F R I T Z K . B R U N N E R

promovierte 1972 an der Technischen Universität Wien. Von 1974 - 1982 war er Lecturer an der School of Surveying, University of New South Wales, Australien und 1981 Humboldt-Stipendiat an der Universität Stuttgart. 1986 wurde er als Professor und Direktor an die School of Surveying, University of New South Wales, berufen, 1994 erfolgte der Ruf zum Professor für Ingenieurgeodäsie an die Technische Universität Graz. Seine Forschungsinteressen sind Ingenieurgeodäsie, atmosphärische Effekte auf geodätische Messungen, GPS Vermessung und faseroptische Sensorik.

E W A L D B R Ü C K L

wurde 1942 geboren. Er promovierte 1969 in Geophysik an der Universität Wien. Nach einigen Jahren an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der Technischen Universität Wien folgte 1975 der Wechsel in die Privatwirtschaft, wo er geophysikalische Methoden in den Bereichen Geotechnik, Naturgefahren und natürliche Ressourcen zum Einsatz brachte. 1993 erfolgte seine Berufung zum Professor für Geophysik an die Technische Universität Wien. Neben Arbeiten in der ingenieurgeophysikalischen Praxis war er in Programme der Österreichischen Akademie der Wissenschaften involviert.

7

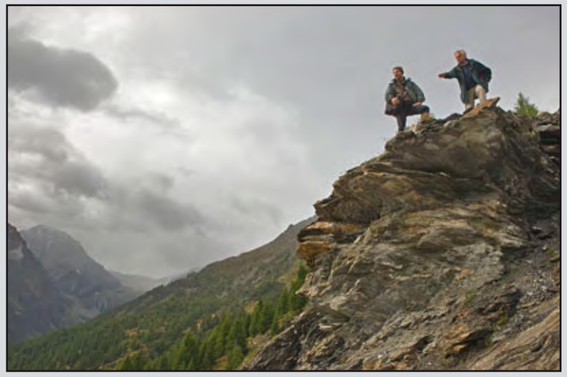
MASSENDYNAMIK

Im Gradenbachtal in den Hohen Tauern wird anhand einer seit langem bekannten, großen Rutschfläche untersucht, wie und warum große alpine Massenbewegungen stattfinden. Dabei wird die sich bewegende Masse mit unterschiedlichen Methoden vermessen und versucht, vor allem die Eigenschaften der Gleitflächen zu analysieren. Aus den sehr feinen Messwerten werden Modelle über die Dynamik der Bewegungen errechnet. Damit kann die betroffene Bevölkerung gewarnt werden, wenn steigende Bewegungsraten und andere Indikatoren den Übergang zu einer raschen Gleitung erwarten lassen.

Gefördert durch: Geophysik der Erdkruste (GdE), International Geoscience Programme (IGCP), International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)

DANK | Daniel Gander, Rudolf Lummerstorfer, Helmut Woschitz, Franz Weber, Richard Bäk, Uwe Herzog, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (Kärnten), Agrargemeinschaft Gradenwald, Aleksander Guterch (Polnische Akademie der Wissenschaften), K. Aric, M. Behm, W. Chwatal, H. Grassl, S. Hock, V. Höck, F. Kohlbeck, E.-M. Rumpfhuber, C. Schmid, R. Schmöller, C Tomek, C. Ullrich, FWF Projekt P15576, Länder Kärnten und Steiermark

Ewald Brückl: „Beim Gradenwirt erinnert ein gerahmtes Foto an dramatische Tage. Die Ortschaft Putschall am Ausgang des Gradentales wurde 1965 von einer großen Mure schwer beschädigt. Im Hintergrund ist der erodierte Hangfuß der Massenbewegung Gradenbach zu sehen“.



Herr Brückl, Herr Brunner, wir sind jetzt drei Stunden einen steilen Berg hinauf gegangen. Das Gelände ist stark zerklüftet, und obwohl wir jetzt hier sitzen und uns ausruhen, fahren wir zu Tal. Der Berg bewegt sich, langsam zwar, aber mit einer, für einen Berg, ganz erheblichen Geschwindigkeit. Sie beide sind in der Lage, in den Berg „hineinzuschauen", wie machen Sie das?

