auflösung ausgegangen werden. (Raetzo, 2011)



Abb. 80: Satellitenradarbilder von Rutschungen, die farbigen Flächen zeigen Bewegungsbereiche³⁸

³⁸ Quelle: http://www.sia.ch/uploads/media/sbz-004_2011_137_17-18_a_003.pdf aufgerufen am 02.07.2017

5.2.2.18 Laserscanbefliegung

Eine weitere Fernerkundungsmethode zur Überwachung von Massenbewegungen bildet das Laserscanning (Lidar). Ein Laserstrahl trifft auf die Oberfläche, wird von dort reflektiert und das rückgesendete Signal gemessen. Zum Einsatz kommen terrestrische und luftgestützte Lidar-Geräte. Erst genannte können bei Distanzen von einigen 1000 Metern eingesetzt werden und erstellen ein qualitatives Bild mit bis zu 400 Punkten pro m². Die Messungenauigkeit liegt bei einer Distanz von 50 m bei 0,6 bis 15 mm. Luftgestützte Laserscanner haben eine geringere Auflösung und erreichen eine Höhengenaugigkeit von 10 bis 20 cm. Zum Einsatz kommen sie aus Flugzeugen oder Helikoptern. Die Auflösung liegt bei nur einigen Punkten pro m², wodurch diese für Rutschungen nicht die geeignetste Methode darstellen. Im Vergleich zu Radarmessungen sind Laserscanner günstiger und ermöglichen eine bessere dreidimensionale Erfassung des Geländes. Bezüglich Genauigkeit, Störanfälligkeit bei atmosphärischen Veränderungen und Reichweite bietet die Radarmessung allerdings bessere Ergebnisse. (Raetzo, 2011)

5.2.2.19 Hydrologische Messeinrichtungen

Hydrologische Messeinrichtungen dienen zur Ermittlung von Niederschlag, Temperatur sowie Abflussmengen an Gerinnen. Informationen zu Niederschlag und Temperatur werden von Wetterstationen erhalten oder ansonsten mittels einfacher Niederschlagsmessern und Thermometern bestimmt. Zur Bestimmung von Abflussmengen an Gerinnen kommen verschiedene Methoden zum Einsatz. Flügelmessung, Tracerverfahren und Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP) sind die bekanntesten Verfahren.

5.2.3 Planung eines Monitorings

Beim Monitoring von Massenbewegungen werden laufend Daten erfasst, verarbeitet und ausgewertet, um daraus Schlussfolgerungen treffen zu können. Die größte Herausforderung bei der Planung eines Monitorings bildet die Festlegung zuverlässiger Alarm- und Grenzwerte. Laut ÖGG Salzburg (2017) bildet die Grundlage für ein effektives Monitoring die Kombination vorhandener Schadensbilder mit möglichen Versagensmechanismen und den jeweiligen vorherrschenden Randbedingungen. Aufbauend darauf ist es mögliche Messgrößen zu erfassen und mittels einer Sensitivitätsanalyse Grenzwerte zu definieren. Ob es beim Erreichen der Grenzwerte zu einem abrupten Versagen oder zu weiteren langsam fortschreitenden Deformationen kommt, ist kaum zu beantworten und muss für die jeweilige Situation von Fachexperten

bewertet werden. Die Grenzwerte müssen dabei immer wieder an die tatsächlich erfassten Werte angeglichen und an die jeweilige Entwicklung der Hangdeformationen angepasst werden. (ÖROK, 2014)

5.2.4 Positionierung eines Monitorings

Die Positionierung der Messeinrichtungen ist für jede Hangbeobachtung individuell zu planen. Laut Handbuch Geotechnik (Marte, Paulus-Grill, Scharinger, 2012) wird bei der örtlichen Positionierung von Messungen zwischen Messgrößen im Baugrund, Messgrößen zur Überwachung der Bauausführung, Messgrößen an Bau- und Konstruktionsteilen im Bau- und Endzustand und Messgrößen an angrenzenden Objekten unterschieden. Zur Beobachtung von Massenbewegungen sind hauptsächlich erst- und letztgenannte von Bedeutung. Im Untergrund werden Messeinrichtungen zur Ermittlung von Spannungen, Verschiebungen und Porenwasserdrücken installiert. An angrenzenden Objekten werden im Zuge des Monitorings hauptsächlich Größen gemessen, anhand derer eine Formveränderung des Objekts festgestellt werden kann. Dazu zählen Setzungen und Lageveränderungen, sowie Risse, welche aufgrund von Änderungen der Lastableitung oder Bewegungen entstehen. Außerdem ist es erforderlich Grundwasserstände an Objekten, welche sich im Einflussbereich einer Massenbewegung befinden, zu überwachen. Abb. 81 zeigt einen möglichen Aufbau eines Messkonzepts zur Überwachung einer Massenbewegung.

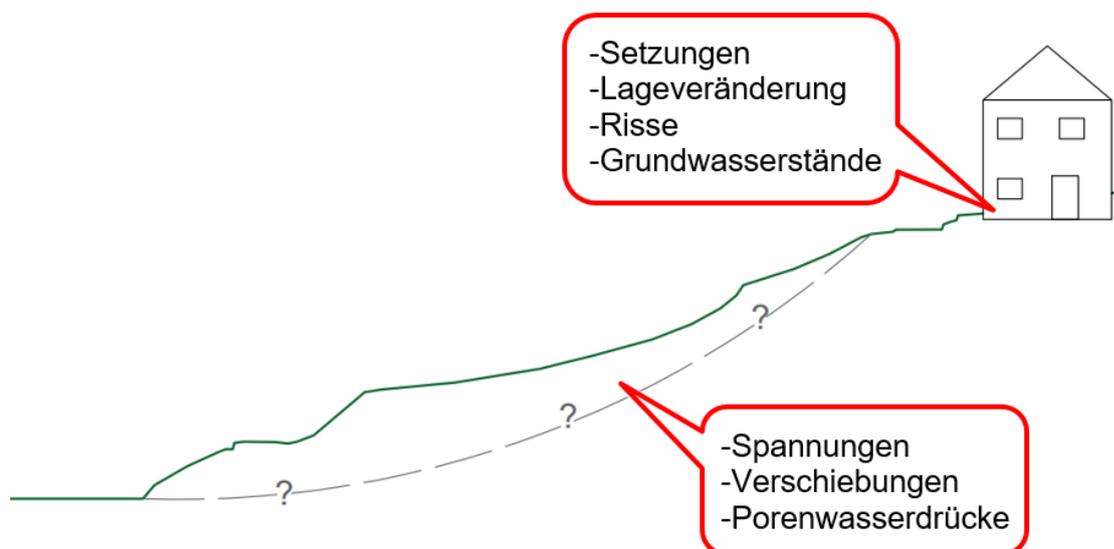


Abb. 81: Möglicher Aufbau eines Messkonzepts

5.2.5 Randbedingungen bei der Überwachung von Massenbewegungen

Ein effizientes Monitoring einer Massenbewegung bietet die Möglichkeit die Gefahr für Verkehrswege und Siedlungsräume wesentlich zu verringern. Durch Überwachung kann ein Versagen frühzeitig erkannt und durch rechtzeitiges Entgegenwirken das Ausmaß an Schäden geringgehalten werden. Dies ermöglicht eine enorme Risikoreduktion und Aufwandminimierung von sonst erforderlichen Sanierungsarbeiten. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass ein Monitoringsystem eine Hangbewegung weder verbessern, noch entschleunigen oder die Ursachen der Bewegung beseitigen kann, sondern lediglich Daten über die aktuelle Hangkinematik liefert. Die Installation von Messeinrichtungen reicht nicht aus, um eine Gefahr zu verringern oder Schäden zu vermeiden, erst die dazu umgesetzten Schritte können der Situation entgegenwirken und diese verbessern.

5.3 Fallbeispiel Großrutschung Höhenberg Großraming

Im Osten Oberösterreichs setzte sich im Jahr 2013 aufgrund von Starkregenereignissen ein Hang nahe dem Ort Pechgraben in Bewegung. Abb. 82 zeigt die geographische Lage der Massenbewegung. Die Unterlagen sind dem Vortrag der Wildbach- und Lawinenverbauung von Gasperl und Tartarotti (2014) entnommen, weitere Quellen sind im Text angeführt.



Abb. 82: Darstellung der geographischen Lage der Großrutschung Höhenberg Großraming im Osten Oberösterreichs³⁹

³⁹ Quelle: <https://www.google.at/maps> aufgerufen am 19.06.2017

Im Jänner 2013 herrschte eine niederschlagsreiche Periode, welche Bewegungen im Untergrund auslöste und zur Entstehung erster Zugrisse an der Geländeoberfläche führte. Bis März des Jahres kam es zu einer Verstärkung der Bewegungen wobei eine Fläche von 7 ha betroffen war. Nach der Umsetzung erster Sofortmaßnahmen wurde ein Monitoringsystem installiert (Abb. 83). Mithilfe des Monitoringsystems konnte festgestellt werden, dass die Bewegungen vorerst zum Stillstand kamen.

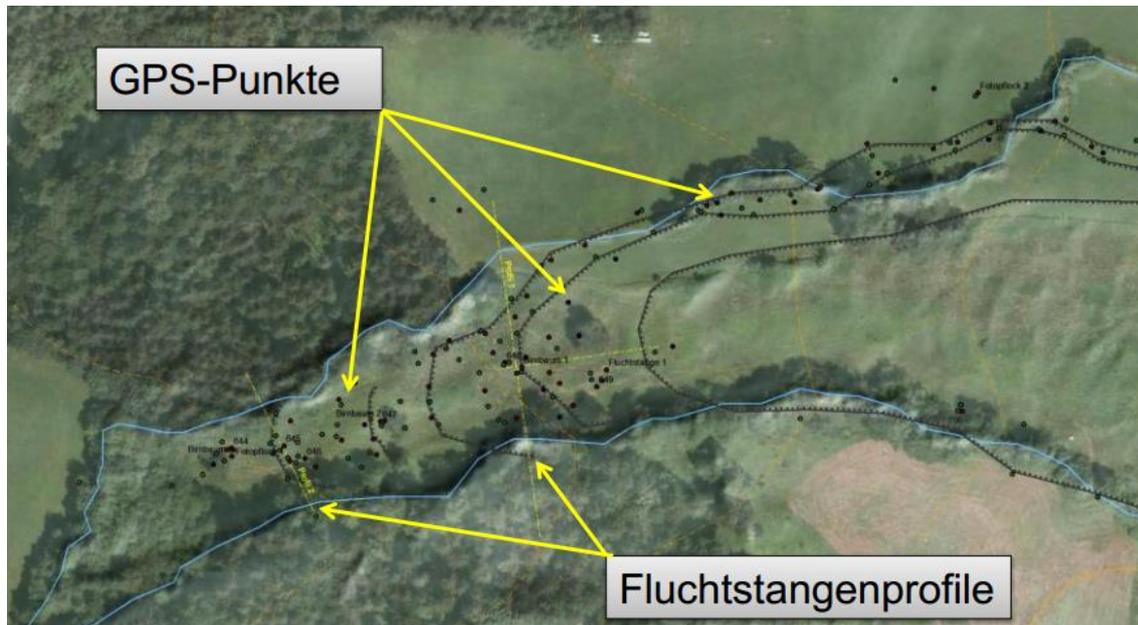


Abb. 83: Monitoringsystem zur Überwachung der Großhangrutschung. (Gasperl, Tartarotti, 2014)

Im Juni 2013 kam es erneut zu starken Niederschlägen. Die Bewegungen traten wieder ein und der Bewegungsbereich dehnte sich von ursprünglich 7 ha auf 80 ha innerhalb von 2 Tagen aus. Mehrere Millionen m³ lockeres Material bewegten sich mit einer Bewegungsrate von ungefähr 4 cm/h talabwärts. Eine angrenzende Siedlung mit 15 Wohnhäusern befand sich im unmittelbaren Gefahrenbereich, außerdem kam es zu einem erhöhten Gefahrenpotential des Ahornleitenbachs. Durch Verschüttung und Verlegung des Bachs würde die Hochwassergefährdung rasant ansteigen. Abb. 84 bis Abb. 88 zeigen Schadensbilder der Situation im Juni 2013 anhand derer das Ausmaß der Großhangrutschung verdeutlicht wird.



Abb. 84: Links: offene Risse im Boden; rechts: Anrisskanten mit Höhenversatz des Geländes im Meterbereich (Gasperl, Tartarotti, 2014)



Abb. 85: Massenverlagerung durch die Rutschbewegung. (Gasperl, Tartarotti, 2014)



Abb. 86: Anwendung einfacher Messinstrumente zur sofortigen Überwachung der Bewegungen. (Gasperl, Tartarotti, 2014)

Abb. 87 und Abb. 88 verdeutlichen die hohe Dynamik der Rutschung. Die Bilder wurden an der gleichen Stelle im Abstand von 2 Tagen aufgenommen. In Abb. 87 sind nur wenige Zaunstempel um 1 bis 2 Meter verschoben. Hingegen weitete sich zwei Tage später der Rutschungsbereich so stark aus, dass der Zaun total zerstört, um etwa 20 m verschoben wurde und die Bodenbewegungen bis weit nach dem Zaunbereich hinausreichten (Abb. 88).



Abb. 87: Ausdehnung der Rutschung an verschobenen Zaunstempeln erkennbar (Gasperl, Tartarotti, 2014)



Abb. 88: Innerhalb von 2 Tagen dehnte sich der Bewegungsbereich extrem aus (Gasperl, Tartarotti, 2014)

Um die Rutschung erneut zum Stillstand zu bringen bzw. zumindest die Bewegungsrate wesentlich zu reduzieren wurden wiederum unmittelbar Maßnahmen durchgeführt. Für die weitere Überwachung des Rutschhanges wurde ein komplexes Monitoringsystem installiert. 5 Kernbohrungen wurden entnommen und Ketteninklinometer eingebaut. Es erfolgte die Errichtung einer Wetterstation, um die Niederschläge zu dokumentieren. An 3 Stellen wurden Grundwasserpegelmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurden 1-2-mal pro Woche GNSS Punkte vermessen und mittels Fotostation und Webkamera Fotozeitraffer, sowie mittels Laser Scanner weitere Aufnahmen erstellt. Abb. 89 zeigt ein Geländemodell, welches im Zuge einer Laser Scan Befliegung erstellt wurde.

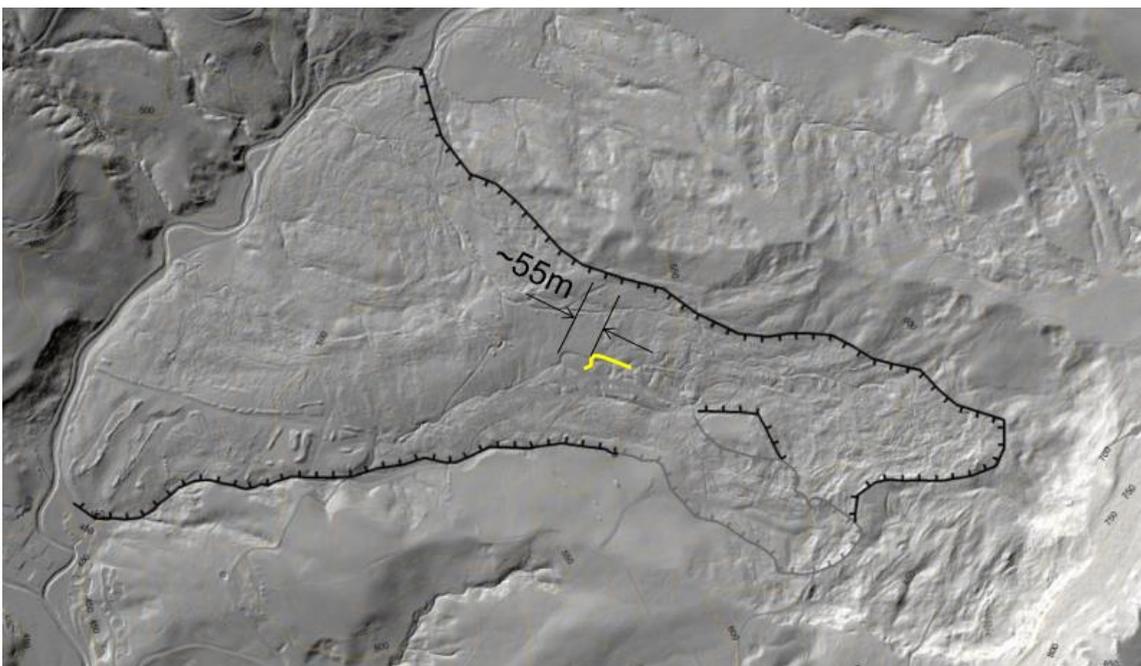


Abb. 89: Geländemodell der Rutschung erstellt durch Airborne Laser Scan Befliegung (Gasperl, Tartarotti, 2014)

In Abb. 90 ist die örtliche Positionierung von Inklinometer, Pegelmessungen und Fotostationen zur Überwachung der Großhangbewegung ersichtlich.

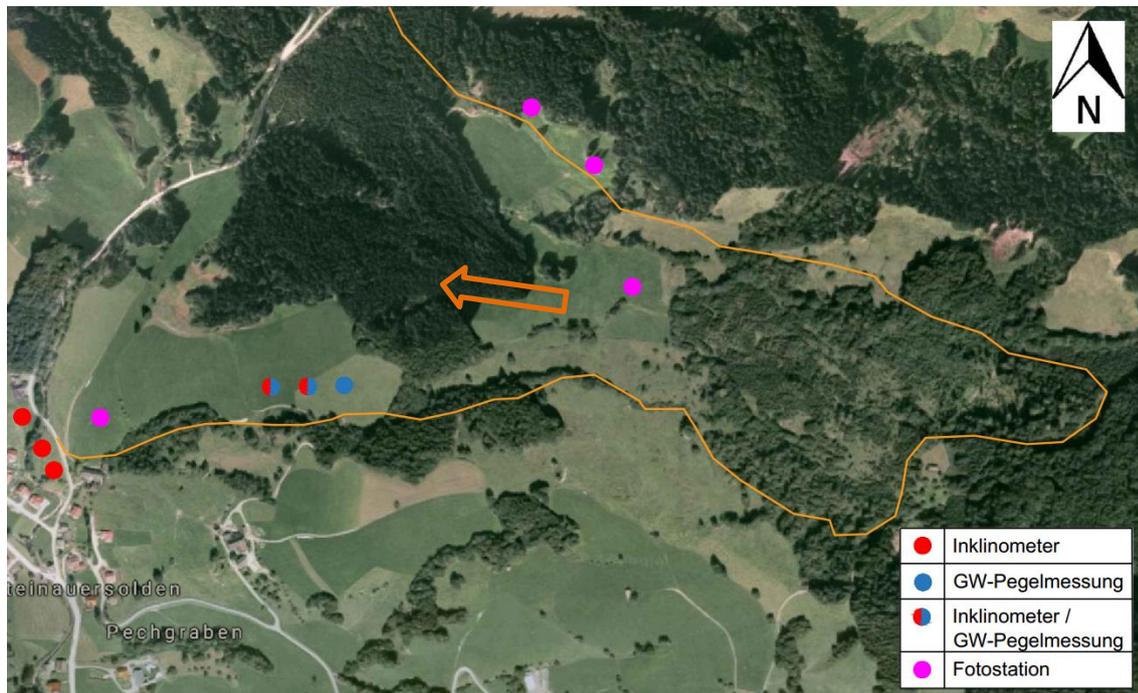


Abb. 90: Übersichtsplan des Bewegungsgebietes mit Positionierung der Messeinrichtungen

5.4 Fallbeispiel Talzus Schub Eggerberg/Gradenbach

Als Quelle für das Fallbeispiel Talzus Schub Eggerberg/Gradenbach wurde der Vortrag von Bäk (2003) herangezogen, weitere Quellen sind im Text angeführt.

