

RESEARCH

Michael Moser · Florian Amann
Jörg Meier · Stefan Weidner

Tiefgreifende Hangdeformationen der Alpen

Erscheinungsformen –
Kinematik – Maßnahmen



Springer Spektrum

Tiefgreifende Hangdeformationen der Alpen

Michael Moser · Florian Amann
Jörg Meier · Stefan Weidner

Tiefgreifende Hangdeformationen der Alpen

Erscheinungsformen –
Kinematik – Maßnahmen



Springer Spektrum

Prof. Dr. Michael Moser
Erlangen, Deutschland

Dr.-Ing. Jörg Meier
Basel, Schweiz

Dr. Florian Amann
Zürich, Schweiz

Dr. Stefan Weidner
München, Deutschland

ISBN 978-3-658-16923-7 ISBN 978-3-658-16924-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-16924-4

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Der Auslöser für die intensiven Untersuchungen von instabilen Talflanken war die Großhangbewegung Gradenbach/Kärnten Ende der 60iger Jahre. Dort wurde durch die Unterschneidung der Stirn durch den Vorfluter und den Abtransport von ca. 1 Mio. m³ Fels und Lockergestein die Ortschaft Putschall südlich Heiligenblut zum großen Teil zerstört. Auch andere Großhangbewegungen wie z.B. die Reppwand zeigen die negativen und häufig zerstörerischen Auswirkungen auf Siedlungen und Infrastruktur. Obwohl die negativen Auswirkungen auf der Hand liegen, sind verwertbare Ergebnisse zum Bewegungsverhalten und Bewegungsmechanismus eher selten. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass eine Auflösung des Bewegungsmusters langjährige Messungen und geotechnische Untersuchungen über einen zumeist großflächigen Massenkörper erfordert. Dies ist besonders der Fall, wenn die steuernden Faktoren wie z.B. Schneeschmelzvorgänge oder Bergwasserspiegelhöhen, in die Analyse der tiefgreifenden Massenbewegungen einbezogen werden sollen.

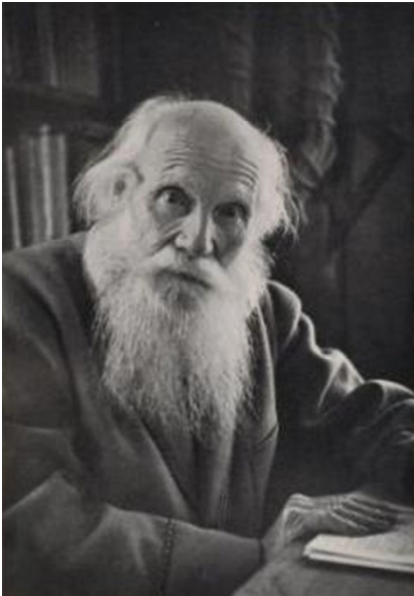
In dieser Veröffentlichung wird das Hauptaugenmerk auf solche Hangbewegungen gelegt, die sich in den Ostalpen befinden und bei denen langjährige quantitative Untersuchungen vorliegen. Einige Objekte in Frankreich und in der Schweiz, bei denen die Kinematik und die geotechnischen Aspekte ausführlich untersucht wurden, sind zur besseren Vergleichbarkeit der eigenen Ergebnisse in die Auswertung integriert.

Die langjährigen und detaillierten Untersuchungen erforderten die Zusammenarbeit vieler Disziplinen, Institutionen und Personen. Besonders bedanken möchten wir uns

- für die Überlassung von Unterlagen und finanzielle Unterstützung bei den Gebietsbauleitungen der Wildbach- und Lawinenverbauung des Drau- und oberen Mölltales, des Gail- und Lesachtales und von Osttirol, sowie beim Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen in Wien und den Tiroler Wasserkraftwerken AG in Innsbruck,
- für die teils langjährige finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft in Bonn,
- für die Mithilfe bei geodätischen Arbeiten bei Mitarbeitern der geodätischen Institute in Karlsruhe und München,
- bei den Mitarbeitern G. Eichenseer, St. Eisenbarth, U. Glawe, R. Gloser, M. Lotter, R. Suchan und G. Teusch am Lehrstuhl für Angewandte Geologie in Erlangen-Nürnberg für die z.T. aufwändigen und schwierigen Arbeiten im Gelände,
- für das schweizerische Objekt „Großhangbewegung Sedrun/Graubünden“ bei Herrn Bonanomi/Sedrun für die Überlassung von Unterlagen und die konstruktive Zusammenarbeit,
- bei Herrn H. Meier vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Erlangen-Nürnberg für den langjährigen und unermüdlichen Einsatz im Gelände und im Institut.

Unser Leben ist kurz. Das Gedächtnis der Menschheit als Ganzes schwach. Die wenigen Bergstürze, die wir miterleben, haben den Eindruck hinterlassen, die Bergstürze seien ganz ungewöhnliche, außerordentliche Erscheinungen. Allein, es ist nicht so. Die Bergstürze sind normale Erscheinungen der Gebirge. Im Gebirge, besonders im Hochgebirge haben sie ihr Heimatrecht. Hier müssen sie helfen am Modellieren und am endlichen Schleifen der Gebirge, welche Formungsvorgänge unabänderlich, rücksichtslos und stetig fortarbeiten.

Albert Heim (1932)



It has often been stated that certain slides occurred without warning. All slides except earthquakes and spontaneous liquefaction involve a progressive deformation of the slice of material located above the potential surface of sliding and a downward movement of all points located on the surface of the slide. Hence if a landslide comes as a surprise to the eyewitnesses, it would be more accurate to say that the observers failed to detect the phenomena which preceded the slide.

Terzaghi (1950)



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Erforschungsgeschichte und Begriffsentwicklung	5
3 Charakteristische Kennwerte	11
4 Petrographisch-geotechnische Eigenschaften der betroffenen Felsmassen	15
5 Morphologische Ausbildung des gesamten Massenkörpers	17
6 Gleitkörpergeometrie, Bewegungsmechanismus und numerische Modellierung	21
6.1 Einleitung	21
6.2 Theoretische geomechanische Analysen.....	22
6.3 Aspekte der numerischen Modellierung von Hangdeformationen	30
7 Angaben und Kennwerte zur Kinematik	35
7.1 Bewegungsraten über lange Zeiträume	35
7.2 Genauer zeitlicher Bewegungsablauf.....	39
7.3 Ebener und räumlicher Bewegungsvektor	40
7.4 Bewegungsmuster interner Strukturen.....	42
7.5 Einfluss externer Faktoren auf den Bewegungsablauf.....	42
7.6 Zeitpunkt und Reichweite sich ablösender Teilkörper.....	43
8 Auswirkungen auf die alpine Umwelt	45
8.1 Auswirkungen auf Siedlungen	47
8.2 Auswirkungen auf Verkehrswege	52
8.3 Auswirkungen auf Wildbachverbauungen.....	55
8.4 Auswirkungen auf Tunnel und Stollen	73
8.5 Auswirkungen auf Talsperren-Stauräume.....	73
8.6 Schlussfolgerungen	74
9 Detailuntersuchungen zur Geotechnik und Kinematik	77
9.1 La Clapière/Alpes Maritimes (1).....	79
9.1.1 Geographischer und geologischer Überblick.....	79
9.1.2 Die kinematischen Verhältnisse.....	86
9.2 Campo Vallemaggia, Cimalmotto/Tessin (5)	92
9.2.1 Einleitung.....	92
9.2.2 Morphologische und geologisch-geotechnische Verhältnisse.....	98
9.2.3 Kinematik an der Oberfläche der Massenbewegung	104
9.2.4 Bewegungsablauf nach der Tiefe und Bewegungsmechanismus	105
9.2.5 Numerische Modellierung	106

9.3	Sedrun/Graubünden (6).....	109
9.3.1	Morphologische und geologisch-geotechnische Gegebenheiten.....	109
9.3.2	Kinematik.....	119
9.3.3	Steuerung der Hangbewegung durch externe Faktoren.....	132
9.3.4	Quantitative Auflösung der Internstrukturen oberhalb der Trogschulter.....	136
9.3.5	Größe und mögliche Reichweite sich ablösender Teilkörper der Großhangbewegung.....	141
9.3.6	Modellierung.....	146
9.4	Peiden, Pleiv/Lugnez-Graubünden (7, 8).....	153
9.5	Schwarze Nolla/Heinzenberg-Graubünden (10).....	159
9.5.1	Morphologie, Geologie.....	159
9.5.2	Kinematik.....	161
9.6	Schuders/Graubünden (11).....	163
9.6.1	Morphologie, Geologie.....	163
9.6.2	Kinematik.....	164
9.7	Gepatschspeicher/Tirol (17, 18, 19, 20).....	170
9.7.1	Zeitliche Entwicklung der geologischen Kenntnisse im Talsperren-Stauraum.....	170
9.7.2	Morphologisch-geologische Übersicht: Hochmais (17).....	172
9.7.3	Die messtechnische Überwachung der Großhangbewegung Atemkopf-Hochmais.....	175
9.7.4	Kinematik der verschiedenen Gleit- und Kriechkörper A, B und C.....	176
9.7.5	Kinematik und Bewegungsmechanismus des untersten Gleitkörpers D.....	178
9.8	Gradenbach/Kärnten (35).....	189
9.8.1	Geographischer und geologischer Überblick, strukturelle Einheiten.....	189
9.8.2	Kinematik.....	204
9.8.3	Steuerung der Hangbewegung durch externe Faktoren.....	226
9.8.4	Numerische Modellierung.....	236
9.9	Reppwand/Kärnten (40).....	240
9.9.1	Morphologie und geologisch-geotechnische Ausbildung der Gesteine.....	240
9.9.2	Bewegungsraten, Bewegungsablauf, ebener und räumlicher Bewegungsvektor.....	246
9.9.3	Numerische Run-Out Analyse.....	251
9.10	Schlanitzenalm/Kärnten (41).....	257
9.10.1	Morphologische und geologische Verhältnisse.....	257
9.10.2	Kinematik.....	259
10	Maßnahmen und Sanierungskonzepte.....	263
10.1	Verbauungen und Maßnahmen an der Stirn der Großhangbewegungen.....	264
10.2	Tiefgreifende Baumaßnahmen im mobilen Gebirgskörper selbst.....	277
11	Ausblick.....	283
12	Literatur (Auswahl).....	285

