

Freitag 20. Oktober 2017

10:00-10:30

Untertagebau in Chile – ein geologisch-tektonischer Abriss aus den Zentralanden (33° - 35°S)

Steffen Bauer ¹, Mathias Bischof ²

¹ Skava Consulting S.A., Matilde Salamanca 736, Santiago de Chile

² Skava Consulting ZT GmbH, Grabenweg 68, 6020 Innsbruck

Einleitung

Das lateinamerikanische Land Chile ist vor allem als der weltgrößte Kupferexporteur bekannt, rund 40% der weltweiten Kupfervorkommen stammen aus Chile. Aufgrund der nahezu einzigartigen geologischen Situation des Landes stellen für Geologen besonders die Untertagebau-Projekte immer wieder neue Herausforderungen dar. Doch nicht nur in die Kupferindustrie, auch in teils bedeutende Energieversorgungs- und Infrastrukturprojekte wird in Chile investiert.

Der vorliegende Beitrag berichtet von Erfahrungen bei Untertagebauprojekten in tertiären Vulkaniten in den Zentralanden Chiles (33°-35°S).

Geologisch-tektonischer Überblick

Chile befindet sich in unmittelbarer Nähe des Kontinentalrandes auf der südamerikanischen Platte. Die Nazca-Platte taucht entlang des Chile-Grabens, welcher sich in rund 100-130 km Entfernung N-S entlang der Küstenlinie befindet, unter die südamerikanische Platte ab. Die subduzierte Nazca-Platte und die nach Westen überschobene südamerikanische Platte bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von rd. 8,0 cm/a aufeinander zu. Begleitet wird diese Subduktion auch immer noch von aktivem, rezentem Vulkanismus, welcher sich ungefähr auf die Region südlich von Santiago (33°S) beschränkt. Dies steht im Zusammenhang mit einem deutlich steileren Abtauchwinkel der Subduktionszone bzw. Abtauchen der Nazca-Platte südlich dieser Linie mit rund 35° Neigung während die Platte im Norden davon deutlich flacher abfällt (Armijo et al., 2010). Die meisten seismischen Aktivitäten, welche v.a. zu Schäden bzw. schweren Erdbeben auf dem Festland führen, sind zu einem großen Teil an den Bereich entlang der flacheren Subduktionszone im Norden des Landes gebunden. Hier liegen die entsprechenden Epizentren in seichteren Tiefen.

Im Bereich um Santiago ist die Seismizität durch die folgenden seismogenen Quellen gekennzeichnet:

- (a) „Interplate thrust“ Events mit Epizentren entlang des Tiefseegraben in einer Tiefe zwischen 15 und 50 km.
- (b) „Intraplate“ oder „In-Slab-Events“, entlang der Subduktionszone mit Epizentren tiefer als 50 km.
- (c) „Cortical“ oder „crustal earthquakes“, innerhalb der Kontinentalplatte mit geringen Tiefen und stehen im Zusammenhang mit Regionalstörungen
- (d) „Outer-rise“ oder offshore Erdbeben innerhalb der ozeanischen Platte.

