

Tektonik und Klima am Beispiel der Anden

Onno Oncken

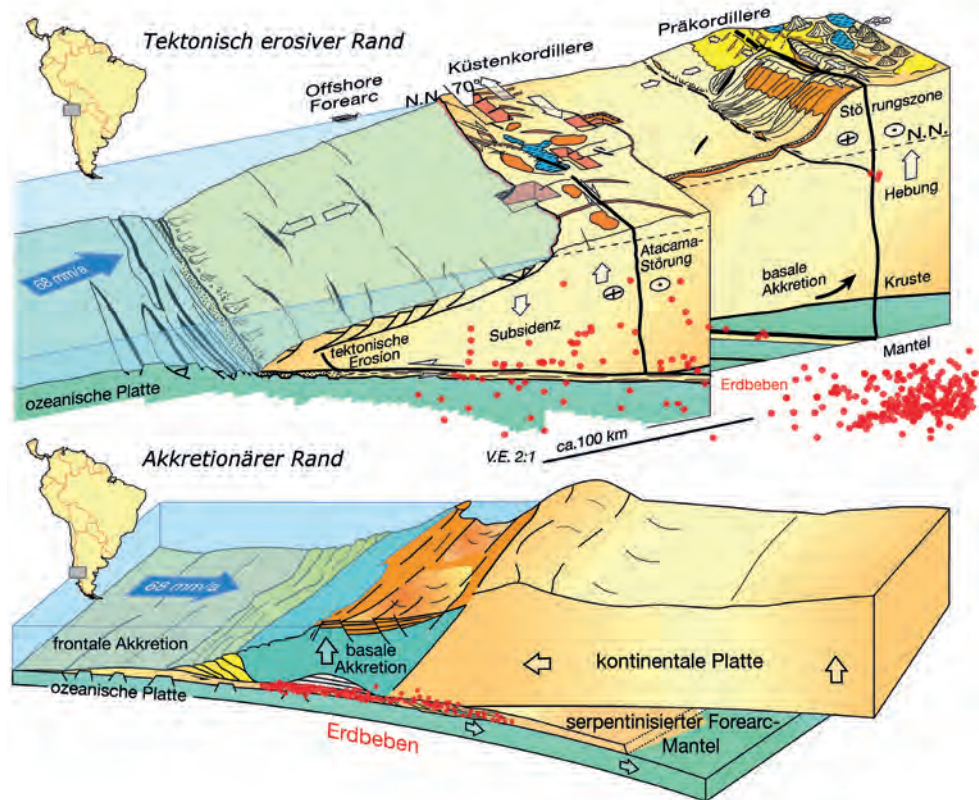
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Tectonics influences the climate, directly and indirectly. It is well known that high mountain ranges of the Earth have a direct effect on the global atmospheric circulation. In addition, the global oceanic circulation – and, thus, the climate – would look very different without the mid-ocean ridges and the passages between the continents. The reverse statement, however, that the climate in turn influences tectonics is not quite so obvious. Only the scientific results in recent decades have been able to verify this. The interplay of finely tuned processes rich in complex feedback and control mechanisms interacting within System Earth shows that a purely meteorological definition of climate, i.e. the mean of 30 years of atmospheric parameters, takes too narrow a view. Climate processes take place on a gigantic spectrum of scales in time and space. In geological time scales the climate plays an important role in tectonics and indirectly even contributes to the distribution and patterns of strong earthquakes at today's plate margins.

Anden-Hochplateau und Azufre-Vulkan



Es ist bekannt, dass die Hochgebirge der Erde direkt auf die globale atmosphärische Zirkulation wirken. Ebenso sähe auch die globale ozeanische Zirkulation, und damit das Klima, ohne die mittelozeanischen Rücken und Passagen zwischen den Kontinenten anders aus. Die umgekehrte Aussage aber, dass das Klima seinerseits die Tektonik beeinflusst, ist nicht ganz so selbstverständlich. Erst die Forschungsergebnisse der letzten Dekaden haben diese Einsicht verifizieren können. In geologischen Zeiträumen spielt das Klima eine wichtige Rolle in der Tektonik und wirkt sogar indirekt auf die aktuelle Erdbebenaktivität an den heutigen Plattenrändern zurück.



