Die Alpen – das ist die Front, an der die eurasische und die afrikanische Platte aufeinander prallen. Diese Winteraufnahme des Terra-Satelliten aus rund 700 Kilometer Höhe zeigt eindrucksvoll die starke Zerklüftung. Rot markiert: das „Tauernfenster", unter dem sich seit Jahrmillionen rätselhafte Dinge abspielen.

J. Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC

Geophysiker erforschen das Rückgrat Europas

Die Alpen-Spione

Wo jetzt klirrende Kälte herrscht und Eis und Schnee das Regiment führen, haben im Sommer Wissenschaftler schweißtreibende Arbeit verrichtet: Sie haben Hunderte Seismometer im Boden vergraben, um den Untergrund abzuhorchen. *bild der wissenschaft*-Autor Klaus Jacob war dabei

Obwohl noch früh am Morgen, ist es schon heiß an diesem Tag im August. Die Piste führt uns im Geländewagen hinauf zur Egger Alm in Kärnten, nicht weit von der italienischen Grenze. Die Fahrspuren sind ausgewaschen, im Auto schaukelt es wie auf dem Rücken eines Kamels. Es geht ein schroffes Tal hinauf, vorbei an vielen umgestürzten Bäumen, die der Sturm letzte Woche gefällt hat. Zum Glück haben die Waldbesitzer den Weg bereits freigesägt. Doch vor einer verschlossenen Schranke endet die Fahrt unvermittelt. Es heißt umkehren und den Berg von einer anderen Seite erklimmen. Das sind rund 30 Kilometer Umweg, unzählige weitere Kurven und eine gute Stunde Verlust.

Im Auto sitzen Michael Weber vom Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ), Professor für Geophysik an der Uni Potsdam, und der Seismologe Helmut Hausmann von der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Sie dürfen auf verbotenen Wegen fahren, denn sie haben eine wichtige Mission. Sie wollen hoch oben auf dem Berg eine Erdbebenstation installieren. Mehr noch: Das Gerät, das hinten im Kofferraum liegt, gehört zu einem gigantischen Projekt, dem „AlpArray".

Armada aus 600 Erdbeben-Sensoren

Geowissenschaftler aus acht Ländern – neben Deutschland sind auch Österreich, Italien, die Schweiz, Frankreich, Slowenien, Ungarn und Tschechien mit dabei – überziehen die Alpen samt dem Umfeld mit einem Netz von Seismometern, um das Gebirge nach allen Regeln der Kunst abzuhorchen. Insgesamt werden schließlich etwa 600 Erdbebensensoren Daten übermitteln, alle 40 bis 60 Kilometer einer, 23 sogar vom Grund des Ligurischen Meers aus. Etwa ein Drittel davon sind Permanentstationen, die bereits in Betrieb sind. Doch der größte Teil kommt neu hinzu, darunter auch die Unterwasser-Stationen, deren Installation besonders viel Aufwand erfordert.

Von dem Mammutprojekt, das sich allein Deutschland rund zehn Millionen Euro kosten lässt, habe er seit Jahren geträumt, sagt Geologie-Professor Mark Handy von der FU Berlin, der den deutschen Teil koordiniert: „Endlich hat es geklappt!" Es war schwierig, die Aktivitäten der beteiligten Länder aufeinander abzustimmen. Doch die größte Herausforderung ist die Auswertung der Unmengen an Daten. Handy vergleicht das Projekt deshalb mit einer Mondlandung.

Die Deutschen sind vor allem an einer Region in den Ostalpen interessiert, dem sogenannten Tauernfenster, wo der Unter-

Kompakt

- Beim europäischen Großprojekt „AlpArray" werden die Alpen erstmals tiefgründig und detailliert vermessen.
- Deutsche Wissenschaftler sind daran federführend beteiligt.
- Die Bundesrepublik lässt sich das Projekt 10 Millionen Euro kosten.

Auf der Egger Alm in Kärnten wird eine seismische Station errichtet. Sie ist eine von rund 600 des AlpArray-Projekts zur Vermessung der Alpen.

