

Geowiss. Mitt. 1
1973, 151 - 170

NATÜRLICHE MASSENBEWEGUNGEN AUS DER SICHT DES
GEODÄTEN

von

F. Brunner

(Vortrag gehalten am 7. Februar 1973
im Rahmen des Kolloquiums der Assistenten
der Studienrichtung Vermessungswesen)

Dipl.Ing.Dr. Friedrich Brunner, Hochschulassistent am Institut für
Geophysik, Technische Hochschule in Wien 1040, Gußhausstraße
27 - 29.

ZUSAMMENFASSUNG

Den Geodäten betreffen die natürlichen Massenbewegungen hauptsächlich durch die drei folgenden Gründe:

1. Die Verfassung von Lage- und Höhenplänen von Bewegungsgebieten erfordert vom Geodäten ein gutes Verständnis für die natürlichen Massenbewegungen.
2. Durch die natürlichen Massenbewegungen verlieren vielfach die Fixpunkte der Geodäten ihren Charakter des Fixseins und verändern dadurch im Laufe der Zeit ständig ihre Koordinaten.
3. Der Geodät wird herangezogen, wenn es darum geht, Hangbewegungen zu messen.

Ohne das rechte Verständnis für die Naturereignisse, inklusive der auslösenden Ursachen, wird der Geodät allerdings nicht den Platz einnehmen können, der seiner verantwortungsvollen Aufgabe zukommt. Im ersten Teil des Vortrages wird daher der Versuch unternommen, eine phänomenologische Übersicht über die wichtigsten natürlichen Massenbewegungen zu geben. Besondere Beachtung bei dieser Zusammenstellung wurde der Geschwindigkeit der Bewegungsabläufe zugemessen, um die Möglichkeit einer geodätischen Vermessung der Bewegungswerte von vornherein im Auge zu behalten.

Anknüpfend an diese phänomenologische Zusammenstellung werden die wichtigsten geodätischen Gesichtspunkte herausgearbeitet und besprochen. Als Beispiel einer Bewegungsmessung wird die Vermessung des Talzuschubes "Lesacher Riegel" in Osttirol vorgestellt. Die Nullmessung der Bewegungsmeßpunkte wurde im Sommer 1972 vom Institut für Geophysik ausgeführt. Die, bei dieser Vermessung aufgetretenen, stark negativen Refraktionskoeffizienten der hangparallelen, gegenseitigen Zenitdistanzbeobachtungen werden als interessantes geodätisches Teilresultat dieser Arbeiten hervorgehoben.

EINLEITUNG

Was versteht man eigentlich unter der Bezeichnung "Natürliche Massenbewegungen"? Ganz allgemein würde man darunter alle, durch Kräfte verschiedenster Art bewegten Massen wie Wasser, Erde, Fels und Eis verstehen. Doch wurden einige dieser Bewegungsgruppen durch die rasche Entwicklung der Geomorphologie als der übergeordneten Wissenschaft, der diese Themen zugeordnet sind, so ausgebaut und spezialisiert, daß man die Gletscher- oder Eismassenbewegungen und auch die reinen Bewegungen des Wassers abtrennen mußte. Auch die Massenbewegungen auf der Erdoberfläche, die durch tektonische Kräfte in horizontaler und vertikaler Richtung erfolgen - ganz zu schweigen von den Bewegungen, die ganze Kontinente erfassen - werden im allgemeinen nicht zu den natürlichen Massenbewegungen gezählt. Es verbleibt daher, die natürlichen Massenbewegungen in Fels und Lockergesteinen zu besprechen. Dazu zählen in einer ersten Nennung die Felsstürze, die Erdrutsche, das Bodenkriechen und das Bodenfließen. Um die Definition weiterzuführen, werden unter den natürlichen Massenbewegungen die Verlagerungen von Fels- und Lockergesteinsmassen in einer von der Vertikalen abweichenden Richtung verstanden, d.h. es soll neben einer vertikalen auch unbedingt noch eine horizontale Bewegungskomponente vorhanden sein. Die Bewegungen mit ausschließlich vertikaler Bewegungskomponente nennt man Setzungen, und diese bilden ein ganz spezielles, separates Sonderkapitel. Ein Gebiet, das zwar von den Geodäten besonders intensiv durch Senkungs- und Setzungsmessungen betreut wird, hier aber im folgenden nicht näher behandelt werden soll.

Auf jede Erdmasse an der Erdoberfläche wirkt ständig die Schwerkraft mit vorgegebener Richtung und Größe als allgegenwärtige und allgemeinste Triebfeder aller Massenbewegungen. Hinzu kommt als wichtigstes Agens das Wasser, das mit verschiedenen Druckhöhen als Poren- oder Bergwasser angreift, als Lösungsmittel und immer auch als Transportmittel arbeitet und bei fast allen Massenbewegungen als auslösendes Moment erkannt werden muß.

Das Ergebnis jeder Erdmassenbewegung ist eine brechende oder bildsame Verformung des Geländes. Daher stehen die Massenbewegungen immer in enger Beziehung zur geomorphologischen Entwicklung einer

Gegend. Dort wo Wasserläufe oder Gletscher die Hänge übersteilt haben, versuchen diese, durch Massenverlagerungen ihre Form wieder der Standfestigkeit der Gesteine anzupassen. Diese Anpassungsvorgänge erstrecken sich über die gesamte Größenskala von kleinen, kaum beachteten Erdbewegungen bis zu vielen Millionen Kubikmetern bewegten Materials als Katastrophen mit vielen Toten. Natürlich waren es gerade diese gewaltigen, über die ganze Welt verbreiteten Schäden, die zur Erfassung der Ursachen dieser Massenbewegungen angeregt haben.