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Alpenraum hat sich in den letzten 25 Jahren, bedingt durch den technischen und wirtschaftlichen Fortschritt, ein tiefgreifender sozioökonomischer Wandel vollzogen. Der ange deutete Strukturwandel in der Gesamtwirtschaft und dem sozialen Gefüge ist einerseits auf die Bildung neuer Intensivzonen, andererseits auf die Entleerung bzw. die periodisch übermäßig starke Frequentierung einiger Regionen zurückzuführen. Wie stark der Siedlungsdruck in manchen alpinen Gebieten ist, spiegelt z.B. eindrücklich die Karte der Fläche von „Netto-Tirol“ wider, die die eigentlich besiedlungsfähigen Flächen, abzüglich der durch Lawinen, Wildbäche, Muren, Hochwässer und Vernässungszonen nicht in Frage kommende Gebiete darstellt. Die Gesamtfläche von 12.647 km² wird auf ca. 1.000 km² reduziert (AULITZKY 1972). Da die aufgezeigten Entwicklungen für gewisse Teile der Alpen auch für die Zukunft relevant sein werden, ist man zu der Überzeugung gekommen, dass umfangreiche Ursachen- und Schadensanalysen für eine sachgerechte Raumplanung im alpinen Raum für den Bestand der Landschaft unerlässlich sind. Alle Bergabhänge neigen aufgrund der an ihnen allzeit angreifenden Schwerkraft, Verwitterung und Abtragung dazu, sich zu verflachen. Im Grunde genommen ist jeder Hang mit einem steileren Gefälle als einem Grenzgefälle, welches vorgegeben ist durch Gebirgsfestigkeit und Reibungswiderstand, auch ein potentiell instabiler Hang. Eine der bildhaftesten Sammlungen und Beschreibungen dieser Ausgleichsvorgänge in den Alpen publizierte schon HEIM (1932) in seinem Werk „Bergsturz und Menschenleben“. Darin sind, wie der Titel des Werkes vermuten lässt, aber nicht nur die plötzlich stattfindenden und zerstörerischen „Bergstürze“ beschrieben. Es enthält auch solche großflächigen, tiefgreifenden Hangdeformationen, die durch ein langsames Kriechen, Fließen oder Gleiten hervorgerufen werden und bei denen die Ausgleichsvorgänge über relativ lange Zeiträume andauern: instabile Bergflanken aufgrund tiefgreifender Hangdeformationen.

Sie befinden sich in einem labilen Gleichgewichtszustand, bewegen sich mal schneller, mal langsamer, widerstehen aber (noch) der plötzlichen „Talfahrt“. Sie zeigen nach BARLA & CHIRIOTTI (1995) und HERMANN (1996) verschiedene Entwicklungsstadien (Initial-, Übergangs- und Finalstadium) und stellen vielfach eine Vorstufe der spontanen Rutschungen dar. Die geomorphologischen Veränderungen eines Hanges durch diese Deformationen sind seit mehr als 60 Jahren wohl bekannt und wurden mit den anschaulichen Begriffen BergrerreiÙung (AMPFERER 1939), Sackung (HEIM 1932), Talzuschub (STINI 1941, 1942) und neuerdings mit dem Begriff deep-seated gravitational slope deformations (DSGSD) belegt (CROSTA et al. 2013).

Beispiele dazu gibt es, wie das Studium der Literatur zeigt, auf fast allen Kontinenten der Erde. Am häufigsten werden tiefgreifende Hangdeformationen aus den jungen Hochgebirgen beschrieben: den Alpen, den Apenninen, den West-Karpaten, den Rocky Mountains, der Küstenkette der Vereinigten Staaten, dem kanadischen Küstengebirge, den neuseeländischen Alpen, aus China oder den Kanto-Mountains und Akaishi Mountains auf Honshu, Zentral-Japan. Weniger häufig beschrieben werden diese Deformationen aus dem Himalaya oder den Anden (z.B. TRÂN VÔ NHIEM et al. 1988; RIEMER et al. 1988), obwohl sie dort ebenfalls vorkommen.

Der genaue zeitliche Ablauf und die Mechanismen dieses für den Betrachter meistens unmerklich langsamen Geschehens können jedoch nur mittels langjähriger klimatischer, hydrogeologischer und geodätischer Messreihen geklärt werden. Solche Messreihen sind aber sehr kosten- und personalintensiv und deshalb sind veröffentlichte Resultate bislang nur spärlich vorhanden. Erst in den letzten Jahren wird zunehmend von den z.T. vor 20 bis 30 Jahren begonnenen Untersuchungen berichtet.

Ausgehend von der ingenieurgeologischen Geländeaufnahme mittels thematischer Karten, Lageplänen und geotechnischen Längenschnitten wird die kinematische Entwicklung von sich langfristig vorbereitenden Hanginstabilitäten angezeigt.

Die Beschreibung der geologisch-geomorphologischen Verhältnisse, die Ergründung der Ursachen der bisherigen Entwicklung sowie die richtige Interpretation des rezent zu beobachtenden Bewegungsverhaltens (messtechnische Überwachung) sind entscheidend für Aussagen zum zukünftigen Verhalten eines Felshanges und damit für sein Gefahrenpotential.

Die verschiedenen Aspekte und Auswirkungen auf Umwelt und Infrastruktur werden an ca. 50 tiefgreifenden Hangbewegungen dargelegt (Abb. 1). Die Nummern bedeuten im Einzelnen:

(1) La Clapière/Alpes Maritimes	(24) Sagspitz/Tirol
(2) Bonvillard/Savoien	(25) Speicher Durlaßboden/Tirol
(3) Rosone/Piemont	(26) Trattenbach/Salzburg
(4) La Frasse/Vaude	(27, 28) Dürnbach/Salzburg
(5) Campo Vallemaggia, Cimalmotto/ Tessin	(29) Jenbach/Oberbayern
(6) Sedrun/Graubünden	(30) Teufenbach/Salzburg
(7) Peiden/Graubünden	(31) Hopfgarten/Osttirol
(8) Pleiv/Graubünden	(32) Glunzerberg-Bunzkögele/Osttirol
(9) Heinzenberg/Graubünden	(33) Bretterwand/Osttirol
(10) Schwarze Nolla/Graubünden	(34) Lesacher Riegel/Osttirol
(11) Schuders/Graubünden	(35) Gradenbach/Kärnten
(12) Rellsbach/Vorarlberg	(36) Judenbrücke/Kärnten
(13) Golmerhang/Vorarlberg	(37) Wasserradkopf/Kärnten
(14) Zintlkopf/Tirol	(38) Mödritschgraben/Kärnten
(15) Fliess/Tirol	(39) Mattlinggraben/Kärnten
(16) Kaltenbrunn/Tirol	(40) Reppwand/Kärnten
(17) HochmaisGepatschspeicher/Tirol	(41) Schlanitzenalm/Kärnten
(18) Klasgarten-Gepatschspeicher/Tirol	(42) Hammerboden/Kärnten
(19) Hapmes-Gepatschspeicher/Tirol	(43) Millstätter Alpe/Kärnten
(20) Nasserein-Gepatschspeicher/Tirol	(44) Kaponig/Kärnten
(21) Ganderberg/Südtirol	(45) Sölktaier/Steiermark
(22) Lanersbach/Tirol	(46) Triebenbach/Steiermark
(23) Heinzenberg/Tirol	