BRÜCKL| Wir sind hier oben, um einen Eindruck von einer derartig großen Massenbewegung zu bekommen, wie es der Berghang am Gradenbach darstellt. Derartige Bewegungen sind in den Alpen typisch. Sie stellen ein allgemein geologisches Phänomen dar, sind aber auch eine beträchtliche Gefahr, schon allein auf Grund der großen Masse, die wir hier vorliegen haben und die sich abwärts bewegt. Unsere beiden Forschungsprojekte werden vom ISDR-International Strategy for Disaster Reduction-Programm der ÖAW unterstützt. Das ISDR-Nationalkomitee hat beschlossen, sich auf eine für Österreich und für die Alpen typische geologische Gefahr zu konzentrieren, nämlich Massenbewegungen. Wir haben sehr große Massenbewegungen ausgewählt, die einen ganzen Hang tief greifend erfassen, und wo unsere Möglichkeit, sie zu sanieren oder zu stoppen, sehr beschränkt sind. Es ist also unbedingt gefragt, diese Vorgänge genau zu verstehen, um sagen zu können, wie eine Massenbewegung in naher Zukunft weitergehen wird. Es sollen ja für die Bevölkerung relevante Warnungen möglich werden. Aber auch langfristige Vorhersagen, im Hinblick auf eine eventuelle touristische Erschließung, sind gefragt oder wie eine Bebauung und die dazugehörende Infrastruktur neben einer solchen Gefahrenzone aussehen soll. Das Ziel unserer Forschungsarbeit soll sein, diese imposante Erscheinung einer großen Massenbewegung, die man auch Sackung nennen kann, besser zu verstehen und die entsprechenden Schlüsse für die Gesellschaft abzuleiten. Das erste, das wir bei einer beobachteten Massenbewegung tun können, ist die Aufnahme der Grunddaten: Welche Masse sich bewegt, erklärt uns der Geologe, wie groß die Masse ist, erhebt der Geophysiker, also in diesem Fall unsere Gruppe von der Technischen Universität Wien. Dann folgt die sehr komplexe Erhebung der Bewegung der Massen.

F| Gab es einen Anlassfall, zu dem Sie hierher gerufen wurden, um sich einen bestimmten Vorgang anzuschauen?

BRÜCKL| In meiner früheren, privaten Tätigkeit war ich schon im Jahre 1978 beauftragt, Messungen am Gradenbach zu machen. Das Gradenbachtal ist ein klassisches Untersuchungsgebiet, um diesen typischen Fall einer Sackung zu untersuchen. Dieser Hang hat schon mehrmals große Geschwindigkeiten, bis zu etlichen Metern pro Jahr, aufgewiesen. Das kann man nicht mehr als Kriechen bezeichnen, und hat auch weiters zur Folge, dass sich der Talboden verengt. Dort bilden sich Muren, und im Jahre 1965 hat das zu einer schweren Verwüstung des Ortes Putschall geführt. Durch die lange Beobachtungsdauer wissen wir schon viel über diesen Hang, insbesondere, dass er sehr schnell werden kann. Kollege Brunner ist jemand, der diese Bewegung wirklich professionell und wissenschaftlich korrekt erfassen kann.

BRUNNER| Wir sind durch die Aussagen und Hinweise von Kollegen Brückl auf die Massenbewegung im Gradenbachtal aufmerksam geworden. Für unsere Untersuchungen haben wir ein GPS-Überwachungssystem mit vielen Modulen entwickelt, das uns erlaubt, sehr präzise Messungen zu machen. GPS ist als Vermessungswerkzeug für solche Hangrutschungen besonders geeignet, weil wir damit die Messpunkte dorthin legen können, wo wir sie brauchen, um die Bewegungen bestimmen zu können. Wir brauchen also nicht auf Sichtverbindungen zwischen den Punkten Rücksicht zu nehmen, sondern wir können die Punkte wirklich nach geologischen und geophysikalischen Gesichtspunkten auswählen. Wir haben diese GPS-Module zuerst bei einem Rutschhang in der Steiermark entwickelt und dabei gezeigt, dass es wirklich mit einigen Millimetern Präzision möglich ist, die Punkte zu bestimmen, auch wenn dazwischen große Distanzen vorhanden sind. Wir haben zum Beispiel ein Kalibriermodell für die Höhengenauigkeit entwickelt, das bei großen Höhenunterschieden von alpinen Hängen besonders wichtig ist. So haben wir bei der Höhengenauigkeit eine Verbesserung mit dem Faktor drei erreicht. Diese Erkenntnisse kommen jetzt bei der Überwachung der tiefen Massenbewegung am Gradenbach zum Einsatz.

ES SIND DIE SEISMISCHEN WELLEN, DIE UNS EIN ABBILD DES ERDINNEREN ERMÖGLICHEN.