K. Jacob (Foto links); imago/Sven Simon (Foto rechts)

grund ungewöhnlich aktiv ist und wo sich rätselhafte Dinge abspielen. Der Name deutet an, dass man durch dieses „Fenster" tief ins Erdinnere blicken kann, ohne einen Bohrer anzusetzen. Noch aus 80 Kilometer Tiefe sind einzelne Gesteinspakete im Laufe der Jahrmillionen an die Oberfläche gelangt – und die Forscher fragen sich, warum. In dieser Region, einem Rechteck von 300 mal 100 Kilometern, haben die Experten des GFZ und etlicher anderer deutscher Hochschulen und Institutionen das Netz noch einmal verdichtet und stellen die Stationen, insgesamt 151 Stück, in einem Raster von 15 Kilometern auf. So dicht hat noch niemand ein derart großes Netz über ein ganzes Gebirge geknüpft.

Die Station auf der Egger Alm gehört dazu. Doch bevor die Feldarbeit beginnen kann, war eine aufwendige Vorbereitung nötig: Weber und sein Team haben das gewünschte 15-Kilometer-Raster über die Landkarte gelegt und realistische Punkte zum Aufstellen der Geräte ausgewählt. „Wir haben in Google Earth geschaut, was geht", sagt er. Ein Gipfel, eine Steilwand oder ein Stausee schieden von vornherein aus. Die Standorte sollten mit dem Geländewagen zu erreichen sein, aber trotzdem nicht weiter als einen Kilometer vom idealen Rasterpunkt entfernt liegen.

Heraus kam ein bunter Strauß von Herausforderungen – und Tausende Kilometer Autofahrt. Der höchste Punkt liegt immerhin 2900 Meter über dem Meer. Im zweiten Schritt ging es für mehrere Wochen auf Dienstfahrt. Die Besitzer des jeweiligen Geländes – Landwirte, Genossenschaften, Gemeinden, Unternehmen – mussten vorab ihre Zustimmung geben. Das war nicht immer leicht. Mancher Ansässige hatte Angst vor einer Technologie, die er nicht verstand. Doch „viele sind froh, dass sie helfen können", sagt Hausmann.

Ein schweres Beben und seine Folgen

Walter Krieber, der für die Egger Alm zuständig ist, gehört zu den Hilfsbereiten. An diesem warmen Sommertag sitzt er in der Almwirtschaft vor einem Bier, um erst einmal in Ruhe die Details zu besprechen. Über die Notwendigkeit von Erdbebenstationen muss ihn niemand aufklären. Er kann sich noch gut an das schwere Erdbeben von Friaul im Mai 1976 erinnern, kaum mehr als 50 Kilometer von seiner Heimat entfernt, bei dem fast 1000 Menschen starben. Es war so heftig, dass es sogar in der damaligen DDR zu spüren war und dort zur Gründung eines Erdbebendienstes führte. Das Haus von Walter Krieber wurde damals heftig durchgeschüttelt und bekam einen breiten Riss.

Krieber schlägt als Standort für das Seismometer eine gefasste Quelle vor, auf der ein Betonhäuschen steht, nur ein paar Hundert Meter von der Alm entfernt. Doch bei der Inspektion zeigt sich, dass hier ständig Wasser rauscht, was die Erdbebenaufzeichnungen stören würde. Also ziehen die Forscher 100 Meter weiter und wählen einen Platz direkt an der italienischen Grenze. Nur ein Schritt, und sie würden in Italien stehen.

Jetzt ist harte Handarbeit gefordert. Michael Weber, der als GFZ-Sektionsleiter sonst meist im Büro arbeitet, greift zu Hacke und Spaten. Die Zeit drängt. Denn alle Stationen sollen bis zum Einbruch des Winters installiert sein. Deshalb arbeiten mehrere GFZ-Teams parallel, jeweils mit zwei bis drei Forschern. Von den 151 vorgesehenen Geräten für das Tauernfenster haben sie bisher gerade 20 aufgestellt – eines davon in den Ötztaler Alpen, „nur ein paar Hundert Meter vom Fundort des Steinzeitmenschen ‚Ötzi' entfernt", wie Ben Heit berichtet, der eines der Teams leitet.