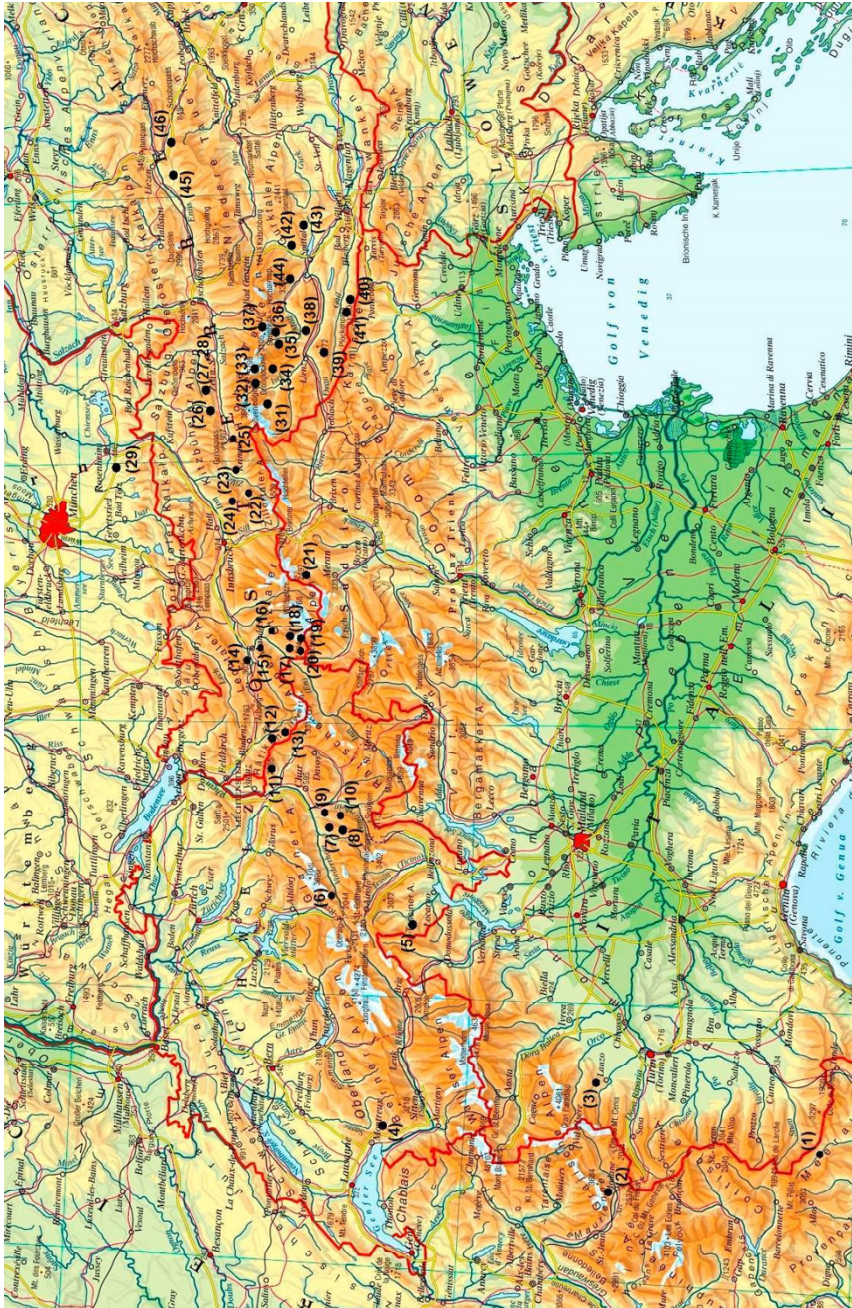


Abb. 1: Lage ausgewählter Großhangbewegungen im Alpenkörper

2 Erforschungsgeschichte und Begriffsentwicklung

Die Phänomene an instabilen Hangflanken und deren Bewegungsprozesse wurden in der Vergangenheit von den bearbeitenden Autoren immer wieder unterschiedlich bezeichnet und auch heute noch werden die Ausdrücke nicht einheitlich verwendet (Tab. 1). Die Gründe für die Entstehung der vielen Begriffe liegen z.B. in den sehr großen Erstreckungen in Fläche und Höhe der von Deformation betroffenen Hänge, dem Entwicklungsgrad und den variierenden Bewegungsraten. Deshalb können mehrere Bewegungsprozesse wirksam und wenige oder viele Phänomene ausgebildet sein.

STINI (1941) hat wohl als erster sehr eindrucksvoll auf die negativen Einflüsse von Talzuschüben besonders bei der Beherrschung von Wildbächen hingewiesen, und auch in Folgezeit traten und treten weiterhin durch die fortschreitende intensive Besiedlung und Nutzung der Alpen vielfältige Schwierigkeiten im Zusammenhang mit Talzuschüben auf.

STINI (1941) verweist mit dem Beitrag „Unsere Täler wachsen zu“ auf schwer erkennbare „Lebensäußerungen der Täler“ und die Gefahr für den bautätigen Ingenieur, diese zu übersehen. STINI (1942) verwendet auch als erster den Begriff „Talzuschub“ für „alte Bergschlipfe und Felsgleitungen größten Stils“. Der Zusammenschub ist eine Folge der Zerreißung der Berge. Der Talzuschub ist somit eine fortgeschrittene Form der Bergzerreißung, bei dem sich „die Felsmassen auf einem Steilhang vom Hintergehänge loslösen und sich fast unmerklich gegen die Talmitte hin vorschieben“ (STINI 1952 b). Die Feststellung, dass es sich beim Talzuschub um eine „fortgeschrittene Form der Bergzerreißung“ handelte, führte wohl dazu, den Begriff als Bezeichnung für die tiefgreifenden Hangdeformationen als Ganzes zu benutzen, sofern nicht nur die Phänomene der Bergzerreißung vorhanden waren.

Der z.B. von HEIM (1932), JÄCKLI (1957) und ZISCHINSKY (1966 a, 1966 b, 1969 a, 1969 b) verwendete und bevorzugte Begriff „Sackung“ – von „sacken“ (sich absetzen; sich (ab)senken; sinken) – wurde verwendet für Hangbewegungen, bei denen die vertikale Bewegungskomponente betont ist und das bewegte Material noch einigermaßen im Schichtverband verbleibt.

TERZAGHI (1950) unterscheidet bei Böden zwischen saisonalem Kriechen („seasonal creep“), das in den oberflächennahen Schichten unter Wirkung jahreszeitlicher Einflüsse (Klima) hervorgerufen wird, und kontinuierlichem Kriechen bzw. Massenkriechen („continuous creep“ bzw. „mass creep“). Letzteres findet unterhalb der durch das Klima beeinflussten Schichten statt. Es hängt ausschließlich von der Schwerkraft ab und ist unabhängig von anderen Einflüssen. Solange sich der Betrag der Gewichtskraft nicht saisonal ändert, ist die Kriechrate annähernd konstant. Das Phänomen „Bergzerreißung und Talzuschub“ im Sinne von AMPFERER und STINI bezeichnet TERZAGHI (1962) als „deep-seated rock slide“. Er benutzt diesen Ausdruck auch zur Abgrenzung von „superficial rock falls“, deren Vorkommen auf den oberflächennahen Verwitterungsbereich beschränkt ist.

In der Klassifikation von HUTCHINSON (1988) werden, u.a. wegen des grundlegenden Kriteriums „Morphologie“ für die gewählte Unterteilung, „creep“ und „sagging“ sogar voneinander getrennt dargestellt. Dies führt zwangsläufig zur Verwirrung, da in der Gruppe „creep“ auch „deep-seated, continuous creep; mass creep“ als ein gesonderter Un-

terpunkt aufgeführt wird. Der Begriff „sagging“, der von Hutschinson etwas umfassender benutzt wird als der von ZISCHINSKY verwendete Begriff „Sackung“, wird für Hangbewegungen vorgeschlagen, die sich aufgrund der zeitlichen und mechanischen Entwicklung zwischen „creep“ und „landslide“ befinden. Folglich tritt anfänglich, entweder einzeln oder kombiniert, ausschließlich Kriechen („purely mass creep“) oder teilweises Gleiten auf diskreten Scherflächen auf, das von einem progressiven Bruch ausgehend, über die nachfolgende Entstehung einer durchgehenden Gleitfläche, zu einer Rutschung führt.

Aus der oben dargestellten Entwicklung der Begriffe für die Kennzeichnung der tiefgreifenden Hangdeformationen bzw. ihrer näheren Erläuterung werden die Schwierigkeiten in der Namensgebung sichtbar. Die Problematik ergibt sich aus der Tatsache, dass das eine Mal nur die geomorphologischen (Groß-)Strukturen mit den Begriffen Bergzerreißung, Sackung und Talzus Schub gemeint sind und das andere Mal die mechanischen Prozesse bzw. das Phänomen an sich. Etwas salopp werden die deutschen Begriffe Talzus Schub, Sackung und Bergzerreißung alternativ verwendet, wie die Auflistung von BISCO et al. (1996) andeutet. Sie sind auch in etwa gleichbedeutend mit den englischen Begriffen „sagging of mountain slopes“, „deep-seated creep“ und „rock mass creep“. Dennoch beschreibt zumindest jeder der deutschen Begriffe ein anderes geomorphologisches Teilphänomen. Der Gesamtprozess umfasst alle Teilphänomene, auch wenn nicht jedes der Phänomene an einer Hangbewegung gleich deutlich entwickelt oder erkennbar ist. Die zuletzt genannten beiden englischen Ausdrücke dagegen beschreiben mehr die Mechanik und den Bewegungsvorgang. So hat sich nun in den englischen Veröffentlichungen zu solchen tiefgreifenden Hangdeformationen seit DRAMIS & SORRISO-VALVO (1994) besonders der Begriff „deep-seated gravitational slope deformations (DSGSD)“ eingebürgert, der sinnvollerweise eine genaue Zuordnung zu „creep“ oder „slide“ vermeidet (z. B. CROSTA et al. 2013, AGLIARDI et al. 2012). Deshalb sollte für eine eindeutige Bezeichnung für diese Hangbewegungstypen auch im Deutschen besser der Begriff „tiefgreifende Hangdeformation“ verwendet werden. Eine zusammenfassende Kennzeichnung tiefgreifender Hangdeformationen hinsichtlich Gleitkörpergeometrie und Mechanik kann der Abb. 14 (Kap. 6.2) entnommen werden. Im Text wird häufig statt des etwas sperrigen Begriffs „tiefgreifende Hangdeformationen“ synonym der Ausdruck „Großhangbewegung“ oder „instabile Talflanke“ gebraucht. Zudem dürfen diese Hangdeformationen nicht aus Hangbewegungsklassifikationen ausgeschlossen oder an den Rand gedrängt werden, indem man ihnen nur eine den eigentlichen Hangbewegungen bzw. Rutschungen vorbereitende Rolle zugesteht (Abb. 2). Nicht betrachtet in dieser Studie werden Prozesse des typischen „lateral spreading“, die sehr häufig mit dem Geomechanik-System „Hart auf Weich“ verbunden sind.

Seit den 60-er Jahren sind zahlreiche Arbeiten vorgestellt worden, die versuchen, Kinematik und Bewegungsmechanismus von tiefgreifenden Hangdeformationen in allgemeine Hangbewegungsklassifikationen einzuordnen. Es wurden überwiegend Schemata vorgestellt, die auf der Art der Bewegung (Kriechen, Fließen, Gleiten und Fallen) und der Art des betroffenen Materials (Boden und Fels) als primäre Kriterien aufbauen. Weitere zusätzliche Unterscheidungsmerkmale sind die Geschwindigkeit, die Morphologie, die Form der Anbruchsnische, die Tiefenlage der Gleitzone sowie die Durchfeuchtung (Tab. 2).