BRÜCKL| Es ist das ureigenste Anliegen der Geophysiker, in die Erde hineinzuschauen. Während jedoch in der Atmosphäre und im Weltraum elektromagnetische Wellen, zum Beispiel Licht- oder Radiowellen die notwendige Information übertragen, sind es die seismischen Wellen, die ein Abbild des Erdinneren ermöglichen. Seismische Wellen werden durch Erdbeben, Sprengungen oder andere künstliche Energiequellen angeregt und können im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen die gesamte Erde durchdringen. Seismographen, beziehungsweise Geophone in verkleinerter Form, sind die geeigneten Messgeräte, um die zum Teil winzigen Bodenbewegungen zu erfassen. Am Gradenbach haben wir die seismischen Wellen durch eine von uns selbst entwickelte mechanische Energiequelle, dem so genannten VAKIMPAK, oder durch Kleinsprengungen in ein bis zwei Meter tiefen Handbohrungen angeregt. Zur Aufzeichnung der seismischen Wellen entlang von Profilen mit etwa ein Kilometer Länge stand uns eine Apparatur zur Verfügung, die Signale von 96 Geophonen gleichzeitig aufzeichnen konnte. Bewegte Felsmassen unterscheiden sich vom kompakten Gebirge durch geringere Ausbreitungsgeschwindigkeiten der seismischen Wellen. Die seismischen Wellen werden an Grenzflächen innerhalb der bewegten Masse oder an der Gleitfläche, die den Übergang zum unbewegten Gebirge darstellt, reflektiert und gebrochen. Die Laufzeiten dieser Wellenzüge von der Quelle zu den einzelnen Geophonen stellen die wichtigste Information dar und bilden die Grundlage der Modellbildung. Unser seismisches Modell des Gradenbachs ergab für Volumen und Gewicht der Rutschmasse 0,12 Kubikkilometer und zirka 50 Millionen Tonnen. Diese Zahlen sind klein im Maßstab der Lithosphäre, jedoch beeindruckend für Mensch und Technik. Ein Vergleich: Bewegt sich diese Rutschmasse nur einen Millimeter in die Tiefe, so entspricht die freigesetzte Energie der einer schweren E-Lok, die vom Bergkamm in 2.200 Meter Höhe in das Tal auf 1.000 Meter Höhe rollt oder fällt. Wir haben ähnliche Untersuchungen auch bei anderen Massenbewegungen ähnlichen Typs gemacht, zum Beispiel in Köfels, im Ötztal. Dort finden wir die größte Massenbewegung im Kristallin der Ostalpen mit nahezu vier Kubikkilometern Volumen. Sie ist ein wunderbares Beispiel für eine riesige Massenbewegung, die sich sicherlich zunächst langsam kriechend gebildet hat, so wie hier am Gradenbach, die aber dann plötzlich in eine

Massenbewegungen sind in den Alpen ein geologisches Phänomen und eine beträchtliche Gefahr. Es ist unbedingt notwendig, diese Vorgänge genau zu verstehen und die entsprechenden Schlüsse zum Schutz der Bevölkerung zu ziehen.

rasche Gleitung übergegangen ist. Sogar so rasch, dass an der Gleitfläche Gestein geschmolzen ist. Das hat diesen Bergsturz so berühmt gemacht, obwohl das Ereignis bereits vor 9.600 Jahren stattfand.

F| Warum setzt sich denn ein Berg überhaupt in Bewegung?

BRÜCKL| Zur Beantwortung dieser Frage ist der geschichtliche Ablauf herzustellen. Die Vorstellung, die bei den meisten Sackungen dieser Art zutreffen wird, ist die, dass die Täler während der Eiszeit übersteilt wurden. Nachdem das Eis nach der Eiszeit in unserem Bereich 18.000 bis 15.000 Jahre vor heute zurückgegangen ist, ist die seitliche Stützung der Talflanken weggeblieben. Zum Beispiel reichte das Eis beim Gradenbach bis in 2.400 Meter Höhe, es hat den Bergkamm überdeckt. Darum ist er auch so schön rund, und erst die nächsthöheren Berge, wo kein Eis darüber lag, sind schroff. Geht das Eis zurück, und gibt es bereits bestehende Schwächezonen im Gestein, kann es zu solchen Massenbewegungen kommen. Beim Gradenbach ist die, den Hang aufbauende Matreier Zone die Schwächezone, die weniger Festigkeit hat, als das umliegende Gestein. Es gibt aber auch Fälle, wo sich im kompakten Gneis, ohne wirklich auffälligen, vorgeprägten Trennflächen, eine Gleitfläche ausgebildet hat, und Massen in Bewegung gekommen sind. Es ist dieser Vorgang ein sehr komplexes Problem, und die Frage, wie die Bewegungen wirklich entstehen, welche Prozesse dabei wirksam sind, ist ein Kernproblem zum Verständnis dieser großen Massenbewegungen.

BRUNNER| Nachdem dieses Gebiet hier ja schon seit langem als rutschgefährdet bekannt ist, haben wir den Gradenbach als unser Experimentierfeld ausgewählt. 1999 haben wir begonnen, das GPS-Netz aufzubauen und die ersten Messungen zu machen. Schon im nächsten Jahr hat sich gezeigt, dass der Hang in Bewegung ist und zwar deutlicher, als vorher angenommen wurde. Das hat sich im darauf folgenden Jahr zu einer stark beschleunigten Bewegung herausgebildet und war im Sommer 2001 derartig stark, wie wir Bewegungen knapp vor katastrophalen Hangrutschungen kennen. Doch dann kam die große Überraschung und damit der Kernpunkt der derzeitigen Forschungen, als ein plötzlicher Stillstand in der Bewegung eintrat. Diese Rutschung hat sich nicht weiter entwickelt, obwohl sie in großer Beschleunigung war. Die Frage ist nun: Warum bewegt sich ein Hang mit starker Beschleunigung und wird zur Katastrophe, während ein anderer Hang unvermittelt zur Beruhigung kommt. Diese Ursachen wollen wir mit verschiedenen Methoden weiter untersuchen. Die Sicherheit der Menschen und die Warnung der Menschen vor solchen Ereignissen ist stark davon abhängig, ob man Überwachungssysteme hat und ob man versteht, was die Gründe für diese Beschleunigung und für das Verlangsamen der Bewegung sind. Der Gradenbach hat sich für uns insofern als Glücksfall herausgestellt, als dort dieses Phänomen aufgetreten ist, und wir es zufällig gemessen haben. Wir wissen aber aus früheren Beobachtungen, dass dieser Vorgang schon häufiger aufgetreten ist. Wenn es uns gelingt, den Mechanismus zu verstehen, können wir auch die Vorhersagen wesentlich präziser machen.