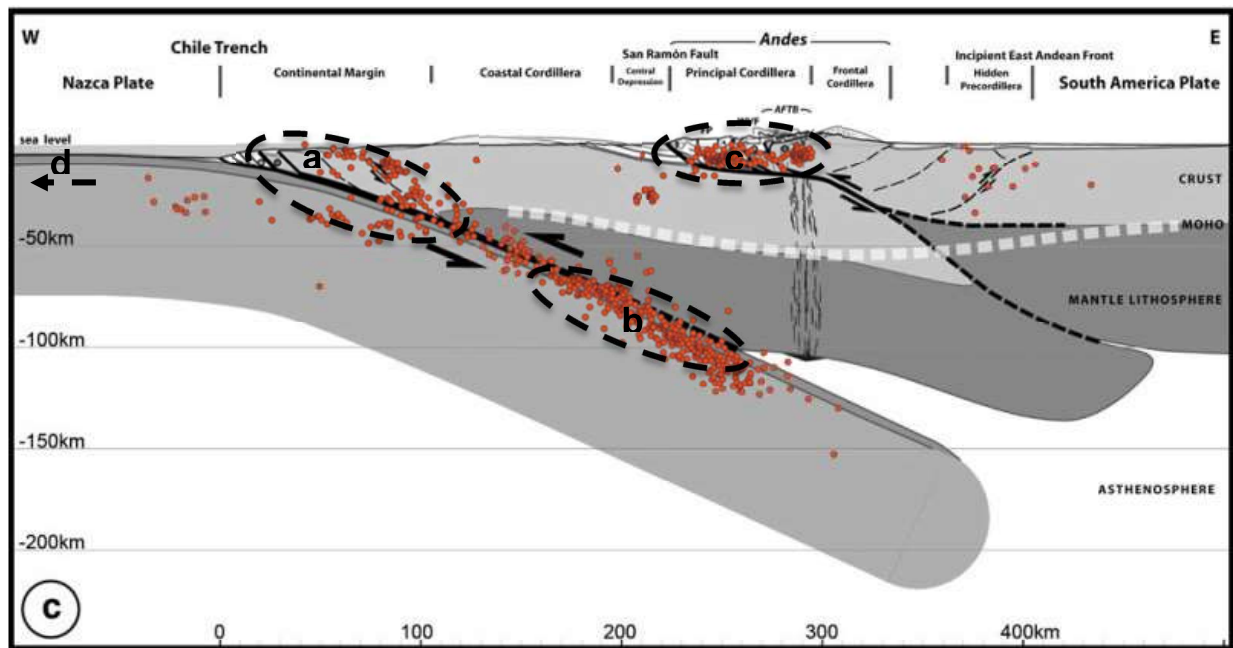


Abb. 1: Plattentektonische Übersicht mit seismogenen Quellen (aus Armijo et al., 2010)

„Interplate Events“ ist der häufigste Erdbeben-Typ in Chile. Dieser ist verantwortlich für die stärksten je aufgezeichneten Erdbeben der Geschichte, wie z.B. das Erdbeben von Valdivia in 1960 mit einer Magnitude von M_w 9.5, oder in Maule 2010 mit einer Magnitude von M_w 8.8. Beeindruckend ist, dass diese Erdbeben meist keine großen Massenbewegungen auslösen, sondern nur kleinere Felsstürze. Historische Aufzeichnungen hingegen zeigen, dass größere Massenbewegungen und Felsstürze eher von Erdbeben in seichten Tiefen mit kleineren Magnituden des Typs „cortical“ oder „crustal“ ausgelöst werden, wie zum Beispiel nach dem Erbeben von *Las Melosas* 1958, 100 km östlich von Santiago mit einer Magnitude M 6.7 – 6.9 (Sepulveda et. al., 2008).

Dem tektonischen Gefüge entsprechend bestehen die Gesteine im Bearbeitungsgebiet aus vulkanoklastischen Gesteinen, Tuffen, intermediären bis basischen Lava-Gesteinen, Ignimbrite mit zwischengeschalteten Lagen von alluvialen, fluviatilen und lakustrinen Sedimenten. Unterbrochen werden diese Schichten von zumeist vertikal stehenden, porphyrischen Ganggesteinen.