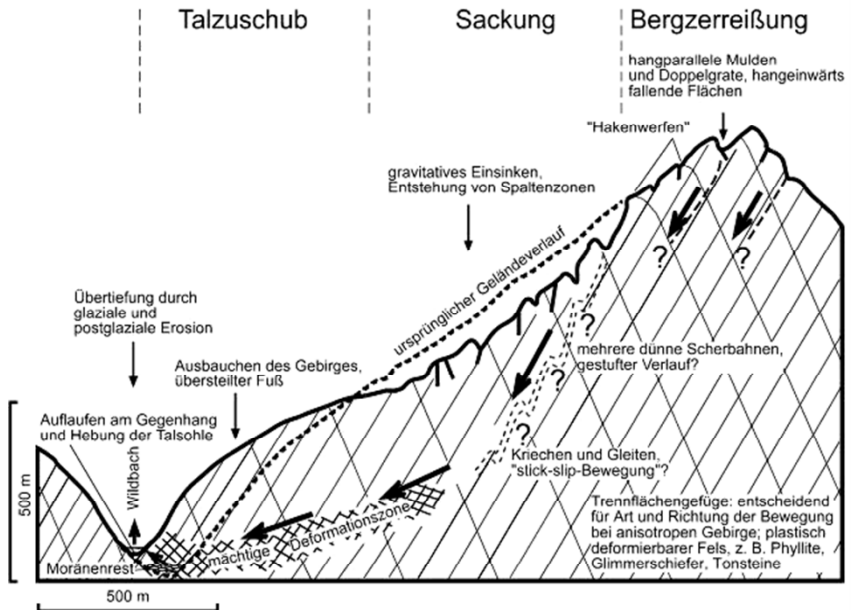


Abb. 2: Schematische Darstellung morphologischer Phänomene und Kennzeichen einer großflächigen, tiefgreifenden Hangdeformation im Finalstadium bei überwiegend einheitlich kompetentem, anisotropem Gebirge. Die morphologischen Veränderungen sind überhöht dargestellt, WEIDNER (2000)

Tab. 1: Historische Entwicklung und Zusammenstellung wichtiger Bearbeiter und Veröffentlichungen einiger tiefgreifender Hangdeformationen. – Die Sortierung erfolgte in etwa chronologisch nach dem Jahr der ersten Veröffentlichung eines Autors zur Thematik, WEIDNER (2000)

Autor(en)	Jahr	Terminologie, Begriffe und Umschreibungen; Anmerkungen
STINY / STINI	1929	Hinweis auf das Phänomen und Deutungsversuch (“das Zuschieben der Talfurche“
	1941	Unsere Täler wachsen zu
	1942; 1952 a,	Talzusub; Talzusub, Massenrücken,
	1952 b	Massenschleichen
HEIM	1932	Sackung; Absenkung
HARRISON & FALCON	1936	gravity collapse structures
AMPFERER	1939	Bergzerreißung
	1940	Beschreibung der Phänomene instabiler Berghänge
TERZAGHI	1950	continuous creep; mass creep

Autor(en)	Jahr	Terminologie, Begriffe und Umschreibungen; Anmerkungen
MÜLLER (MÜLLER-SALZBURG)	1955 1963 a & b 1992	Bergzerreißung, Talzuschub Talzuschub, Massenfließen eines tiefen Bereiches; Begriffstrennung: Talzschübe und Sackungen
GOLDSTEIN & TER-STEPANIAN/ TER-STEPANIAN	1957 1965, 1966, 1974 1977, 1980	depth creep of slopes Tiefkriechen von Böschungen deep-reaching gravitational deformation of mountain slopes
HORNINGER	1958	Talzuschub
JAHN	1964	Beschreibung von Phänomenen an Böschungen, resultierend vom Eigengewicht; Doppelgrate
CLAR & WEISS	1965	Talzuschub
HOLZ	1965	Talzuschub
ZISCHINSKY	1966 a & b, 1969 a & b	Felssackung, Sackung, Talzuschub
HUTCHINSON	1968 1988	deep-seated continuous creep; mass creep deep-seated continuous creep & mass creep getrennt dargestellt von sagging of mountain slopes
RYBÁŘ & NEMČOK	1968	curvature and bursting of mountain ridges
BECK	1968	gravity faulting
ZÁRUBA & MENCEL	1969	long-term deformations of mountain slopes (gravitational slides)
TABOR	1971	large-scale creep (ridge-top depressions due to large-scale creep); entsprechender Begriff zu Sackung nach ZISCHINSKY!
PAŠEK	1972	Talzuschub
NEMČOK, PAŠEK & RYBÁŘ	1972	deep-seated creep
NEMČOK	1972	gravitational slope deformation; deep-seated creep
NABHOLZ	1975	Schiefersackung
SCHEIDEGGER	1975	rock mass creep
RADBRUCH-HALL et al.	1976	gravitational spreading of steep-sided ridges ("Sackung")
RADBRUCH-HALL	1978	gravitational creep of rock masses on slopes
MAHR & NEMČOK	1977	deep-seated creep deformations
MAHR	1977	deep-reaching gravitational deformation of high mountain slopes
MOSER	1978, 1994, 1996	Talzuschub, continuous mass creep in rock sagging of mountain slopes
MOSER & GLUMAC	1982	Massenkriechen im Fels

Autor(en)	Jahr	Terminologie, Begriffe und Umschreibungen; Anmerkungen
VARNES	1978	flows in bedrock
CHIGIRA CHIGIRA & KIHO	1992 1994	gravitational mass rock creep; mass rock creep
DRAMIS & SORRISO-VALVO	1994	deep-seated gravitational slope deformations
BISCI, DRAMIS & SORRISO-VALVO	1996	Rock Flow (Sackung)
AGLIARDI, CROSTA & FRATTINI	2012	slow rock-slope deformation (DSGSD)
CROSTA, FRATTINI & AGLIARDI	2013	deep-seated gravitational slope deformations (DSGSD)
ZANGERL, CHWATAL & KIRSCHNER	2015	deep-seated rock slide

Tab. 2: Klassifikation der Grundtypen von Massenbewegungen und Anbruchsformen für den alpinen Bereich, MOSER (1986)

BEWEGUNGSVORGANG	I FESTGESTEINE	II FESTGESTEINE DER FELSGÜTEKLASSE E	III LOCKERGESTEINE
	Anbruchsform	Anbruchsform	Anbruchsform
1 FALLEN, STÜRZEN	1.1 Steinschlag, Blockschlag 1.2 Felssturz <u>Nischenanbruch</u> 1.3 Bergsturz <u>Nischenanbruch</u>		1.4 selten, wenn Lockergesteinsabsturz <u>Plattenanbruch</u>
2 GLEITEN 2.1 z. T. rotationsförmig	2.1.1 Felsgleitung ohne vorgezeichnete Gleitfläche <u>Nischenanbruch</u> 2.1.2 Felsgleitung mit vorgezeichneter Gleitfläche <u>Nischenanbruch</u>	2.1.2 Rotationsrutschung in Felsgüteklasse E <u>Murenschelanbruch</u>	2.1.3 Rotationsrutschung <u>Murenschelanbruch</u> a) tiefgreifend b) flach
2.2 translationsförmig	2.2.1 Felsgleitung mit vorgezeichneter Gleitfläche <u>Nischenanbruch</u>	_____	2.2.2 Translationsrutschung <u>Blattanbruch</u> a) tiefgreifend b) flach z. B. mächtige Haagschuttdecke z. B. Grasnarbenrutschung auf Fels
3 FLIEßEN 3.1 schnell (Meter/Jahr)	_____	_____	3.1.1 Schuttstromfließen
3.2 sehr schnell (5 bis 20 Meter/Sekunde)	_____	_____	3.2.1 Mure <u>Rinnenanbruch</u>
4 KRIECHEN	4.1 Talzusub (Sackung)	4.2 Felskriechen in Felsgüteklasse E	4.3 Lockergesteinskriechen

3 Charakteristische Kennwerte

Tab. 3: Exposition und Neigung, regionalgeologische Stellung und Petrographie sowie vorhandene Trennflächenscharen an tiefgreifenden Hangdeformationen, WEIDNER (2000)