Der Talzus Schub Eggerberg / Gradenbach befindet sich im Nordwesten von Kärnten im Gradental kurz vor dem Übergang ins Mölltal (Abb. 91). Der Gradenbach verläuft entlang dem Gradental und weist seit langem immer wieder Probleme zufolge Geschiebetransport auf. Kurz vor Mündung des Gradenbachs in die Möll befindet sich orographisch links der sogenannte Berchtoldhang (Eggerberg), welcher sich kontinuierlich zu Tal bewegt und auf diese Weise ständig das Bachbett des Gradenbachs verengt. Der Kriechhang hat eine Ausdehnung von ca. 1,8 km². Die Anrisskante befindet sich auf etwa 2200 müA, die Rutschungsstirn auf 1100 bis 1270 müA. Die Bewegungszone erstreckt sich über eine Breite von 600 - 1000 m mit einer Gleitflächentiefe von 130 m. Im Bereich der Rutschungsstirn herrscht eine Neigung von 50°, darüber eine mittlere Neigung von 25° mit einigen Steilstufen.



Abb. 91: Darstellung der geographischen Lage des Talzuschubs Eggerberg/Gradenbach im Nordwesten Kärntens⁴⁰

Bereits im Jahr 1965/66 kam es aufgrund der Geschiebemengen zu einem Katastrophenhochwasserereignis. Mit einer derartigen Gefahr ist wegen der immer noch anhaltenden Bewegungen ständig zu rechnen. Dabei beschränkt sich der gefährdete Bereich nicht nur auf den eigenen Schwemmkegelbereich⁴¹, sondern reicht bis weit flussabwärts der Möll.

In den Jahren 1965 und 1966 wurden 1 Mio. m³ Schuttmasse aus dem Gradental verfrachtet und führte zur Verwüstung der Ortschaft Putschall. 15 Häuser mussten zufolge des Katastrophenereignisses aufgelassen werden und mehrere hundert Meter der Mölltaler Bundesstraße wurden zerstört. Dieses Ereignis zählt nicht zu den einzigen in den vergangenen Jahren. Hochwasserereignisse ähnlichen Ausmaßes ereigneten sich bereits mehrmals zuvor, sowie auch etwas später im Jahr 1975. Die enormen Schuttmassen entstehen vorwiegend aufgrund der tiefgründigen Kriech- und Rutschbewegung des Eggerbergs, wodurch der Fels zerschert und aufgelockert wird und demzufolge erosionsanfälligeres Verhalten aufweist. In den letzten Jahren wurden bereits mehrere Geschiebesperren errichtet sowie Sanierungsmaßnahmen

⁴⁰ Quelle: <https://www.google.at/maps/> aufgerufen am 15.06.2017

⁴¹ Schwemmkegel: Übergangsbereich eines gefällereichen Flusses in ein flaches Gerinne. Die Fließgeschwindigkeit und somit auch die Schleppkraft nehmen enorm ab. Diese Bereiche sind anfällig für Verlandungsprobleme und weisen höhere Überflutungsgefahr auf.

durchgeführt. Die Bewegungen hielten jedoch trotzdem noch an, sind aber rückläufig. Mit ca. 11 cm/Jahr waren die Verschiebungen über längere Zeit in einem geringen Bereich. 2009 kam es allerdings erneut zu einer Zunahme. Mit mehr als 40 cm pro Jahr an der Talzuschubstirn stieg die Gefahr erneuter Schadensereignisse wieder an. (Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 2017)

In Abb. 92 ist eine Übersicht des Berchtoldhanges abgebildet. Die Ausdehnung der Kriechbewegung ist in rot markiert. An der Abbildung ist erkennbar, dass sich einige Gebäude innerhalb des Bewegungsbereichs befinden. Da es bis dato nicht möglich war, den Hang zu stabilisieren, besteht für die Bewohner bei jeder Bewegung die Gefahr von Steinschlägen oder Felsstürzen.

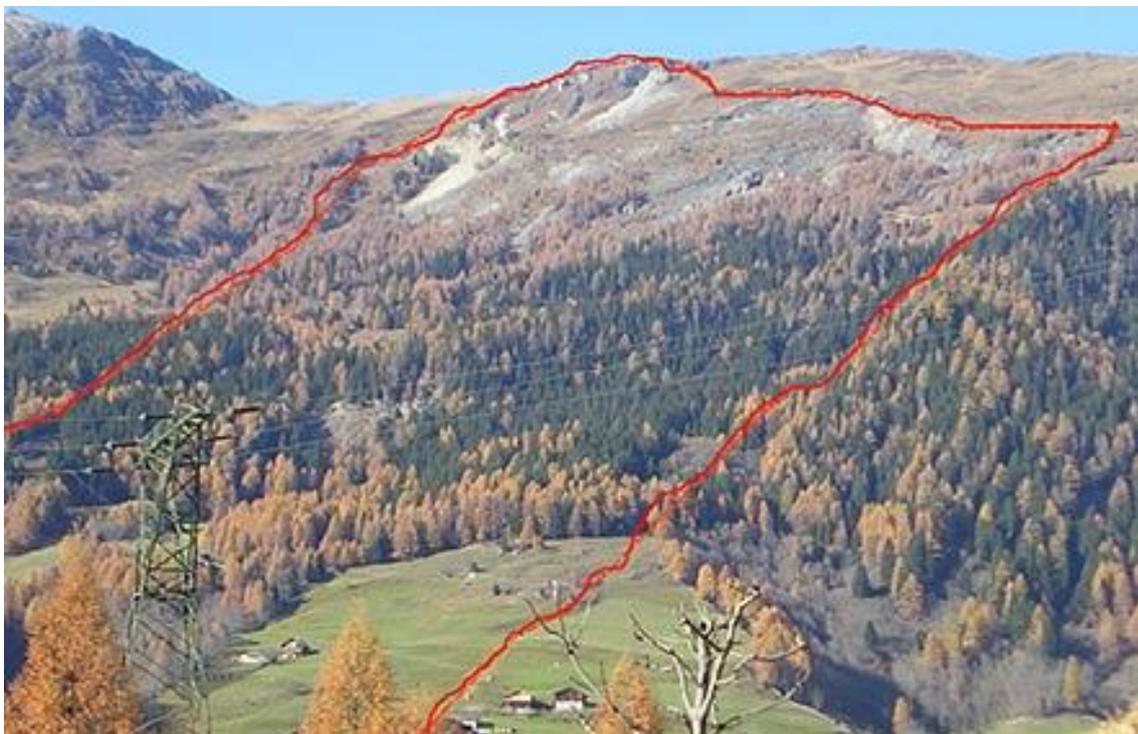


Abb. 92: Berchtoldhang: die rote Markierung stellt den Bewegungsbereich dar⁴²

Abb. 93 und Abb. 94 zeigen Schadensbilder am Berchtoldhang, verursacht durch die losgelösten Schuttmassen.

⁴² Quelle: <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8462> aufgerufen am 16.06.2017



Abb. 93: Durch Bewegungen im Untergrund kommt es immer wieder zu herabstürzenden Felsblöcken, die teilweise zu Schäden an Bäumen führen.⁴³



Abb. 94: Abgerutschte Schuttmassen führen immer wieder zur Zerstörung von errichteten Geschiebesperren.⁴⁴

⁴³ Quelle: <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=8462> aufgerufen am 16.06.2017

⁴⁴ Quelle: http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/Katastrophen_oestr/Talzusub.html aufgerufen am 16.06.2017

Zufolge durchgeführter Beobachtungen und Monitoringmethoden über längere Zeit konnte eine Korrelation zwischen Bewegungsrate und Niederschlag festgestellt werden. Bei stärkeren Niederschlägen kommt es zu einer progressiven Zunahme der Hangbewegung. Somit gilt die Hangdurchfeuchtung als Hauptauslöser der Kriech- und Rutschbewegungen. Abb. 95 zeigt ein Zeit-Verschiebungsdiagramm für den Zeitraum von 1999 bis 2009. Zusätzlich zur Bewegungsrate ist außerdem der Grundwasserpegel erkennbar. Dieser ist im Zeitraum von hohen Bewegungsraten wesentlich höher als in übrigen Phasen. Extreme bilden die Jahre 2000 bis 2002 sowie 2009.

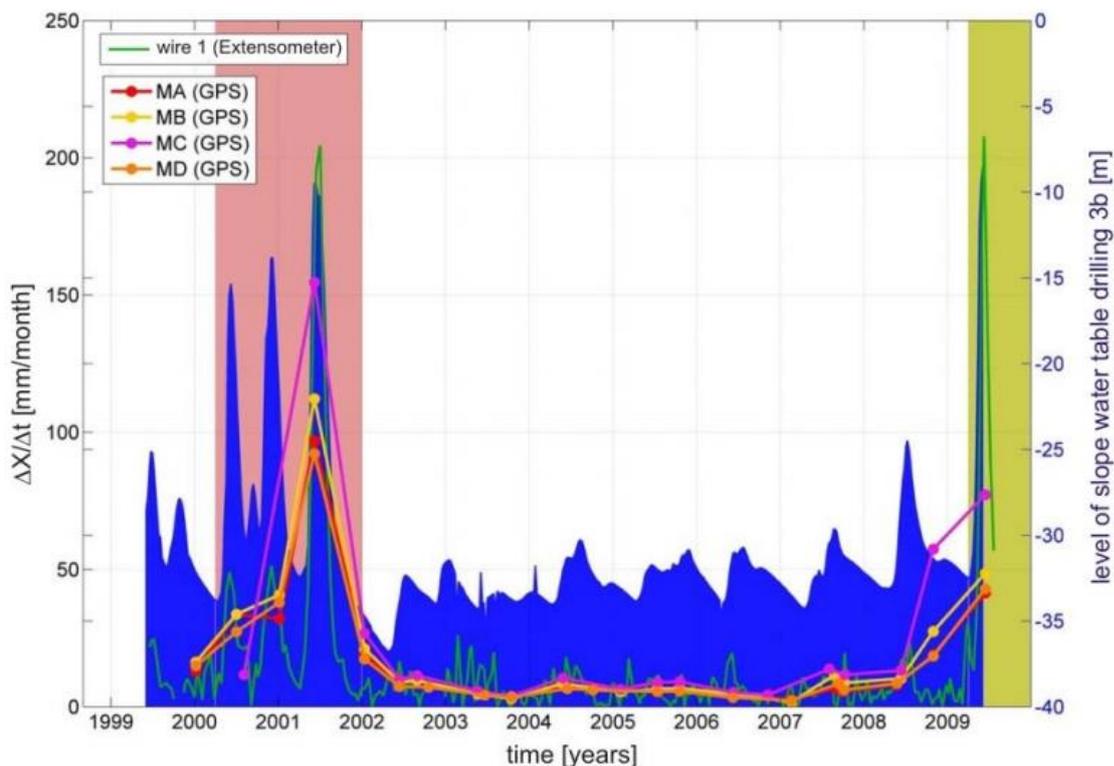


Abb. 95: Zeit-Verschiebungsdiagramm des Bercholthanges mit eingezeichnetem Grundwasserpegel (Lienhart, 2016)

Erstmals wurde im Jahr 1972 mit der Überwachung der Hangbewegung begonnen. Durch regelmäßiges Messen des Abstandes zwischen zwei Fixpunkten an beiden Seiten des Ufers war es möglich auf die Bewegungsgeschwindigkeit im Hangfuß rückzuschließen. Heute kommt ein komplexes Monitoringsystem zum Einsatz, bei welchem es zu einer Kombination von absoluten und relativen Verschiebungsmessungen kommt, mit vollautomatisierten Messeinrichtungen und Echtzeit-Ergebnissen. Abb. 96 stellt eine Übersicht des Kriechhanges mit den unterschiedlichen angebrachten Messinstrumenten dar. Zur Überwachung erfolgen folgende Messungen: GPS, Seismik, Wasserpegel, Durchfluss, Drainageabfluss, Meteorologie, Extensometer, Strainrosette und terrestrische Vermessung.

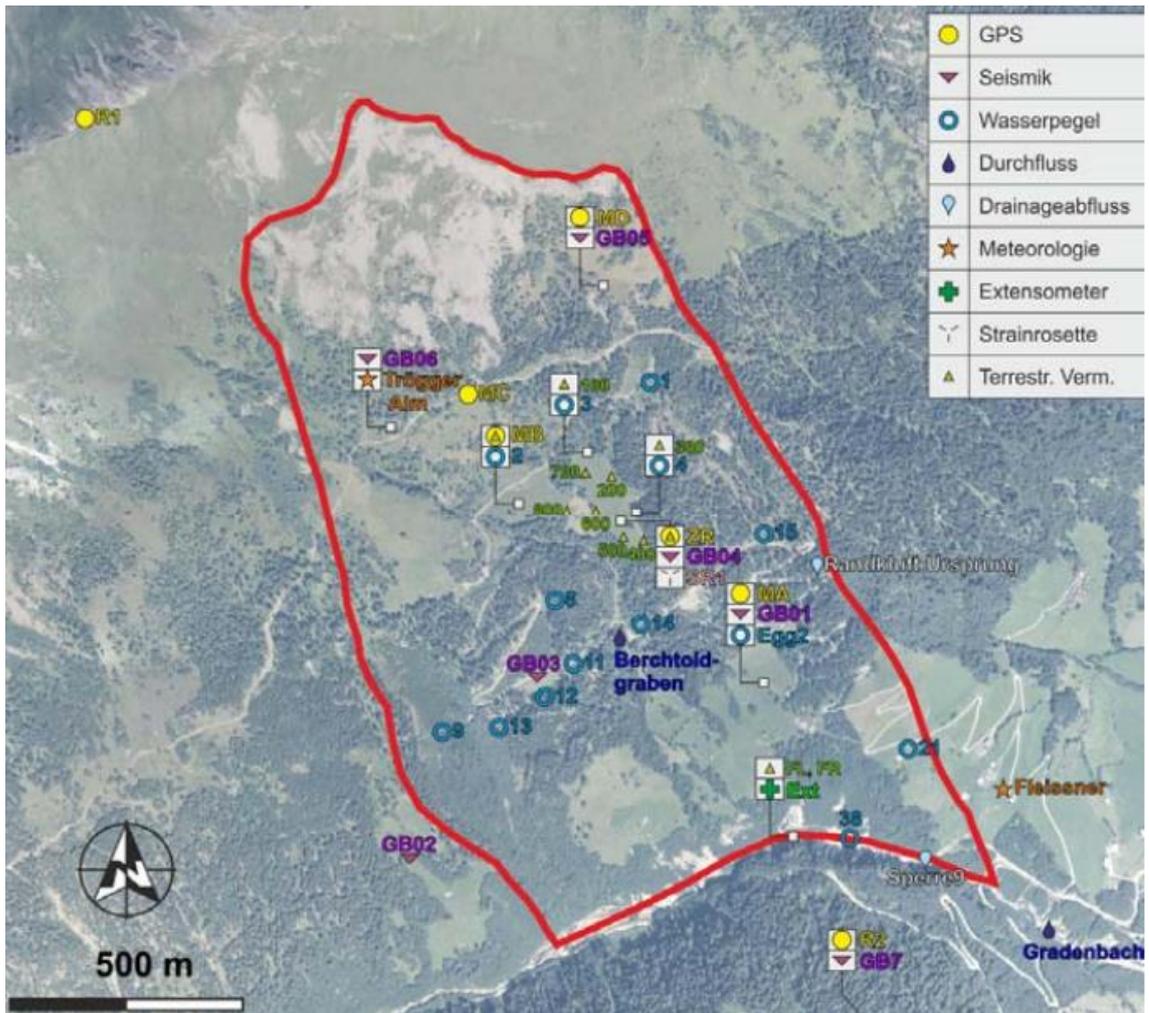


Abb. 96: Monitoringsystem am Berchtoldhang (Lienhart, 2016)

6 Schadensbilder zur Überwachung von Massenbewegungen

6.1 Einleitung

Das nachfolgende Kapitel wurde gemeinsam mit Herrn Marte, Herrn Rebhan und Herrn Vostrel verfasst und soll den Lückenschluss zwischen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern liefern. Ziel dieses Kapitels ist es, auf die Nutzung von geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern als einfache, rasche und kostengünstige Ergänzung für das Monitoring zur Überwachung von Massenbewegungen, oder als Grundlage für die Planung eines Monitorings einzugehen. Dabei sollen anhand von Beispielen die Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten einer derartigen interdisziplinären Aufgabe dargestellt und ausgearbeitet werden.

Bauwerke und Kunstbauten, welche sich auf Böschungen oder im näheren Umfeld dieser befinden, können Auswirkungen auf die Hangstabilität haben und Bodenbewegungen wie Hangkriechen, Hangfließen oder Rutschungen verursachen, zu welchen es ohne deren Konstruktion möglicherweise nicht kommen würde. In umgekehrter Weise führen Hangbewegungen zu Verformungen im Untergrund, welche über die Foundation direkt in das Bauwerk weitergeleitet werden und in weiterer Folge Schäden an diesen verursachen können.

Schäden infolge einer Hangbewegung müssen nicht sofort im gesamten Einflussgebiet bemerkbar sein. So kann es sein, dass zunächst nur Schadensbilder an Bauwerken zu erkennen sind, denen erst später geotechnisch sichtbare Veränderungen im Gelände wie z. B. Anrisskanten oder Buckelbildung folgen. In umgekehrter Weise können sich Bewegungen im Hang zu Beginn auch nur durch „geotechnische Auffälligkeiten“ und erst in weiterer Folge an den Konstruktionen selbst zeigen. Um Schadensbilder als mögliche Erkennungs- und Überwachungsmittel von Massenbewegungen nutzen zu können, ist es erforderlich, das gesamte Umfeld zu betrachten und den Zusammenhang zwischen geotechnischen und konstruktiven Schäden zu verstehen. Zur Überwachung von Hangbewegungen zählen sowohl die Aufnahme von Schäden im Gelände, als auch an Bauwerken. Erst die Berücksichtigung der Gesamtheit aller Schadensbilder und deren Gegenüberstellung lässt auf die Bewegungen im Hang schließen, wodurch mögliche Fehlanalysen oder Missinterpretationen vermieden werden können. Nicht jeder Hang mit einer unruhigen Morphologie indiziert eine Bewegung im Untergrund und nicht jedes Gebäude mit Schäden nahe eines Hanges gilt als sofortiges Anzeichen einer Massenbewegung. Es ist somit i.A. erforderlich eine Vielzahl an unterschiedlichen

Schadensmerkmalen aufzunehmen und diese gegenüberzustellen. Erst die Kombination geotechnischer und konstruktiver Schadensbilder gibt Aufschluss, ob es tatsächlich Hangbewegungen gibt oder ob die Schäden durch andere Ursachen ausgelöst wurden. Handelt es sich um Bewegungen im Untergrund, bietet die Überwachung der Schadensbilderentwicklung von Bauwerken über die Zeit eine gute ergänzende Monitoringmethode, um die Bewegungen im Hang kostengünstig zu erfassen und entsprechende Sicherungsmaßnahmen rechtzeitig umzusetzen. Der Einsatz eines Monitorings liefert zwar mehr oder weniger eindeutige Ergebnisse über den Zustand der Hangaktivität, aus Kostengründen wird deren Anwendung aber oftmals nur auf einen begrenzten Zeitraum ausgelegt. Da bei Massenbewegungen jedoch nie sicher gesagt werden kann, wann es erneut zu einer Erhöhung der Bewegungsrate kommt oder sich ein inaktiver Hang wieder in Bewegung setzt, ist eine Begrenzung des Überwachungszeitraums oftmals schwierig festzulegen. Wird anhand der Schadensbilder erkannt, dass ein komplexeres Überwachungssystem erforderlich ist, so liefern die Schadensbilder im Vorhinein eine gute Möglichkeit, um die Notwendigkeit eines Monitorings abzuschätzen. Ziel der Verknüpfung unterschiedlichster Schadensmerkmale ist es, die Entwicklung von Schäden und die Bewegungsaktivität eines Hanges umfangreicher und eventuell kostengünstiger beobachten zu können. Zwar ist diese Methode keinesfalls mit aufwändigen Monitoringlösungen vergleichbar, jedoch bietet sie für viele Fälle, vor allem in ländlichen, kaum besiedelten Gebieten, eventuell eine ausreichende bzw. in den meisten Fällen eine ergänzende Möglichkeit der Erfassung und Überwachung von Massenbewegungen.

Im folgenden Kapitel werden drei Beispiele von Hangbewegungen behandelt, anhand derer die kombinierte Betrachtungsweise von geotechnischen und konstruktiven Schäden für Monitoringzwecke diskutiert wird. Mithilfe der Schadensbilder und einfacher Messgeräte wird die Entwicklung der Ausdehnung und die Bewegungsrate der Massenbewegung, sowie der Aktivitätszustand bestimmt. Um die Darstellung möglicher Schadensbilder zu erleichtern, werden in den Beispielen Fotos realer Ereignissen verwendet. Diese sollen jedoch lediglich der Darstellung und Visualisierung der Schadensbilder bzw. Schadensmerkmale dienen.