Die Anden

Mit den sich auf 7500 km Länge erstreckenden Anden beherrscht der pazifische, konvergente Plattenrand Südamerikas das weltweit längste, durch aktive Subduktionsvorgänge gebildete Gebirge. Als einzige subduktionsgesteuerte Kordillere durchqueren die Anden eine Vielzahl von Zonen, an denen sowohl klimagesteuerte Randbedingungen als auch die Geometrie der Subduktionszone und die Subduktionsgeschwindigkeit systematisch über einen großen Bereich variieren.

Dies wird besonders bei einer Gegenüberstellung der ausladenden Zentralen Anden und der sehr schmalen Pata-

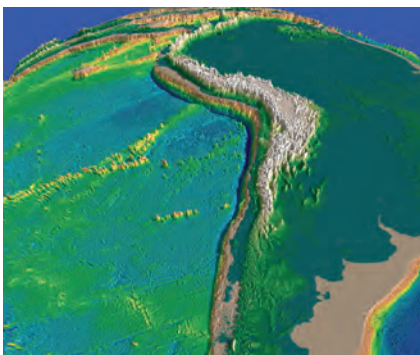


Abb. 1: Die Topographie des südamerikanischen Plattenrands

Fig. 1: The topography of the South American plate margin

Abb. 2: Blockbilder des südamerikanischen Plattenrands von Nordchile (a) und Südchile (b) zeigen völlig unterschiedliche Strukturen mit Subduktionserosion von der Plattenbasis im Norden und der Bildung eines Akkretionskeils im Süden.

Fig. 2: Block diagrams of the South American plate margin of Northern Chile (a) and Southern Chile (b) show completely different structures, with subduction erosion from the base of the plate in the north and formation of an accretionary wedge in the south

gonischen Anden deutlich (Abb. 1). Die Höhe und Breite des Orogens ist im zentralen Bereich mit rund 4 bis 6 km bzw. 800 km wesentlich größer als im Süden und Norden mit etwa 2 bis 4 km bzw. 200 bis 300 km.

In den Zentralen Anden hat sich seit dem Eozän (55 bis 38 Mio. Jahre vor heute) östlich des Vulkanbogens unter starker Krustenverkürzung das breite, im Mittel 3,8 bis 4,5 km hohe Altiplano-Puna herausgehoben, das nach dem Tibetplateau das zweitgrößte Hochplateau der Erde ist. Die Krustendicke nahm dabei auf über 70 km Dicke zu (Abb. 2).

Im Süden, in den Patagonischen Anden, fehlt ein solches Plateau. Damit geht dort eine Abnahme der Krustendicke von 70 km unter den Zentralen Anden auf rund 40 km unter den Südanden einher, die selbst nur noch eine mittlere Höhe von ein bis zwei Kilometern erreichen.



Kontakt: O. Oncken
(oncken@gfz-potsdam.de)

Klima und Tektonik: der Baustil der Anden

Woher kommt dieser ungleichmäßige Aufbau? Einerseits ist er durch die tektonischen Prozesse der Plattenkollision selbst bedingt, andererseits werden diese wiederum entscheidend durch das Klima beeinflusst. Obwohl in den Patagonischen Anden im Süden des Kontinents grundsätzlich dieselben Prozesse an und in der Subduktionszone ablaufen wie in den Zentralen Anden, verhält sich dieser südliche Bereich völlig anders (Abb. 3).

Mangels Niederschlägen im trockenen Klima der Zentralen Anden findet nur wenig Erosion statt, hier wird das Gebirge kaum abgetragen. Die Tiefseerinne vor den Zentralen Anden ist darum nahezu sedimentfrei. Im westlichen Altiplano und in der Atacamawüste fällt die extrem geringe Niederschlagsmenge von weniger als 50 mm im Jahr; daher wird hier seit mindestens 30 Millionen Jahren kaum noch Material durch Niederschläge erodiert und in die Tiefsee transportiert.