ERSCHEINUNGSFORMEN DER NATÜRLICHEN MASSENBEWEGUNGEN

Wendet man sich, ohne einer strengen Einteilung zu folgen, nun den einzelnen Erscheinungsformen der Massenbewegungen zu, so läßt eine sorgfältige Inspektion eines Hanges immer Anzeichen von oberflächennahem Kriechen des Bodens erkennen. Im Zusammenhang mit Hangbewegungen versteht man unter Kriechen, dem einfachen Sprachgebrauch folgend, eine langsame Bewegung. Oberflächliches Kriechen umfaßt die ungefähr 3 m dicke oberflächennächste Bodenschicht und hat in jahreszeitlichen Temperatur- und Feuchteschwankungen seine Ursachen. Das Zusammenwirken der hangparallelen Komponente der Schwerkraft und der Wechsel von Expansion und Kontraktion bewirkt immer eine hangabwärts gerichtete Bewegung der Erdmassen. Oberflächliches Kriechen ist auch für Nichtfachleute an talwärts geneigten Monumenten, Bäumen, Pfählen und Telegrafmasten zu erkennen. Diese Rotation entsteht dadurch, daß sich tiefere Schichten weniger schnell als oberflächennahe Schichten talwärts bewegen. Im Fels bei steil einfallenden Schichtköpfen kann dieser Mechanismus das Umbiegen der Schichtköpfe (Hakenwerfen) zur Folge haben. Dies erfolgt vor allem dann, wenn die Überlagerungsdecke des Bodens nicht größer als die Eindringtiefe der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen ist.

Auch auf Schutthalden unterhalb von Bergwänden können Bewegungen beobachtet werden, die ganz allgemein als Talus-Kriechen bezeichnet werden. Eine Kombination der Verdichtungsbewegung des Materials mit einer hangabwärts geneigten gravitativen Bewegung gilt zur Zeit als mechanische Bewegungserklärung. Allerdings ist diese Erklärung theoretischer Natur und kaum durch tatsächliche Bewegungsmessungen auf

Schutthalden begründet.

Bewegungen mit Kriechgeschwindigkeit bleiben aber nicht nur auf die oberflächennahe Zone beschränkt. Man kennt auch die Erscheinungsform des tiefen Massenkriechens. Das tiefe Massenkriechen kann nicht durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen erklärt werden, sondern ist nur aus der Rheologie des Materials zu verstehen, wobei der Motor dieser Bewegung natürlich die Schwerkraft ist. Als Ursachen, die zu solchen Bewegungen führen, sind die postglazialen Umstände zu nennen, die die Stabilität der Talflanken besonders geschwächt hatten. Die Gletscher hatten das Profil der Täler übersteilt ausgehobelt und die oberflächennahen, aufgelockerten und entspannten Schichten entfernt, gleichzeitig aber auch die steilen Flanken gestützt. Durch den Rückgang der Gletscher in der postglazialen Zeit blieben die übersteilten Hänge ungestützt stehen und mußten sich daher den neuen Bedingungen durch Neuordnung der Massen, eben den besprochenen Massenbewegungen, die oft noch bis heute andauern, angleichen.

In einer Arbeit des Institutes für Geophysik (BRÜCKL u. SCHEIDEGGER, 1972) wurde das morphologische Bild und der Bewegungsprozess eines Talzuschubes mit vier verschiedenen rheologischen Modellen verglichen. Es zeigte sich im Verlauf der Untersuchung, daß nur das rheologische Modell einer viskösen Flüssigkeit, deren Viskosität mit der Zeit abnimmt, mit den Naturbefunden in Einklang steht.

Für das tiefe Massenkriechen existieren mehrere Bezeichnungen, deren Relation zur Bewegung selbst die Abb. 1 erläutern soll. Die schraffiert dargestellte Fläche ist jene Zone, die von der tiefgreifenden Bewegung erfaßt wird. In Zone A herrschen Zugspannungen und es entstehen jene Anrisse, die AMPFERER (1939) "Bergzerreißen" genannt hat. In Zone C, am Fuße des Berges herrscht Kompression und es wölben sich die Massen mit konvexer Form in das Tal vor, von STINI (1941) "Talzuschub" genannt. In Zone B sind die Längsspannungen gering. Dieser Teil des Talzuschubes zeigt eine deutliche Verflachung. Die Bewegungserscheinung als Ganzes betrachtet, wurde von ZISCHINSKY (1967) mit "Sackung" bezeichnet.

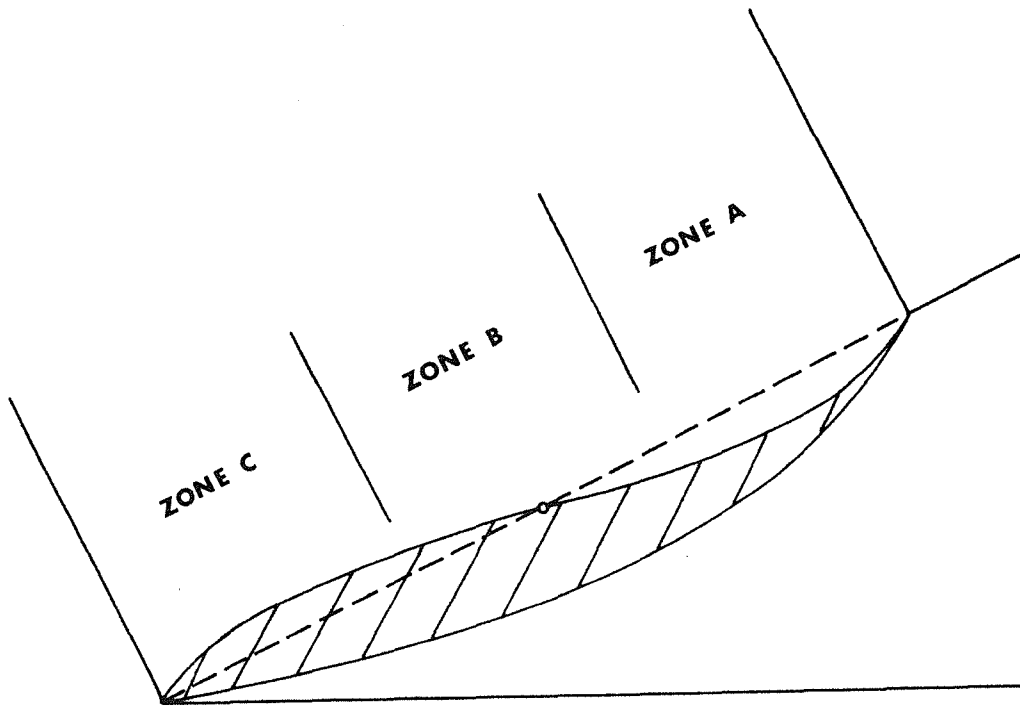


Abb.1: Typisches Hangprofil für tiefes Massenkriechen, die Bewegungszonen zeigend. Das kriechende Gebirge ist schraffiert dargestellt.