6.2 Beispiel 1

6.2.1 Beschreibung der Situation

Dieses Beispiel stellt einen Hang dar, an dessen Krone sich zwei Gebäude befinden. Am Böschungsfuß verläuft eine Stützmauer und eine Straße. Über den Hang verteilt herrscht aufgelockerter Baumbewuchs. Außerdem verläuft eine Stromleitung mit mehreren Masten entlang der Böschung.

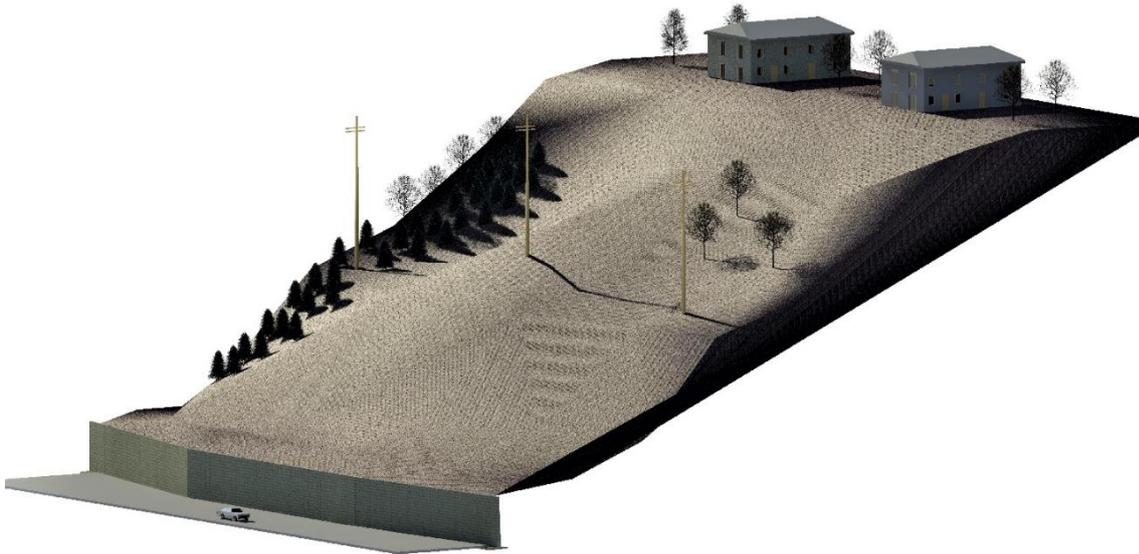


Abb. 97: Übersicht Hangsituation

6.2.2 Ausdehnung der Massenbewegung

Die Ausdehnung der Bewegungszone lässt sich anhand der Schadensbilder feststellen. Die im Umfeld einer Massenbewegung über längere Zeit entstandenen geotechnischen als auch konstruktiven Schäden können Rückschluss über die Ausdehnung einer Massenbewegung geben. Kommen über die Jahre in der weiteren Umgebung neue Schadensbilder hinzu, so kann davon ausgegangen werden, dass sich der Bereich der Massenbewegung ausgedehnt hat.

Das folgende Beispiel stellt Schadenssituationen zu zwei Zeitpunkten dar. Zunächst wird die Erstaufnahme einer Massenbewegung mit Schadensbildern präsentiert und anschließend jene einer Folgeuntersuchung.

Erstaufnahme des Hanges

Abb. 98 stellt die Hangsituation zum Zeitpunkt der Erstaufnahme mit den unterschiedlichen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern dar. Der rot strichlierte Bereich umfasst eine mögliche Bewegungszone des Hanges. Die einzelnen Schadensbilder werden in Abb. 99 bis Abb. 103 in größerer Form dargestellt und durch eine kurze Beschreibung ergänzt.

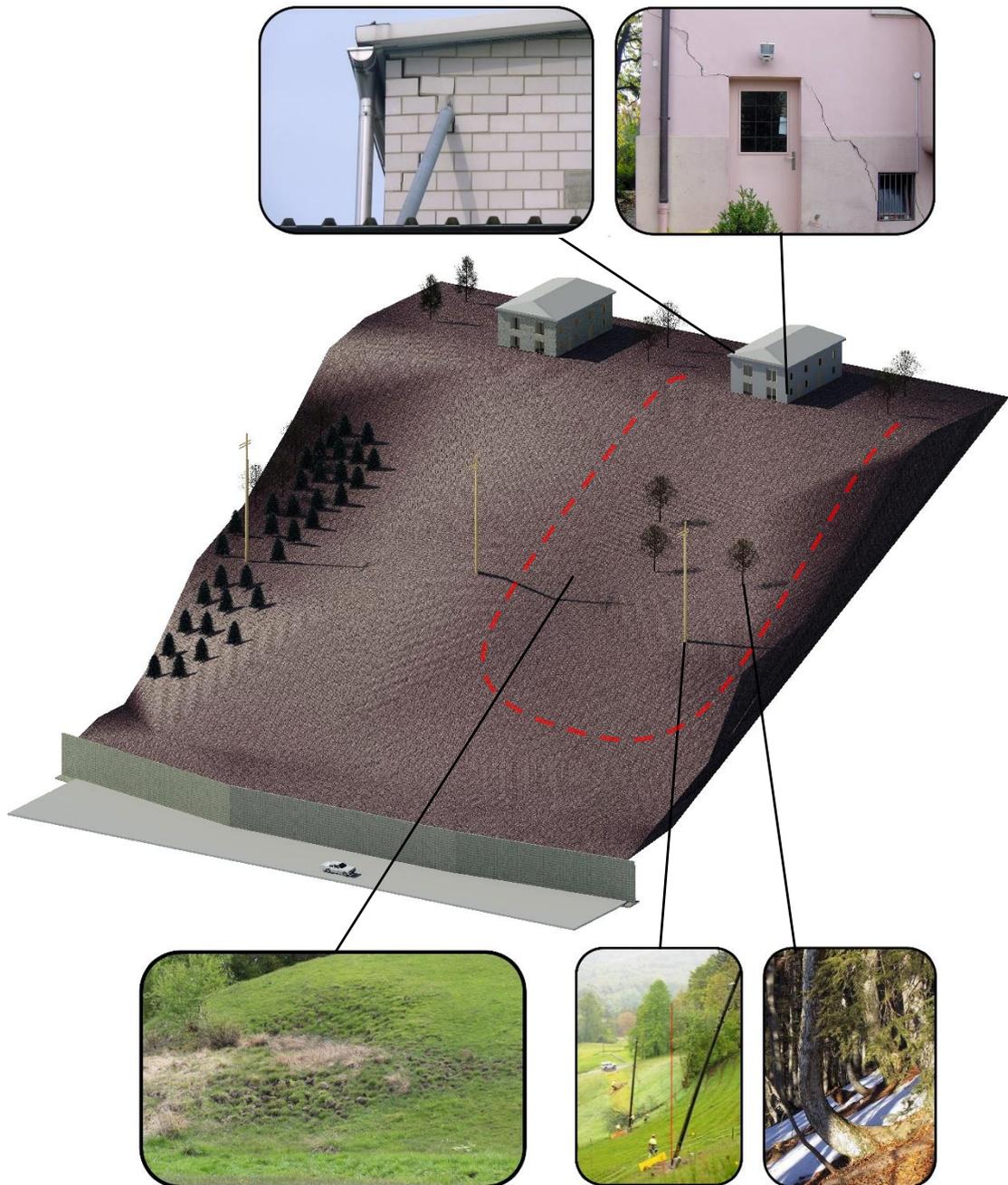


Abb. 98: Übersicht der Hangsituation mit den Schadensbildern zum Zeitpunkt der Erstaufnahme

In Abb. 99 ist ersichtlich, dass sich das abgebildete Gebäude nach links neigt. Infolge dieser Neigungsänderung entstehen Risse. Charakteristisch für Verformungen an Bauwerken ist die große Rissbreite.



Abb. 99: Setzungsrissse an einem Gebäude⁴⁵

Abb. 100 zeigt Verformungen bzw. Mauerwerksrisse im Bereich der Fugen unter der Dachkonstruktion, welche infolge einer Auflagersenkung entstehen können.



Abb. 100: Risschäden im Mauerwerk infolge von Verformungen ⁴⁶

⁴⁵Quelle: <http://www.soiltec.ch/setzungsschaeden-wie-weiter.html> aufgerufen am 27.05.2017

⁴⁶Quelle: <http://www.soiltec.ch/setzungsschaeden-wie-weiter.html> aufgerufen am 27.05.2017

Bei der Erstaufnahme wurden Schäden an Strommasten bemerkt. Wenn Versorgungsleitungen, wie in Abb. 101 Strommasten, im Einflussbereich einer Massenbewegung stehen, können diese übermäßige Verdrehungen bzw. Verschiebungen aufweisen. Die Stromleitung kann aufgrund der Lageänderung überspannt bzw. durchhängend sein.



Abb. 101: Verdrehung von Strommasten ⁴⁷

Eine unruhige Hangmorphologie kann durch die Bewegung des Hanges ausgelöst werden. Um diese Anzeichen als Indiz für Hangbewegungen nutzen zu können, ist sicherzustellen, dass diese Schäden am Gelände nicht durch andere Einflüsse wie z. B. Viehtrieb verursacht wurden (Abb. 102).

⁴⁷Quelle Abb. links: <http://www.luzernerzeitung.ch/nachrichten/zentralschweiz/obwalden/EWO-verlegt-nach-Hangrutsch-Stromleitung;art95,263908> aufgerufen am 25.04.2017
Quelle Abb. rechts: http://159.213.57.103/geoweb/scheda_frane/imm_frane.htm aufgerufen am 28.06.2017



Abb. 102: Unruhige Hangmorphologie

Durch langjährige Kriechbewegungen in bewaldeten Gebiet kann Säbelwuchs an Bäumen beobachtet werden (Abb. 103). Weisen auffällig viele Bäume im Bereich eines möglichen Kriechhanges diese Wuchsform auf, so kann davon ausgegangen werden, dass diese durch langsame Bewegung des Untergrundes verursacht wurden. Bei der Erstaufnahme konnte an einigen Bäumen eine säbelartige Wachstumsform erkannt werden.



Abb. 103: Säbelwuchs⁴⁸

⁴⁸Quelle Abb. links: http://www.bayerwaldwandern.de/sonstiges/treffokt05_17.jpg aufgerufen am 14.05.2017

Quelle Abb. rechts: <http://www.sagen.at/fotos/data/506/medium/Saebelwuchs.jpg> aufgerufen am 01.05.2017

Folgeuntersuchung des Hanges

Abb. 104 stellt die Hangsituation im Zuge einer Folgeuntersuchung mit den unterschiedlichen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern dar. Der rot strichlierte Bereich stellt jenen Bereich der Massenbewegung dar, welcher als Ausgangslage für die weiteren Untersuchungen herangezogen wurde.

Die Ausdehnung der Kriechbewegung ist daran zu erkennen, dass im Zuge der Folgeuntersuchung auch Schäden am zweiten Gebäude an der Hangkrone erkennbar wurden, weiters ist ein zweiter Strommast von Verformungen betroffen, einige Stützmauerblöcke zeigen leichte Neigungsänderungen und der Bereich der Buckelbildung am Hang hat sich im Vergleich zur Erstaufnahme vergrößert. Mithilfe dieser Schadensbilder ist es möglich den aktuellen Bewegungsbereich (gelb strichliertem Bereich) abzuschätzen und die Ausdehnung im Vergleich zur Erstaufnahme zu ermitteln.

Das Schadensbild der Stützmaerverdrehung ist in Abb. 105 in größerer Form dargestellt. Für die übrigen Schadensbilder wird auf Abb. 99 bis Abb. 103 der Erstaufnahme verwiesen, wobei sich diese im Laufe der Jahre durch die Weiterentwicklung der Bewegung verändert haben. Die Risse des ersten Hauses weiteten sich weiter aus und die Rissbreite nahm zu. Die Verdrehungen des Strommasten erhöhten sich und die Buckelbildung weitete sich im Gelände aus.

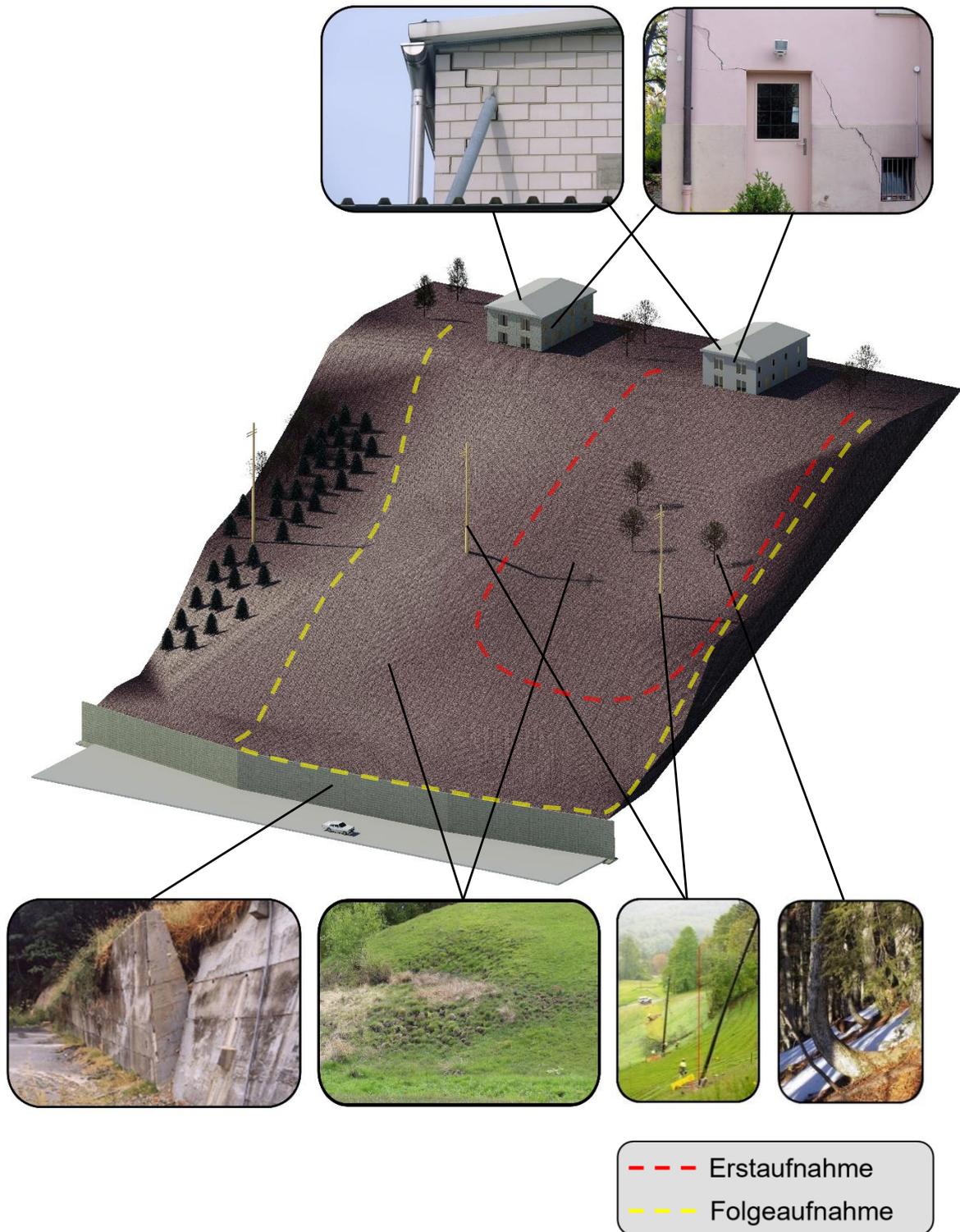


Abb. 104: Übersicht der Hangsituation mit entstandenen Schadensbildern im Zuge der Folgeuntersuchung. Die rote Strichlinie stellt die Bewegungszone zum Zeitpunkt der Erstaufnahme dar. Die aktuelle Bewegungszone ist durch den gelb strichlierten Bereich dargestellt.

Durch den erhöhten Erddruck eines Kriechhanges kann es zu Neigungsänderungen bei Stützbauwerken kommen, ohne dass diese komplett versagen. Bei angrenzenden Fahrbahnen können demzufolge Verwerfungen im Asphalt auftreten. Zu Beginn befinden sich diese nur im Millimeter bis niedrigem Zentimeter-Bereich. Abb. 105 zeigt eine bereits stark fortgeschrittene Neigungsänderung bei welcher sich das Bauwerk über längere Zeit verdreht hat. Bewuchs in den Rissen des Asphalts deutet darauf hin, dass die Schäden schon vor längerer Zeit entstanden sind.



Abb. 105: Neigungsänderung einzelner Stützmauerblöcke⁴⁹

6.2.3 Bewegungsrate der Massenbewegung

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich ein Hang fortbewegt, lässt sich mithilfe einfacher Messgeräte bestimmen. Generell werden Bewegungen im Untergrund mit geotechnischen Instrumenten, wie z.B. Inclinometermessungen, ermittelt. Diese sind jedoch i.A. mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden. Eine einfachere Möglichkeit bietet die Beobachtung konstruktiver sowie geotechnischer Schadensbilder an der Oberfläche. Durch die Veränderung der Schäden über einen längeren Zeitraum kann unter Umständen auf die Bewegungsrate geschlossen werden.

⁴⁹ Quelle:

https://www.researchgate.net/publication/268590571_Seismically_Induced_Lateral_Earth_Presures_on_Retaining_Structures_and_Basement_Walls aufgerufen am 27.05.2017

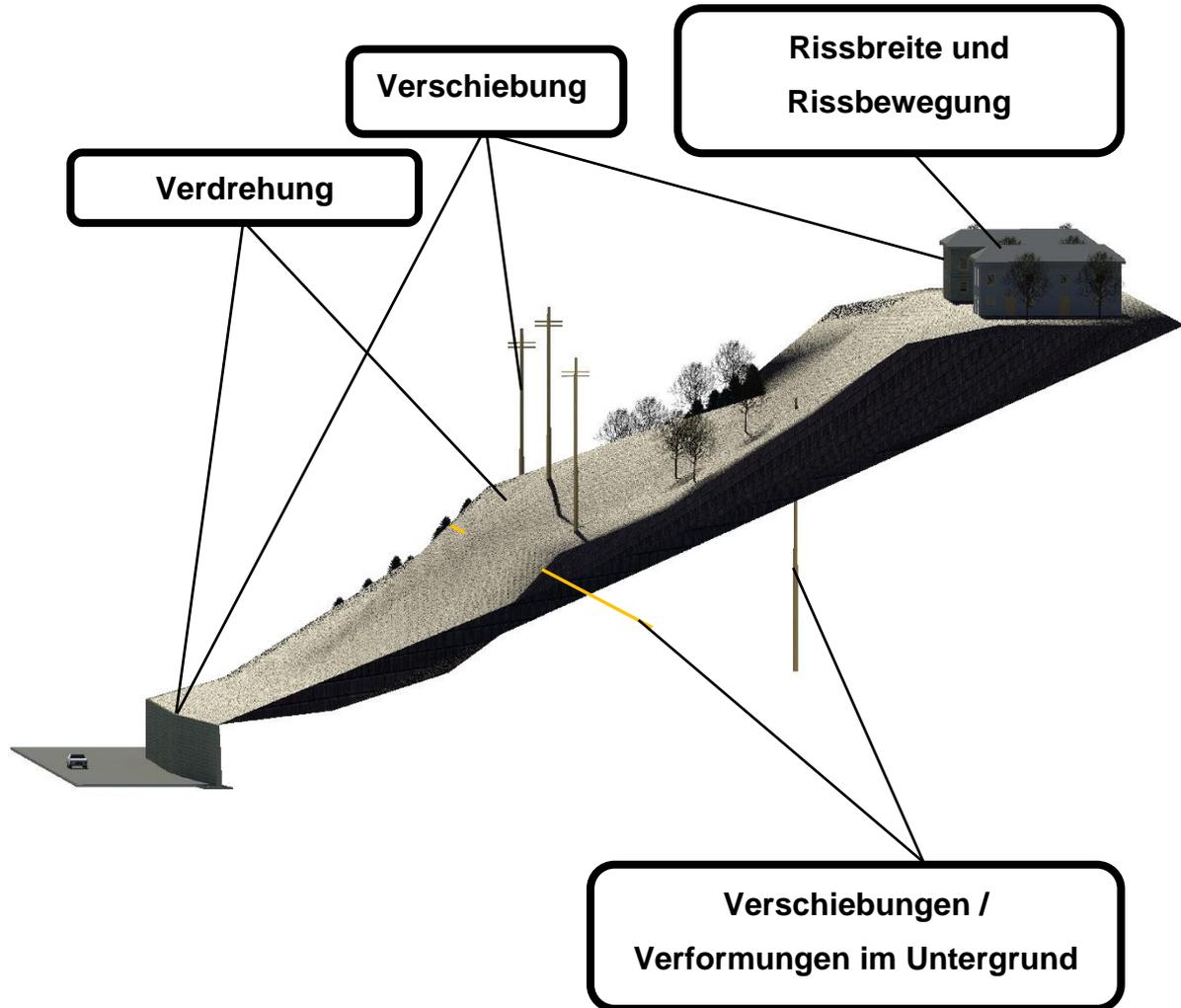


Abb. 106: Überblick des Kriechhanges mit verschiedenen Messgrößen zur Ermittlung der Bewegungsrate

Abb. 106 stellt den Hang mit möglichen Messgrößen dar, welche erfasst werden können, um die Bewegungsrate des Hanges zu bestimmen. Da zu Beginn der Messungen noch nicht bekannt ist, um welche Schadensursache es sich handelt, wird empfohlen aus Kostengründen zuerst einfache Überwachungsmethoden wie Risslineal, Gipsmarker, Wasserwaage, Drahtextensometer und dergleichen anzuwenden. Werden Veränderungen festgestellt und reichen die angewandten Methoden nicht mehr aus, so muss eine aufwändigere Messtechnik eingesetzt werden. Die zu ermittelnden Messgrößen und die dazu erforderlichen Messinstrumente werden im Folgenden eingehender beschrieben.