Die Stationen bleiben zwei Jahre im Gelände, dann haben sie ihre Pflicht erfüllt und werden wieder abgebaut. Die Wissenschaftler müssen deshalb beim Aufstellen nicht ganz so akribisch vorgehen wie bei einer Permanentstation. Das wäre bei der großen Zahl auch gar nicht möglich. Es genügt, die Seismometer einen halben bis einen Meter tief im Erdreich zu vergraben oder in einem erschütterungsfreien Keller auf den Betonboden zu stellen. Die Permanentstationen des österreichischen Erdbebendienstes stecken dagegen 100 Meter tief im Fels, oft in alten Stollen, weitab von jeder Vibration.

Erdbeben auf der Spur

Wozu der ganze Aufwand? Zum einen: Mit einer solchen Armada von Seismometern lassen sich Erdbeben viel besser lokalisieren und vermessen als bisher. Hausmann schätzt, dass man einen Bebenherd in Österreich mit einer Genauigkeit von einem halben bis einem Kilometer wird bestimmen können, vorher waren es rund fünf Kilometer: „Das ist eine große Verbesserung." Doch vor allem geht es darum, die Struktur der Alpen bis zur Erdmantelgrenze in etwa 60 Kilometer Tiefe und darunter zu erforschen. Wie es dort aussieht, interessiert nicht nur

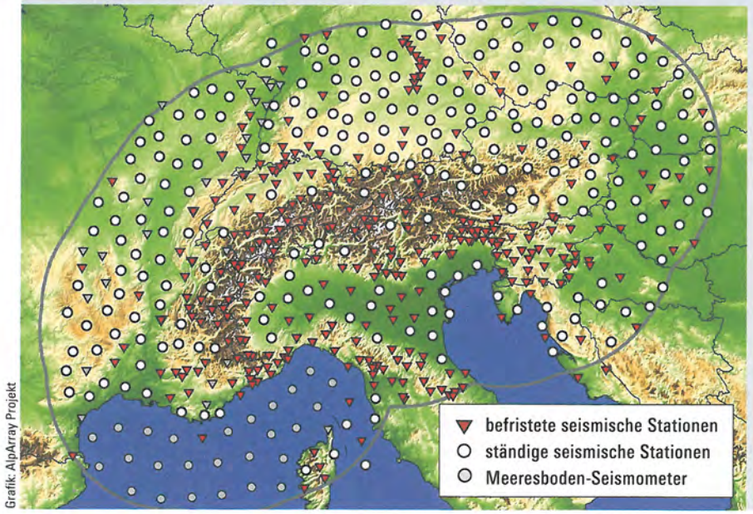
Das schwere Erdbeben im Friaul am 6. Mai 1976 machte 45 000 Menschen obdachlos.

AlpArray – Großprojekt mit 600 Horchposten

Noch nie wurden die Alpen so gründlich durchleuchtet wie beim Projekt AlpArray. Geophysiker, Geologen und andere Wissenschaftler von 64 Universitäten und Forschungseinrichtungen aus 17 Ländern beteiligen sich daran. Mit dabei sind Bosnien und Herzegowina, Bulgarien, Deutschland, Frankreich, Irland, Italien, Kroatien, Niederlande, Österreich, Polen, Rumänien, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Tschechien, Ungarn und die USA.

Grundlage ist ein engmaschiges Netz von rund 600 Erdbebenstationen, das von München bis Venedig reicht und von Marseille bis Graz. Sogar am Grund des Ligurischen Meeres stehen Geräte. Viele der Stationen arbeiten nur zeitlich befristet und werden nach wenigen Jahren wieder abgebaut. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert das Projekt mit rund 10 Millionen Euro, davon 2,7 Millionen für die Beschaffung von 100 neuen seismischen Beobachtungsstationen. Beteiligt sind Forscher der FU Berlin und der Universitäten von Bochum, Bremen, Frankfurt am Main, Kiel, Leipzig, Mainz, Münster und Tübingen sowie neben dem GFZ Potsdam auch das GEOMAR in Kiel, das Karlsruher KIT und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover.