Viele der zur Zeit stabilen Hänge waren in der postglazialen Zeit in Bewegung und sind heute fast gänzlich zur Ruhe gekommen. Die geodätischen Vermessungen lassen aber noch manchmal Bewegungen von durchschnittlich 2 - 10 cm pro Jahr in horizontaler Richtung erkennen.

Oft sind stationäre Talzuschübe von der Natur äußerst gut getarnt und als solche nicht leicht erkennbar. Bei einem großen Bauvorhaben, vielleicht beim Bau eines Kraftwerkes, wird durch Unterschneiden des Hanges oder Veränderung des Bergwasserzustandes im Hang dieser latente Talzuschub wieder aktiv und kann in der Folge davon verheerende Katastrophen auslösen. Das ist auch der Grund, warum fast alle Staubeckenhänge unter geodätischer Bewegungskontrolle stehen.

Fast immer gehen einer Rutschung Kriechbewegungen voraus. Abb.2 zeigt in einem Zeit-Verschiebungsdiagramm die Kriechphase, das Einsetzen der die Rutschung fördernden Umstände und danach die Rutschung selbst, die sich in kurzer Zeit vollzieht. Man sieht in Abb.2, wie die Geschwindigkeit der Bewegung dabei exponentiell, in kaum vorhersagbarer Weise, schneller wird. Das ist auch der Grund, warum so oft rechtzeitige Schutzmaßnahmen verhindert werden.

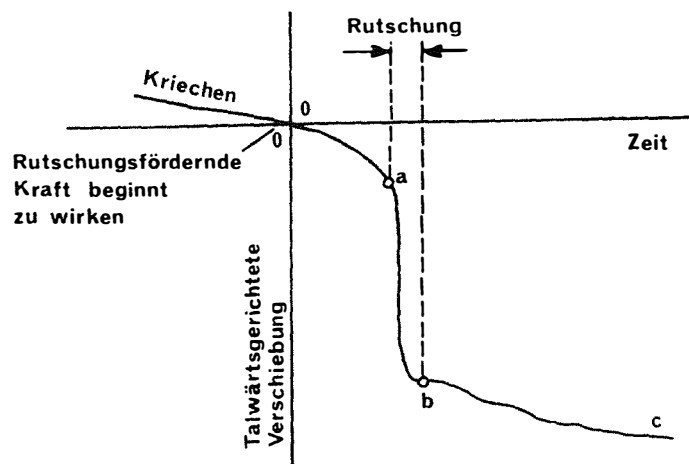


Abb.2: Zeit-Verschiebungsdiagramm: vor, während und nach einer Rutschung, nach TERZAGHI (1950).

Ein Beispiel dafür ist die bekannte Katastrophe von Vajont in Italien vom 9. Oktober 1963. Ein Felsrutsch mit einem Massenumfang von 240 Millionen Kubikmetern rutschte in das mit Wasser gefüllte Staubecken. Ohne daß der Damm brach, löste dann die darauffolgende Flutwelle des überlaufenden Wassers eine Flutkatastrophe aus, die das Dorf Longarone einschließlich seiner Einwohner zerstörte. Es kamen dabei ungefähr 3000 Menschen ums Leben.

KIERSCH (1964) gibt einen guten Überblick über den Ablauf der Ereignisse in Vajont. Im Frühjahr und Sommer 1963 konnten Kriechbewegungen des Staubeckens von rund 1 cm pro Woche beobachtet werden. Im September darauf steigerte sich die Bewegungsrate auf 1 cm pro Tag, doch dachte man unglücklicherweise damals, daß sich nur die Bewegung einiger Punkte beschleunigt hätte. Ende September setzten heftige und andauernde Regenfälle ein. Zu diesem Zeitpunkt beobachtete man auch, daß grasende Tiere die später abgeglittenen Hänge verließen. Später wuchs die Geschwindigkeit der Bewegung auf 20 - 40 cm pro Tag. Knapp vor dem Felsrutsch wurden noch 80 cm Bewegung pro Tag beobachtet. Der totale Zusammenbruch der Felsmassen entlang von vorgezeichneten Bankungsklüften spielte sich in rund 30 Minuten ab. Die Ursachen für diese Felsrutschung kann man mit den ungünstigen geologischen Verhältnissen der Hänge, den künstlichen Eingriffen durch den Stauraumbau und der progressiven Schwächung der Felsmassen mit der Zeit, beschleunigt durch die ungünstigen Grundwasserverhältnisse, umreißen.