Tab. 5 Beispiele für Messgrößen und jeweilige Messinstrumente

Rissbreiten und Rissbewegungen	
 Abb. 107 Gipsmarker ⁵⁰	Einfache Messmethoden zu Beginn: Risslineal, Gipsmarker, Rissmonitor Genauere Messmethoden: Fissurometer, Setzdehnungsmesser
Verschiebungen von Bauwerken	
  Abb. 108 Prisma ⁵¹ Abb. 109 Totalstation ⁵²	Einfache Messmethoden zu Beginn: an das Bauwerk angebrachte Messpunkte (Prisma), welche mittels Totalstation periodisch überwacht werden können Genauere Messmethoden: Satellitenmessungen durch GNSS oder Laserscanning
Verdrehungen	
 Abb. 110 Wasserwaage ⁵³	Einfache Messmethode zu Beginn: Wasserwaage, Pendel, Schlauchwaage Genauere Messmethoden: elektronische Neigungssensoren, Laserscanner
Verschiebungen und Verformungen im Untergrund	
 Abb. 111 Inklinometer ⁵⁴	Oberflächliche Messmethoden: gespannte Drahtextensometer, Schlauchwaage, Konvergenzmessgerät, Vermessung geodätischer Messpunkte mit Totalstation Messmethoden für tieferliegende Bodenschichten: Stangenextensometer, Inklinometer, TDR

⁵⁰Quelle: <http://www.baulinks.de/webplugin/2012/0645.php4> aufgerufen am 13.06.2017

⁵¹Quelle: <http://www.vinzai.com/blog/85-leica-builder-series-total-stations> aufgerufen am 13.06.2017

⁵²Quelle: <http://www.pictaram.club/share/BRCsKPhnZGA> aufgerufen am 27.05.2017

⁵³Quelle: <http://messfreunde.de/stabila-wasserwaage-type-196-2-m-electronic-ip65-magnet-neigungs-messer-183-cm-4005069177072-17707.html> aufgerufen am 13.06.2017

⁵⁴Quelle:

https://www.lfu.bayern.de/geologie/massenbewegungen/hangbewegungen/pic/985696_gr.jpg
 aufgerufen am 13.06.2017

6.2.4 Aktive / inaktive Bewegung

Sind bei einer Hangbewegung über einen längeren Zeitraum (ca. 1 Jahr) keine Bewegungen erkennbar, wird laut Multilingual Landslide Glossary (1993) von einer inaktiven Bewegung gesprochen. Mit den im vorigen Abschnitt (Bewegungsrate) angeführten Messsystemen kann die Bewegungsrate ermittelt werden. Bei der Bestimmung der Hangaktivität müssen saisonale Veränderungen wie Frost-Tau-Wechsel Perioden oder niederschlagsreiche Monate berücksichtigt werden, da diese häufig die Ursache von Bewegungen sind oder zu einer Erhöhung der Bewegungsrate führen. Es ist jedoch zu beachten, dass jede inaktive Bewegung zu einem späteren Zeitpunkt erneut in Bewegung treten kann.

6.3 Beispiel 2

6.3.1 Beschreibung der Situation

Im unteren Bereich des Hanges von Beispiel 2 verläuft eine Eisenbahnstrecke, welche von einer Straßenbrücke gequert wird. Die Brücke ist auf vier Pfeilern und zwei Brückenwiderlagern gelagert. Im Hang selbst befindet sich ein Weidezaun sowie eine Stromleitung mit einigen Masten.

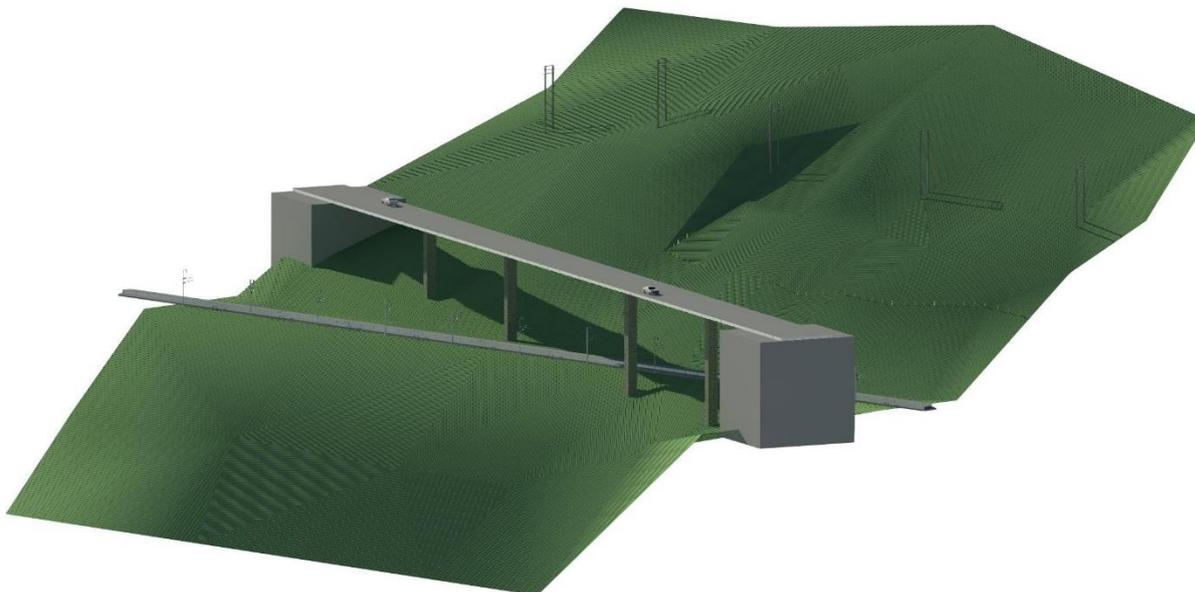


Abb. 112: Übersicht Hangsituation

6.3.2 Ausdehnung der Massenbewegung

Wie in Beispiel 1 werden auch in diesem Fall die unterschiedlichen Schadensbilder, welche am Hang und den umliegenden Konstruktionen auftreten können angeführt, und zur Abschätzung der Ausdehnung der Massenbewegung herangezogen.

Das folgende Beispiel stellt die Erstaufnahme einer Schadenssituation und eine Folgeuntersuchung der Massenbewegung zu einem späteren Zeitpunkt dar.

Erstaufnahme des Hanges

Abb. 113 illustriert den Hang zum Zeitpunkt der Erstaufnahme mit den vorgefundenen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern. Der rot strichlierte Bereich stellt eine mögliche Bewegungszone des Hanges dar. Die einzelnen Schadensbilder werden in Abb. 114 bis Abb. 120 in größerer Form dargestellt und kurz beschrieben.

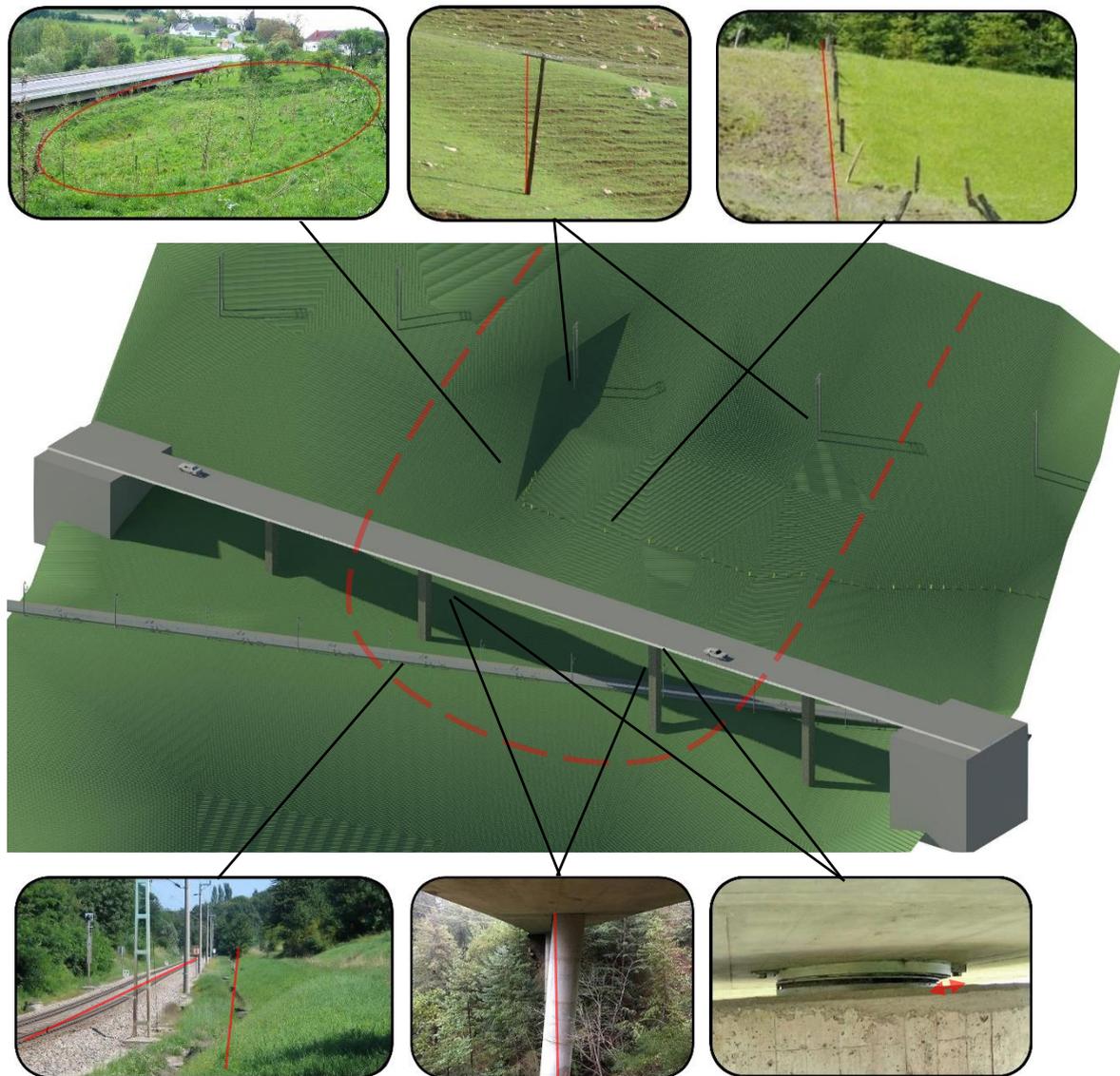


Abb. 113: Übersicht der Hangsituation mit den ersichtlichen Schadensbildern zum Zeitpunkt der Erstaufnahme

Verdrehungen von Strommasten wurden im Zuge der Erstaufnahme festgestellt und dokumentiert. Abb. 114 zeigt die Neigungsänderung eines Masten, welche sich anfänglich durch eine durchhängende bzw. zu stark gespannte Stromleitung bemerkbar macht.



Abb. 114: Verdrehungen des Strommasten, sowie Bodenunebenheiten und erste Anrisskanten erkennbar ⁵⁵

Des Weiteren sind zum Zeitpunkt der Erstaufnahme verschobene und verdrehte Zaunstempel bemerkbar. Diese können Hinweis auf mögliche Bewegungen im Untergrund liefern. Ist ein Zaun in einem gewissen Abschnitt verdreht und im übrigen Bereich unbeschädigt, so kann dadurch auf die Grenze der Bewegung rückgeschlossen werden. Abb. 115 illustriert einen Zaun, bei welchem einige Elemente durch eine mögliche Kriechbewegung verdreht sind.



Abb. 115: Verdrehungen der Zaunstempel (Gasperl, Tartarotti, 2014)

Abb. 116 zeigt aufgenommene Schäden am Bahngleis. Bei aktiven Bahnstrecken ist es eher unwahrscheinlich, dass Verformungen sichtbar werden, da bereits bei kleinsten Abweichungen der erforderlichen Gleislage der Oberbau saniert wird. Aufgrund der Entgleisungsgefahr haben Gleise einen sehr geringen Toleranzbereich für zulässige

⁵⁵ Quelle: http://159.213.57.103/geoweb/scheda_frane/imm_frane.htm aufgerufen am 08.06.2017

Verformungen. Sind in gewissen Abschnitten häufig Sanierungsarbeiten erforderlich, kann dies ein Indiz für mögliche Untergrundbewegungen sein. Abb. 116 zeigt eine Gleisanlage, bei welcher trotz regelmäßiger Sanierungen durch einen angrenzenden Kriechhang erkennbare Hebungen und ein Versatz der Gleislage entstanden sind. Die Auswirkungen der Kriechbewegungen sind an dem parallel zum Gleis verlaufenden Drainagegraben noch deutlicher erkennbar, welcher ursprünglich geradlinig eingebaut wurde und erst durch die kriechenden Untergrundbewegungen den am Bild erkennbaren kurvigen Verlauf erhalten hat.



Abb. 116: Zuggleis angrenzend an einen Kriechhang mit erkennbaren Schäden. (Leopold, 2012)

Weiters wurden bei der Erstaufnahme Schadensbilder an den Brückenpfeilern aufgenommen. Abb. 117 zeigt einen Versatz des Pfeilerfundamentes. Infolge der Verdrehung des Pfeilers kam es zu Rissen im Stützbereich. Fällt die Stützung eines Tragwerks aus, kann es zu großen Verformungen und Biegerissen kommen, wie in Abb. 118 ersichtlich.



Abb. 117: Linkes Bild: Verschiebung eines Brückenpfeilers; Rechtes Bild: Risschäden im Stützbereich⁵⁶



Abb. 118: Biegerisse am Tragwerk aufgrund des Ausfalls der Stützwirkung⁵⁷

An Brückenpfeilern mit biegesteifen Stützenanschlüssen an das Tragwerk, welche sich im Einflussbereich eines Kriechhanges befinden (im Fallbeispiel die zwei mittleren Stützen), können durch Verschiebungen Risse entstehen. Ist die Brücke auf den Pfeilern verschieblich gelagert, so können Verschiebungen in den Auflagern festgestellt werden. Durch die Anzahl der betroffenen Stützen ist es möglich, den Ausdehnungsbereich der Massenbewegung abzuschätzen.

⁵⁶ Quelle: <http://www.sanluisobispo.com/news/local/community/cambrian/article134263244.html> aufgerufen am 13.06.2017

⁵⁷ Quelle: <http://www.sanluisobispo.com/news/local/community/cambrian/article134263244.html> aufgerufen am 13.06.2017



Abb. 119: Auflagerverschiebungen an den Stützen der Brücke zufolge möglicher Kriechbewegungen⁵⁸

Im Zuge der Erstaufnahme ist eine unebene Morphologie des Hanges ersichtlich, wie in Abb. 120 dargestellt.



Abb. 120: Unebene Hangmorphologie verursacht durch mögliche Kriechbewegungen im Untergrund (Leopold, 2012)

⁵⁸ Quelle: <http://www.ingenieurkaelin.ch/kompetenzen/untersuchungen/> aufgerufen am 08.06.2017

Folgeuntersuchung des Hanges

Abb. 121 stellt die Hangsituation zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung mit den unterschiedlichen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern dar. Der rot strichlierte Bereich stellt jenen Bereich der Massenbewegung dar, welcher als Ausgangslage für die weiteren Untersuchungen herangezogen wird.

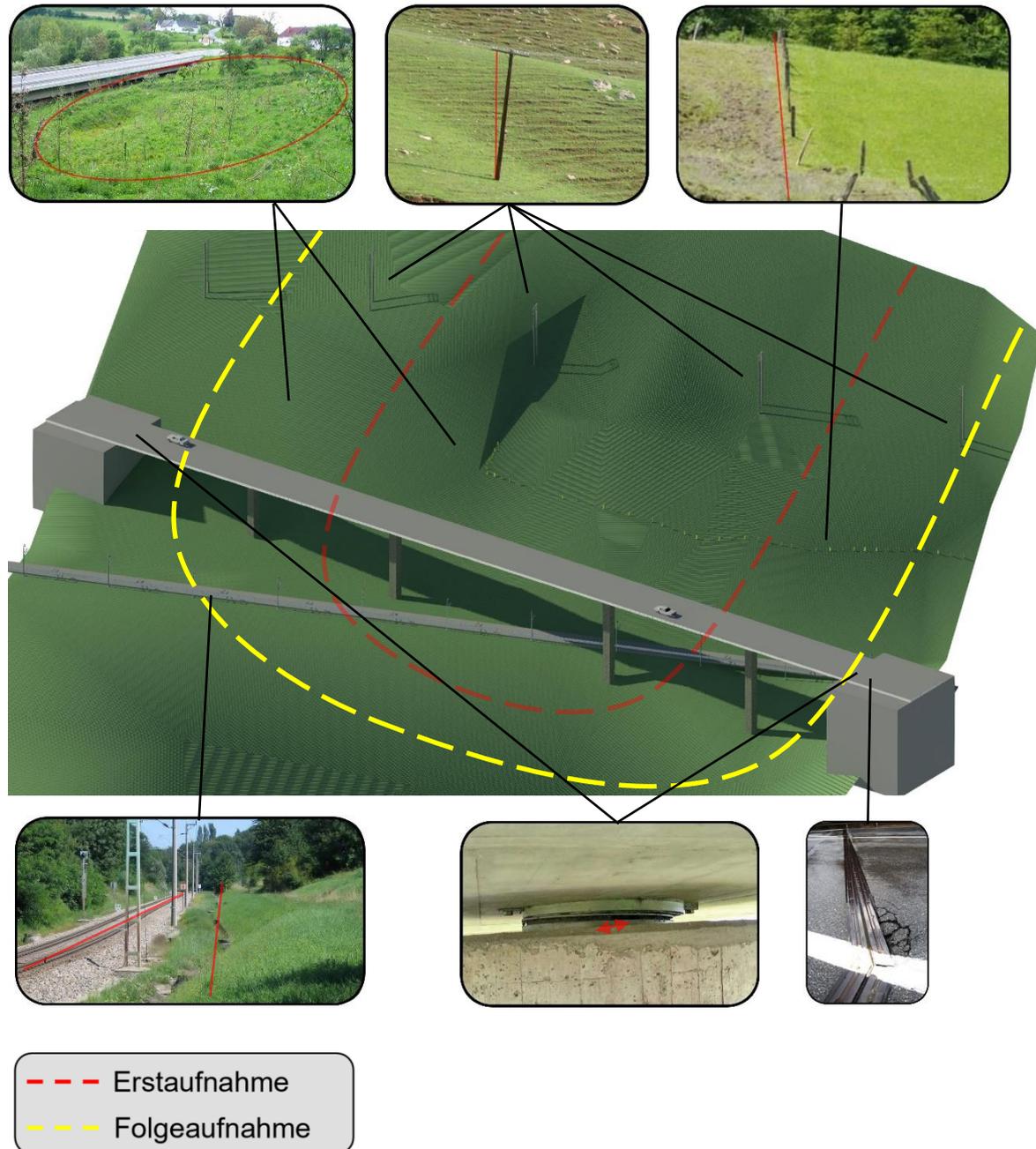


Abb. 121: Übersicht der Hangsituation mit entstandenen Schadensbildern im Zuge der Folgeuntersuchung. Der rot strichlierte Bereich stellt die Bewegungszone zum Zeitpunkt der Erstaufnahme dar. Die aktuelle Bewegungszone ist durch den gelb strichlierten Bereich dargestellt.