F| Eine Ihrer wichtigsten Messmethoden ist das Vermessen mit dem GPS-System. Dieses Kürzel ist ein landläufiger Ausdruck geworden.

BRUNNER| GPS ist das Global Positioning System, eines von mehreren existierenden derartigen Systemen. Manche sind derzeit im Aufbau, wie das europäische System Galileo, aber das vom US-Verteidigungsministerium betriebene NAVSTAR-GPS hat derzeit die größte Präsenz und Bedeutung. Mit Hilfe des GPS wird die Lage eines Punktes auf der Erde mit Hilfe der Distanzen zu mehr als vier Satelliten, deren Positionen bekannt sind, festgestellt. Die Satelliten senden Mikrowellensignale mit 19,6 und 21,0 Zentimeter Wellenlänge aus. Der Empfänger wird am zu messenden Punkt aufgestellt. Üblicherweise erreicht man Genauigkeiten im Meterbereich. Durch Phasenmessungen an den kurzen Mikrowellenlängen kann man Koordinatendifferenzen zwischen zwei Punkten mit Zentimetergenauigkeiten bestimmen. Durch rechnerische Korrekturen erhält man sogar millimetergenaue Koordinaten. Für diese Korrekturen haben wir am Institut mittlerweile zwei verschiedene Softwarepakete entwickelt, und wir verwenden auch ein kommerzielles Produkt, das von der Universität Bern erzeugt wird, für die präzisen Positionsbestimmungen.

BRUNNER| Am Gradenbach oder auch bei anderen Anwendungen würden wir schauen, dass wir mindestens zwei Referenzstationen besetzen, die im stabilen, im sich nicht bewegenden Bereich, platziert werden. Dann wird, je nach Finanzlage des Projektes, eine Anzahl von Monitorstationen im bewegten Bereich ausgesucht, und es werden die relativ zueinander stattfindenden Verschiebungen gemessen. Wir haben das Messsystem so entwickelt, dass wir kontinuierlich messen können. Mit Taktraten von drei Sekunden können wir die Signale empfangen, decodieren, speichern und abfragen. Durch diese großräumige Vermessung am Gradenbach, haben wir auch festgestellt, dass sich der ganze Hang wie ein Block bewegt. Es ist nicht so, dass es einzelne, unterschiedlich schnelle Ströme gibt, sondern der ganze Rutschhang bewegt sich wie ein Block, und das war schon einigermaßen überraschend.

> BEI DIESEM MESSPRINZIP ÄNDERN KRÄFTE, DIE AUF GLASFASERN EINWIRKEN, DIE QUALITÄT DER LICHTÜBERTRAGUNG IN DER FASER.

F| In welcher Tiefe wird denn die Rutschebene angenommen, oder weiß man das mittlerweile gesichert?

BRÜCKL| Das ist in maximal 140 Metern Tiefe im untersten Drittel, ansonsten zwischen 50 und 70 Meter. Es wurden auch photogrammetrische Flüge aus den Jahren 1963 bis 1996 miteinander verglichen. Diese Vergleiche haben eine hervorragende Information über die gesamte Bewegung ergeben. Das gemeinsame Interpretieren der GPS-Daten, der photogrammetrischen Daten und des seismischen Strukturmodells, haben zum Nachweis geführt, dass sich diese Masse als Block bewegt und beschleunigt. Die Bewegung kann sehr gut als eine Rotationsgleitung, als eine Blockbewegung beschrieben werden, was wieder günstig ist für die Modellierung und natürlich für das Verständnis der weiteren Entwicklung. Das Spannendste am gesamten Vorgang ist dieses episodische Kriechen. Das plötzliche Beginnen und das plötzliche Aufhören. Wie ist das zu erklären? Eine Theorie erster Ordnung wäre, dass eine solche Rutschmasse sich aus einem annähernd kompakten Gestein entwickeln kann, also nicht unbedingt vorgeprägt sein muss. Wäre sie nämlich schon vorher da, hätten mit aller Wahrscheinlichkeit die Gletscher der Eiszeit dieses Lockermaterial schon weggeräumt. Das Herausbilden einer Gleitfläche selbst, ist ein komplexer Vorgang. Auch in globalen geologischen Störungssystemen ist es so, dass es erst über breite Zonen Verformungen gibt. Später, in einem fortgeschrittenen Stadium, konzentriert sich die Verformung an der Gleitfläche. Wir können uns den Übergang zum raschen Gleiten nur dann vorstellen, wenn die Gleitfläche voll ausgeprägt ist, und es ist nicht zu erwarten, dass ein gesunder Hang von einem Jahr aufs andere plötzlich zu einer raschen Gleitung wird. Aus der Lage der basalen Gleitfläche, die wir im oberen Anrissbereich über etwa 40 Meter schön sehen, und mit der aktuellen Geschwindigkeit können wir Modelle erstellen. Aber diese Modelle gehen davon aus, dass die Masse kontinuierlich abrutscht. Der tatsächliche Ablauf ist aber episodisch. Vermutlich war es so, dass nach der Eiszeit diese episodischen Bewegungen initiiert wurden. Wir wissen aber nicht, wie lange der Hang ruhig gestanden ist. Immerhin hat er sich in jüngster Vergangenheit einmal sieben Meter pro Jahr bewegt und doch wieder beruhigt. Wie schon erwähnt, wurde eine dieser kurzzeitigen Veränderungen glücklicherweise beobachtet und gemessen. Als Nächstes wollen wir schauen, ob es auch ganz kurzzeitige und kleine Schwankungen gibt, was eine enorme Herausforderung an die Messtechnik ist. Wenn wir im Jahr nur Bewegungen von einigen Zentimetern und pro Tag nur Bewegung von Zehntelmillimetern haben, dann reicht das GPS nicht aus. Wir müssen also andere Methoden der Vermessung anwenden.