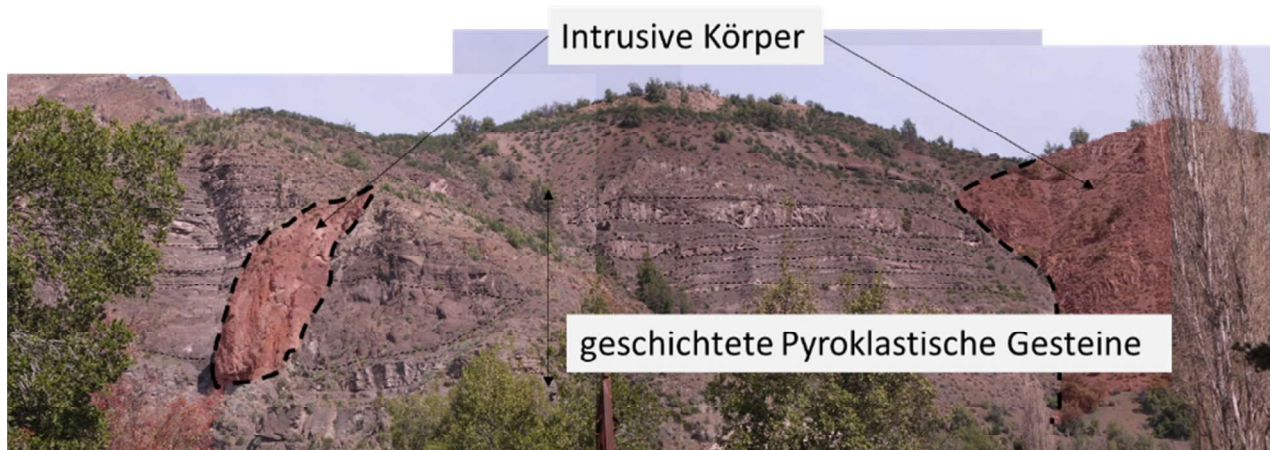


Abb. 2: typischer Schichtaufbau von pyroklastischen Gesteinen, unterbrochen von steil stehenden Ganggesteinen.

Die Hauptkette der Anden, östlich von Santiago getrennt durch die aktive, west-vergente San Ramon-Störung, unterliegt im back-arc der südamerikanischen Platte rezent immer noch aktiver E-W Kompression. Dies drückt sich durch schwache Faltung und Überschiebungen (Duplex Strukturen) in den tertiären Gesteinen und flachgründiger seismischer Aktivität aus (Tiefe von <20 km; Alvarado et al., 2009).

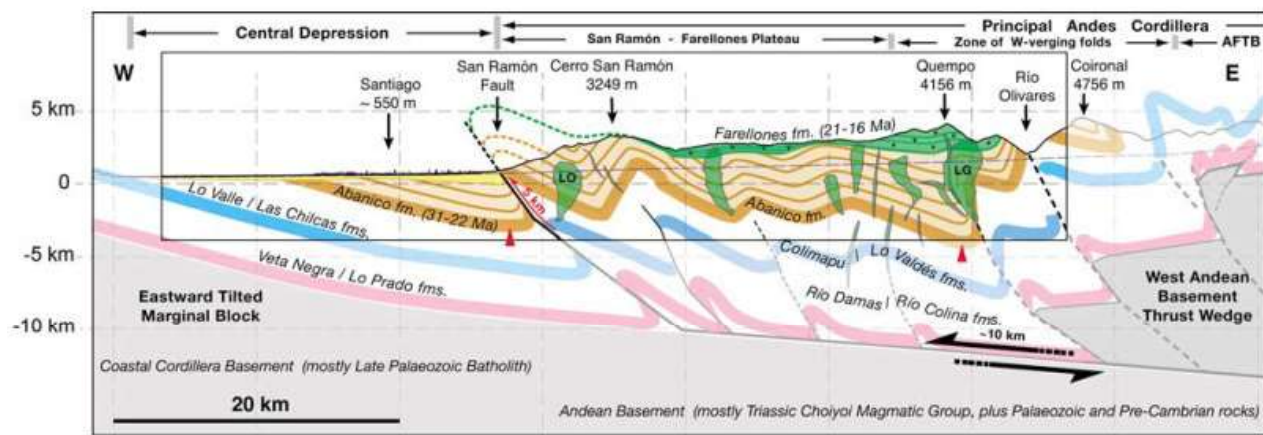


Abb. 3: Geologisch-tektonisches E-W Profil östlich von Santiago (aus Armijo et al., 2010)

Dementsprechend ist die Hebung nach wie vor aktiv und die Erosion / Abtrag des Gebirges hoch. Die Hebungsraten der Zentralanden seit dem späten Miozän werden mit 2 km bis 2.5 km angegeben (Fariás et al. 2008). Durch aktiven Vulkanismus ist der geothermische Gradient um ein Vielfaches höher als in Mitteleuropa und dementsprechend die hydrothermale Alteration hoch. Der Metamorphismus ist meist niedriggradig und kann der Zeolith-Fazies und Prehnit-Pumpellyit-Fazies zugeordnet werden (Muñoz et al., 2010). Vor allem die vulkanischen Gesteine (meist Andesite) und Tuffe sind metamorph überprägt und zeigen teils durch Chloritisierung intensive Grünfärbung mit Zeolithe und Tonminerale in ihrer Gesteinsmatrix.