Die Ausdehnung der Kriechbewegung ist daran zu erkennen, dass zu diesem Zeitpunkt nun auch Verdrehungen an zwei weiteren Strommasten erkennbar sind. Des Weiteren kam es zu Verschiebungen zusätzlicher Zaunstempel, der Bereich der Buckelbildung vergrößerte sich und der Bereich des Gleises, welcher von Versatz betroffen war, dehnte sich im Vergleich zur Erstaufnahme aus. Die Lagerverschiebungen an den beiden mittleren Pfeilern, welche zur Erstaufnahme von den Bewegungen betroffen waren, verringerte sich. Grund dafür ist, dass nun die gesamte Brücke in der Massenbewegung liegt und alle Pfeiler gemeinsam mit der Bewegungsmasse mit verschoben werden, ohne dass es zu weiteren größeren Schäden an den Pfeilern oder Auflagerbereichen kommt. Jedoch weisen die Auflager in den Widerlagern nun starke Verschiebungen auf. An der Fahrbahnübergangskonstruktion zwischen Brücke und angrenzender Straße entstehen demzufolge Risse und Verwerfungen. Mithilfe der erwähnten Schadensbilder ist es möglich den aktuellen Bewegungsbereich (gelb strichlierte Bereich) abzuschätzen und die Ausdehnung im Vergleich zur Erstaufnahme zu ermitteln.

Das Schadensbild der Fahrbahnübergangskonstruktion ist in Abb. 122 in größerer Form dargestellt. Für die übrigen Schadensbilder wird auf Abb. 114 bis Abb. 120 der Erstaufnahme verwiesen, wobei sich diese im Laufe der Zeit durch die Weiterentwicklung der Bewegung veränderten und die Schäden verstärkt ausgeprägt und deutlicher erkennbar sind.



Abb. 122: Asphaltbrüche bzw. -risse an einer Fahrbahnübergangskonstruktion ⁵⁹

⁵⁹Quelle Abb. links:

<http://www.ewp.ch/core/cms/article.php?parmx=YXJ0JTNENTM0JTl2bGFuJTNERyUyNm5wJTNEMTA1NQ%3D%3D&par mz=4bb2a9f756f2883f898554c9fe2b92e7> aufgerufen am 12.06.2017

Quelle Abb. rechts: <https://www.springerprofessional.de/ingenieurbau/brueckenbau/wie-anfugen-brueckenschaeden-entstehen/6558538> aufgerufen am 28.06.2017

6.3.3 Bewegungsrate der Massenbewegung

Gleich dem Beispiel 1 wird zur Ermittlung der Bewegungsrate wiederum die Möglichkeit der Verwendung einfacher Messmethoden angeführt. Abb. 123 zeigt eine Übersicht des Kriechhanges mit den unterschiedlichen Messgrößen, anhand derer auf die Bewegungsgeschwindigkeit im Hang rückgeschlossen werden kann.

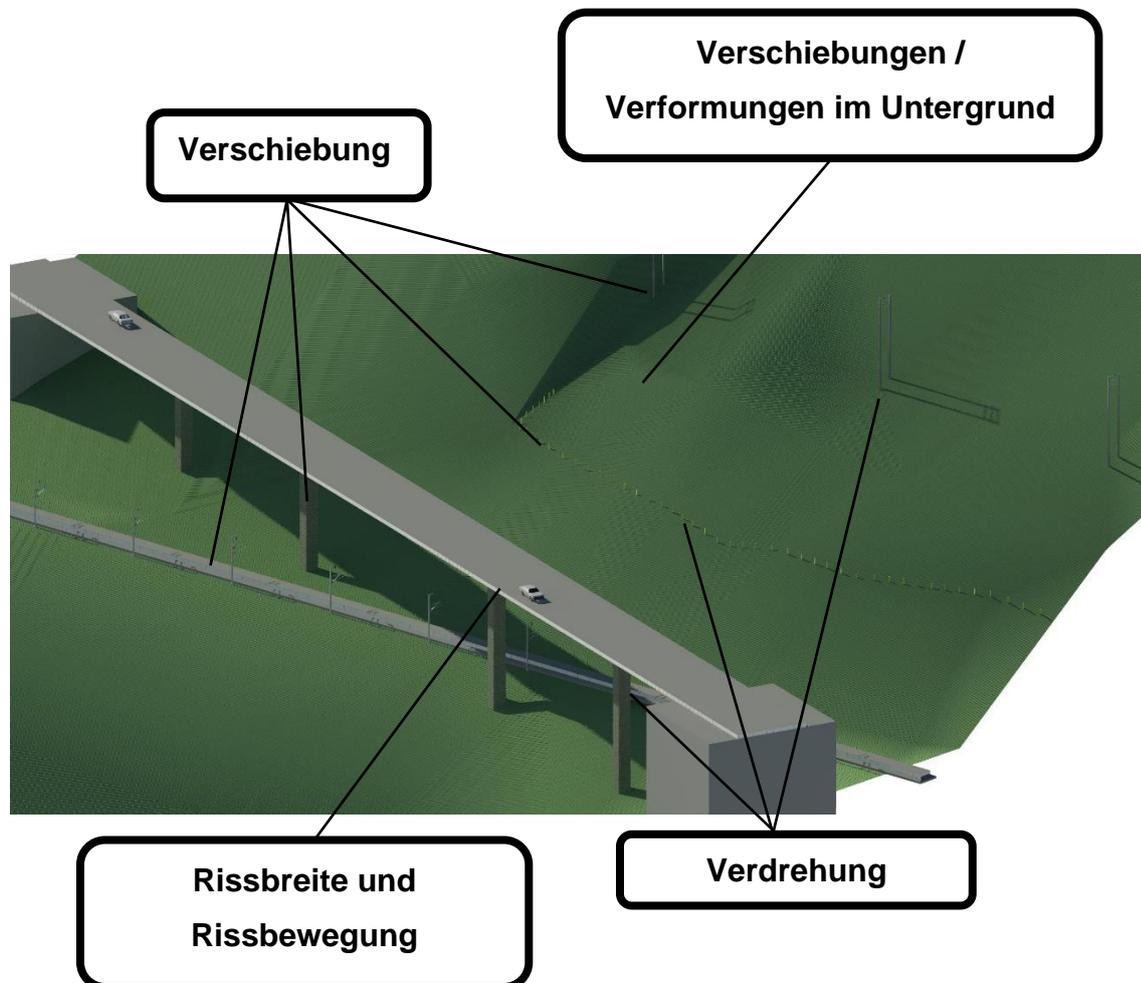


Abb. 123: Überblick des Kriechhanges mit verschiedenen Messgrößen zur Ermittlung der Bewegungsrate

Für eine genaue Beschreibung der einzelnen Messgrößen sowie der Messgeräte zur Ermittlung dieser, wird auf Tab. 5 (Kapitel 6.2.3 Beispiel 1) verwiesen. Vor allem Inklinometermessungen werden bei dieser Größenordnung von Bewegungen empfohlen. Zur Messung von Rissbewegungen an schwer erreichbaren Bauteilen (z.B. Brückenpfeiler) können elektronische Rissbreitenmesser eingesetzt werden. Veränderungen der Gleislage können mittels Schienenprüfzug detektiert werden.

6.4 Beispiel 3

6.4.1 Beschreibung der Situation

Dieses Beispiel umfasst den Talstationsbereich einer Skipiste, in welchem sich mehrere Gebäude (Liftgebäude, Parkhaus) mit einem danebenliegenden Parkplatz befinden. Wenig darüber, im Fußbereich der Piste, steht eine Skihütte. Neben der Piste verlaufen am Hang Liftstützen, Beschneiungsanlagen sowie einige Lichtmasten. Im Randbereich der Skipiste sind des Weiteren vereinzelt Bäume vorzufinden.

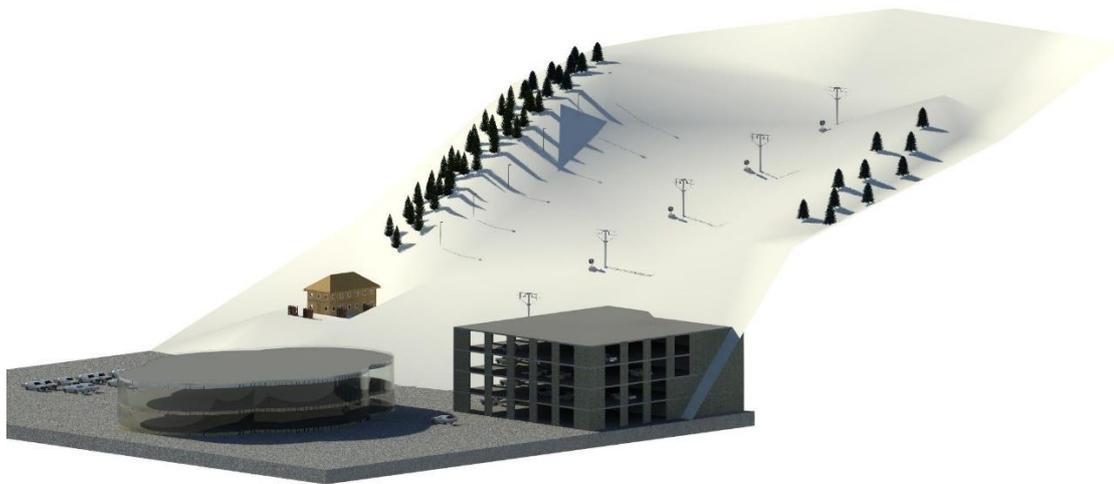


Abb. 124: Übersicht Hangsituation

6.4.2 Ausdehnung der Massenbewegung

Wie in den beiden vorhergehenden Beispielen werden auch in diesem Beispiel die unterschiedlichen Schadensbilder, welche am Hang und den umliegenden Konstruktionen auftreten können, angeführt und zur Abschätzung der Ausdehnung der Massenbewegung genutzt.

Das Beispiel stellt die Erstaufnahme einer Schadenssituation und eine Folgeuntersuchung der Massenbewegung zu einem späteren Zeitpunkt dar.

Erstaufnahme des Hanges

Abb. 125 illustriert den Hang zum Zeitpunkt der Erstaufnahme mit den unterschiedlichen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern. Der rot strichlierte Bereich stellt eine mögliche Bewegungszone des Hanges dar. Die einzelnen Schadensbilder werden in Abb. 126 bis Abb. 128 in größerer Form dargestellt und kurz beschrieben.

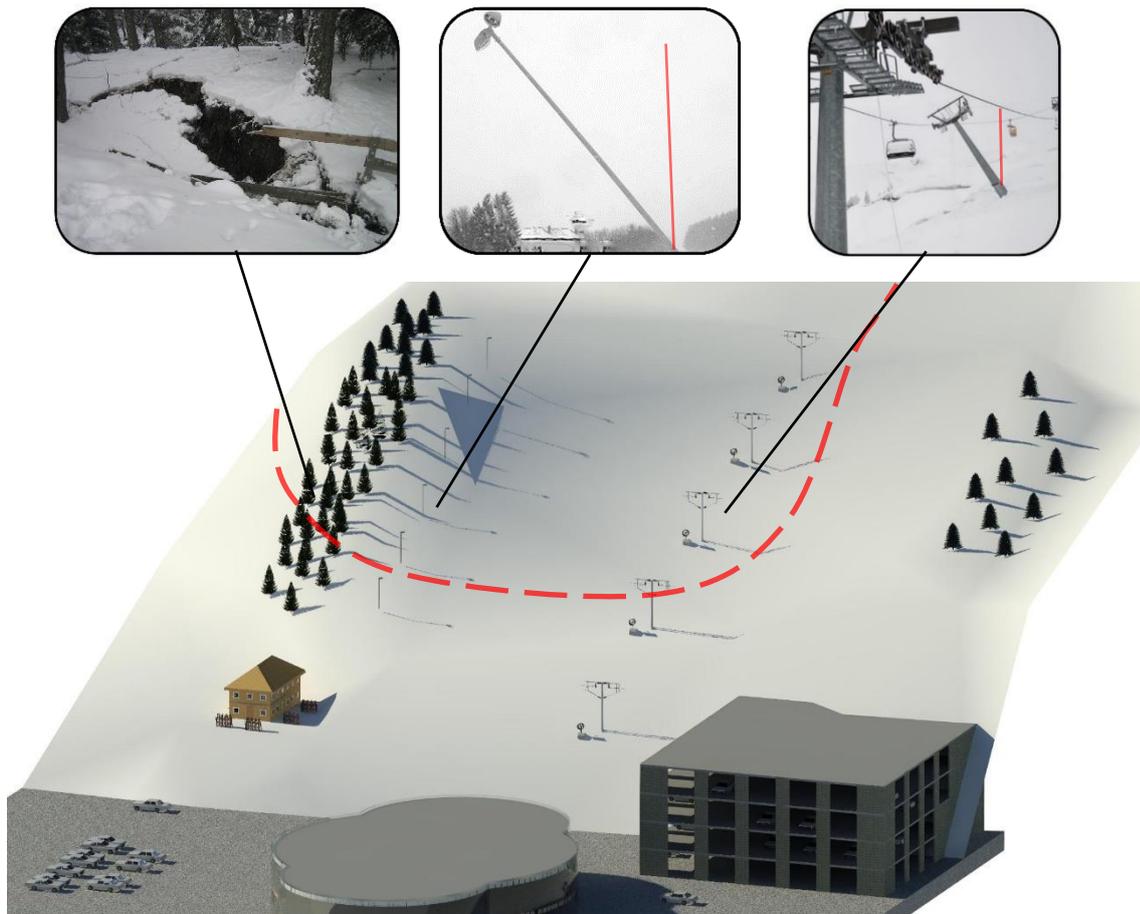


Abb. 125: Übersicht der Hangsituation mit ersichtlichen Schadenbildern zum Zeitpunkt der Erstaufnahme

Im Zuge der Erstaufnahme der Skipiste wurden Anrisskanten im Randbereich der Piste erkannt. Anrisskanten im Boden können durch Untergrundbewegungen verursacht werden und helfen in vielen Fällen den Übergangsbereich von bewegtem zum unbewegtem Untergrund zu detektieren. Der darüberliegende Bereich ist nicht von der Massenbewegung betroffen, der darunterliegende befindet sich im Einflussbereich. Somit ist die Lage der Anrisskante ein hilfreiches Mittel zur Abschätzung der Ausdehnung der Bewegung (Abb. 126 und Abb. 127).



Abb. 126: Anrisskante mit erkennbarem Geländeversatz ⁶⁰



Abb. 127: Anrisskante als Hinweis möglicher Hangbewegungen ⁶¹

⁶⁰ Quelle:

http://www.provinz.bz.it/zivilschutz/service/news.asp?aktuelle..=&aktuelles_action=4&aktuelles_article_id=412174 aufgerufen am 13.06.2017

⁶¹ Quelle: <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/erdrutsch/entstehung-er/> aufgerufen am 13.06.2017

Des Weiteren waren bei der Schadensaufnahme Verdrehungen an den Lichtmasten entlang der Skipiste erkennbar. Bewegungen im Untergrund können zu Verschiebungen und Verdrehungen der Lichtmasten führen, wie in Abb. 128 links dargestellt. Handelt es sich um Untergrundbewegungen, ergibt sich die Möglichkeit die Anzahl der betroffenen Masten zu nutzen, um Informationen über die Ausdehnung des Bewegungsbereichs zu erhalten.

Konstruktive Schadensbilder wurden außerdem an den Liftstützenfundamenten aufgenommen, welche möglicherweise auf Bewegungen im Hang zurückgehen. Befinden sich Stützen im Einflussbereich einer Massenbewegung, so kommt es zu differentiellen Setzungen und horizontalen Verschiebungen. Bei größeren Fundamenten können auch unter Umständen Risse entstehen. Aufgrund dessen kann es zu Neigungsänderungen der Stützen kommen. Abb. 128 rechts zeigt mögliche Schäden an Liftstützen.



Abb. 128: Verdrehter Lichtmast links⁶²; Neigungsänderung einer einzelnen Liftstütze rechts⁶³

⁶² Quelle: <https://www.merkur.de/lokales/miesbach/miesbach/lichtmasten-kreisverkehr-gerammt-1026575.html> aufgerufen am 28.06.2017

⁶³ Quelle: <http://www.luzernerzeitung.ch/nachrichten/zentralschweiz/obwalden/Schoenbueel-Mast-knickte-wegen-zuviel-Schnee;art95,259946> aufgerufen am 13.06.2017

Folgeuntersuchung des Hanges

Abb. 129 stellt die Hangsituation mit den unterschiedlichen geotechnischen und konstruktiven Schadensbildern dar. Der rot dargestellte Bereich zeigt den Bereich der Massenbewegung, welcher als Ausgangslage für die weiteren Untersuchungen herangezogen wird.

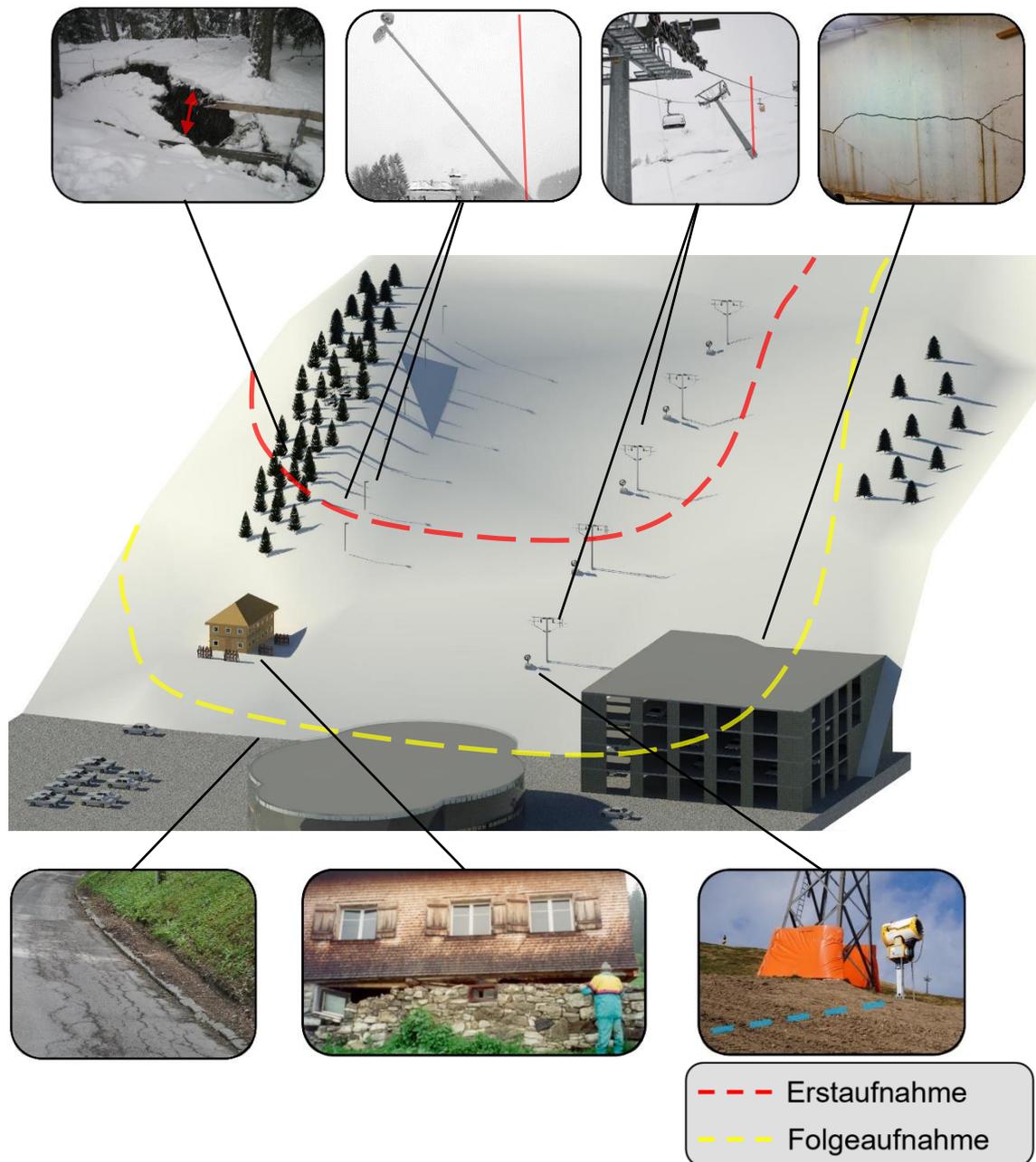


Abb. 129: Übersicht der Hangsituation mit entstandenen Schadensbildern im Zuge der Folgeuntersuchung. Der rot strichlierte Bereich stellt die Bewegungszone zum Zeitpunkt der Erstaufnahme dar. Die aktuelle Bewegungszone ist durch den gelb strichlierten Bereich dargestellt

Die Ausdehnung der Kriechbewegung ist daran zu erkennen, dass sich zu diesem Zeitpunkt die bereits zuvor aufgetretenen Schäden verstärkten und ausweiteten, sowie zusätzlich neue Schadensbilder entstanden sind. Die Massenbewegung dehnte sich bis zum Fuß des Hanges aus und führte dadurch zur Entstehung von Schäden an der Skihütte, dem Parkplatz und dem Parkhaus. Die Anzahl der betroffenen Liftstützen und Lichtmasten erhöhte sich und die Anrisskante dehnte sich aus. Zusätzlich führte die Bewegung im Untergrund zu Schäden an den Wasserversorgungsleitungen der Beschneiungsanlage.