BRUNNER| Unsere Idee war, dass wir, ähnlich wie bei anderen bekannten Anwendungen, so genannte Verformungsrosetten in den Boden einbringen. Wir nennen das System „strain rosette", weil wir damit die Verformungen messen können. Die Idee war allerdings, dass wir die Länge der Arme der Rosette, die normalerweise nur im Zentimeterbereich liegen, sehr groß machen. Wir haben dann für die Realisierung fünf Meter lange Arme gewählt. Für die Verformungsbestimmung sollte man drei Arme, die mit 120° unterschiedlicher Ausrichtung eingebettet werden, verwenden. Natürlich muss diese Rosette sicher eingebaut werden. Dazu haben wir ein Versuchsmuster gebaut und auch in den Boden eingebettet, um zu lernen, was bei einem neuen System alles zu beachten ist. Dann haben wir uns nach einigen Testmessungen, mit denen wir sehr zufrieden waren, entschlossen, diese am Gradenbach einzubauen. Am Hang wurde, natürlich in Absprache mit den Grundstückbesitzern, ein Punkt gewählt und die Verformungsrosette eingebaut. Der Vorteil der Rosette ist vor allem die Messgenauigkeit. Wir haben für diese Strain Rosette ein faseroptisches Messsystem gewählt, mit dem wir schon bei anderen Projekten sehr gute Erfahrungen gemacht haben. Bei diesem Messprinzip ändern Kräfte, die auf Glasfasern einwirken, die Qualität der Lichtübertragung in der Faser. Durch die Änderung des Lichtes in der Glasfaser an einer bestimmten Stelle, kann festgestellt werden, wo äußere Kräfte wirken. So kann man die fünf Meter langen Arme der Rosette mit einer Präzision von zwei Mikrometern ausmessen. Mit einem anderen Auswertesystem können wir diese fünf Meter mit einem Kilohertz, also 1.000 Mal pro Sekunde, in der Zeit auflösen und eine Genauigkeit von ungefähr zehn Nanometer erreichen, das ist eine sagenhafte Genauigkeit. Durch Anregung des Bodens mit Hammerschlägen, haben wir die Sensibilität des Systems an mehreren Stellen überprüft und ausgezeichnete Resultate erhalten.

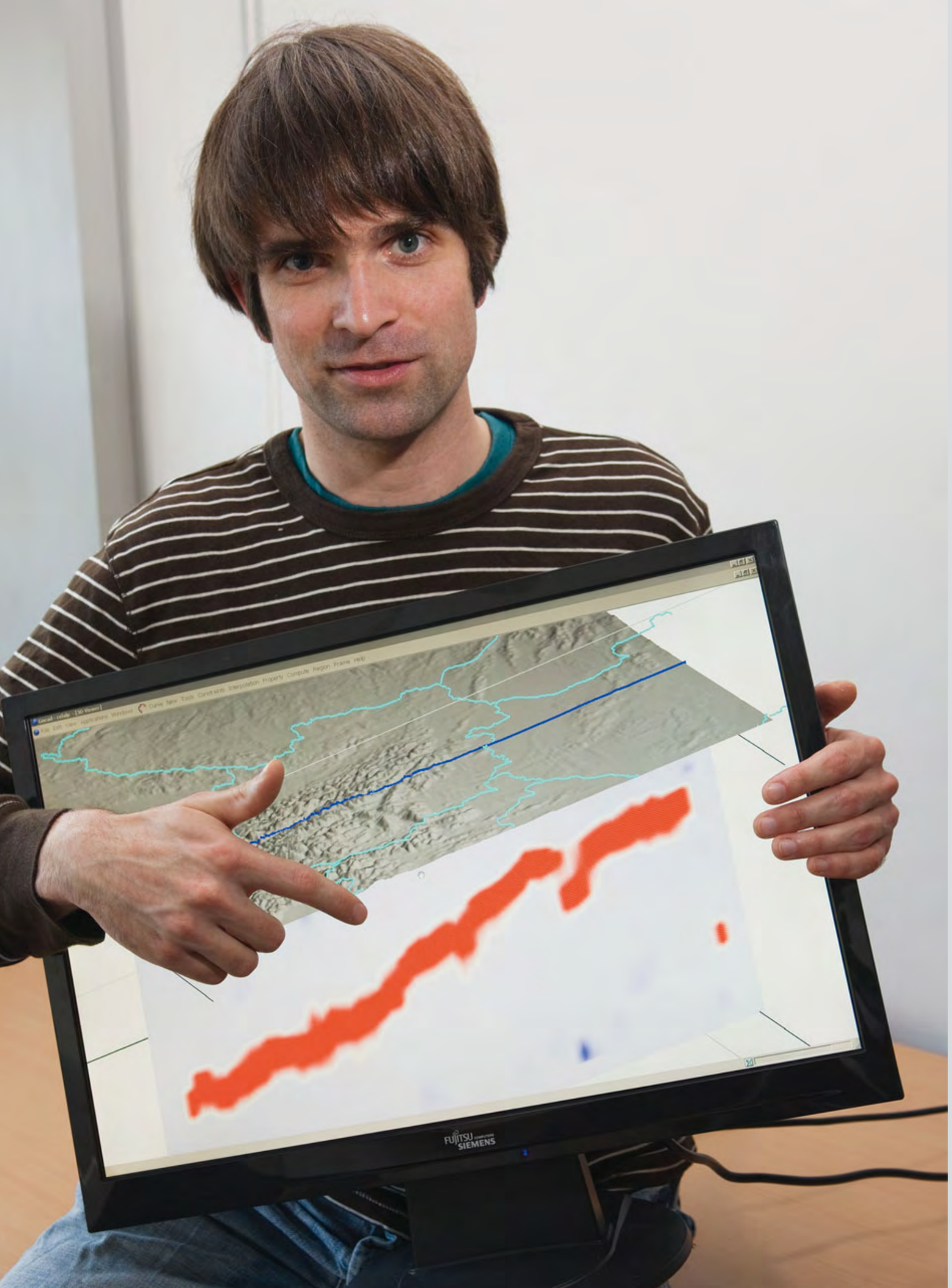
F| Sie haben vorher von den seismischen Messungen erzählt, bei welchen Sie mit kleineren Sprengungen Wellen im Erdboden erzeugen.