Am Beispiel von Vajont kann man sehen, wie Kriechbewegungen durch progressive Bruchvorgänge in eine Rutschung übergehen können. Eine Rutschung ist das schnelle Talwärtsgleiten von Felsmassen, von verwittertem Material oder einer Mischung aus beiden. Der Unterschied zwischen Kriechen und einer Rutschung besteht im wesentlichen darin: In einer Rutschung ist ein definierter Bereich in kurzer Zeit in Bewegung, wogegen beim Kriechen langsame Bewegungen, ohne scharfe Grenzen zum unbewegten Bereich hinterlassend, stattfinden. Das Bruchverhalten, zumeist die Überschreitung der Scherfestigkeit von homogenem Material, kann mit Hilfe der COULOMBSchen Gleichung (die Scherfestigkeit ist eine Funktion von Kohäsion und Reibungswinkel des Materials) beschrieben werden, siehe z.B. TERZAGHI u. JELINEK (1954). Die COULOMBSche Gleichung bildet in fast allen Stabilitäts-Untersuchungen zur Stabilität von Hängen die rechnerische Ausgangsbasis. Im einfachsten Fall der Stabilitätsuntersuchungen rechnet man für verschiedene ebene oder gekrümmte Gleitflächen, meist werden aber im Querprofil des Hanges Gleitkreise angenommen, die kritischen Hanghöhen für bestimmte Materialwerte. Auch ist es bei diesen Berechnungen möglich, den Einfluß des Porenwasserdruckes zu berücksichtigen. Zusätzliche oder geänderte äußere und innere Umstände verringern dann zu einem späteren Zeitpunkt die Scherfestigkeit des Materials, und es kommt in der Folge davon zum Bruch. Die Verminderung der Scherfestigkeit kann in der Erhöhung des Porenwasserdruckes, dem Auswaschen von Bindemitteln und dem Flüssigwerden von wassergesättigten Tonen zu suchen sein. Oft führt aber auch eine Erhöhung der Scherspannungen in der Gleitfläche, erwähnt sei dafür die Erosion am Hangfuß, Erschütterungen durch Erdbeben und zu große Lasten am Hang, zum Hangbruch.

In natürlichen Felshängen sind potentielle Gleitflächen meist schon durch die geologische Situierung vorgezeichnet. Wenn zu den klimatischen Einflüssen, die an der Erdoberfläche wirken, noch Kräfte in der Tiefe kommen, so können diese Felsgleitungen mit tief liegenden Gleitflächen hervorrufen. Für das Zustandekommen von Felsrutschungen wird dem regionalen Spannungsfeld der Erdkruste eine zentrale Stellung beigemessen. Ein weiterer Hauptgrund für die vielen postglazialen Felsrutschungen ist das Vorhandensein eines oberflächenparallelen Kluftsystems, das relativ unabhängig von Struktur

und geologischen Eigenschaften des Gebirges ist und viele mögliche Gleitflächen für Felsrutschungen darstellt. Die Erscheinungsform der oberflächenparallelen Klüfte wird vielfach Exfoliation genannt.

In einer Arbeit des Institutes für Geophysik (BRUNNER u. SCHEIDEGGER, 1973) wurden die Naturerscheinungen der Exfoliation und die dazu vorhandenen quantitativen Aussagen mit den bisherigen Erklärungsversuchen kritisch verglichen. Es wurde darin gezeigt, daß die vorhandenen Theorien zur Entstehung der Exfoliation eher unwahrscheinliche Modelle sind. Sobald man aber in der Exfoliation ein Analogon zu den druckparallelen Brüchen des einachsialen Druckversuches sieht, gewinnt dieses neue Modell stark an Bedeutung, besonders deshalb, da dieses Modell in keinem Widerspruch mehr zu den quantitativen Ergebnissen steht. Es erklärt durch die geringe Zugfestigkeit der Gesteine in überzeugender Weise sowohl die Parallelität der Exfoliation mit der Oberfläche als auch die Zunahme der Plattendicke mit Zunahme der Bergtiefe und vor allem das Verschwinden der Exfoliation in einer bestimmten Bergtiefe.

Als weiteren Grund für das Zustandekommen von Felsgleitungen muß man unbedingt immer die Restspannungen im Gebirge in Betracht ziehen. Die Vorbereitungs- und Auslösearbeit von Felsrutschungen leistet fast immer das Kluft- und Porenwasser, vor allem durch die Variation der Druckhöhen dieses Bergwassers.

Wichtig ist manchmal die Wechselwirkung von Felsgleitung und Felssturz. Oft ist die Gleitfläche nicht vollständig bis zur Krone eines Hanges ausgebildet, so daß nach einer erfolgten Felsgleitung noch ungeheuer große Felsmassen nahe der Bergkrone überhängend zurückbleiben und später dann als Felssturz in die Tiefe fallen. Sobald nämlich der Zusammenhang der Massen während der Bewegung aufgehoben wird und diese wenigstens teilweise durch die Luft erfolgt, spricht man von einem Fels- oder Bergsturz. Die Geschwindigkeit der Bewegung kann 40 bis 150 m pro Minute erreichen und wird nach unten und nach den Rändern hin kleiner. Im Sturz zerbersten die Felsmassen in Trümmer, wobei einzelne Blöcke oder auch größere Massen weit aus der Sturzbahn herausgeschleudert werden. Im Ablagerungsgebiet, das oft noch am jenseitigen Gehänge emporsteigt, bilden die Massen ein wirres Trümmerwerk, das vielfach zur Abdämmung von Tälern zu

Seen führt. In ehemals vergletscherten Gebieten traten nach dem Rückgang der Vergletscherung, die übersteilte Gehänge geschaffen hatte, Bergstürze in großer Zahl auf. Das bekannteste Beispiel ist der Flimser-Sturz am Vorderrhein in der Schweiz, durch dessen über 12 Kubikkilometer mächtige Massen der Rhein 90 m hoch gestaut worden war und später eine 15 km lange Schlucht in diese Bergsturzmasse eingeschnitten hat.

Man fragt sich natürlich, welche Gründe maßgebend sind, daß sich ein Fels- oder Bergsturz ereignet. Die vorbereitenden Ursachen werden vor allem in der physikalischen, insbesondere der spannungsinduzierten Verwitterung und der chemischen Verwitterung zu suchen sein. Das Gestein zeigt sehr deutlich die Spuren von der Wirkung des Spannungsfeldes, unter anderem durch die Ausbildung von konjugierten Bruchflächen und besonders im spröden Material durch die Ausbildung der Exfoliationserscheinungen. Die physikalische Verwitterung arbeitet meist durch den rythmischen Temperaturwechsel im Laufe des Tages und der Jahreszeiten in der Form von Gesteinsabplatzungen. Chemische Verwitterung ist besonders dann von Interesse, wenn Schichten verschiedenen Gesteins übereinander liegen, so daß die chemische Verwitterung je nach der Beschaffenheit der Schicht anders voranschreitet. Durch das chemische Verwittern einer tiefer liegenden Schicht verlieren oft Felsschichten oder Felsblöcke ihren Halt und gehen dann als Felsstürze zu Tal. Die abspaltende Wirkung der Vegetation, hier besonders die von Baumwurzeln, ist meist nur für die Stürze einzelner Felsblöcke von Bedeutung.