Durch die Ausdehnung der Bewegungszone sind zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung Schäden am Parkhaus erkennbar. In Abb. 130 ist ersichtlich, dass der einwirkende Erddruck zur Entstehung von Rissen am Gebäude führte.



Abb. 130: Risse am Parkhaus ausgelöst durch den erhöhten Kriechdruck, der auf das Gebäude einwirkt ⁶⁴

Das Schadensbild in Abb. 131 zeigt Verwerfungen im Asphalt des Parkplatzes, welcher an den Böschungsfuß angrenzt. Durch die kriechenden Bewegungen im Untergrund und die daraus resultierenden langsamen Verschiebungen der Bodenmasse, wirkt ein erhöhter Erddruck auf darunterliegende Konstruktionen ein.

⁶⁴ Quelle: <http://www.hingeneering.com/hingeblog/foundation-crack-repair-in-concrete-basement-wall> aufgerufen am 13.06.2017



Abb. 131: Risse und Verwerfungen am Parkplatz angrenzend an die Skipiste⁶⁵

Weitere konstruktive Schäden sind an der Skihütte erkennbar. Die Hütte ist aus Holz konstruiert und befindet sich auf einem Steinschichtungsunterbau. Durch Massenbewegungen kann es zu Verformungen von Holzkonstruktionen kommen, wie in Abb. 132 ersichtlich. Zusätzlich findet man in diesem Fall eine geschädigte Unterkonstruktion vor. Holzkonstruktionen sind aufgrund ihrer nachgiebigen Bauweise und der höheren Zugfestigkeit von Holz weniger anfällig für Risse und können sich im Vergleich zu Konstruktionen aus mineralischen Baustoffen stärker verformen.



Abb. 132: Verformungen an der Holzkonstruktion und Schäden am erdberührten Mauerwerk verursacht durch kriechende Bewegungen des Hanges (Jaritz, 2001)

⁶⁵ Quelle: <https://www.meinbezirk.at/feldkirchen/lokales/die-klein-st-veiter-strasse-richtung-st-martin-sorgt-seit-jahren-fuer-aerger-nicht-nur-bei-anrainern-m6345243,943614.html> aufgerufen am 13.06.2017

Durch die langsam fortschreitenden Bewegungen im Untergrund kommt es im Übergangsbereich von bewegter zu unbewegter Zone zu einer Verschiebungsdifferenz. Befinden sich in diesem Bereich unterirdische Leitungen, wie im vorliegenden Beispiel Wasserleitungen zur Versorgung der Beschneiungsanlage, kann es zu Rohrbrüchen und Versorgungsproblemen kommen.



Abb. 133: Wasserleitung (in blau eingezeichnet) zur Versorgung der Beschneiungsanlage. Durch die Kriechbewegung kommt es zur Entstehung undichter Stellen im Rohr ⁶⁶

Mithilfe dieser Schadensbilder ist es möglich den aktuellen Bewegungsbereich (innerhalb des gelb strichlierten Bereichs in Abb. 129) abzuschätzen und die Ausdehnung im Vergleich zum Zeitpunkt der Erstaufnahme zu ermitteln. Für die übrigen Schadensbilder wird auf Abb. 126 bis Abb. 128 verwiesen, wobei sich diese im Laufe der Jahre durch die Weiterentwicklung der Bewegung verändert haben.

6.4.3 Bewegungsrate der Massenbewegung

Gleich den vorigen beiden Beispielen wird zur Ermittlung der Bewegungsrate wiederum die Möglichkeit der Verwendung einfacher Messgeräte angeführt. Abb. 134 zeigt eine Übersicht des Kriechhanges mit den unterschiedlichen Messgrößen anhand derer auf die Bewegungsgeschwindigkeit im Hang rückgeschlossen werden kann.

⁶⁶ Quelle: <http://www.wieser.it/de/fotos/kronplatz-bz-errichtung-der-skipiste-hinterberg-inkl-verlegung-der-beschneiungsanla/> aufgerufen am 13.06.2017

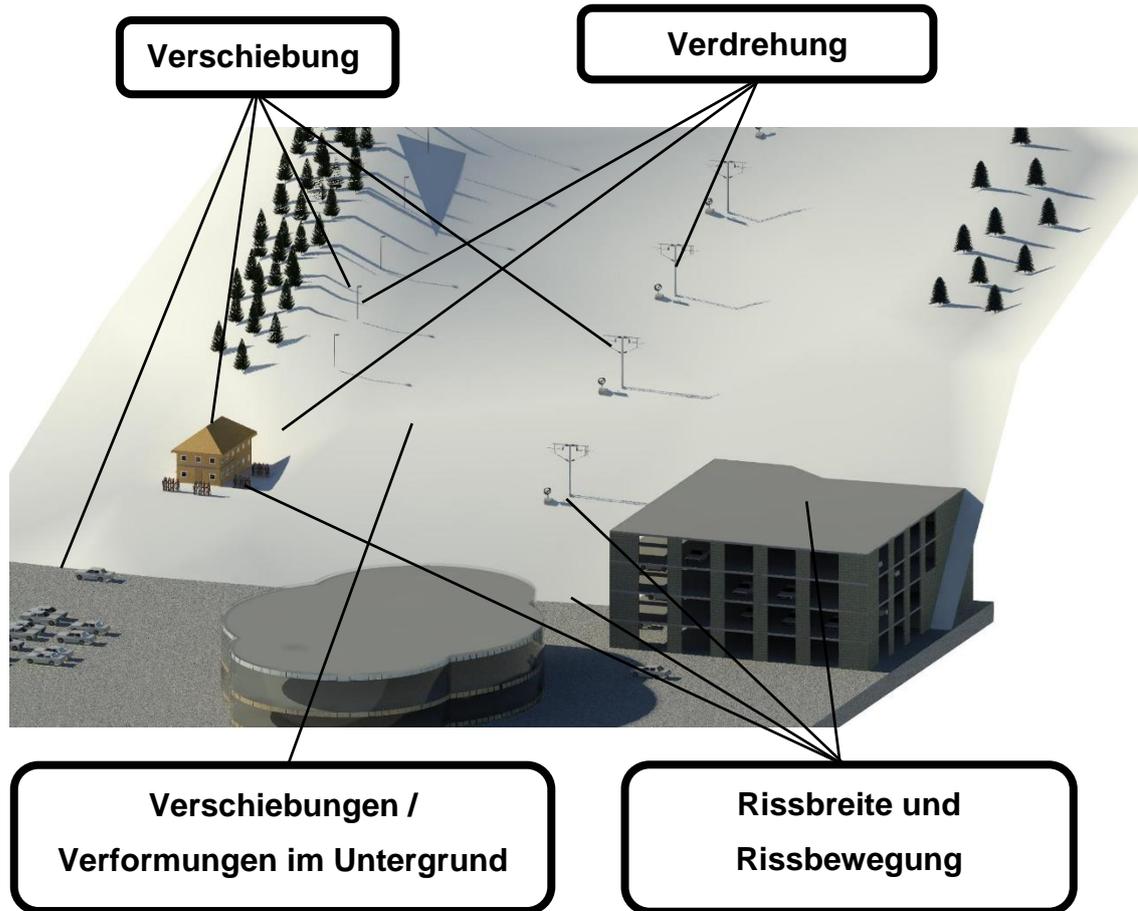


Abb. 134: Überblick des Kriechhanges mit verschiedenen Messgrößen zur Ermittlung der Bewegungsrate

Für eine genaue Beschreibung der einzelnen Messgrößen sowie der Messgeräte zur Ermittlung dieser, wird auf Tab. 5 von Kapitel 6.2.3 (Beispiel 1) verwiesen.

6.5 Rutschung Pogerschitzen

Die Ortschaft Pogerschitzen (Gemeinde Sittersdorf) ist im Osten von Kärnten, nahe der slowenischen Staatsgrenze situiert (Abb. 135). Im Februar 2014 ereignete sich in dieser Ortschaft eine Hangrutschung auf einer Fläche von ca. 50.000 m². Die Unterlagen zu der Massenbewegung wurden freundlicherweise von der Wildbach- und Lawinenverbauung Kärnten zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden gemeinsam mit dem Ingenieurbüro GDP ZT GmbH vor Ort Begehungen des Geländes und der Situation durchgeführt.

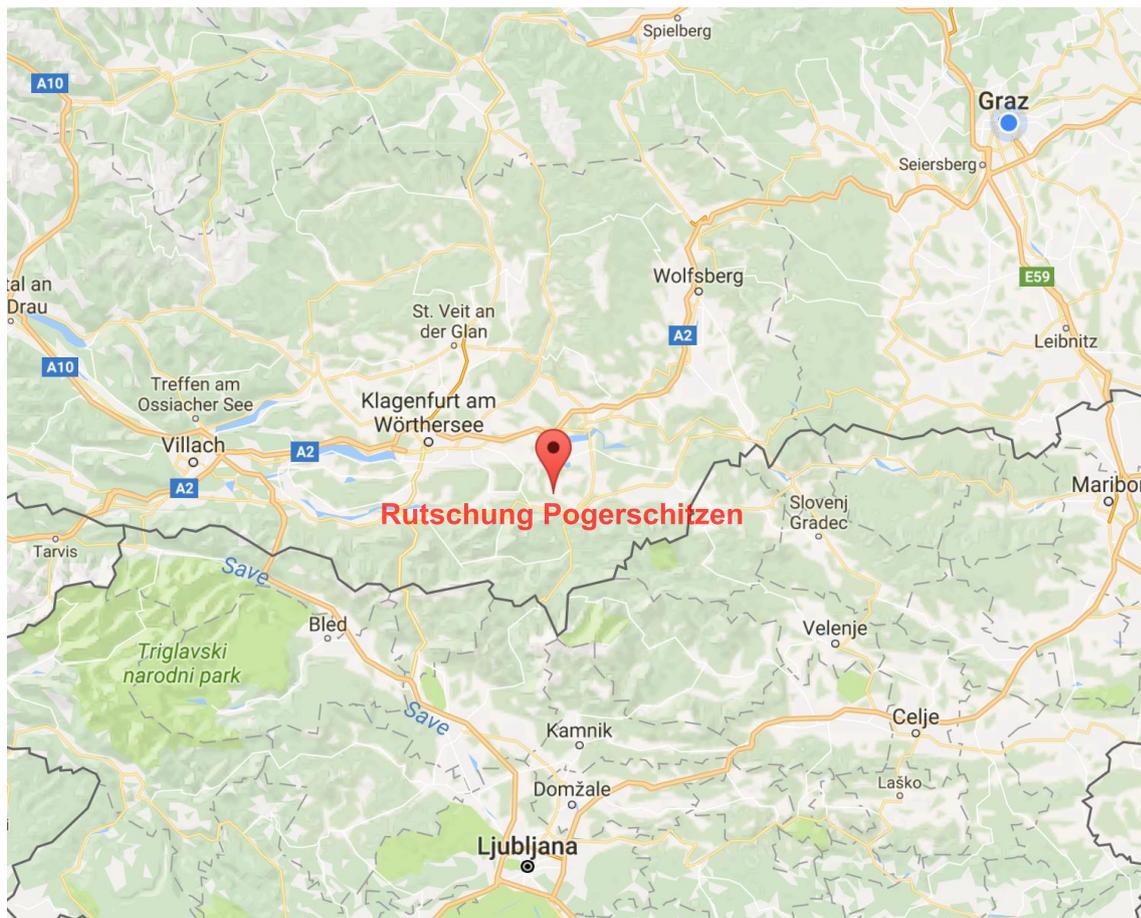


Abb. 135: Geographische Lage der Rutschung Pogerschitzen (Google Maps)

Die Rutschung ereignete sich an einem Hang, welcher zur Vellach (Fluss durch die Ortschaft Pogerschitzen) hin abfällt. Die Rutschung weist eine Länge von ca. 300 m und eine Breite von 150 bis 200 m auf. Im Zuge der geomorphologischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass es in diesem Bereich bereits früher zu Hangbewegungen gekommen ist. Im unteren Bereich der Rutschung befinden sich muschelförmig ausgeformte Muldenstrukturen, welche als ehemalige Abrisse interpretiert werden konnten. Auf Grund der umgebenden sehr flachen, kontinuierlich verlaufenden Geländemorphologie, wird eine Geländeüberschiebung vermutet.

Im oberen Bereich der Rutschung (Steilhang) befindet sich bis zur Böschungsoberkante grobkörniges Material (vorwiegend Kies) mit einer Mächtigkeit von 25 bis 30 m. Im unteren Bereich der Rutschung geht der Kies in feinkörnigen, bindigen Boden über. Es dominieren sandig, tonige Schluffe und schluffige Feinsande mit geringem Tonanteil.

Bezüglich der hydrologischen Bedingungen sei zu erwähnen, dass eine bergseitige Wassereinspeisung in die Rutschmasse erfolgt. Im Schichtgrenzbereich, zwischen Kies und dem feinkörnigen Neogen, treten an mehreren Stellen Schichtwässer hervor (siehe Abb. 144 und Abb. 145).

Die Tiefe der Gleitfuge konnte im Zuge der Untersuchungen ermittelt werden und liegt bei ca. 17 m. Durch eine Inclinometermessung (durch die GDP ZT GmbH) konnte diese Annahme bestätigt werden.

6.5.1 Ursachen und Auslöser

Als Hauptauslöser für die entstandene Hangrutschung gelten die austretenden Schichtwässer im Grenzbereich von kiesigen, steinigen Material und Neogen. Diese bewirkten eine ständige breitflächige Bewässerung des hangabwärts anschließenden Geländes. Unterhalb des grobkörnigen Materials befinden sich Lockerböden mit wasserempfindlichem Verhalten. Werden diese ständig bewässert kommt es zu einer Aufweichung des Bodens und zusätzlich zur Erhöhung des Porenwasserdrucks, welcher die Böschungsstandsicherheit reduziert. Es wird des weiterem davon ausgegangen, dass durch die Gletscherschmelze nach der Eiszeit Entspannungsvorgänge in den Hängen auftraten, welche bis heute teilweise noch ablaufen, und zur Bildung von neuen Trennflächen in der Rutschungsmasse führen. Dadurch werden die Böden wasserwegsam und die Stabilität des Hanges reduziert. Die überlagernde grobkörnige Bodenschicht bildet im Übrigen eine erhebliche Auflast und wirkt sich ungünstig auf die Böschungsstabilität aus.

Bereits vor Eintritt der Rutschung wurden beim Hang Drainagen und Entwässerungsmaßnahmen durchgeführt. Allerdings stellten sich diese als sehr ungünstig dar, da vor allem im mittleren und unteren Bereich der Rutschung Feuchtzonen und Tümpel, sowie im Boden aufgetretene Risse, in welchen Wasser stand, zu finden waren.

All diese Faktoren gemeinsam lösten letztendlich die Bewegung des Hanges aus.

6.5.2 Geotechnische Schadensbilder

Im Zuge der Begehung am 24.05.2017 wurden die geotechnischen Schadensbilder aufgenommen. Die Rutschung befindet sich in einem unsanierten Zustand. Das Rutschereignis liegt bereits etwas mehr als drei Jahre zurück, wodurch zufolge des Bewuchses und der natürlichen Regeneration nicht mehr alle Schäden deutlich erkennbar sind. Ein Großteil der Schadensbilder ist jedoch immer noch auffindbar.

Die Rutschung unterteilt sich in zwei Steilstufen mit dazwischenliegendem flachen Bereich. Abb. 136 zeigt eine Satellitenaufnahme des Rutschbereiches mit einer Fläche von ca. 50.000 m². Die blaue Markierung stellt die obere Steilstufe mit anschließendem flachen Abschnitt dar, die rote Markierung bildet die Begrenzung der unteren Steilstufe.

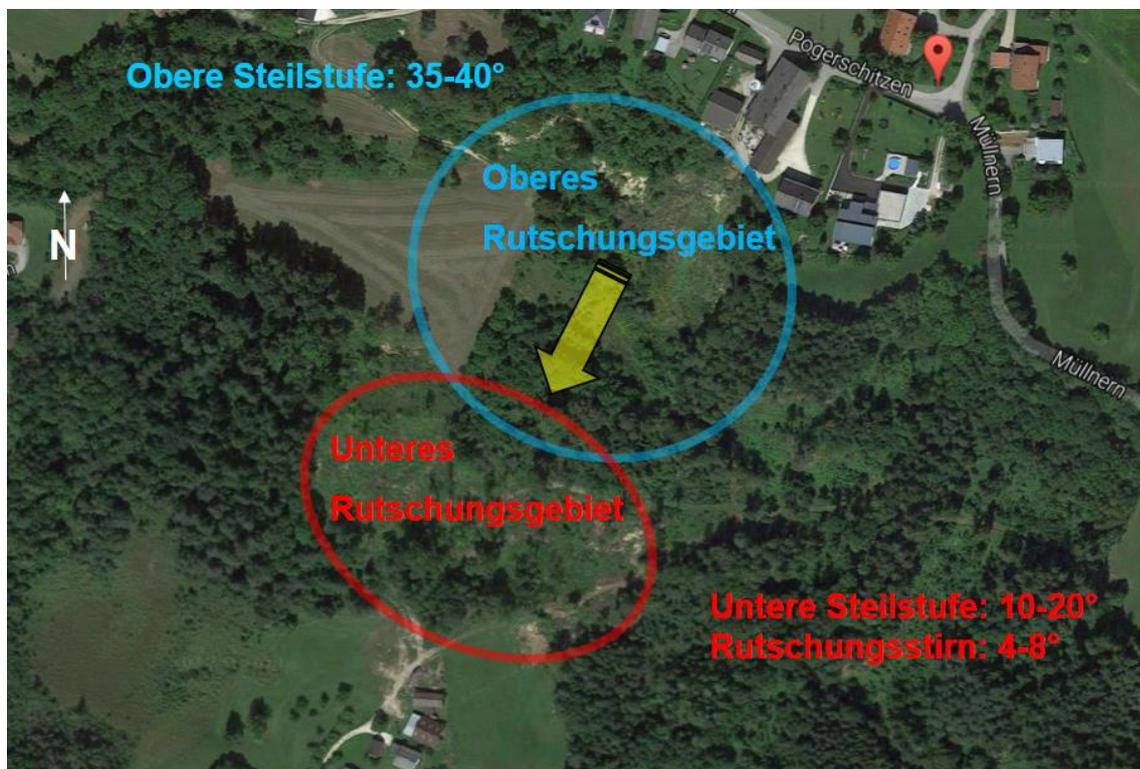


Abb. 136: Satellitenaufnahme des Rutschungsgebietes. Blaue Markierung: oberes Rutschungsgebiet; rote Markierung: unteres Rutschungsgebiet⁶⁷

Oberer Rutschungsbereich

Der obere Rutschungsbereich besteht aus einer sehr steilen Böschung und einer darunter angrenzenden Wiese. Abb. 137 stellt diesen Bereich mit Blick von der darunterliegenden Wiese dar (Blickrichtung Nordosten). Zur einfacheren Zuordnung der aufgenommenen Schadensbilder erfolgt eine Unterteilung in die drei Bereiche A, B und

⁶⁷ Adaptiert von: Google Maps, abgerufen am 27.05.2017

C (siehe Abb. 137). Die gesamte Rutschzone ist aufgrund einer deutlich ausgeprägten Anrisskante gut erkennbar und vom unbewegten Bereich abgrenzbar.