An der Westflanke der Südanden hingegen wird bei feuchtem Klima mit Niederschlägen von mehr als 3000 mm pro Jahr sehr viel Gesteinsmaterial erodiert, ins Meer geschwemmt und im Tiefseegraben abgelagert. Da aber die südamerikanische Platte in Richtung Westen vorrückt, wird dieses Sediment gewissermaßen abgeschert und häuft sich zu einem akkretionären Sedimentkeil vor der Südamerikaplatte an.

Logischerweise ist dieser Vorgang der Materialanlagerung durch Abschürfen der ozeanischen Sedimente nur dort möglich, wo genügend Sedimentmaterial bereitsteht. Fehlen solche Sedimente im Tiefseegraben, wie es weiter nördlich vor den Zentralanden der Fall ist, wird die Basis der Oberplatte bei laufender Subduktion buchstäblich von unten abgehobelt.

Daraus erklärt sich bereits bis zu einem gewissen Grad das unterschiedliche Verhalten der Zentralen Anden und der Südanden: ihm liegt eine enge Wechselwirkung von Klima und Tektonik zugrunde. Weltweite Vergleichsdaten deuten an, dass eine Sedimentfüllung des Tiefseegrabens von etwa 1 km Dicke notwendig ist, um Akkretion in Gang zu setzen. Bei einer geringeren Mächtigkeit wird das gesamte Sediment subduziert und mitsamt der subduzierenden Platte in die Tiefe transportiert. Am südamerikanischen Rand lässt sich beispielhaft zeigen, dass tektonische Akkretion nach Norden hin von tektonischer Erosion abgelöst wird. Die Südanden besitzen einen kleinen Keil aus tektonisch angelagerten Sedimenten an der untermeerischen Front des Kontinentalrandes. Ein weiterer Teil wird subduziert. Der Plattenrand vor den Zentralen Anden hingegen gilt inzwischen als Typvertreter, an dem tektonische Erosion dominiert. Hier ist seit dem Jura (140 bis 200 Mio. Jahre vor heute) ein über 200 km breiter Streifen kontinentaler Kruste vernichtet worden.

Das hat Folgen für die Erdbebenaktivität. An einer Subduktionszone überträgt sich die kinetische Energie der mit einigen Zentimetern pro Jahr driftenden ozeanischen Platten auf die kontinentale Platte. Die Festigkeit der Subduktionszone der Südanden, ihre Reibung und Viskosität, steuert nicht nur die Art des Akkretionsverhaltens am Plattenrand, sondern wahrscheinlich auch die Intensität der seismischen Aktivität. Wichtige Größen dabei sind der Wärmehaushalt, der Wassergehalt und die stoffliche Zusammensetzung der Gesteine, aus denen die ozeanische und die kontinentale Kruste bestehen.

Das aride Klima der Nord- und Zentralanden hingegen lässt kein Sediment entstehen, daher raspelt die Nazca-Platte hier die kontinentale Kruste ab. Die dabei stark erhöhte Reibung überträgt ihrerseits eine höhere Kraft, die das Andenplateau