BRÜCKL| Bei der Seismik als Erkundungsmethode haben wir die seismischen Wellen selber erzeugt. Eine Tatsache ist aber auch, dass der Hang durch seine Bewegung, durch Brechen und kleinräumiges Rucken, selbst Mikroerdbeben erzeugt. Diese Mikroerdbeben stehen in einem engen Zusammenhang mit der Bewegung. Die seismische Methode besteht in einer kontinuierlichen Registrierung der natürlichen Bodenbewegungen mit Seismometern oder Geophonen. Ein Standardaufnahmesystem kann zum Beispiel eine Bodenschwingung, die 100 Hertz hat, also wenn der Boden 100 Mal pro Sekunde auf und ab schwingt, bis zu einem Zehntel Atomdurchmesser auflösen. Bei niedrigeren Frequenzen liegt die Auflösung im Bereich von 10 Atomdurchmessern. Wir konzentrieren uns auf Schwingungen, die von Beben stammen, die der Hang selber produziert. Sie können sich aber vorstellen, wenn wir Bodenverschiebungen mit der eben beschriebenen Auflösung beobachten, dass diese natürlich den unterschiedlichsten Grund haben können. Das kann Windbewegung sein, das können auch weiter weg gelegene Erschütterungen sein. Es ist eine sehr interessante, methodisch aber auch sehr aufwendige Arbeit, wirkliche, vom bewegten Hang ausgelöste Beben, von anderen Erschütterungen zu unterscheiden. Selbstverständlich müssen wir dann jedes Hangbeben lokalisieren und in seiner Größe bewerten. Stefan Mertl arbeitet im Rahmen seiner Dissertation an der Lösung dieser Probleme. Ein besonders interessanter Aspekt wird sein, die seismische Energie, mit den entsprechenden geodätischen Resultaten zu vergleichen. Es ist zu erwarten, dass eine geglättete Gleitfläche bei gleicher Verschiebung der Massen, also beim Freiwerden der gleichen potentiellen Energie, weniger Beben erzeugt, als eine erst in Entstehung befindliche, bei der noch Materialbrücken zu durchbrechen sind. Das Verständnis, wie sich die Reibung an der Gleitfläche entwickelt, ist der Schlüssel für eine Vorhersage der Massenbewegungen sowohl kurz- als auch langfristig. Was wir bisher noch gar nicht angesprochen haben, ist der Porenwasserdruck, der Druck des Wassers im Hang. Das macht einerseits den Hang etwas schwerer – das wäre noch nicht das Schlimme – aber es verringert die Reibung. Wir müssen also auch das Porenwasser beobachten und bei unseren Überlegungen beachten. Diese Größe hat in unserem Projekt bisher noch nicht ausreichend Berücksichtigung gefunden. Diese großen Hangbewegungen reagieren zwar manchmal auf Niederschlagsphasen, manchmal aber überhaupt nicht, oder sie bewegen sich beschleunigt, ohne dass große Regenereignisse aufgetreten wären.

F| Reden wir noch über die Zukunft, wie es weitergeht. Wo stehen Sie jetzt mit Ihrem Projekt und wo führt es hin? Was kann man mit diesen Ergebnissen tun? Verfügen Sie jetzt über bessere Möglichkeiten, die Bevölkerung rechtzeitig zu warnen?