Nr.	Kurzbezeichnung	Exposition	Neigung Grad	Regionalgeologische Stellung und Petrographie	Trennflächenscharen Einfallrichtung/Fallwinkel bzw. Streichrichtung	Anmerkung
1	<i>La Clapière</i>	SW	max 50 mit 30...34	Externes Kristallinmassiv von Mercantour; Migmatitische Gneise, Amphibolite und Restite	sf 45/60...80 k1 NNE-SSW k2 NE-SW k3 NW-SE	
2	<i>Bonvillard</i>	S	25	Zone Houillere Briançonnais; stark verfallene Sandsteine, Schiefer, Konglomerate und Kohleflöze	B N-S k E-W	k ist ac-Klüftung
3	<i>Rosone-Bertodasco-Sektor</i>	S...SE	24...34	Gran Paradiso Formation; Gneise	sf 155/35 k1 N-S k2 E-W	
4	<i>La Frasse</i>	SE	15	Trias...ultrahelvetischer Flysch; Rauwacken, Kalke, Mergel, Tone... Tonschiefer	ss NE-SW	
5	<i>Campo</i>	SE	26	Penninikum; Schiefer und Gneise	sf 130...160/20...40 k NE-SW k NW-SE	
6	<i>Sedrun</i>	SSW...SSE	30	Metamorpher Rahmen des Aar-Massivs; Gneise und kristalline Schiefer	sf 150...170/80	
7,8	<i>Lugnez</i>	SE	15...17 max 30	Penninikum; Bündnerschiefer; sandig-tonige-Kalkschiefer	sf 145/15	
9	<i>Heinzenberg</i>	S...E	15 im S...25 im N	Penninikum; Bündnerschiefer; Kalkschiefer, Phyllite	ss sf sf 145/15...35 k1 NNW-SSE k2 E-W	
11	<i>Schuders</i>	S...SE	mit 31 oben 24 unten 33	Penninikum; Präätigauschiefer; Kalke, Kalkschiefer, Mergel, Mergelschiefer, Tonschiefer mit organischer Substanz	sf1 160/70 ...200/75 sf2 135/40 sf3 45/25 k1 NNE-SSW k2 E-W	k1 ist ac-Klüftung
17	<i>Gepatsch-Hochmaß</i>	E	35	Öztaler Altkristallin; Augengneise, Schiefergneise, Granite	k.A.	
18	<i>Gepatsch-Klasgarten</i>	W	35	Öztaler Altkristallin; Augengneise, Schiefergneise, Granite	k.A.	
25	<i>Königsleiten Durlaßboden</i>	SSW...SSE	25	Penninikum; Glocknerdecke; Quarzite?	k. A.	
34	<i>Lesacher Riegel</i>	SW	29	Altkristallin; Gneise, Glimmerschiefer, Amphibolite	sf(1) 170...190/65...85 sf(2) 150...160/35...55 k1 ENE-WSW k2 NNW-SSE	sf(1) Rahmenschieferung sf(2) im bewegten Gebiet
35	<i>Gradenbach</i>	SE...SSE	26 max 60...80	Unterostalpin; Matreier Zone; Phyllite, Glimmerschiefer & Gneise	sf 210...240/30...60 k1 0...40/70...90 k2 120...140/70...90 S 45; 140	
37	<i>Wasserradkopf</i>	ESE	26	Penninikum des Tauernfensters; Glocknerdecke, Rotewanddecke; Glimmerschiefer, Serpentinite	k1 N-S k2 NW-SE k3 ENE-WSW k4 NNE-SSW	Fuß mit mehr als 40° übersteilt
38	<i>Mödritschbach</i>	SW...SSE	25	Altkristallin; Phyllitische Quarz-Glimmerschiefer	sf 280...330/30...40 k1 NE-SW k2 NW-SE k3 ENE-WSW	Schieferungsrichtung stark streuend
40	<i>Reppwand-Oselitzenbach</i>	NNW...NNE	17	Südalpin; Tonschiefer...Sandsteine, Konglomerate, bituminöse Kalksteine	ss 150/24 ss 195/2 ss 265/35	ss-Werte aus Teilbereichen an der Talzuschubsstim

ss Schichtung; sf Schieferung; k Klüftung; S Störung; B Faltenachse; k. A. keine Angabe in den Literaturstellen; max maximaler Wert; min minimaler Wert; mit mittlerer Wert

Die geometrischen Abmessungen

Die Höhendifferenz zwischen Hangfuß und oberster Abrisskante variiert zwischen 450 und 1400 m. Neben sich bescheiden ausnehmenden Objekten mit einer Fläche von nur einem halben Quadratkilometer gibt es nahezu gigantische Beispiele mit bis zu 45 Quadratkilometer (z.B Lugnez in Graubünden/ Schweiz). Bei einer Tiefe der bewegten Bereiche unter Geländeneiveau von minimal 50 m bis maximal 400 m resultieren daraus Volumina von mehreren Millionen bis zu einigen Milliarden Kubikmetern (Abb. 3).

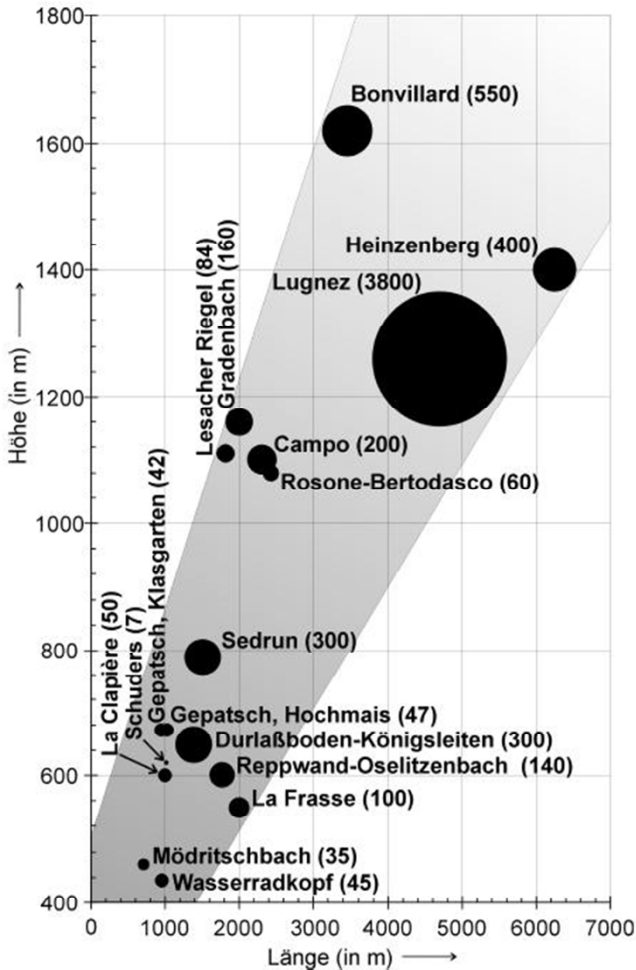


Abb. 3: Länge, Höhe und geschätztes Volumen ($\times 10^6 \text{ m}^3$) der verglichenen tiefgreifenden Hangdeformationen. – Das Volumen wird durch die Fläche der Kreise repräsentiert und ist den Objektamen in Klammern nachgestellt, WEIDNER & MOSER (2000)

Exposition

Von allen in Tab. 3 aufgelisteten Beispielen sind es nur drei, Hochmais-Gepatsch/Tirol (17), Klargarten-Gepatsch/Tirol (18) und Reppwand/Kärnten (40), die nicht nach SE bis SW exponiert sind. Diese Häufigkeitsverteilung spricht für eine Prädisposition südexponierter Hänge für die Entstehung tiefgreifender Hangdeformationen. Dabei wirken an den zwischen 750 und 2600 m entwickelten Deformationen die tiefgründige Verwitterung und Auflockerung vorbereitend. Die raschere Verfügbarkeit von Schmelzwasser im Frühsommer sowie die sich anschließenden hydrogeologischen Prozesse wirken aktivierend.

4 Petrographisch-geotechnische Eigenschaften der betroffenen Felsmassen

Die detaillierte Untersuchung von 25 tiefgreifenden Hangdeformationen im Ostalpenkörper zeigt, dass Gesteine mit deutlicher Festigkeitsanisotropie besonder betroffen sind. Das Auftreten ist vornehmlich an metamorphe Gesteinsserien geknüpft (77 %), wobei Phyllite mit 36 %, Gneise mit 23 % und Glimmerschiefer mit 18 % beteiligt sind. Sedimentäre Abfolgen (Sandsteine, Ton- und Schluffsteine, Mergel und Kalke) kommen auf 18 %, die Beteiligung von magmatischen Gesteinen ist gering.

Bei einer regionalen Studie im Vinschgau und in oberen Veltlin kommen AGLIARDI et al. (2009) auf ähnliche Ergebnisse (Abb. 4).

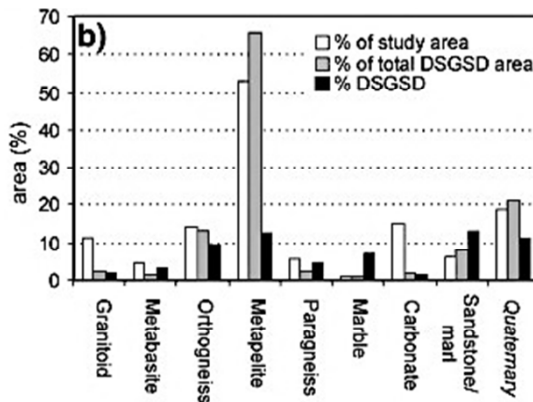


Abb. 4: Analysis of DSGSDs mapped at the regional scale. b) DSGSD areal distribution versus lithology. The areal frequency of each lithology, the fraction of total DSGSD area involving each lithology, and the percentage of outcrop area involved in DSGSD (i.e. DSGSD density) are shown, AGLIARDI et al. (2009)

Neben der petrographischen Ausbildung spielt vielleicht eine noch größere Rolle das Trennflächengefüge. Die Trennflächenabstände gegeben durch Schichtung, Schieferung und Klüftung sind teilweise sehr klein, so dass sich Grund- oder Klufkörper im cm-Bereich ergeben. Dies wiederum bedingt die Möglichkeit eines verstärkten Angriffes der Verwitterung und der Bereitstellung von feinkörnigen Lockermaterialien (Abb. 5).

Insgesamt müssen solche Serien als hochteillbeweglich angesehen werden und erlauben tiefgreifende Kriechbewegungen seit dem Spätglazial.

HUDER (1992) ermittelte an diesen Serien je nach Freiheitsgrad Restreibungswinkel von 23° bis 28°. Hingewiesen wird auch darauf, dass durch große Verschiebungen auch in der Natur die Verzahnung respektive die Kohäsion des Materials überwunden wird. Aus dieser geleisteten Arbeit resultiert eine Auflockerung des Materials, d.h. es tritt eine Reduktion der Wichte beim Schervorgang auf, bis das Material bei konstantem Volumen nur noch Reibung aufweist.