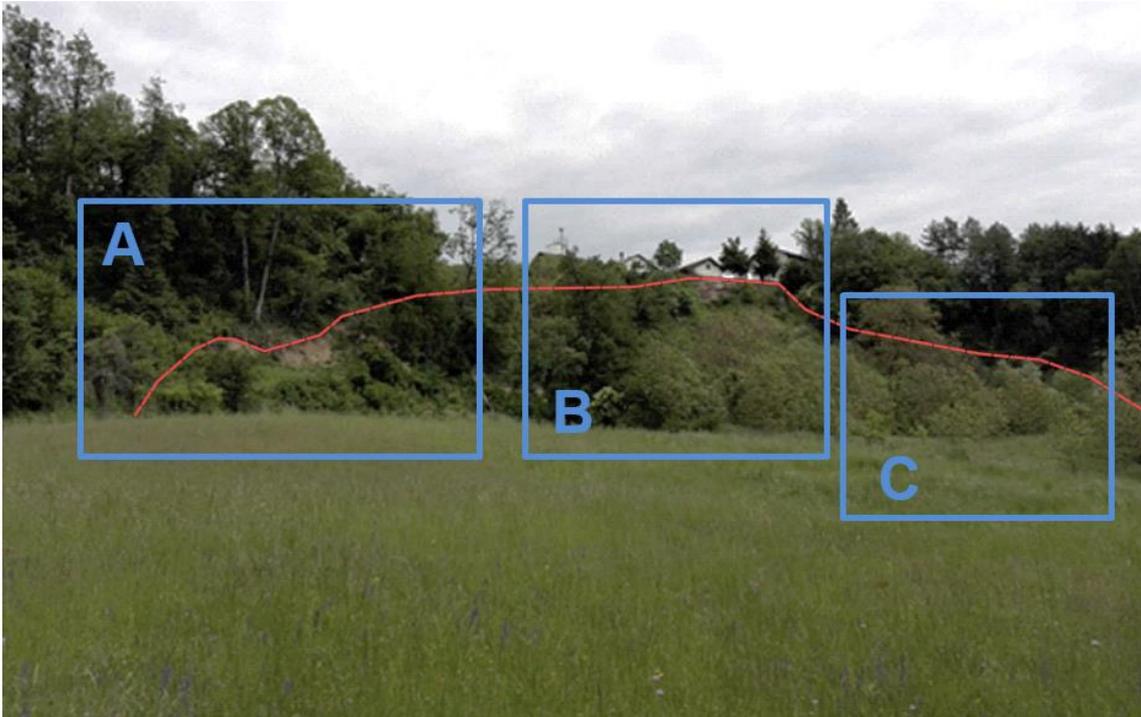


Abb. 137: Blickrichtung Nordosten auf die obere Steilstufe der Rutschung. Die rote Markierung stellt den Verlauf der Anrisskante dar. Die Bereiche A, B und C werden anschließend im Detail ausgearbeitet.

Bereich A

Bereich A stellt den westlichen Teil des oberen Rutschungsbereiches dar. An den Fotos ist erkennbar, dass es sich um einen grobkörnigen Bodenaufbau handelt. Abb. 138 bis Abb. 140 zeigen die Anrisskante der Rutschung. Diese ist durch einen Geländeversatz von ca. 2-3 m deutlich erkennbar.



Abb. 138: Gut erkennbare Anrisskante. Durch die Rutschung ergab sich ein Höhenversatz des Geländes von mehreren Metern.



Abb. 139: Durch die Rutschung ist das Gelände um 2-3 m tiefer versetzt.

Seit dem Rutschereignis kam es entlang der Anrisskante zu keinen nennenswerten Nachrutschungen des Erdmaterials. Immer wieder wurden örtliche Begehungen und

Dokumentationen durchgeführt, anhand derer feststellbar ist, ob es zu Veränderungen kam. Abb. 140 zeigt jedoch Bereiche entlang der Anrisskante, an welchen es jederzeit möglich ist, dass es zum Abrutschen von kleineren Massen kommt. Vor allem die sich knapp ober der Anrisskante befindlichen Bäume können durch ihr Eigengewicht und die Schiefstellung Bewegungen auslösen. Aufgrund der starken Verwurzelung der Bäume haben diese allerdings auch eine positive Auswirkung auf die Stabilität.



Abb. 140: Die Auflast des Baumstamms kann zum Nachbrechen der Anrisskante führen.

Bereich B

Dieser Bereich umfasst den höchsten und steilsten Teil der Rutschung. Abb. 141 bis Abb. 146 zeigen Schadensbilder dieser Zone. Anhand der Fotos ist erkennbar, dass der Boden unterhalb des kiesigen Materials in eine feinkörnige Neogenschicht übergeht. Unmittelbar nach dem Rutschungsereignis war die Neogenschicht derart stark durchnässt, dass Wasser austrann. Zum Zeitpunkt der Begehung ist diese Feuchte immer noch erkennbar und Wassertropfen an der Schicht sichtbar. Auch im umliegenden Bereich sind Feuchtstellen und Tümpel im Boden zu finden. Man kann davon ausgehen, dass diese Neogenschicht den Hang derart stark durchnässte, dass es schlussendlich zur Rutschung führte.



Abb. 141: Blick von oben auf den östlichen Bereich der Anrisskante.



Abb. 142: Obere Steilstufe mit Blick auf die Anrisskante unmittelbar nach dem Rutschereignis (WLV Kärnten, 2014)



Abb. 143: Obere Steilstufe mit Blick auf die Anrisskante zum Zeitpunkt der Begehung, drei Jahre nach dem Rutschereignis



Abb. 144: Neogenschicht (rote Markierung) unterhalb des grobkörnigen Bodens bewässert den Hang permanent



Abb. 145: Geringe Wasseraustritte aus der Neogenschicht erkennbar



Abb. 146: Feuchtstellen im Boden deuten auf eine starke Durchnässung des Hanges hin

Bereich C

Bereich C umfasst den östlichsten Bereich der oberen Steilstufe. Abb. 147 und Abb. 148 zeigen Schadensbilder dieser Zone. Die Anrisskante ist wiederum gut erkennbar, zusätzlich ist es in diesem Bereich durch Aufschiebungen der Rutschungsmasse zur Schiefstellung von Bäumen gekommen. Aufgrund der verschiedenen Bewegungsraten im Boden sind die Bäume unterschiedlich stark verdreht worden und wachsen nun in dieser Form weiter.



Abb. 147: Deutlich sichtbare Anrisskante der Rutschung



Abb. 148: Schrägstellung der Bäume durch die Verschiebungen der Bodenmasse

Flache Wiese zwischen den Steilstufen

Beim Rutschungsereignis kam es in der Wiese zwischen den Steilstufen (unteres Ende des oberen Rutschungsbereiches) zur Entstehung enormer Zugrisse im Boden. Diese wiesen teilweise eine Breite von bis zu einem Meter auf. Zuzufolge der starken Durchnässung des Hanges waren diese Risse teilweise mit Wasser gefüllt. Im Zuge durchgeführter Sanierungsarbeiten wurden die Risse in der Wiese geschlossen. Bei der Begehung im Mai 2017 konnten an der Wiese aus diesem Grund keine aussagekräftigen Schadensbilder aufgenommen werden. Jedoch war zuzufolge der Aufschiebungen im betroffenen Bereich eine unruhige Oberflächenmorphologie ersichtlich.

In Abb. 149 bis Abb. 152 sind Fotos der Wiese dargestellt. Die Abbildungen enthalten Fotos unmittelbar nach dem Rutschungsereignis, sowie Fotos zum Zeitpunkt der Begehung.



Abb. 149: Blickrichtung Süden von der oberen Steilstufe auf den anschließenden flachen Bereich



Abb. 150: Blickrichtung Nordosten vom unteren Bereich der dazwischenliegenden Wiese auf die obere Steilstufe. An der Wiese sind außer leichten Unebenheiten keine Schäden mehr ersichtlich.



Abb. 151: Risse in der Wiese unmittelbar nach der Rutschung (WLV Kärnten, 2014)



Abb. 152: Durch die starke Durchfeuchtung des Hangs sind die Risse teilweise mit Wasser gefüllt; Aufnahme direkt nach dem Rutschungsereignis (WLV Kärnten, 2014)

Unterer Rutschungsbereich

Im unteren Rutschungsbereich konnten im Zuge der Begehung nur einige Schadensbilder aufgenommen werden. Durch die Rutschung liegen umgebrochene Bäume am Boden oder hängen an anderen noch intakten Bäumen. Teilweise sind die Bäume schräg geneigt, je nach Bewegungsgeschwindigkeit im Untergrund haben sich die Bäume in verschiedene Richtungen verdreht. Zusätzlich ist das Gebiet bereits so stark verwachsen, dass es schwierig war, Risse oder andere Schäden am Boden zu erkennen. Es ist zu erwähnen, dass der Hang in diesem Bereich immer noch stark durchfeuchtet ist und am Boden immer wieder Tümpel und Fochtstellen aufzufinden sind. In den letzten zwei Tagen vor der Begehung hat es leicht geregnet. Laut Informationen der GDP ZT GmbH ist die Durchfeuchtung des Hanges aber auch ohne unmittelbar zuvor auftretende Niederschläge deutlich erkennbar.

Die untere Abgrenzung der Rutschung zum unbewegten Bereich wird im östlichen Abschnitt von einer aufgeschobenen Rutschungsstirn gebildet, im westlichen Bereich ist das Gelände eher eingesunken und hat zur Entstehung von Eintiefungen geführt. Abb. 153 bis Abb. 155 zeigen aufgenommene Schadensbilder dieses Rutschungsbereiches.



Abb. 153: Blickrichtung Süden auf den unteren Rutschungsbereich. An den schiefen Bäumen ist erkennbar, welcher Bereich von der Bewegung betroffen ist.



Abb. 154: Im Bereich der unteren Rutschzone sind Bäume durch die Rutschung teilweise umgebrochen, hängend an anderen Bäumen oder schiefgestellt.



Abb. 155: Unteres Ende der Rutschung im östlichen Bereich. Die aufgeschobene Rutschzunge bildet den Übergang zur unbewegten Zone.

Monitoring

Im oberen Bereich der Rutschung (Bereich B) wurde (durch die GDP ZT GmbH) zur Überwachung der Hangbewegungen ein Inklinometerrohr installiert. Eine Nullmessung und drei Folgemessungen wurden bisher durchgeführt, wobei es zu Verschiebungen von 2 mm im Zeitraum eines Jahres gekommen ist. Aus Kostengründen wurden seit Mai 2016 keine weiteren Messungen mehr durchgeführt. Abb. 154 zeigt das installierte Inklinometerrohr.



Abb. 156: Inklinometerrohr

Anhand anderer einfacher Beobachtungsmethoden wurde im Zuge der Begehung jedoch festgestellt, dass es seit der letzten Messung zu keinen größeren Verschiebungen gekommen ist. Im Grenzbereich zwischen bewegter und unbewegter Zone verlaufen einige Waldwege. Deren Verlauf kann genutzt werden, um Aussagen über die Bewegungsrate im Untergrund zu treffen. Da an den Wegen keine Verschiebungen erkennbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass es im Hang in

letzter Zeit zu keinen größeren Bewegungen kam (siehe Abb. 157 und Abb. 158).
Zumindest können Verschiebungen im Dezimeterbereich oder darüber hinaus
ausgeschlossen werden. Kleinere Bewegungsraten können mit derartigen
Beobachtungsmethoden nicht festgestellt werden.



Abb. 157: Ungerader Verlauf des Weges deutet auf die Grenze der Bewegungszone und die Verschiebungen hin.

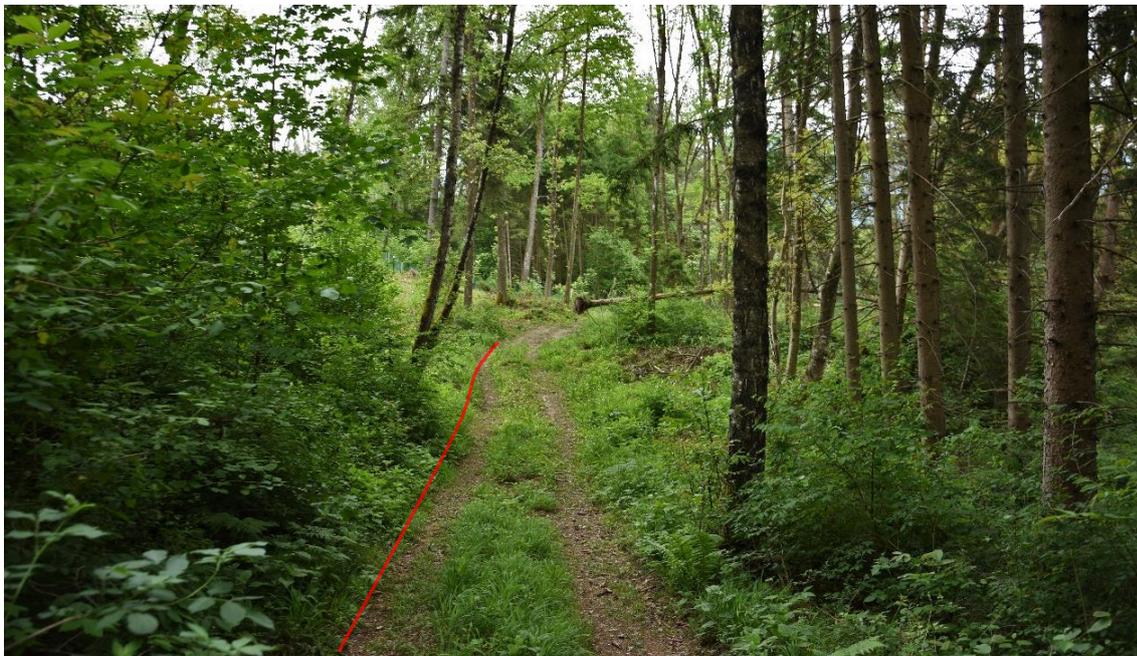


Abb. 158: Verlauf und Form des Weges liefern Hinweise über die Bewegungsrate und die Grenze zwischen bewegtem und unbewegtem Bereich.

6.5.3 Konstruktive Schadensbilder

Neben den geotechnischen Schadensbildern wurden bei der Begehung am 24.05.2017 im Rutschungsgebiet bzw. im unmittelbaren Umfeld der Rutschung ebenfalls konstruktive Schadensbilder erhoben.

Zur Übersicht wird das Rutschungsgebiet mit dem nordöstlich gelegenen Bauernhof (Abb. 159, X), sowie dem südlichen Bauernhof (Abb. 159, Y bzw. Z) im folgenden Satellitenbild dargestellt.

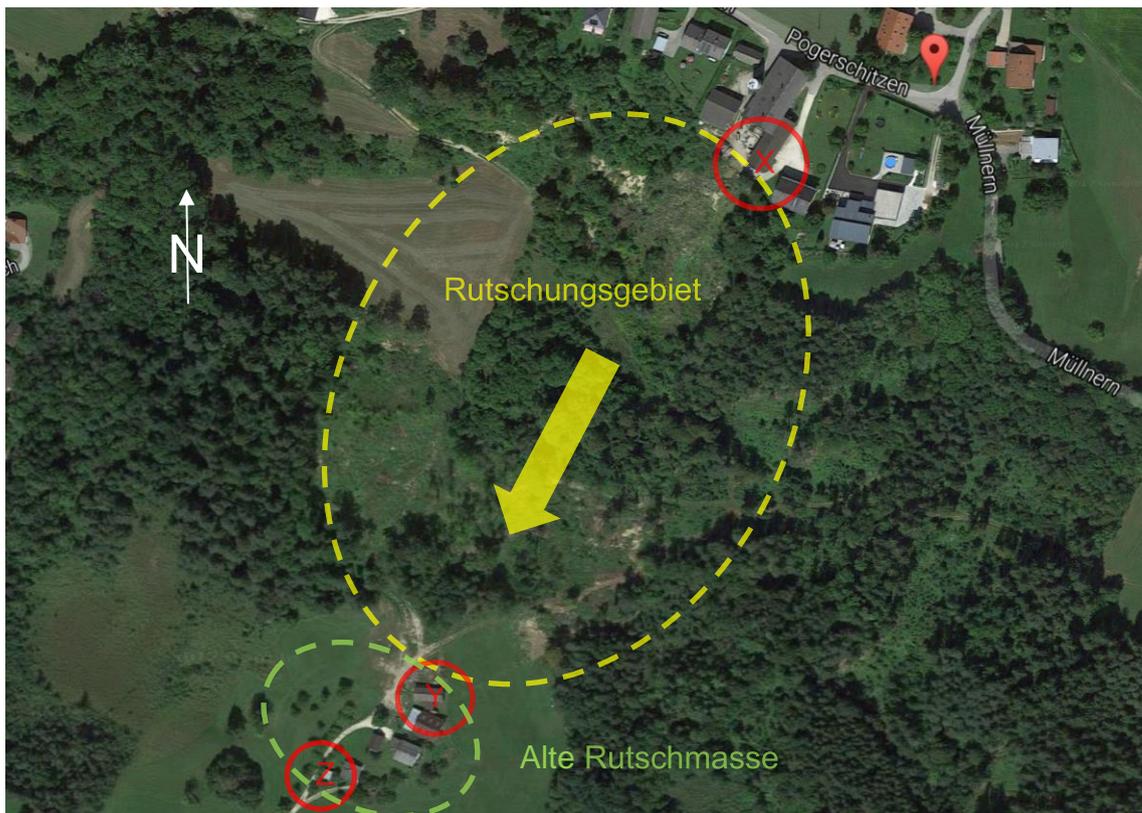


Abb. 159: Satellitenaufnahme des Rutschungsgebietes ⁶⁸

Direkt im Rutschungsgebiet befinden sich keine Bauwerke, jedoch sind unmittelbar an der Hangkrone (in ca. 5 m Entfernung) einige Bauwerke situiert. Ein weiterer Bauernhof liegt südlich angrenzend an die Rutschungsstirn. In diesem Bereich flacht das Gelände ab (4°- 8° Gefälle). Die Rutschung kam einige Meter vor den Objekten des südlichen Bauernhofes zum Stillstand, welcher sich auf einer alten Rutschmasse befindet.

⁶⁸ Google Maps, abgerufen am 27.05.2017



Abb. 160: Blick Richtung Norden: Aufnahme des südlichen Bauernhofes unter dem Rutschungsgebiet; eingezeichnet in grün das alte Rutschungsgebiet



Abb. 161: Blick Richtung Süden: Aufnahme des südlichen Bauernhofes nach dem Rutschungsereignis 2014 (WLV Kärnten, 2014)

Bereich X

Bei der Begehung wurde zuerst der nordöstliche Bauernhof besichtigt (Abb. 159, X). Während die umliegenden Bauobjekte keine signifikanten Schäden aufwiesen, zeigte ein als Traktorgarage verwendetes Bauwerk auffällige Risse.