In allen über der Vegetationsgrenze gelegenen Hochgebirgsgegenden - also bei starker Abspülung, steilen Gehängen und großem Schuttreichtum - entwickeln sich aus dem mit Wasser durchtränkten Schuttmassen die sogenannten Muren. Muren sind zähflüssige, ruckweise sich abwärts wälzende Massen aus einem Gemisch von Wasser, Erde, Schutt, Felsblöcken und Holz; also in der Mitte liegend zwischen Wildbach und Erdrutsch. Diese Form einer Massenbewegung spielt sich in wenigen Stunden, obwohl manchmal ganz gewaltige Massenvolumen bewegt werden, katastrophenartig ab. Gerade in unseren Gebirgsgegenden gehören die Muren zu den gefürchtetesten Katastrophen, von denen manche Ortschaften immer wieder betroffen werden.

Viele Arten der Massenbewegungen lassen sich nur schlecht in den bestehenden Einteilungen unterbringen und werden daher als Sonderkapitel der Massenbewegungen behandelt. Einige Erscheinungsformen davon fehlen in den Gebirgsgegenden Österreichs, manche andere können, obwohl morphologisch sehr interessant, hier in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht ausführlich besprochen werden, sollen aber der Vollständigkeit halber zumindest genannt werden. Dazu gehören vor allem die Erd- und Schlammströme, die Massenbewegungen des dauergefrorenen Bodens, die Blockgletscher, die Blockströme, die Bewegungen der schnellen Tone und auch die unterseeischen Rutschungen.

GEODÄTISCHE GESICHTSPUNKTE

In welcher Weise betreffen die aufgezählten Naturereignisse nun aber die Geodäten? Dazu seien drei Hauptaspekte in einer ersten Zählung genannt:

1. Die Verfassung von Lage- und Höhenplänen von Bewegungsgebieten erfordert vom Geodäten Verständnis für die natürlichen Massenbewegungen, da er erst dadurch seine Detailpunkte richtig wählen kann.
2. Durch die natürlichen Massenbewegungen verlieren vielfach die Fixpunkte der Geodäten ihren Charakter des Fixseins und verändern im Laufe der Zeit ständig ihre Koordinaten.
3. Der Geodät wird herangezogen, wenn es darum geht, Hangbewegungen zu messen. Eine höchst verantwortungsvolle Aufgabe, da, wie man bei der Felsrutschung in Vajont gesehen hat, zumeist die Sicherheit von Menschenleben und Sachgütern von diesen Arbeiten abhängen.

Dem ersten Punkt dieser Reihung wird durch die Vorlesung "Landformenkunde für Geodäten" im Studium für Vermessungsingenieure Rechnung getragen.

Es ist eine bekannte Tatsache, daß ein großer Teil der Triangulierungspunkte seine Lage im Laufe der Zeit ändert. Unverändert bleiben in der Regel nur Punkte auf Berggipfeln, Gratlinien und Felsbändern. Viele Triangulierungspunkte befinden sich jedoch in den Talhängen, und Talhänge kriechen ausnahmslos mehr oder weniger rasch

talabwärts. Man betrachtet Talwärtswanderungen mit Werten bis zu 5 mm jährlich als normal und daher kaum bemerkenswert. Auch jährliche Verschiebungen von 1 bis 2 cm (KOBOLD, 1959) gelten noch nicht als außergewöhnlich, denn nur größere Bewegungswerte werden besonders beachtet. Selbstverständlich ist es den Beamten des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen nicht möglich, alle diese geringen jährlichen Bewegungen ständig zu vermessen und zu registrieren. Es wären aber weitere geodätische Untersuchungen zur Stabilität von Hangpunkten wünschenswert und auch erfolgversprechend, da für diese Zwecke im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen wertvolles Datenmaterial vorhanden ist.

Teilt man die besprochenen Massenbewegungen nach Geschwindigkeitsbereichen ein, so sieht man in der Tab.1, daß sich nur Kriechbewegungen zur Geschwindigkeitsbestimmung durch geodätische Methoden eignen. Alle anderen Massenbewegungen vollziehen sich so rasch, daß der Geodät

Bezeichnung	Größenordnung der auftretenden Geschwindigkeiten
Bergstürze (Felsstürze)	Bewegungstirne: bis zu 100 m/sec
Hangrutsche und Erdlawinen	etwa 10 m/sec, aber u.U. auch darüber
Murbrüche	mehrere m/sec
Geschiebeführung der Gewässer	einzelne Geschiebestücke: bis zu einigen m/sec; wandernde Sand- und Geschiebebänke bis zu einigen 100 m/Jahr
Gekrieche	1 bis 10 cm/Jahr bis etwa 3 cm/Tag

Tab.1: Einteilung der natürlichen Massenbewegungen nach Geschwindigkeitsbereichen, nach LANSER (1967).

immer zu spät an den Schauplatz des Geschehens kommen würde. Nur Kriechbewegungen, oberflächennahes Kriechen und tiefes Massenkriechen, sind für geodätische Bewegungsmessungen geeignet.