Das Ziel ist, mithilfe der Laufzeiten von Erdbebenwellen die Struktur der Alpen bis in große Tiefe detailliert zu ergründen. Denn hier sind noch viele Fragen offen: Wie sind die Alpen entstanden, und wie entwickeln sie sich weiter? Welchen Einfluss haben Umwälzungen tief im Erdmantel auf die Erdoberfläche? Und – umgekehrt – was passiert in der Tiefe, wenn sich oben etwas ändert? Die Forscher erhoffen sich dadurch Aufschluss über die Entstehung vieler Gebirgsketten weltweit, denn die Alpen sind ein typischer Vertreter dieser Landschaftsform. Die Erkenntnisse werden auch dabei helfen, das Erdbebenrisiko besser einzuschätzen.



Grafik: AlpArray Projekt

K. Jacob (3)

Handfeste Forschung: Michael Weber, Professor für Geophysik an der Uni Potsdam (im schwarzen T-Shirt), und der österreichische Seismologe Helmut Hausmann haben eines der hochsensiblen Seismometer des AlpArray im Almboden versenkt. Davor mussten sie drei Löcher graben: In einem findet der Akku Platz (verpackt in orangefarbener Schutzfolie), in einem anderen der Datenspeicher und das GPS-Gerät (im grauen Kasten), und im dritten das kleine Seismometer. Das Ziel ist die Aufzeichnung von Erdbebenwellen, die verraten, wie es im Untergrund der Alpen aussieht.

Geowissenschaftler, sondern hilft auch, die Erdbebengefahr besser abzuschätzen. Dass es unter den Alpen rumort, weiß man nicht erst seit dem Friaul-Beben. In den letzten Jahrhunderten gab es immer wieder schwere Beben, etwa 1348 und 1690 bei Villach in Kärnten sowie 1571, 1572 und 1689 bei Innsbruck im Inntal.

Unten geht es drunter und drüber

Natürlich verrät der Blick in die Tiefe auch vieles über die Entstehung des gewaltigen Gebirges, des Rückgrats von Europa. Schüler lernen, dass die afrikanische Platte mit der eurasischen kollidiert und dass sich in der Knautschzone über Jahrmillionen die Alpen aufgetürmt haben. Wie zwei gigantische Eisschollen haben sich die beiden Gesteinsmassen ineinander verkeilt.

Doch je genauer die Experten hinschauen, desto rätselhafter wird das Ganze: Offenbar geht es in der idyllischen Urlaubsregion drunter und drüber. Da gibt es nicht nur zwei große tektonische Platten, die aufeinanderprallen, sondern auch mehrere Mikroplatten, die sich unter- und übereinander schieben und sich dabei mitunter auch noch verdrehen.

Mehr noch: Gesetzmäßigkeiten, die Geowissenschaftler als Faustregeln ansehen, gelten in den Alpen einfach nicht. Bisher ging man davon aus, dass die spezifisch schwere ozeanische Lithosphäre – sie besteht aus Erdkruste und oberem Erdmantel – bei einer Kollision von tektonischen Platten stets unter die leichtere kontinentale Lithosphäre sinkt und ins Erdinnere abtaucht – „subduziert", sagen die Geowissenschaftler. Doch im Tauernfenster scheint es ganz anders zu sein, wie ein Blick auf die gehobenen Schichten aus der Tiefe verrät.

Die Forscher haben Anzeichen dafür gefunden, dass sich die Subduktion hier sogar umgedreht hat: Bis vor rund 30 Millionen Jahren schob sich die eurasische Platte unter die adriatische Mikroplatte – ein Sporn an der afrikanischen Platte. Dann, nach einer Pause von rund 10 Millionen Jahren, ging es andersherum. Die Experten rätseln, wie das möglich ist. „Das wäre eine kleine Revolution", sagt Handy. Die Erdbebengefahr habe durch diesen seltsamen Wechsel deutlich zugenommen. Das Friaul-Beben von 1976 hält er für eine Folge davon.