Typische Gebirgs- und Gesteinscharakteristika

Geomorphologisch ist das Gebiet charakterisiert durch starke glaziale Überprägung während des Quartärs, gekennzeichnet durch mächtige Moränenablagerungen, welche später durch fluviatile Prozesse umgelagert wurden. Untersuchungen der Gletscherstände von Clapperton (1994) entlang des Aconcagua Flusses berichten von mindestens drei Maximalständen auf 2800 m ü. NN, 1600 m ü. NN und 1300 m ü. NN während des Quartärs (ohne Berücksichtigung tektonischer Hebung oder isostatischen Ausgleichsbewegungen). Aktuell liegt die Gleichgewichtslinie der Gletscher zwischen 33° S und 35 ° S auf etwas über 4000 m ü. NN in den Sommermonaten (Carrasco et al., 2005).

Die Talfüllungen zwischen 786 m ü. NN und 2500 m ü. NN bestehen meist aus einer Wechselfolge aus Mur-Ablagerungen und Flusssedimenten und verzahnen im Hangenden mit Hangschutt. Die freien Standhöhen der teilweise vertikalen und bis zu mehreren Zehnermeter hohen Böschungen sind beeindruckend, berücksichtigt man die hohe seismische Aktivität (siehe Abb. 4). Die sehr guten bodenmechanischen Eigenschaften der Lockergesteine werden hauptsächlich auf die gute Verzahnung, die weitgestufte Kornverteilung, den entsprechenden Anteil an kohäsiven Feinkorn und die kontinuierliche seismische Aktivität, welche zur guten Kompaktion beiträgt, zurückgeführt.

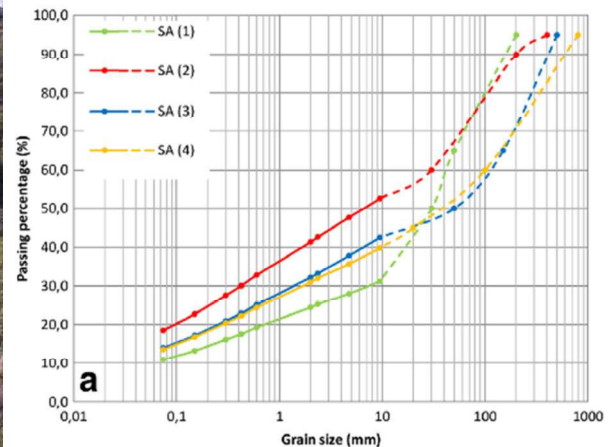


Abb. 4: links: mächtige Mur-Ablagerungen; rechts: Siebanalyse verschiedener Mur-Ablagerungen aus Sepúlveda et al., 2014.

Ab Höhen über 2500 m ü. NN dominieren schwach umgelagerte, glaziale Moränenablagerungen und Schmelzwassersedimente in Verzahnung mit mächtigen Schuttfächern. Nennenswert sind auch die mächtig ausgebildeten Blockgletscher, welche 10 % der Landoberfläche auf Höhen zwischen 3500 m ü. NN und 4250 m ü. NN bedecken (Brenning, 2005).

Durch die starke Hebung der Anden und die einhergehenden erosiven Prozesse sowie glaziale Überprägung sind viele Hang- und Talflanken übersteilt. Dies führt in Kombination mit seismischer Aktivität und „veränderlich-festen Gesteinen“ zu Felssackungen, aktiven Talzuschüben bis hin zu Bergstürzen mit mehreren km² an Volumina. Einer dieser Bergstürze wird der sogenannten *Meson Alto* Ablagerung zu gerechnet, welche sich in der Hauptandenkette auf 33°40'S befindet. Jedoch ist der Ursprung noch nicht endgültig geklärt und ist Bestand aktueller Forschungen (Deckart et al., 2014), da sich hier wichtige Infrastrukturen sowie ein Teil der Trinkwasserversorgung Santiago de Chiles befinden.