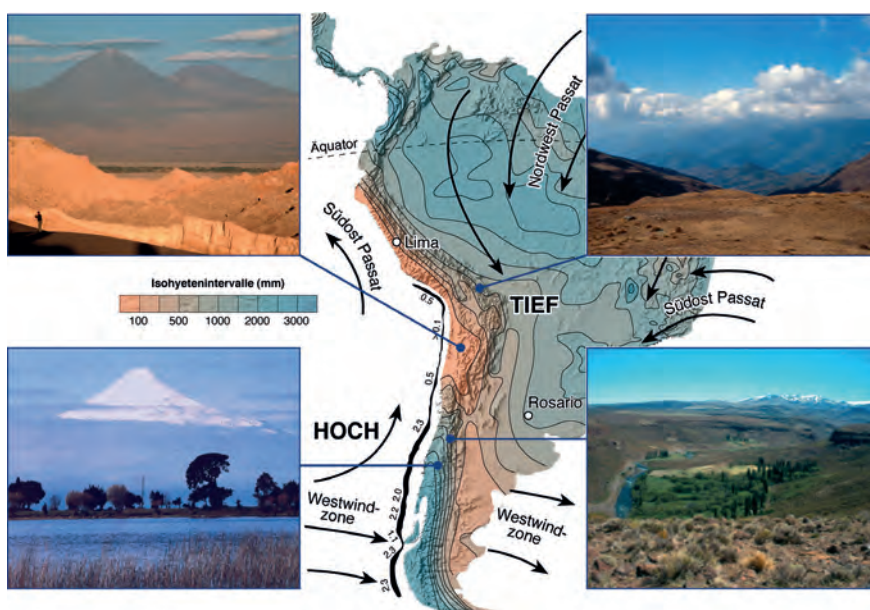


Abb. 3: Die atmosphärische Zirkulation über Südamerika und die Verteilung der Niederschläge (braun: niedrige Niederschlagsraten; blau: hohe Niederschläge). Die Bilder zeigen jeweils die stark kontrastierenden Verhältnisse an der Andenwestflanke mit dem Vulkanbogen und die Andenostflanke. Die Sedimentdicke im Tiefseegraben im Pazifik vor der Küste (Maßeinheit in Kilometern Sedimentdicke) korreliert eng mit der Niederschlagsverteilung.

Fig. 3: Atmospheric circulation over South America and the distribution of precipitation (brown: low rainfall rates; blue: high rainfall). The images show the highly contrasting conditions on the western flank of the Andes with its volcanic arc, and the eastern flank of the Andes. The thickness of the sediment in the deep-sea trench off the Pacific coast (sediment thickness is given in kilometres), closely correlates with the precipitation pattern.

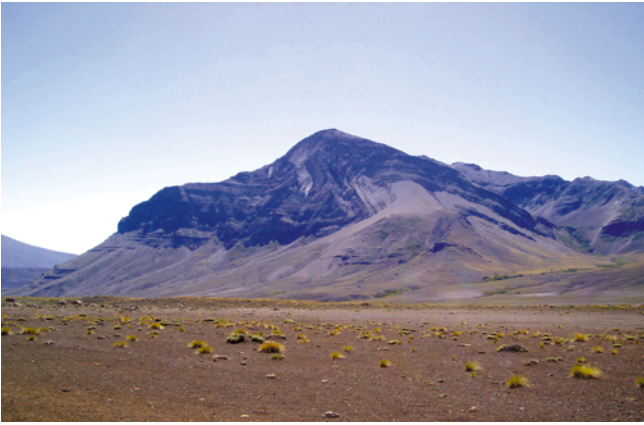


Abb.4: Das aride Klima der Zentralanden in der Nähe der Faltung bei Antuco (Chile), (Foto: H. Echlter, GFZ)

Fig. 4: The arid climate of the Central Andes near Antuco, Chile

in die Höhe und Breite wachsen lässt. Das wiederum verstärkt den Regenschatten an der Westseite der Anden und verringert die Erosion zusätzlich. Am stärksten ist die Herausbildung des Plateaus im ariden Bereich zwischen etwa 16° und 28° südlicher Breite.

Auf der landwärtigen, östlichen Seite der Anden tragen die Prozesse der Subduktionszone ein anderes Gesicht. Subtropischen Niederschlägen mit erheblicher Erosion in den Nordanden steht im zentralen Bereich und im Süden eine semiaride Ostseite mit nur sehr begrenzter Erosion gegenüber.

Das recht junge Alter des Akkretionskeils vor den Patagonischen Anden im Süden des Kontinents weist indes darauf hin, dass ein solch gleichmäßiges Zusammenspiel zwischen Gebirge und Klima nicht immer vorlag. Die großen Sedimentmengen, aus denen der gegenwärtige Akkretionskeil vor Südchile aufgebaut ist, wurden erst seit Beginn der Vergletscherung der Patagonischen Anden vor etwa sechs Millionen Jahren vom Gebirge abgetragen und in den Tiefseegraben verfrachtet, wo heute eine Sedimentdecke von mehr als 2 km Mächtigkeit liegt (Abb. 2). Ein tektonischer Systemwechsel: Die Südanden waren zunächst erosiv, erst die Vergletscherung und die Niederschläge machten sie durch den Sedimenttransport in den Tiefseegraben akkretionär.