Form der Klufkkörper					
Kluffabstand d (cm)	d_1 d_2 d_3	d_1 d_2 d_3	d_1 d_2 d_3	d_1 d_2 d_3	d_1 d_2 d_3
$\frac{d_1}{d_3}; \frac{d_2}{d_3}$	1 : 5	1 : 2 bis 1 : 5	1 : 1	2 : 1 bis 5 : 1	5 : 1
$d_{max} > 100$	großsäulig	großblockig	großwürfelig	quaderig-bankig	großplattig
$100 > d_{max} > 10$	kleinsäulig	kleinblockig	kleinwürfelig	kleintäfelig	schiefrig
$d_{max} < 10$	stengelig-faserig	kubisch-ruschelig	kubisch-ruschelig	splitterig	blättrig-kleinschuppig

Abb. 5: Die Klufkkörperform und -größe ist neben den Substanzeigenschaften ein Indikator für die Teilbeweglichkeit des Gebirgsverbandes. Bei instabilen Talflanken kann häufig eine blättrig-kleinschuppige Gebirgsfazies beobachtet werden, mod. n. MÜLLER (1963)

Die geringe Durchschnittsneigung und die niedrigen Bewegungsraten von durchschnittlich 5 bis 10 cm/a der aktiven instabilen Talflanken deuten darauf hin, dass in vielen Bereichen nur mehr die Restreibungswinkel des Gebirges vorliegen. Als mechanisch relevant anzusehen sind folgende Reibungswinkel (Abb. 6, 8):

- Restreibungswinkel auf serizitführenden, z.T. graphithaltigen Schieferungsflächen von Phylliten und Glimmerschiefern sowie auf Schichtflächen von Mergeln
- Restreibungswinkel von schluffigen, dünnen Zwischenlagen innerhalb kompetenter Gesteinsschichten („Sandwichanordnung“, HÖWING & KUTTER 1985)
- Restreibungswinkel von schwach bindigem bis bindigem Verwitterungsmaterial
- Restreibungswinkel von phyllitischem Material, das durch die Hangtektonik stark mylonitisiert worden ist („schwach bindiges Lockermaterial“)
- Grobblockschutthalden mit viel Feinmaterial

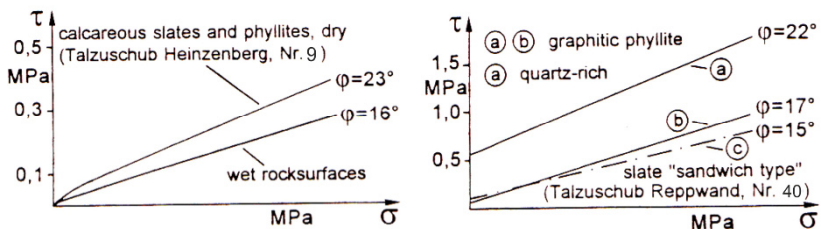


Abb. 6: Direktscherversuche Kalkglimmerschiefer, Tonschiefer; Heizenberg/ Graubünden (9), ZIEGLER (1982), Tonschiefer („Sandwich-Anordnung“), quarzreiche Tonschiefer; Reppwand/Kärnten (40)

5 Morphologische Ausbildung des gesamten Massenkörpers

Eine schematische und überhöhte Darstellung der Erscheinungsformen an häufig auftretenden morphologischen Charakteristika tiefgreifender Hangdeformation ist aus Abb. 2 ersichtlich. Morphologische Betrachtungen, die u. a. die Durchschnittnsneigung aber auch die spezielle morphologische Gliederung berücksichtigen, sind geeignet, weitere geotechnische Details aufzuzeigen. Schon in den 60-er und 70-er Jahren hat man versucht, aus der morphologischen Gliederung einer instabilen Talflanke Rückschlüsse auf den Bewegungsmechanismus einer tiefgreifenden Hangdeformation abzuleiten (u. a. ZISCHINSKY (1966 a), MAHR (1977)).

Solche Betrachtungen wurden verstärkt wieder in den letzten Jahren aufgegriffen (z. B. HERMANN (2000), AGLIARDI et al. (2001)).

Die schon in Abb. 2 angedeutete Großgliederung in drei Abschnitte einer solchen Massenbewegung lässt sich für die untersuchten Beispiele näher präzisieren.

Stirn der Großhangbewegung:

- Wenig ausgeprägt: z.B. Lanersbach/Tirol (22), Sagspitz/Tirol (24), Glunzerberg/ Osttirol (32), Hammerboden/Kärnten (42)
- Hohe übersteilte Uferanbrüche (z.B. Campo Vallemaggia/Tessin (5), Sedrun/ Graubünden (6), Dürnbach/Salzburg (27, 28), Jenbach/Oberbayern (29), Gradenbach/ Kärnten (35), Mattlinggraben/Kärnten (39), Reppwand/Kärnten (40), Schlanitzenalm/ Kärnten (41))

Massenkörper bis zum Ablösebereich:

- Wenig gegliedert: z.B. Heinzenberg/Graubünden (9), Teufenbach/Salzburg (30), Hammerboden/Kärnten (42)
- Stark gegliedert mit Ausstrichen von Bewegungsbahnen (z.B. La Clapière/Alpes Maritimes (1), Sedrun (Graubünden (6), Pleiv/Graubünden (8), Zintlkopf/Tirol (14), Hochmais-Gepatschspeicher/Tirol (17), Gradenbach/Kärnten (35), Reppwand/ Kärnten (40), Schlanitzenalm/Kärnten (41))

Ablösebereich:

- Abrissbereich kaum entwickelt: z.B. Peiden/Graubünden (7), Pleiv/Graubünden (8), Heinzenberg/Graubünden (9), Nasserein-Gepatschspeicher/Tirol (20), Reppwand/ Kärnten (40)
- Abrissbereich gut entwickelt mit z.T. hohen Abrissflächen: (z.B. La Clapière/Alpes Maritimes (1), Sedrun/Graubünden (6), Schuders/Graubünden (11), Hochmais-Gepatschspeicher/Tirol (17), Gradenbach/Kärnten (35), Millstätter Alpe/Kärnten (43))

Die Durchschnittnsneigung des instabilen Massenkörpers

Bei der regionalen Untersuchung von 904 tiefgreifenden Hangbewegungen in Form von DSGSD (deep-seated gravitational slope deformation) im Vinschgau und im oberen Veltlin kommen AGLIARDI et al. (2012) zu dem Schluss, dass die häufigste Durchschnittnsneigung bei 25° liegt (Abb. 7).

Die beobachteten Durchschnittsneigungen der untersuchten Hangbewegungen lassen sich auch festigkeitsmechanisch einordnen. Die am stärksten vertretende Klasse 26° - 30° (ca. 40 %) reflektiert Reibungswinkel von Phylliten und Glimmerschiefern. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Klasse 16° - 20° (ca. 30 %), der typische Restreibungswinkel von Phylliten repräsentiert (Abb. 8).

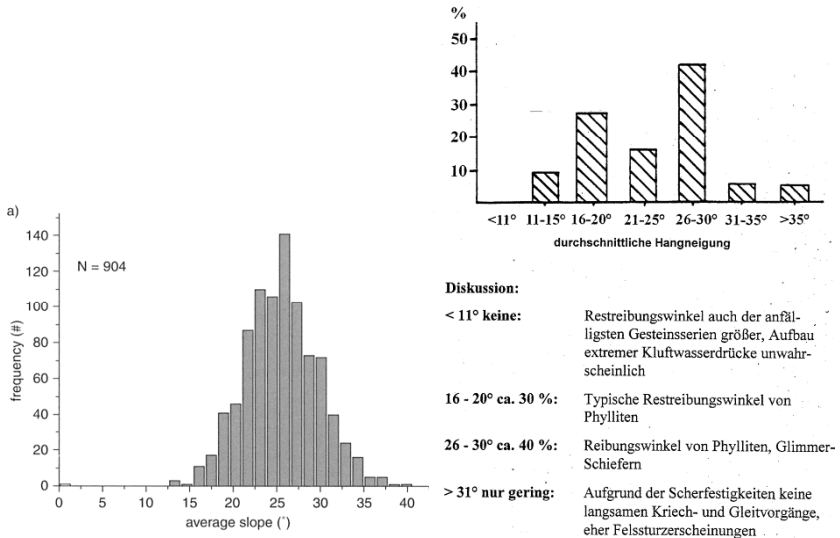


Abb. 7, 8: (7 links) Frequency distributions of DSGSD in the orogen-scale inventory versus: (a) average slope inclination inside affected area (topography: 90-m SRTM DEM, AGLIARDI et al. (2012)); (8 rechts) Durchschnittsneigung instabiler Talflanken und ihre Beziehung zu petrographischen und geomechanischen Bedingungen, MOSER (1993)

Die morpho-strukturellen Gegebenheiten des Massenkörpers

Seit den Arbeiten von ZISCHINSKY in den 60iger Jahren und den tschechoslowakischen Untersuchungen in den 70iger Jahren (z. B. NEMČOK (1972), MAHR & NEMČOK (1977)) hat man immer wieder versucht, aus dem morphologischen und strukturellen Bild Schlüsse für die Kinematik und den Bewegungsmechanismus zu ziehen. Dieses Konzept wurde Ende der 90iger Jahren z. B. von HERMANN et al. (2000) und besonders von italienischen Bearbeitern wieder in verfeinerter Form aufgegriffen. Typische Instabilitätsanzeigen tiefgreifender Hangdeformationen sind z. B. aus der Abb. 9 zu entnehmen.