Und noch ein Rätsel: Nur im Osten des Tauernfensters hat sich die Subduktion umgekehrt, im Westen blieb dagegen alles beim Alten. Darauf deuten die spärlichen Daten hin, die mit dem herkömmlichen weitmaschigen Seismometernetz ermittelt wurden. Das neue Projekt soll nun Gewissheit bringen.

Die Erde wird geröntgt

Natürlich ist es nicht leicht, den steinernen Untergrund zu durchleuchten. Das dabei verwendete Verfahren heißt seismische Tomografie. Es ähnelt der Computertomografie, mit der Röntgenärzte den menschlichen Körper scannen: Radiologen schießen viele Röntgenbilder aus unterschiedlichen Richtungen und überlagern sie mit Computerhilfe. So bekommen sie ein räumliches Bild der Knochen oder des Gewebes.

Allerdings haben sie es wesentlich leichter als die Geowissenschaftler. Denn sie wissen recht genau, was sie wo erwartet. Im menschlichen Körper gibt es kein Organ, das nicht vielfach vermessen wurde. Die Erde hat dagegen noch niemand aufgeschnitten. Die tiefsten Bohrungen reichen gerade zwölf Kilometer weit – das ist nicht mehr als ein Mückenstich in die dünne Erdkruste. Erkenntnisse über das tiefe Erdinnere lassen sich deshalb nur indirekt gewinnen, was die Ergebnisse der Seismologen vieldeutig macht.

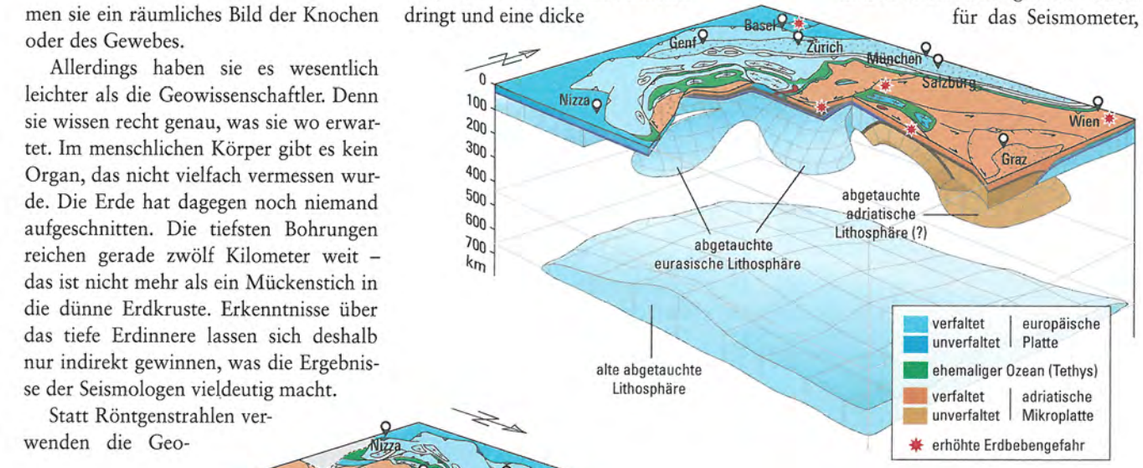
Statt Röntgenstrahlen verwenden die Geowissenschaftler Erdbebenwellen, die durch die Erde laufen. Ein heftiges Erdbeben in Japan oder China ist in Europa zwar für Menschen nicht spürbar, lässt aber sämtliche Alpen-Stationen erzittern. Denn die Erschütterungswellen wandern durch die ganze Erde.