Der Zusammenhang von Klima und Tektonik als entscheidende Ursache für die Bildung und den Lebenszyklus von aktiven Gebirgen wie den Anden wird also maßgeblich von der Intensität der Erosion und damit letztlich von der Atmosphäre gesteuert. Mit höherer Erosion, mächtigeren Sedimenten und schwächerer Kopplung der Platten wiederum schwindet die Möglichkeit, durch Konvergenz Deformation zu erzeugen. Es handelt sich mithin um einen negativ rückgekoppelten Regelkreis. Über diesen Regelkreis hat folglich die Vereisung der Südanden seit dem Pliozän (5,3 bis 2,6 Mio. Jahre vor heute) mit der sprunghaften Zunahme der Erosionsbeträge – als klimagesteuerte äußere Störung des Systems – indirekt Einfluss genommen auf die Entwicklung des südamerikanischen Plattenrands und seiner Deformation in der jüngsten Zeit.



Abb. 5: Hoher Niederschlag und fruchtbare Vegetation: Blick vom Längstal auf die südchilenische Hauptkordillere mit dem Vulkan Llaima, (Foto: H. Echlter, GFZ)

Fig. 5: High precipitation and lush vegetation: View of the longitudinal valley of the main South Chilean cordillera with Llaima Volcano

Weiterführende Literatur

- Stefer [Blumberg], S., Lamy, F., Arz, H. W., Echlter, H., Wiedicke, M., Haug, G., Oncken, O. (2008): Turbiditic Trench Deposits at the South-Chilean Active Margin: A Pleistocene-Holocene Record of Climate and Tectonics. - *Earth and Planetary Science Letters*, 268, 3-4, 526-539, 10.1016/j.epsl.2008.02.007.
- Boutelier, D., Oncken, O. (2010): The role of the plate margin curvature in the plateau buildup: Consequences for the central Andes. - *Journal of Geophysical Research*, 115, B04402, 10.1029/2009JB006296.
- Hoth, S., Kukowski, N., Oncken, O. (2008): Distant effects in bivergent orogenic belts - How retro-wedge erosion triggers resource formation in pro-foreland basins. - *Earth and Planetary Science Letters*, 273, 1-2, 28-37, 10.1016/j.epsl.2008.05.033.
- Melnick, D., Echlter, H. (2006): Inversion of forearc basins in south-central Chile caused by rapid glacial age trench fill. - *Geology*, 34, 9, 709-712, 10.1130/G22440.1.
- Moreno, M., Rosenau, M., Oncken, O. (2010): 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. - *Nature*, 467, 7312, 198-202, 10.1038/nature09349.
- Oncken, O., Sobolev, S. V., Stiller, M., Asch, G., Haberland, C., Mechie, J., Yuan, X., Lüchen, E., Giese, P., Wigger, P., Lueth, S., Scheuber, E., Götze, H.-J., Brasse, H., Buske, S., Yoon, M.-K., Shapiro, S., Rietbrock, A., Chong, G., Wilke, H.-G., Gonzales, G., Bravo, P., Vieytes, H., Martinez, E., Rössling, R., Ricaldi, E., ANCORP Working Group (2003): Seismic imaging of a convergent continental margin and plateau in the central Andes (Andean Continental Research Project 1996 (ANCORP'96)). - *Journal of Geophysical Research*, 108, B7, 2328, 10.1029/2002JB001771.
- Sobolev, S. V., Babeyko, A. Y. (2005): What drives orogeny in the Andes? - *Geology*, 33, 8, 617-620, 10.1130/G21557.1.
- Vietor, T., Oncken, O. (2005): Controls on the shape and kinematics of the Central Andean plateau flanks: Insights from numerical modeling. - *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 3-4, 814-827, 10.1016/j.epsl.2005.06.004.
- Yuan, X., Sobolev, S. V., Kind, R., Oncken, O., Bock, G., Asch, G., Schurr, B., Graeber, F., Rudloff, A., Hanka, W., Wylegalla, K., Tibi, R., Haberland, C., Rietbrock, A., Giese, P., Wigger, P., Röwer, P., Zandt, G., Beck, S., Wallace, T., Pardo, M., Comte, D. (2000): Subduction and collision processes in the Central Andes constrained by converted seismic phases. - *Nature*, 408, 6815, 958-961, 10.1038/35050073.