Unter den Bewegungsmessungen nehmen die Messungen zum oberflächennahen Bodenkriechen breiten Raum in der Literatur ein. Eine ausführliche Literaturzusammenstellung zu diesem Thema findet man bei CARSON u. KIRKBY (1972). Die theoretisch errechneten und vielfach auch praktisch verifizierten Bewegungsgrößen für Bodenkriechen liegen ungefähr bei 2 mm pro Jahr in der horizontalen Projektion der Bewegung. Die Methoden reichen von physikalisch-elektrischen bis zu rein geodätischen Lösungen. Gerade zu den geodätischen Lösungen ist aber folgendes zu bemerken: Die geodätische Methode des Alignements sieht den Einbau von zwei Beobachtungsstandpunkten (zumeist Pfeilern) vor und zwischen diesen eine Reihe von Beobachtungsmarken. Nun verändert sicher aber der Einbau und auch das Gewicht der Pfeiler den Spannungszustand im Hang derart, daß kaum mehr Bodenkriechen allein gemessen werden kann. Es ist daher unbedingt darauf zu achten, mit der Fundierung der geodätischen Fixpunkte den anstehenden Fels zu erreichen oder die Fixpunkte in unbewegtes Gestein zu verlegen. Das Verlegen der Lage- und Höhenfixpunkte in den anstehenden Fels unterhalb der natürlichen Bodendecke bewirkt zusätzlich auch das Unabhängigwerden der Messungen von den Frost- und Taubewegungen, die ungefähr in vertikaler Richtung in der Größenordnung der zu erwartenden Bodenkriechbewegungen liegen. Für Dauerregistrierungen und beim Messen von Geschwindigkeitsprofilen mit zunehmender Tiefe eignen sich naturgemäß physikalische Meßmethoden besser als geodätische.

Das Kriechen von Schutthalden ist in der Standardliteratur eine angenommene Theorie. Es liegen aber zu diesen Theorien kaum praktische Bewegungsmessungen auf Schutthalden vor. Um in dieser Hinsicht mehr Unterlagen zu haben, hat das Institut für Geophysik im Sommer 1972 die Vermessung der Schneeklammshutthalde im Hochköniggebiet begonnen. Außer einer morphometrischen Aufnahme der gesamten Schutthalde wurde auch eine exakte geodätische Nullmessung von Bewegungsmeßpunkten in der Schutthalde durchgeführt. Die Fixpunkte der Vermessung wurden im Fels der Brettlnkopfwand vermarktet, die notwendigen Strecken wurden mittels Basislatte bestimmt und die 4 Bewegungsmeßpunkte in der Schutthalde mittels Sekundentheodolit vorwärts ein-

geschnitten. Die möglichen Bewegungsgrößen sollen auf Grund von Winkeländerungen im Laufe der nächsten Jahre ermittelt werden. Die Nachmessungen in den nächsten Jahren und die Ausdehnung der Messungen auf noch weitere Schutthalden sollen die Massenbewegungen auf Schutthalden mit exakten Zahlen belegen und die Grundlagen für neue theoretische Arbeiten zum Schutthalden-Kriechen bilden.

Die Vermessung von Staurationshängen gehört zu den interessantesten ingenieurgeodätischen Arbeiten. Man verwendet zumeist zur Einmessung von Bewegungsmeßpunkten Einschneide- oder Einbindeverfahren vom unbewegten Gegenhang aus. Bei komplizierten Aufgaben werden auch Versuchsstollen durch den Rutschhang hindurch zum ruhigen Fels vorgetrieben und durch diese hindurch oft auch die Fixpunkte versichert. Durch Differenzmessungen mit elektronischen Entfernungsmeßgeräten werden ebenfalls als weitere Möglichkeit genaue Bewegungsmessungen ausgeführt. Bei sehr großen Geschwindigkeiten der bewegten Massen werden Polygonzüge von unbewegten Teilen des Hanges über die bewegten Massen wieder zu unbewegten Teilen des Hanges geführt und so aus den Koordinatenunterschieden bei den Nachmessungen auf die Bewegungsgrößen geschlossen.

Zur Zeit wächst die Zahl der theoretischen Abhandlungen über Verschiebungsmessungen ständig. Doch sind diese Arbeiten in erster Linie für Verschiebungsmessungen an großen Bauwerken gedacht, indem sie die Korrelationen zwischen den Bewegungen, durch die Festigkeitseigenschaften des Baumaterials gegeben, berücksichtigen. Für Bewegungsmessungen an Hängen sind diese Ausgleichungsschemen kaum anwendbar, da man über das mechanische Verhalten der Hänge, um Korrelationen zwischen den einzelnen Punkten aufstellen zu können, noch viel zu wenig weiß. Gerade durch diese Bewegungsmessungen möchte man ja dieses Wissen erst erweitern.

Die Möglichkeit einer Kleintriangulation der zu messenden Hangpunkte wird in vielen Fällen ebenfalls eine gute geodätische Lösung darstellen. Das Netz kann sowohl als freies oder eingezwängtes Netz im Ausgleich behandelt werden. Immer sollte aber darauf geachtet werden, die Netzpunkte so zu wählen, daß auch die absoluten Lageänderungen und nicht nur die reinen Netzdeformationen errechnet werden können.

Als Ergebnis erwartet man sich von Hangbewegungsmessungen die räumliche, relative und absolute Richtung und Größe der Bewegungswerte. Nach LÖSCHNER (1970) sind bei Deformationsmessungen drei geodätische Prinzipien zu beachten:

1. Das Ordnungsprinzip. Es soll den Arbeitsablauf folgerichtig steuern.
2. Das Zuverlässigkeitsprinzip. Kontrollen bei den Messungen und Berechnungen sollen die Zuverlässigkeit der Ergebnisse sichern.
3. Das Wirtschaftlichkeitsprinzip. Es beinhaltet den Messungsfaktor Genauigkeit, man spricht daher oft auch von einem Genauigkeitsprinzip. Es muß die, für den Meßzweck notwendige und erforderliche, Genauigkeit und auch die Zahl der Überbestimmungen mit dem Meßverfahren und der Meßanlage abgestimmt werden.

Erst die unbedingte Einhaltung der beiden ersten Prinzipien und die realistische Kalkulation zum Wirtschaftlichkeitsprinzip wird dem Geodäten den rechten Erfolg bei der Durchführung der gestellten Aufgaben bringen.