BRÜCKL| Durch Extrapolationen mit verschiedenen Modellen haben wir errechnet, dass sich der Gradenbachhang in Zukunft noch stark beschleunigen wird. Es ist zu erwarten, wenn man diese bisher möglichen Modelle anwendet, dass im kommenden Jahrhundert ein weiterer Zuwachs der Bewegungsgeschwindigkeit stattfinden wird. Die jetzt installierten Geräte – und da in erster Linie die geodätischen Geräte – sind in der Lage, eine momentane Warnung auszugeben. Wir wissen, dass der Hang derzeit entlang einer Gleitfläche kriecht oder gleitet. Das ist eine Vorbedingung dafür, dass er überhaupt schnell werden kann. Und wir wissen aus vielen Beispielen, wie sich die Beschleunigung entwickelt, die schließlich zu einem Bruch in der Gleitfläche und zum rasanten Abrutschen führt. Eine Kriechgeschwindigkeit von einem Zentimeter pro Tag wäre schon eine kritische Situation. Mit dem bestehenden, am Hang installierten Monitoringsystem ist nicht zu erwarten, dass es Todesopfer gibt, weil man rechtzeitig, wenn auch nur kurzfristig, warnen könnte. Aber was wir nur sehr schlecht können, ist die langfristige Vorhersage. Wenn ich weiß, dass der Hang in 100 Jahren gefährlich werden kann, ist das vielleicht ein wesentlicher Punkt für die Raumplanung, nicht aber für einen aktuellen Katastropheneinsatzplan. Eine weitere Besonderheit des Gradenbachhangs ist, dass eine rasche Gleitung den Gradenbach absperrt und aufstaut. Ist der Druck des Stausees dann groß genug, um den natürlichen Damm zu durchbrechen, besteht höchste Gefahr für die darunter lebenden Menschen. In einem solchen

Nächste Seite | *Es ist das ureigenste Anliegen von Fritz Brunner, Ewald Brückl und Helmut Woschitz (von links nach rechts) in die Erde hineinzuschauen. Auf der Massenbewegung Gradenbach überprüfen sie eine geodätisch-seismologische Messstaion.*



Fall müsste man die Gefahrenzone räumen und abwarten, bis der Damm durchgebrochen und das Wasser abgeflossen wäre. Das Ziel unserer wissenschaftlichen Arbeit ist es, Planungen für den Fall einer solchen Rutschung zu machen. Man könnte schon heute einen Stollen an der Gefahrenstelle bauen, um den Bach um den zu erwartenden natürlichen Damm herum zu leiten und den gefährlichen Aufstau zu verhindern. Ein Aspekt unserer Forschung ist auch, dass wir bei plötzlichen Beschleunigungen von großen Massen nicht die Nerven verlieren und Kraftwerke, Betriebe oder Täler, durch verfrühte oder unnötige Evakuierungen lahmlegen. Das können wir nur verantworten, wenn wir wissen, dass eine bestimmte Situation nicht gefährlich ist. An diesem Wissen müssen wir noch arbeiten, und ich muss ehrlich sagen, ich bin derzeit froh, dass ich noch nicht gefordert bin, solche verbindlichen Aussagen zu treffen. Aber ich hoffe, dass ich zumindest einen Beitrag leiste, dass solche Aussagen in Zukunft getroffen werden können. Eine Hangbeschleunigung mit dem Faktor 10 muss noch lange nicht eine Katastrophe bedeuten, aber das muss man aufgrund seines Wissens sagen können.

BRUNNER| Nachdem Risikobewertung und Vorhersage von Katastrophen höchst wichtige aber auch sehr verantwortungsvolle Themen sind, möchte ich noch einmal die Beschleunigungen im Jahre 2001 anführen. Wir haben damals mit dem Landesgeologen von Kärnten Rücksprache gehalten und keine Warnung ausgegeben, weil sich der Hang plötzlich wieder beruhigt hat. Aber man muss diesen Aspekt auch in der sozialen Dimension sehen. Hätten wir die Warnung frühzeitig ausgegeben, vielleicht eine Woche früher, dann hätte man einige Dörfer evakuieren müssen, und, wie wir wissen, die Katastrophe wäre ausgeblieben. Wenn so ein Fehlalarm zu oft passiert – und zu oft ist vielleicht zwei bis drei Mal – dann reagieren die Menschen, wenn es kritisch wird, nicht mehr. Daher ist für uns dieses Verständnis des Hanges, was bewirkt die Beschleunigung und was verursacht wieder die Beruhigung, von absoluter Wichtigkeit und dient der sicheren Vorhersage von möglichen gefährlichen Ereignissen.

F| Herr Brückl, Sie haben zuvor geschildert, wie man mit seismischen Wellen in eine bewegte Felsmasse einige hundert Meter tief hineinschauen kann. Unsere Erde birgt aber noch tiefer liegende Geheimnisse, und ich glaube Sie sind einigen davon auf der Spur.