Abb. 162: Traktorgarage mit auffälligen Rissen, Blick Richtung Osten

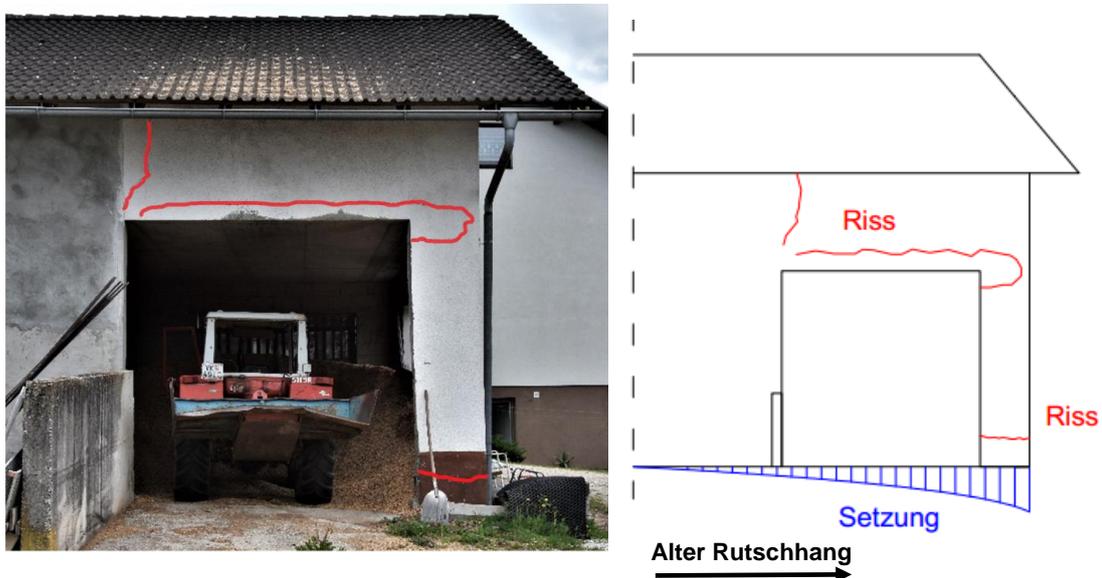


Abb. 163: Linkes Bild: Nachgezeichnete Rissmuster; Rechtes Bild: schematische Darstellung



Abb. 164: Traktorgarage mit Risschäden Blick Richtung Nordwesten

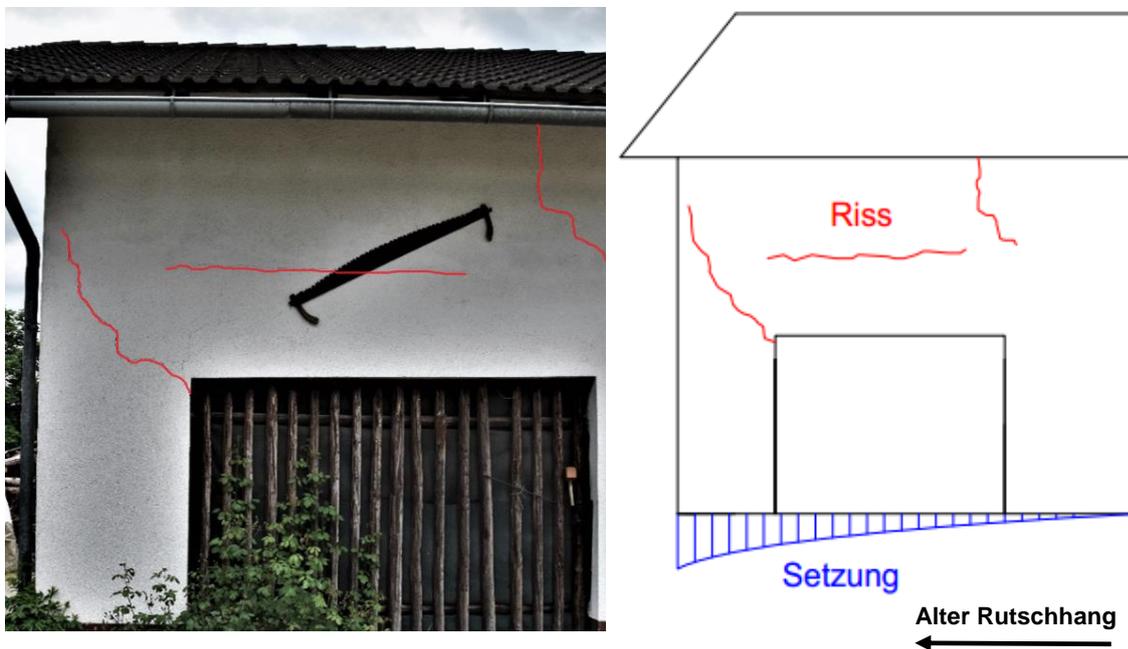


Abb. 165: Linkes Bild: Nachgezeichnete Rissmuster; Rechtes Bild: Schematische Darstellung

Werden die Risschäden von beiden Seiten betrachtet, so deuten diese Rissmuster auf Bewegung in Richtung des Rutschhanges hin.

Abb. 166 zeigt eine Aufnahme aus dem Jahr 2014. Bei genauerer Betrachtung der Aufnahme wird ersichtlich, dass unmittelbar nach der Rutschung noch keine signifikanten Risschäden am Gebäude erkennbar waren. Im Zuge der Begehung wurden jedoch Risschäden mit einer Rissbreite im Zentimeterbereich festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass sich das Objekt über die letzten drei Jahre in Richtung des Rutschhanges bewegt haben könnte.



Abb. 166: Aufnahme des nördlichen Bauernhofes in der Nähe des Hanges nach der Rutschung im Jahr 2014 (WLV Kärnten, 2014)



Abb. 167: Aufnahme der Traktorgarage in der Nähe des Rutschhanges

Bereich Y

Als nächstes wurden die südlich der Rutschung gelegenen Objekte des Bauernhofs im Bereich der Rutschungstirn besichtigt (Abb. 159, Y & Z). Beim Schadensobjekt handelt es sich um eine Holzkonstruktion, welche auf einem Streifenfundament gegründet ist.

Wie in Abb. 168 zu erkennen, weist die Gründung eine Neigung talabwärts auf. Grund für die schiefe Lage können große Bautoleranzen, aber auch Bewegungen des Hanges infolge der Rutschung sein.



Abb. 168: Stallgebäude südlich unter dem Rutschungsende; Blick Richtung Westen; Darstellung der Neigungsunterschiede von Betonwand und Bauwerk im Detail

Bereich Z

Die Wohngebäude, welche südlich unterhalb der Holzkonstruktion liegen, wiesen keine auffälligen Schäden auf. Beim südlichsten Gebäude handelt es sich um eine zweigeschossige Garage (Abb. 159, Z). An dieser war, wie in folgenden Abbildungen zu sehen, eine Verformung mit daraus folgenden Risschäden erkennbar. Die Wände im Untergeschoss neigten sich südwestlich talabwärts.



Abb. 169: Zweigeschossige Garage südlich vom Rutschhang; Blick Richtung Nordosten



Abb. 170: Frontalansicht der Garage Blick Richtung Norden

Die Verformung der Konstruktion führte zu einem Kippen der Wände. Aufgrund dessen kam es zu einer Momentenbelastung im Anschlussbereich Boden/Wand und infolge dessen zu Rissen in der Bodenplatte.

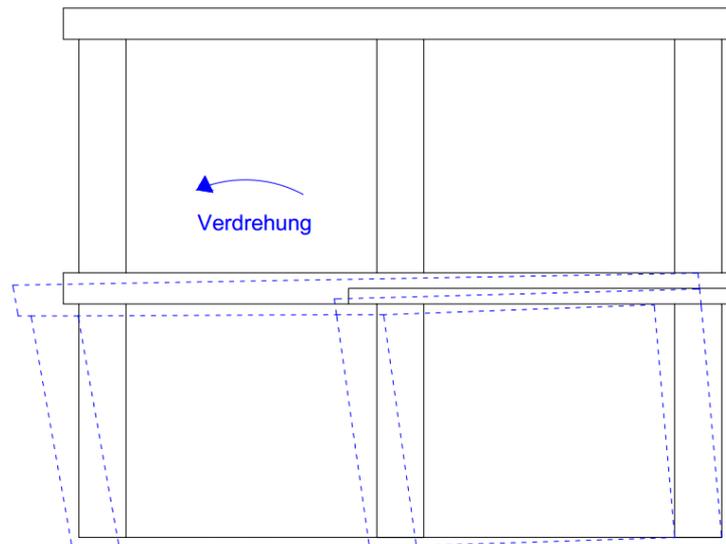


Abb. 171: Schematische Darstellung der Verdrehung der zweigeschossigen Garage; Blick Richtung Norden



Abb. 172: Linkes Bild: Risse in der Bodenplatte aufgrund von Kippen der inneren Wand; Rechtes Bild: Risschaden im Detail

6.5.4 Weiteres Vorgehen

Bei den konstruktiven Schäden konnte festgestellt werden, dass die Orientierung der Deformationen mit der Bewegungsrichtung der Rutschung ident ist. Die Durchfeuchtung des Hanges hat seit dem Rutschungsereignis abgenommen, ist aber immer noch deutlich erkennbar und zu berücksichtigen. Um genaue Aussagen über die Aktivität und Bewegungsrate des Hanges in Pogerschitzen treffen zu können, müssten die dokumentierten Schäden über die nächsten Jahre beobachtet werden, um eventuelle Veränderung der Schadensbilder festzustellen.

Folgende Messgrößen können auf einfache Weise überwacht werden:

Geotechnisch:

- Positionsänderung geodätischer Messpunkte
- Vorhandene Risse im Boden
- Veränderung der Hangmorphologie
- Durchfeuchtung des Hanges

Die geodätischen Messpunkte können mittels GNSS-Sensor bzw. Totalstation auf eine Positionsänderung überprüft werden. Risse im Boden und Durchfeuchtung des Hanges können durch regelmäßige Begehungen optisch auf Veränderungen beobachtet werden.

Konstruktiv:

- Rissbewegung an der Traktorgarage
- Neigungsänderung des Stallgebäudes bzw. der Streifenfundamente
- Neigungsänderung der zweigeschossigen Garage

Bei den Risschäden würden sich Gipsmarker oder ein Rissmonitor anbieten, während die Neigungsänderungen der Bauteile mit einer Wasserwaage bzw. einem Neigungssensor periodisch überwacht werden können.

7 Resümee

Ursache und Auslöser für Massenbewegungen sind oft schwierig festzustellen, da häufig mehrere Faktoren zusammenwirken. Als Hauptauslöser, welche die Böschungstabilität aus dem Gleichgewicht bringen, können die Veränderung der hydrologischen Bedingungen (z.B. Starkregenereignisse) oder die Veränderung der Hanggeometrie oder Lastverteilung bedingt durch anthropogenen Einflüsse genannt werden.

Mit dieser Arbeit wurde versucht eine Sammlung an geotechnischen Schadensbildern verursacht durch Massenbewegungen zu erstellen. Anhand der Schadensbilder wurde gezeigt, wie schwierig es ist, mit der Thematik Massenbewegungen umzugehen, da jeder Bewegungsvorgang ein für sich individuelles Problem darstellt und sich aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen in verschiedenen Schadensformen äußert. Dennoch besteht die Möglichkeit, durch den Vergleich mehrerer Fälle auf Ähnlichkeiten zu schließen und die vorhandenen Schadensbilder als Monitoringmethode anzuwenden.

Hauptinhalt der Arbeit war die kombinierte Betrachtungsweise geotechnischer und konstruktiver Schadensbilder. Eine Anrisskante in einem Hang oder Anzeichen einer unruhigen Hangmorphologie alleine sind nur bedingt ein eindeutiger Hinweis auf eine Massenbewegung oder vorliegende Hangdeformationen. Wird jedoch das gesamte Umfeld betrachtet und werden zusätzlich zu den geotechnischen auch konstruktive Schadensbilder an umliegenden Bauwerken (z.B. Risschäden an Bauwerken, Neigungsänderungen an Stützmauern) vorgefunden, so ist es möglich eindeutigere Aussagen über den Zustand der Hangaktivität treffen zu können. Durch die Beobachtung erster erkennbarer Schadensbilder über einen längeren Zeitraum können Veränderungen mit einfachen Mitteln festgestellt werden. Vor allem in der Anfangsphase der Beobachtung und zur Planung eines Monitoringkonzepts kann die Verwendung einfacher Messinstrumente zur Überwachung der Schadensbilder zielführend sein. Die Nutzung von Schadensbildern als ergänzende Monitoringmethode bietet daher eine geeignete Methode, um Hangbewegungen frühzeitig zu erkennen und durch geeignete Stabilisierungsmaßnahmen Folgeschäden zu vermeiden oder zumindest deren Ausmaß abzuschwächen.

Diese Arbeit fokussiert sich hauptsächlich auf Schadensbilder verursacht durch Rutschungen und Kriechhangbewegungen. Da hierdurch immer häufiger Probleme hervorgerufen werden und in vielen Fällen die finanziellen Mittel für ein klassisches Monitoringsystem nicht vorhanden sind, bieten die behandelten Methoden eine kostengünstige jedoch oftmals effiziente Möglichkeit.

8 Literatur

- Arp, G.; Leiss, B.; Tanner, D.; Vollbrecht, A. (2011)
Neue Untersuchungen zur Geologie der Leinetalgrabenstruktur. Bausteine zur Erkundung des geothermischen Potentials der Region Göttingen. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen.
- Bäk, R. (2003)
Talzuschub Gradenbach. Vortrag im Rahmen des Landesgeologentages in Kärnten zum Thema Umgang mit Naturgefahren. Klagenfurt: 29.09.2003.
- Brandner, R.; Brückl, E.; Eder, S.; Fellin, W.; Prager, C.; Poscher, G.; Schönlaub, H.; Tentschert, E.; Zangerl, C. (2008)
Geo.Alp. Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. Vol. 5.
- Breymann, H. (2014)
Vortragsfolien 3. OÖ Geotechniktag: Kinematische Aspekte und erdstatische Ansätze von Hangbewegungen.
- Bunza, G. (1992)
Instabile Hangflanken und ihre Bedeutung für die Wildbachkunde. München: Deutscher Alpenverein.
- Davies, T. (2015)
Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Amsterdam: Elsevier.
- Dunncliff, J. (1988)
Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: John Wiley & Sons.
- Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (2008)
Technischer Bericht Gschlifgraben. Projekt 2008/II.
- Freie Universität Berlin (kein Datum)
Fachbereich Geowissenschaften. Seitenerosion. Aufgerufen am 20.03.2017 von http://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/geomorphologie/fluvialmorphologie/flusserosion/fluviale_erosionsprozesse/seitenerosion/index.html
- Gasperl, W.; Tartarotti, T. (2014)
Großrutschung Höhenberg Großraming. Wildbach- und Lawinenverbauung OÖ.
- Genske, D.D. (2006)
Ingenieurgeologie. Grundlagen und Anwendung. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Genske, D.D. (2008)
Grundbau Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Kapitel: Massenbewegungen. 7. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.
- Geologische Bundesanstalt Wien (kein Datum)
Allgemeine Informationen zu Massenbewegungen. Aufgerufen am 30.08.2017 von https://www.geologie.ac.at/fileadmin/user_upload/dokumente/pdf/service/webapplikation/allgemeine_info_mass_end_h.pdf

- Glade, T., Stötter, H. (2007)
Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. Aufgerufen am 02.07.2017
von
<https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/Publications/Glade&Stoetter2008.pdf>
- Goldschmidt, F. (2010)
Geologische Stellungnahme zur Rutschung im Fischergraben, KG Luggau. Amt
der Kärntner Landesregierung.
- Goldschmidt, F. (2013)
Geologische Stellungnahme zur Hangrutschung unterhalb Schloss Wernberg. Amt
der Kärntner Landesregierung.
- Hofmann, R.; Jaritz W. (2005)
Großrutschung Sibratsgfäll. 5. Österreichische Geotechniktagung. Wien: Österr.
Ingenieur- und Architekten-Verein.
- Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme TU Graz (2003)
GPS Monitoring von alpinen Hangbewegungen. Ergebnisse der Überwachung der
Massenbewegung Gradenbach mit GPS und Photogrammetrie.
Landesgeologentag Kärnten Klagenfurt 29.09.2003.
- Jaritz, W. (2001)
Großhangbewegung Rindberg, Gem. Sibratsgfäll, Vlb., Schadensbilder –
Ursache – Prognose, Georisiken – Seminar und Workshop 2001. ZT- Büro Moser
– Jaritz. Österreich.
- Johnsen, G. (1984)
Hangbewegungen vom Block-Typ östlich Berggießhübel. Ingenieurgeologische
Untersuchungen im Fels. Vortrags- und Exkursionstagung der GGW 1984 in
Freiberg.
- Käser, E. (2001)
Fachlexikon der Mechatronik. Aufgerufen am 19.08.2017 von
<http://www.fachlexika.de/technik/mechatronik/messtechnik.html>
- Kieffer, S. (2016)
Vorlesungsfolien Landslide and Slope Processes: Landslide Triggering
Mechanisms.
- Kolymbas, D. (2011)
Geotechnik. Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau. 3. neu bearbeitete
Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Krauter, E. (2001)
Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen.
In Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen (6. Auflage).
- Leopold, P. (2012)
Kriechbewegungen in den neogenen Beckensedimenten des Burgenlandes:
Verbreitung, Verbleich natürlicher Einflussfaktoren, Bewegungsmechanismen und
Auslöser. Dissertation an der Universität Wien.

- Lienhart, W. (2016)
Vorlesungsfolien Geotechnical Monitoring: Tunnelling, Landslides and Building Foundations.
- McColl, S.T. (2015)
Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Landslide Causes and Triggers. Amsterdam: Elsevier.
- Ministerium für ein lebenswertes Österreich (kein Datum)
Naturgefahren. Aufgerufen am 16.06.2017 von http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/Katastrophen_oestr/Talzus Schub.html
- Marte, R.; Paulus-Grill, M.; Scharinger, F. (2012)
Handbuch Geotechnik – Kapitel 15: Geotechnische Messverfahren. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Marte, R. (2015)
Vorlesungsfolien Bodenmechanik und Grundbau: Messtechnik und GIS in der Geotechnik.
- Mencl, V.; Záruba, Q. (1982)
Landslides and their control. New York: Elsevier.
- Multilingual Landslide Glossary (1993)
The International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslide Inventory. The Canadian Geotechnical Society. Richmond (B.C.): BiTech Publishers Ltd.
- Niederschick, M. (2007)
Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- One Geology (kein Datum)
One Geology. Aufgerufen am 15.05.2017 von <http://www.onegeology.org/extra/kids/earthprocesses/creep.html>
- ÖGG Salzburg (2017)
Empfehlungen zur Prüfung und Beurteilung bestehender, unverankerter Stützbauwerke.
- ÖNORM B 1997-1-1 (2013)
Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik; Teil 1: Allgemeine Regeln. Wien: Austrian Standards.
- ÖNORM EN 1997-1 (2014)
Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik; Teil 1: Allgemeine Regeln. Wien: Austrian Standards.
- ÖROK (2014)
Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. Aufgerufen am 22.08.2017 von http://www.oerok.gv.at/fileadmin/Bilder/2.Reiter-Raum_u._Region/1.OEREK/OEREK_2011/PS_Risiko/MB_v33.pdf

- Prinz, H.; Strauß, R. (2011)
Ingenieurgeologie. 5. bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Rapp, M. (2011)
Monitoring von Massenbewegungen. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien.
- Reatzo, H. (2011)
Massenbewegungen unter Beobachtung. Aufgerufen am 02.07.2017 von http://www.sia.ch/uploads/media/sbz-004_2011_137_17-18_a_003.pdf
- Steinbacher, N. (2014)
Vortrag: Rutschungsrelevante Hinweise auf geogenes Baugrundrisiko in OÖ.
- Spektrum (kein Datum)
Lexikon der Geowissenschaften. Säbelwuchs. Aufgerufen am 15.05.2017 von <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/saebelwuchs/13873>
- Spektrum (kein Datum)
Lexikon der Geowissenschaften. Fluchtstab. Aufgerufen am 23.08.2017 von <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/fluchtstab/5004>
- Terzaghi, K., Peck, R. (1961)
Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag.
- WLV Kärnten (2014)
Fotobeilage Pogerschitzen Mai 2014, Wildbach- und Lawinenverbauung - Forsttechnischer Dienst - Gebietsbauleitung Kärnten, Villach
- Zepp, H. (2002)
Geomorphologie - Grundriss Allgemeine Geographie. Paderborn: Schöningh Verlag.