TALZUSCHUB "LESACHER RIEGEL"

Die bereits genannte Methode der Kleintriangulation wurde zur Bewegungsmessung des Talzuschubes "Lesacher Riegel" bei Kals in Osttirol zur Anwendung gebracht. Das Institut für Geophysik konnte im Sommer 1972 aber erst die Nullmessung ausführen, so daß hier noch über keine Bewegungswerte berichtet werden kann. Dessen ungeachtet soll aber hier als vorläufiges Teilresultat über die beobachteten Refraktionskoeffizienten der nahezu hangparallelen Visuren berichtet werden.

Vorerst seien einige Bemerkungen zum Talzuschub "Lesacher Riegel" hier angebracht. Der Lesach-Bach, seine Quellflüsse liegen in der Osttiroler Schobergruppe, hat in den Katastrophenjahren 1965 und 1966 seine verheerende Wildbachtätigkeit unter Beweis gestellt. Er vermurte unter Vernichtung von einigen Mühlen und unter Verwüstung großer Waldbestände, die Straße, die von Huben nach Kals führt. Die Gieschiebefracht der Muren stammte hauptsächlich aus dem Bereich des Lesacher-Riegels, der unter dem Einfluß eines Talzuschubes steht.

Dieser Talzuschub ist an seinen gewaltigen Anrissen im oberen Teilstück des Hanges und am konvexen Hangfuß gut zu erkennen. Die nach wie vor ungebrochene Erosionskraft des nicht verbauten Lesach-Baches sowie frische Entblösungen der Anrißnischen, geben berechtigten Anlaß für die Annahme, daß dieser Talzuschub noch immer aktiv ist. Die Entfestigung des Gesteins, die in Straßenaufschlüssen gut zu sehen ist, zeigt eine gute Bereitschaft der Felsmassen zu weiteren Bewegungen.

Dem Wirtschaftlichkeitsprinzip folgend, wurde die Triangulation und Trilateration der Hangpunkte als Meßmethode gewählt. Andere Meßmethoden konnten nicht angewendet werden, da der Gegenhang ebenfalls in Bewegung angenommen werden muß. Für die Höhenbestimmung kam aus wirtschaftlichen Gründen nur die Methode der trigonometrischen Höhenmessung (schief gemessene Seite, gegenseitige Zenitdistanzbeobachtung) in Frage. Bei der Steilheit des Lesacher Riegels (ungefähr 35° Neigung) hätte das geometrische Nivellement keine Genauigkeitssteigerung gebracht, wäre dagegen aber weitaus zeitraubender auszuführen gewesen. In der Verflachung des Hanges, vor dem Steilabfall zum Lesachbach, wurde ein Deformationsviereck vermarktet und mit vielen Überbestimmungen vermessen. Es wird erhofft, aus den künftigen Deformationen in diesem Viereck Rückschlüsse auf den Spannungszustand ziehen zu können.

Vermarktet wurden die Punkte mit 1 m langen verzinkten Eisenrohren. Zwei Punkte sind in jenem Teil der Felsmasse vermarktet, von dem man annehmen kann, daß dieser die großräumige Bewegung des Talzschubes nicht mitmacht. Es sind daher für diese zwei Punkte keine Bewegungen zu erwarten, was bei der Auswertung der Nachmessungen Beachtung finden muß. Als Winkelmeßgerät stand ein Sekundentheodolit WILD T2-E und ein, vom Institut für Landes- und Katastervermessung entliehener, elektrooptischer Nahbereichsentfernungsmesser WILD DI 10 zur Verfügung. Die horizontalen Richtungen wurden in 2 Sätzen, die Zenitdistanzen mit allen 3 Fäden in zwei Kreislagen beobachtet. Die Entfernungsmessungen wurden von der Wippe aus, wo es möglich war in Zwangszentrierung, durchgeführt.

Über die Lageberechnungen der stabilisierten Punkte soll hier noch nicht berichtet werden, dazu soll man wohl einmal die Nach-

messungen abwarten. Die Höhenberechnungen nach der Methode der trigonometrischen Höhenmessung mit schief gemessener Seite und gegenseitiger Zenitdistanzbeobachtung ergaben aber interessante Resultate zur Refraktion hangparalleler Strahlen, so daß darüber hier kurz berichtet werden soll.

Nimmt man bei der Berechnung der Höhenunterschiede nach der trigonometrischen Höhenformel

$$h_{ij} = s_{ij} \cdot \cos z_{ij} + \frac{(1-k_{ij})(s_{ij} \cdot \sin z_{ij})^2}{2r} \quad (1)$$

die unbekanntenen Refraktionskoeffizienten mit Null an, so ergibt die Summe f_{ij} gegenseitig beobachteter Höhenunterschiede

$$\begin{aligned} f_{ij} &= s_{ij}(\cos z_{ij} + \cos z_{ji}) + \frac{(s_{ij} \cdot \sin z_{ij})^2}{r} = \\ &= \frac{(s_{ij} \cdot \sin z_{ij})^2}{r} \cdot \frac{(k_{ij} + k_{ji})}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

die Summe der gegenseitigen Refraktionseinflüsse, selbstverständlich inklusive der zufälligen Beobachtungsfehler. In der Tab.2 sind die berechneten Mittel der gegenseitig wirksamen Refraktionskoeffizienten

$$\bar{k}_{ij} = \frac{(k_{ij} + k_{ji})}{2} \quad (3)$$

der trigonometrischen Höhenmessung aus den Werten f_{ij} zusammengestellt.