- *Scarp*. Morphological expression of a downhill dipping collapse or main failure surface with a downslope movement (continuous lines in Figs. 9 and 10);
- *Counterscarp*. Surface evidence of an upward dipping surface, standing alone or antithetically associated to a major scarp with an upslope movement (dashed lines in Figs. 9 and 10)
- *Trench*. Linear and deeply cut form, expression of extensional opening of a vertical or downward dipping surface, AGLIARDI et al. (2001)

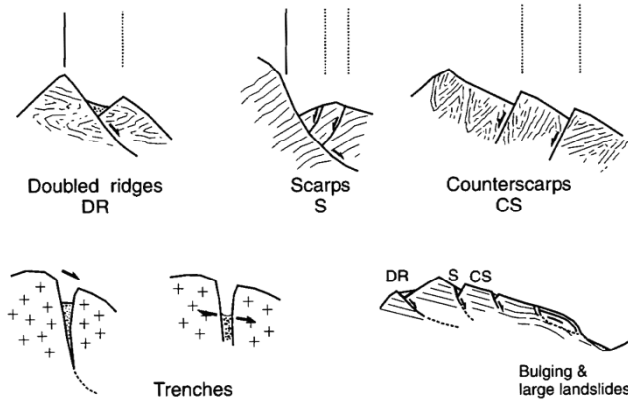


Abb. 9: Morpho-structural features typical of a DSGSD. Two main symbols have been adopted to represent the existing structural elements and to attribute a kinematic significance to them, AGLIARDI et al. (2001)

Die Erhebung und Darstellung solcher kinematischen Elemente fanden auch Eingang in geologisch-geotechnischen Kartierungen großflächiger und tiefgreifender Hangbewegungen. Ein Beispiel zeigt die Abb. 10. Die Großhangbewegung befindet sich östlich von

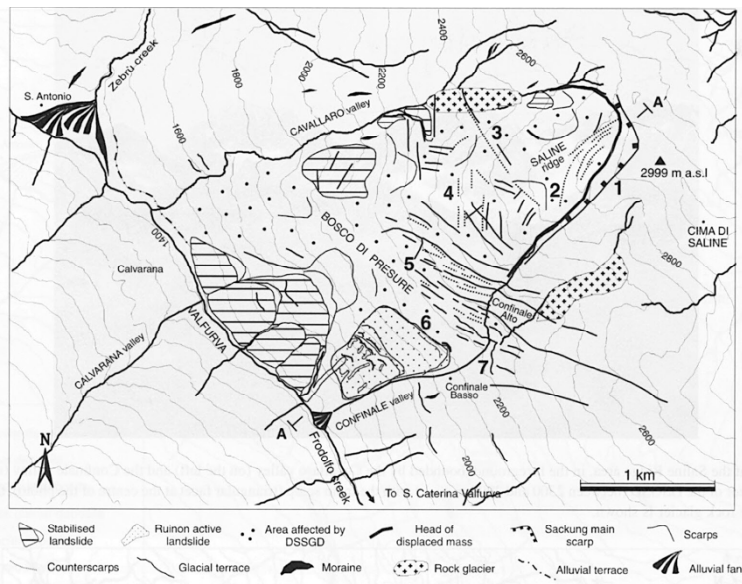


Abb. 10: Geomorphological and morpho-structural map of the area, 1 mainscarp, 2 antithetical listric collaps surfaces, 3 NW-SE striking lineament (subvertical or steeply upslope dipping planes), 4 rectilinear counterscarps up to 300 m long, 5 systems of scarps and counterscarps, 6 convex trenches and tension cracks, AGLIARDI et al. (2001)

Bormio/Italien in phyllitischen Serien des oberostalpinen Kristallins. Die genaue strukturelle Aufnahme erlaubt ein detailliertes Bild der Kinematik und des Bewegungsmechanismus.

Das weit verbreitete Phänomen tiefgreifender Hnagdeformationen besonders in alpinen kristallinen Gebieten der Alpen konnte durch regionale Studien auch zu weiteren orographischen und geologischen Gegebenheiten in Beziehung gesetzt werden. Zu nennen sind hier der Bezug z. B. zu Deckengrenzen, zu Hebungsraten der Alpen und zu Erdbebenzonen (AGLIARDI et al. 2012).

6 Gleitkörpergeometrie, Bewegungsmechanismus und numerische Modellierung

6.1 Einleitung

Obwohl seit den 60iger Jahren eine Vielzahl von Untersuchungen vorgelegt wurde, ist besonders bei sehr tiefgreifenden und großflächigen Hangdeformationen dieses Typs der Kenntnisstand gering. So haben in vielen Fällen die folgenden Zitate heute noch ihre Berechtigung:

- TERZAGHI (1962): „Practically nothing is known concerning the mechanics of deep-seated rock slides. ... It only is known, that the rock located above the surface of sliding has been damaged.“
- HUTCHINSON (1988): „Subsurface information is usually lacking“.
- MÜLLER-SALZBURG (1992): „Der Pegelstand unserer Kenntnisse und auch der Forschungen über die Mechanik von Talzuschüben liegt weit hinter den Bedürfnissen der Geopraxis zurück.“

Auch DRAMIS & SORRISO-VALVO (1994) kommen bei der geomechanischen Betrachtung von Großhangbewegungen zu einer negativen Beurteilung des Kenntnisstandes, wenn sie schreiben: „... the lack of underground data hampers the progress of knowledge.“

Zur Klärung des Bewegungsmechanismus und der Gleitkörpergeometrie tiefgreifender Hangdeformationen („kontinuierliches Massenkriechen in Fels“ bzw. „Tiefenkriechen“) sind die Antworten auf folgende Fragen von besonderem Interesse:

- Findet kontinuierliche Deformation statt oder nicht?
- Liegt eine Gleitzone oder liegen mehrere Gleitzonen vor?
- Ist eine vorhandene Gleitzone durchgehend entwickelt oder nicht?
- Findet die Bewegung auf translations- oder rotationsförmigen Gleitbahnen statt?
- In welcher Tiefenlage befinden sich die Gleitzonen?
- Gibt es Unterschiede der Gleitkörpergeometrie in verschiedenen Bereichen der instabilen Hangflanke?

Um die Fragen nach dem Mechanismus zu beantworten, wurden insbesondere folgende Ansätze verfolgt:

- Verwendung rheologischer Modelle z.B. von TER-STEPANIAN (1966), ZISCHINSKY (1969 a) & (1969 b), BRÜCKL & SCHEIDEGGER (1972) und ZIEGLER (1982)
- Vergleich der gemessenen Zeit-Deformations-Beziehungen mit denen des primären, sekundären und tertiären Kriechens von Gesteinen im Labor, z.B. von ANKE et al. (1975) und MOSER & MAZUR (1983).
- Vereinzelt konnte durch Inklinometerbohrungen den oben gestellten Fragen hinsichtlich des Bewegungsmechanismus etwas näher nachgegangen werden (z. B. BONZANI-GO et al. (2007) und ZANGERL et al. (2010)).

6.2 Theoretische geomechanische Analysen

Die Gleitkörpergeometrie kann durch die Art und die Tiefenlage von Bewegungszone, sowie deren Ausstrichlinien an der Geländeoberfläche charakterisiert werden. Hinsichtlich der Lage und der Beschaffenheit der Bewegungszone als Kriech- oder Gleitzone bzw. Gleitfläche liegt bei einem Großteil der überwiegenden flachgründigen Rutschungen ein gut fundiertes Wissen vor. Im Gegensatz zu den Rutschungen, die oft eine sichtbare Gleitfläche entblößen oder deren Gleitfläche durch Bohrungen aufgeschlossen wurden, kann bei einer tiefgreifenden Hangdeformation meistens nur im Kopfbereich, entlang von Abrisskanten, das Ausstreichen einer oder mehrerer, meist steil einfallender Bewegungsbahnen beobachtet werden. Alles andere entzieht sich der direkten Beobachtung. Deshalb waren einerseits bisher fast alle Untersuchungen zur Gleitkörpergeometrie ausschließlich theoretischer Natur (z. B. TER-STEPANIAN 1966, 1974, HUTCHINSON 1988). Andererseits wurden aufgrund sehr allgemeiner geologischer Untersuchungen prinzipielle geometrische Modelle abgeleitet (ZISCHINSKY 1966 a & b, 1969 a & b, MAHR & BALIAK 1973, MAHR 1977).

Ausgehend von Arbeiten in der Schweiz (z. B. HEIM 1932, JÄCKLI 1957) hat ZISCHINSKY in den 60iger Jahren aufgrund morphologisch-geologischer Untersuchungen die Mechanik solcher tiefgreifender Hangbewegung beleuchtet. Er verwendet den Begriff „Sackung“ von „sacken“ (sich absetzen; sich (ab)senken, sinken) für Hangbewegungen bei denen die vertikale Bewegungskomponente betont ist und das bewegte Material noch einigermaßen im Schichtverband verbleibt.

Mit „Sackung“ wurden z. B. die von ZISCHINSKY beschriebenen Hangbewegungen bei Matrei i. Osttirol (Glunzerberg), bei Radenthein (Millstätter Alpe, Kärnten), Tschaguns Golmerhang (Montafon) und die Talflanken des Gepatsch-Speichers (Tirol) bezeichnet (Abb. 11). Die Bergzerreißung und der Talzusubstanz stellen nach ZISCHINSKY (1969 b) die morphologischen Auswirkungen großzügiger Hangbewegungen dar. Der Ausdruck „Sackung“ vereint dagegen die Namen für die geomorphologischen Phänomene an einer solchen Hangflanke in einem Begriff, der die Mechanik beschreibt.

HERMANN et al. (2000) haben den von ZISCHINSKY (1966, 1969) verwendeten Begriff der Sackung wiederum aufgegriffen und ihn in Beziehung zu strukturellen Gegebenheiten des Trennflächengefüges gestellt (Abb. 12).

Dazu ist anzumerken, dass es prinzipielle Schwierigkeiten bei der Verwendung des Begriffes „Sackung“ gibt, denn von der geomorphologischen Seite aus betrachtet, ist der Begriff „Sackung“ für die Zone unterhalb der Hauptabbrisskante einer tiefgreifenden Hangdeformation treffend. Es ist empfehlenswert, Sackung rein morphologisch rein für die Beschreibung setzungsbetonter Hangbewegungen zu benutzen und nicht im Sinne ZISCHINSKYs für die Beschreibung der Mechanik. Die unklare Zuordnung zeigt sich auch daran, dass ZISCHINSKY (1969) Sackung im Englischen mit „subsidence“ übersetzte.