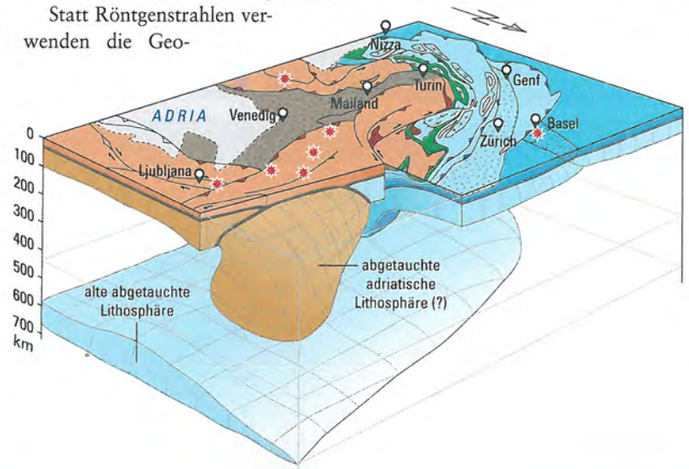
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt dabei von vielen Faktoren ab. Die Dichte des Gesteins spielt ebenso eine Rolle wie seine Temperatur oder die Ausrichtung der Minerale darin. Mit viel Rechenleistung lässt sich aus den Laufzeiten der seismischen Wellen auf die Beschaffenheit des Erdinneren schließen. Und: Je mehr Stationen, desto genauer die Ergebnisse. Die Geowissenschaftler hoffen, mit ihrem Netz ein räumliches Bild des Untergrunds mit einer Auflösung von rund fünf Kilometern zu erhalten.

Gerüstet für den Winter

Aber so weit ist es noch lange nicht. Jetzt auf der Alm heißt es, die Geräte aufzustellen. Bei herrlichstem Sonnenschein müssen die Forscher an den Winter denken, wenn Frost tief ins Erdreich dringt und eine dicke Schneeschicht alles zudeckt. Außerdem müssen sie beachten, dass es hier oben weder Strom noch Handyempfang oder Internet gibt. Die gewonnenen Daten lassen sich deshalb nicht online an eines der europäischen Datenzentren – etwa das GFZ in Potsdam – schicken, was die Auswertung erheblich erleichtern würde.

So vergraben die beiden Geowissenschaftler im weichen Almboden neben dem Seismometer auch einen leistungsstarken Akku von der Größe einer Autobatterie sowie einen großen Datenspeicher. Auch ein GPS-Gerät gehört zum Paket. Es ermittelt nicht nur die exakten Ortskoordinaten, sondern auch die aktuelle Uhrzeit. Mit diesem Equipment arbeitet die Station vollkommen autark. Das ist wichtig: Denn im Winter, wenn die Zufahrtswege unpassierbar sind, gibt es keine Möglichkeit für Reparaturen oder andere Eingriffe. Jeweils nach einem halben Jahr, im Frühjahr und im Herbst, wenn es die Schneelage zulässt, wird ein Team vorbeikommen und die Daten auslesen. Das heißt: Die Geowissenschaftler müssen drei Löcher graben – eines für das Seismometer,





Grafiken: Mark R. Handy, FU Berlin

Unter den Alpen knirscht es gewaltig. Die Computermodelle zeigen das aktuelle Bild des alpinen Untergrunds, das der Geologe Mark Handy mithilfe von seismischen Daten erstellt hat. Es gibt den Forschern noch viele Rätsel auf, die das AlpArray-Projekt lösen soll. Was hat es zum Beispiel mit dem abgetauchten Lithosphärenstück auf sich? Stammt es wirklich von der adriatischen Mikroplatte, wofür einige Indizien sprechen? Ein Blick auf die Alpen aus südöstlicher Richtung (oben) und aus nordöstlicher Richtung (links) zeigt das Geschiebe im Untergrund, das zu starken Erdbeben führen kann.

K. Jacob

Test: Funktioniert alles? Durchaus – nur hat eine neugierige Kuh zwei Seismogrammspuren auf dem Bildschirm kippen lassen, weil ihr Gewicht den Boden minimal in Schieflage gebracht hat. So sensibel ist das Gerät. Die Qualität der Aufzeichnungen beeinträchtigt das aber zum Glück nicht.

eines für den Akku und eines für die Elektronik.