Die Visuren der ausgeführten trigonometrischen Höhenmessungen müssen als bodennahe, hangparallele Visurstrahlen betrachtet werden. Im Mittel ergab sich daher auch ein Refraktionskoeffizient aus allen gegenseitigen Zenitdistanzbeobachtungen mit -0,91. Immerhin ist das ein so hoher negativer Wert, wie er in der Geodäsie nur vom geometrischen Präzisionsnivelement her bekannt ist. Es soll aber nochmals betont werden, daß auf den zu bestimmenden Höhenunterschied nur die Differenz der wirksamen gegenseitigen Refraktionskoeffizienten $(k_{ij} - k_{ji})$ Einfluß hat. Diese Differenz ist mit dem mittleren

zwischen		f_{ij}	D_{ij} (hor. Entf.)	\bar{h}_{ij} (Mittel)	\bar{k}_{ij}
i	j	[mm]	[m]	[m]	
P4	M4	-6,7	251,1	+29,461	-0,68
P4	M2	+5,3	389,4	+80,795	+0,22
P4	M3	-7,2	247,4	+48,371	-0,75
M3	M2	-2,7	276,6	+32,422	-0,23
M3	M4	-9,8	231,4	-18,913	-1,17
P3	P2	-53,3	424,1	+232,352	-1,90
P3	M2	-87,2	603,5	-144,076	-1,53
P3	P4	-59,2	560,9	-224,971	-1,21
		$\bar{k}_{\text{Mittel}} = -0,91, \quad m = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} = \underline{+0,69}$			

Tab.2: Refraktionskoeffizienten der trigonometrischen Höhenmessungen (gemessene schiefe Seite, gegenseitige Zenitdistanzbeobachtung).

Fehler einer Refraktionskoeffizientenbestimmung (nach Tab.2 mit $\pm 0,69$ zu errechnen) sicher zu groß geschätzt. Vor allem deshalb, da für die Berechnung der f_{ij} in Tab.2 nie gleichzeitige Gegenvisuren als Grundlage dienten, sondern vielmehr zwischen den Gegenvisuren große Zeitdifferenzen auftraten und auch die zufälligen mittleren Beobachtungsfehler im Wert $\pm 0,69$ enthalten sind. Unterstrichen werden diese Bemerkungen dadurch, daß über 3 Punkte gebildete trigonometrische Nivellements Schleifen [(P3.M2.P4), (M3.M2.P4) und (M4.M3.P4)] einen mittleren Schleifenschlußfehler von $\pm 3,0$ mm ergaben.

ABSCHLIEßENDE BEMERKUNGEN

Sind die Forderungen der Wissenschaftler anderer Geodisziplinen an die Geodäten in erster Linie auf die Bekanntgabe der Größe der Bewegungsvektoren bei Massenbewegungen beschränkt, so möchte dieser Vortrag unter anderem zeigen, daß bei der Bestimmung dieser Bewegungsvektoren sehr wohl interessante geodätische Fragen auftreten können. Als kleines Beispiel dazu zeigen die vorher beschriebenen Beobachtungen zum trigonometrischen Nivellement ganz klar, daß eine intensive

Untersuchung des Unterschiedes der beiden wirksamen Refraktionskoeffizienten der gegenseitigen, aber nicht unbedingt gleichzeitigen, Zenitdistanzen notwendig sein wird. Für die Nachmessungen der nächsten Jahre ist daher eine Registrierung meteorologischer Daten gleichzeitig mit der Zenitdistanzbeobachtung geplant.

Über diese rein geodätischen Fragen sollte aber doch das naturwissenschaftliche Interesse am untersuchten Objekt (Massenbewegung) nicht verloren gehen. Denn nur das rechte Verständnis für diese Naturerscheinungen wird dem Geodäten erst den erwünschten Erfolg bei seinen Arbeiten bringen.

Gerade das Arbeitsgebiet der natürlichen Massenbewegungen ist ein Thema, an dem viele Geowissenschaften Interesse haben. Die Grundlagen für die Forschung auf diesem Gebiet werden aber immer konkrete, erwünschenswert auch kontinuierliche, Messungen an und zu den Naturerscheinungen sein. Eine enge Zusammenarbeit der verschiedenen Geodisziplinen, wie Geologie, Geomorphologie, Meteorologie, Hydrologie, Geophysik, Bodenmechanik, Geomechanik und Geodäsie, ist dazu erforderlich. Um für diese angesprochene Zusammenarbeit die Leistungen der Geodäten von vornherein an den rechten Platz zu stellen, soll dieser Vortrag mit einem Satz von Professor LÖSCHNER (1970) schließen: "Zur Erfüllung der gestellten Aufgaben und Ziele gebührt der geodätischen Deformationsmessung im Zusammenspiel aller interessierten Disziplinen eine durchaus selbständige wissenschaftliche Partnerschaft!"

LITERATUR

- Ampferer, O.(1939): Über einige Formen der Bergzerreißung. Sitzungsber.Akad.d.Wiss.Wien, math.-nat.Kl., Abt.I, 148, 1-14.
- Brückl, E. u. Scheidegger, A.E.(1972): The Rheology of Spacially Continuous Mass Creep in Rock. Rock Mechanics, 4, 237-250.
- Brunner, F.K. u. Scheidegger, A.E.(1973): Exfoliation. Rock Mechanics, 5, 43-62.
- Carson, M.A. u. Kirkby, M.J.(1972): Hillslope Form and Process. Cambridge University Press.
- Kiersch, G.A.(1964): Vaiont Reservoir Disaster. Civil Eng., 34, 32-39.

- Kobold, F.(1959): Über einige Probleme bei der Absteckung und vermessungstechnischen Kontrolle großer Wasserkraftanlagen im Hochgebirge. Mitteilungsblatt, Bund der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure, 10, 193-213.
- Lanser, O.(1967): Felsstürze und Hangbewegungen in der Sicht des Bauingenieurs. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, V, 89-113.
- Löschner, F.(1970): Geodätische Deformationsmessungen an Bauwerken. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 77, 1-23.
- Stiny, J.(1941): Unsere Täler wachsen zu. Geologie und Bauwesen, 13, 71-79.
- Terzaghi, K.(1950): Mechanism of Landslides. Geol.Soc.Amer.Engineering Geology Volume (Berkey Vol.), 83-123
- Terzaghi, K. u. Jelinek, R.(1954): Theoretische Bodenmechanik. Springer-Verlag, Wien, 505 Seiten.
- Zischinsky, U.(1967): Bewegungsbilder instabiler Talflanken. Mitt. Gesellsch.Geol.Bergbaustud.Wien, 17, 127-167.