BRÜCKL| Sie sprechen hier die Erkundung der Erdkruste und des oberen Erdmantels mit seismischen Methoden an. Lassen Sie mich zu diesem Thema ein wenig ausholen. Bereits in der Frühzeit der Seismologie, im Jahr 1909, wurde aus der Analyse von Erdbebendaten die Grenze zwischen Erdkruste und Erdmantel, die Mohorovičić Diskontinuität, kurz Moho, in zirka 50 Kilometer Tiefe und vier Jahre später die Grenze zwischen Erdmantel und Erdkern in zirka 2.900 Kilometer Tiefe gefunden. Ein verfeinertes Bild der aus Erdkruste und oberstem Erdmantel bestehenden Lithosphäre ermöglichte die Untersuchung mittels Großsprengungen und temporär ausgelegter Miniseismographen. Beispiele hierfür sind die Projekte CELEBRATION 2000 und ALP 2002, an denen mein Forschungsteam und ich im Rahmen einer großen, internationalen und nationalen Kooperation maßgeblich beteiligt waren. Die Hauptlast der Finanzierung auf nationaler Ebene trug die ÖAW. Es wurden etwa 1.000 Miniseismographen vorprogrammiert und über ein Gebiet von 600 Kilometer mal 660 Kilometer von Polen im Norden bis Kroatien im Süden für die Zeitdauer einer Woche entlang von sich kreuzenden Profilen mit einer Gesamtlänge von 7.100 Kilometer ausgelegt. In den Nächten wurden 94 Großsprengungen abgetan und die abgestrahlten seismischen Wellen von den Miniseismographen aufgezeichnet. Energie und Reichweite der seismischen Wellen war beeindruckend. So konnte eine Sprengung bei Schärding in Oberösterreich noch an der Südspitze von Istrien gut beobachtet werden. Um diese hohe, einem kleinen Lokalbeben vergleichbare seismische Energie zu erzeugen, wurden 300 Kilogramm Sprengstoff, verteilt auf fünf Bohrungen mit 50 Meter Tiefe, gezündet. Wir haben die seismischen Daten sowohl entlang von Profilen ausgewertet, als auch in einem direkten Verfahren ein 3D Modell der Erdkruste und eine Karte der Grenzfläche zwischen Erdkruste und Mantel, also der Moho, generiert. Um die Fülle der seismischen Daten voll zu nutzen, haben wir auch zur Methodik der seismischen Auswerteverfahren Beiträge geleistet. Diese neuen Verfahren lassen sich auch auf die kleineren Objekte übertragen und wurden unter anderem bei der Erkundung der Massenbewegung Gradenbach erfolgreich angewandt.

> IN DEN NÄCHTEN WURDEN 94 GROSSSPRENGUNGEN ABGETAN UND DIE SEISMISCHEN WELLEN VON MINISEISMOGRAPHEN AUFGEZEICHNET.

F| CELEBRATION 2000 und ALP 2002 waren für den Geophysiker großartige und spannende Unternehmen. Den Laien interessiert aber besonders, welche neuen Erkenntnisse zur Gebirgsbildung oder zu aktuellen geologischen Vorgängen diese neuen Daten gebracht haben.

BRÜCKL| Im Vergleich zu den Westalpen war der tiefere Untergrund der Ostalpen bisher noch sehr unvollkommen erforscht. Unsere Karte der Moho zeichnet nun ein detailliertes Bild der Gebirgswurzel unter den Ostalpen mit einer maximalen Tiefe von 50 Kilometer. Die Moho zeigt auch eine markante Strukturierung, die der bereits bekannten Vorstellung, dass unter dem Alpenhauptkamm die Europäische Platte unter die Adriatische Platte abtaucht, entspricht. Neu hingegen ist die Entdeckung des Pannonischen Fragmentes. Dieser Teil der Lithosphäre liegt zwischen den Ostalpen im Nordwesten und den Dinariden im Südwesten und weicht dem vom Süden kommenden Druck der Adriatischen Platte sowie dem Eigengewicht der Ostalpen nach Osten hin in Richtung Pannonische Tiefebene aus. Dieses neue Bild der Tiefenstruktur der Ostalpen und ihrer angrenzenden geologischen Provinzen führte zu einer neuen Vorstellung über die aktive Tektonik. Während über viele Millionen Jahre die Periadriatische Naht, die Grenze zwischen Ost- und Südalpen, eine tektonisch hochaktive Zone darstellte, hat sich heute das tektonische Geschehen östlich der Hohen Tauern auf die Mur-Mürztal-Line, das Lavanttal und große, in der Richtung der Dinariden verlaufende Störungen verlagert. Die aktuelle Erdbebentätigkeit, sowie GPS-Messungen bestätigen diese Neustrukturierung der tektonischen Aktivität. Das in Abschluss befindliche Projekt ALPASS, „Alpine Lithosphere and Upper Mantle PASsive Seismic Monitoring", sowie das neu begonnene Projekt ALPAACT, „Seismological and Geodetic Monitoring of ALpine-PAnnonian ACtive Tectonics" sind darauf ausgelegt, unser Verständnis dieser tektonischen Vorgänge weiter zu vertiefen. •••

Michael Behm zeigt die seismische Abbildung der Grenze zwischen Erdkruste und Erdmantel entlang eines West-Ost-Schnittes durch Österreich und Ungarn.