Das Seismometer ist überraschend leicht und klein – kaum größer als eine Vesperdose. Sein Funktionsprinzip hat sich in den letzten hundert Jahren nicht geändert: Ein Gewicht ist frei schwingend aufgehängt. Bei einer Erschütterung bewegt sich das Gehäuse, während das Gewicht durch seine Trägheit in Ruhe bleibt. Um selbst schwache Signale registrieren zu können, hat man das Pendel früher immer schwerer gemacht. In Göttingen wurde 1904 ein Seismometer mit einem 17-Tonnen-Pendel aufgestellt. Eine ausgeklügelte Mechanik übertrug die Schwingungen auf einen Stift, der auf eine endlose Papierrolle die bekannten Zackenmuster malte.

Leistungsstarkes Leichtgewicht

Die Digitalisierung hat die Geräte abgespeckt. Das Leichtgewicht, das Geophysiker Michael Weber aus dem Kofferraum holt, ist trotz seiner geringen Abmessungen bedeutend leistungsfähiger als der historische Koloss. „Es registriert sogar, wenn eine Ameise darüber läuft", sagt Weber. Das Gerät kann selbst winzige Bewegungen von 10 Angström wahrnehmen, das sind gerade mal 0,000 001 Millimeter. Aber auch bei schweren Erschütterungen im Zentimeterbereich liefert es noch verlässliche Daten. Man spricht deshalb von einem Breitbandseismometer.

Mit der alten Papieraufzeichnung wäre das undenkbar – man bräuchte kilometerbreite Rollen, um sowohl schwache als auch starke Signale aufzeichnen zu können. Natürlich muss das Gerät exakt ausgerichtet werden. Weber betoniert deshalb eine kleine Marmorscheibe horizontal als Fundament ins Loch. Das Gerät platziert er darauf in Nord-Süd-Richtung.

Ein erschütterndes Rindviech

Als schließlich alle Teile – Seismometer, Akku, GPS und Datenspeicher – an ihren Plätzen sind, folgt die Generalprobe: Hausmann schließt einen Laptop an, der die gewonnenen Daten anzeigt. Auf dem Bildschirm erscheinen drei Linien, für jede Raumrichtung eine. Ein Stampfen auf den Boden bringt sofort Bewegung in das Bild und führt zu wilden Ausschlägen.

Wie sensibel das Gerät arbeitet, zeigt sich bei einem Zufallstest: Als eine Kuh neugierig herantrottet und in der Nähe stehen bleibt, verlassen zwei der drei Linien die Horizontale, gehen auf Berg- und Talfahrt und schneiden sich. Hausmann erklärt, warum: Das Gewicht des Rindviechs hat den Untergrund in Schieflage gebracht, wenn auch nur minimal.

Zum Schluss schüttet Weber die Löcher wieder zu, und von den Geräten ist nichts mehr zu sehen. Doch um zu verhindern, dass jemand neugierig nachschaut, was da verbuddelt wurde, steht noch eine weitere schweißtreibende Arbeit an: ein Zaun. Massive Pflöcke und schwere Bretter liegen schon bereit. Weil sich die Kühe gerne daran reiben, ist eine robuste Ausführung geboten.

Und tatsächlich: Gegen Abend kommt das Vieh die Almwiese hochgetrottet, erst die Pferde, dann die Kühe. Neugierig glotzen sie auf das kleine eingezäunte Karree. Berührungsängste haben sie nicht. Auch das Auto inspizieren sie sehr genau. Als letzte Arbeit klebt Hausmann noch einen Zettel an die obere Zaunlatte, um Wanderer über den Sinn dieser Einrichtung zu informieren und vom Graben abzuhalten.

Zwei Jahre lang werden die Stationen alle Erschütterungen registrieren. Die Datenflut zu bearbeiten, wird dann noch ein paar Jahre dauern – bis es fertig ist: das neue Bild der Alpen. ●

Inzwischen ist es Winter geworden und alle Stationen sind installiert. KLAUS JACOB wird in *bild der wissenschaft* über die Ergebnisse der Forschungen berichten.