Das Fließen von Fels und Eis

Typische Profile durch Sackungen 1: 40 000 u. durch das grönländische Inlandeis

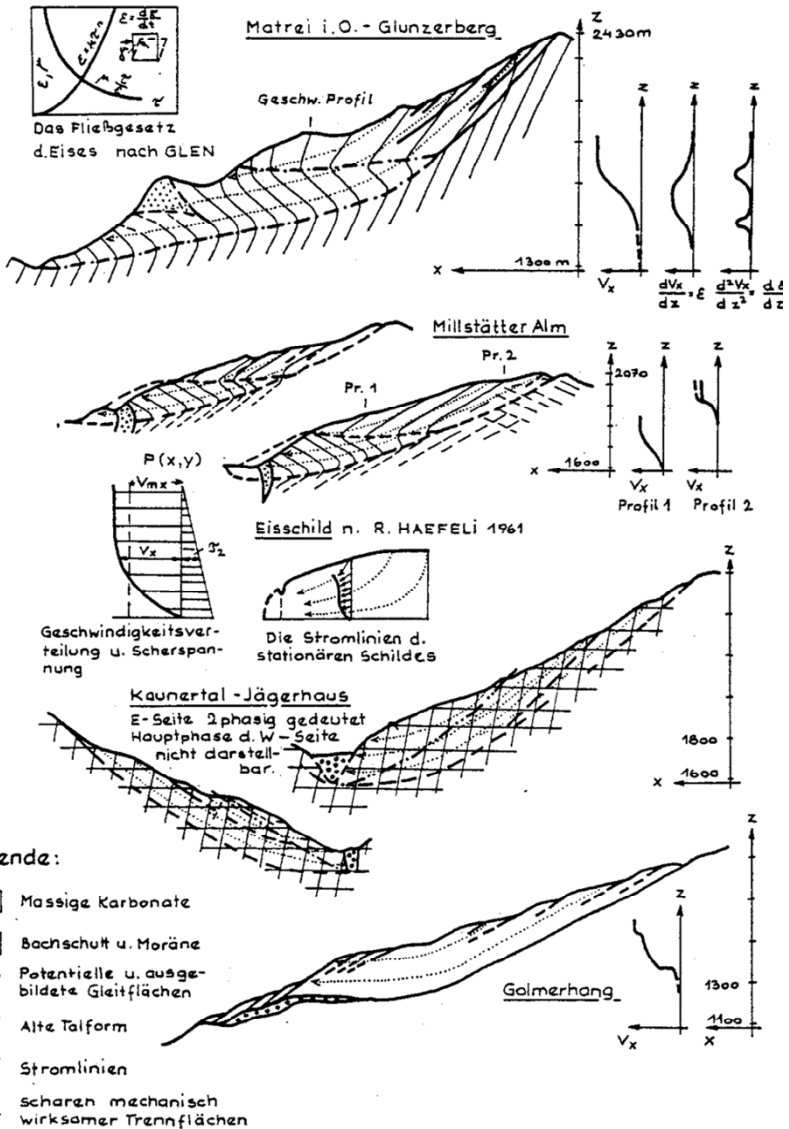


Abb. 11: Das Fließen von Fels und Eis, ZISCHINSKY (1969)

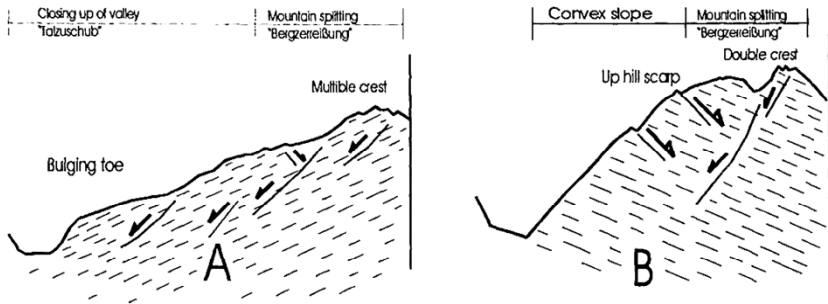


Abb. 12: Schematische Darstellung der morphologischen Endglieder von Sackungen in Abhängigkeit von den Lagerungsverhältnissen. (a): Bei hangauswärts geneigtem Flächengefüge ist eine deutliche Hangverflachung gegeben. Der Oberhang ist konkav, der Hangfuß stets vorgeschoben (Talzuschub). Bergzerreißung durch Mehrfachgrate sowie eine „unruhige“ Oberflächenmorphologie im Mittelhang sind charakteristisch. (b): Bei hangeinwärts fallendem Flächengefüge zeigen Sackungen markante Doppelgratstrukturen und hangparallele Gräben („Uphills“) im oberen Hangabschnitt. Ein konvexes Hangprofil ist typisch, HERMANN et al. (2000)

Fußend auf den Untersuchungen von ZISCHINSKY (1966, 1969) in den kristallinen Schiefen der Zentralalpen wurden in den 70iger Jahren auch rheologische Modelle vorgelegt. Aufgrund der Feldbeobachtung wählten BRÜCKL & SCHEIDEGGER (1972) die Rheologie des räumlich-kontinuierlichen Massenkriechen im Fels. Diese Konzeption hatte zur Bedingung, dass u.a. Kriechgeschwindigkeit und Spannungszustand zu Beginn der Kriechbewegung, der jetzige Spannungszustand und die gesamte Verschiebung seit Beginn der Kriechbewegung bekannt sind (Abb. 13).

Wie in der Folgezeit weitere detaillierte geologisch-geotechnische Untersuchungen und quantitative kinematische Betrachtungen gezeigt haben, werden die starken Vereinfachungen und restriktiven Bedingungen der Natur dieser Hangdeformationen nur unzureichend gerecht. Dies liegt besonders an der Heterogenität und Anisotropie der geotechnischen Eigenschaften der Felsmassen im Falle einer solchen tiefgreifenden und großflächigen Hangbewegung.

In letzter Zeit wurden besonders in italienischen Arbeiten (z. B. AGLIARDI et al. 2012) die in der Literatur unterbreiteten Vorschläge zur Charakterisierung der Mechanik und der Gleitkörpergeometrie tiefgreifender Hangbewegungen wieder diskutiert.

Aus der Abb. 14 kann hinsichtlich der Vorschläge folgendes herausgelesen werden:

- Rotationsförmige Gleitzone (Abb. 14 a-g)
- Zusammengesetzte Gleitzone (Abb. 14 h-l)
- Ebene Gleitzone (Abb. 14 m-r)
- Gleitzone bestimmt durch das Trennflächengefüge (z. B. persistente Trennflächen steil hangauswärtsfallend, Abb. 14 u-w)

Besonders bei den Fällen 14 a-g ist natürlich zu bedenken, dass eine von den Abrissbereichen bis in die Fußzone durchgehende, weitgehend rotationsförmige Gleitfläche aufgrund der verschiedenen strukturellen und lithologischen Gegebenheiten einer manchmal 1000 Höhenmeter aufweisenden Talanke sicher eine zu starke Vereinfachung darstellt.

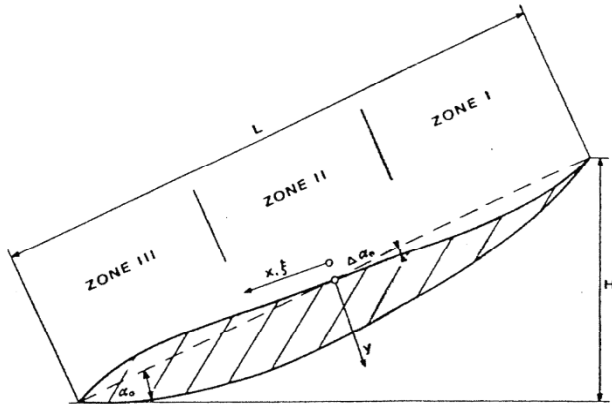


Abb. 13: Typischer Schnitt durch einen räumlich kontinuierlich kriechenden Hang: α_0 Hangneigung vor Beginn der Kriechbewegung; $\Delta\alpha_0$ Abnahme der Hangneigung infolge der Kriechbewegung; H Höhe des kriechenden Hanges; L Länge des kriechenden Hanges; x, y Kartesische Koordinaten; ξ Verschiebung des kriechenden Gebirges. Das kriechende Gebirge ist schraffiert dargestellt, BRÜCKL & SCHEIDEGGER (1972)

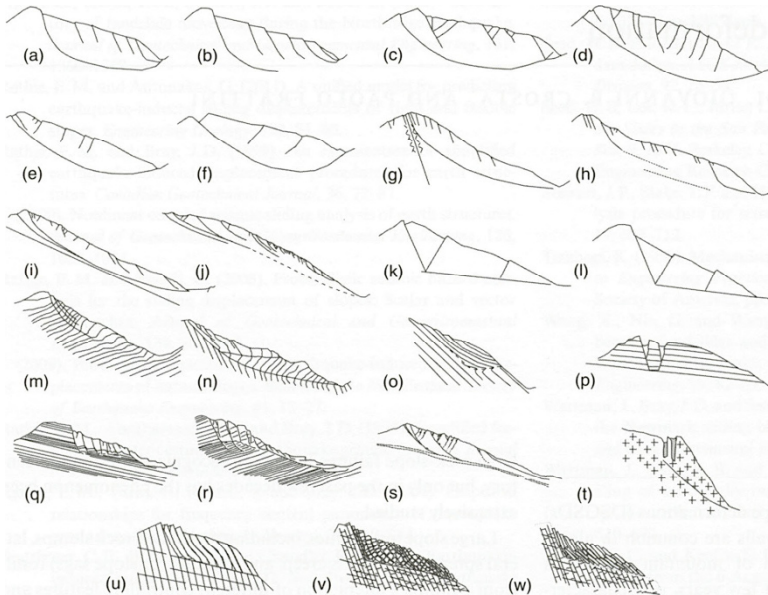


Abb. 14: Mechanismus of large-scale rock-slope failure proposed in the literature, ordered on the basis of failure geometry and structural controls. (a), (b), (c), (f) BOIS et al. (2008); (d) MAHR (1977); (e), (g), (h), (i) AMBROSI & CROSTA (2006), (j) AGLIARDI et al. (2001); (k), (l) HUTCHINSON (1988); (m), (n) ZISCHINSKY (1966); (o), (p), (t) CHIGIRA (1992); (q), (r) NEMČOK (1972); (s) AGLIARDI et al. (2009b); (u), (v), (w) KIEFFER (1998); AGLIARDI et al. (2012)