Tunnelvortriebe in den Anden haben bei der Unterfahrung großer Massenbewegungen gezeigt, dass selbst bei Überlagerungen von mehreren hundert Metern sich dies im Vortrieb ausgewirkt hat. Die Ausbruchsmethode musste von Sprengvortrieb auf mechanischen Vortrieb umgestellt werden. Geophysikalische Untersuchungen während des Vortriebs mittels Reflexionsseismik haben prognostiziert, dass in diesen Bereichen mit stark wechselnden Gebirgsverhältnissen zu rechnen ist.

Das Gebirge ist charakterisiert durch gut geschichtete, pyroklastische Gesteine im Wechsel mit andesitischen Laven und Intrusivkörper. Dadurch entstehen extreme Unterschiede in der einaxialen Druckfestigkeit von wenigen bis zu mehreren hundert Megapascal (MN/m²) im Felsverband. Zudem zeigen die pyroklastischen Gesteine teils „veränderlich-festes Verhalten“ und neigen zum Quellen.

Besonders die sogenannten roten Tuffe (red tuff) sind einerseits in Bezug auf ihre Quellfähigkeit bei Wasserkontakt und / oder Spannungsverlust zu erwähnen. Vor allem Tonminerale der Smektit-Gruppe (z.B. Montmorillonit) besitzen aufgrund ihrer mineralogischen Struktur die Eigenschaft eine bedeutende Menge an Wasser innerhalb der Zwischenlagen und Umgebung bei Kontakt aufzunehmen (Galera et. al, 2014). Ein weiteres, typisches quellfähiges Tonmineral ist Vermiculit, welches häufig entlang von Klüften in Verbindung mit jungen basaltischen Gängen nachgewiesen wurde.

Andererseits sind die Tuff-Gesteine im Bearbeitungsraum „veränderlich-feste Gesteine“, welche auch nur bei atmosphärischer Exposition, wie z.B. Hebung / Erosion oder beim Auffahren von Tunneln zum Verlust ihrer Gesteinsfestigkeiten führen können.

In Fallbeispielen wurden solche Gesteine im frischen Zustand mit einaxialen Druckfestigkeiten von 90 MPa und einem E-Modul zw. 15-20 GPa angetroffen und nur 1 Jahr später innerhalb von Wasserstollen komplett zersetzt zu kleinen Gesteinsbruchstücken begleitet von Quellprozessen vorgefunden (Piaggio, 2015). Um die Veränderlichkeit und Quellfähigkeit zu quantifizieren werden verschiedene Laborversuche durchgeführt. In verschiedenen Projekten im Bearbeitungsraum werden Ethylen-Glykol-Lagerungsversuche in Kombination mit der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen durchgeführt, um eine erste Abschätzung des Veränderlichkeitsgrades und der möglichen Quelldrücke zu erhalten (Carter et. al. 2010).

Zudem werden nachfolgend Pulverquellversuche mit konstanter Normalspannung und Langzeitquellversuche an intaktem Gestein nach Huder-Amberg durchgeführt. Langzeitquellversuche an intakten Proben sollen ermöglichen, einen Reduktionsfaktor für die ermittelten Quelldrücke aus Pulverquellversuchen zu definieren.

Die aktive, ost-vergente Subduktion und die Stauchung (Verkürzung) der kontinentalen Kruste resultiert in stark anisotropen Gebirgsspannungen. Verfügbare Daten aus der World Stress Map Datenbank ergeben einen zu erwartenden generellen Trend der maximalen Horizontalspannung orthogonal (E-W) zur Subduktionszone. Jedoch haben publizierte in-situ Spannungsmessungen mittels Overcoring und Acoustic Emission (AE) aus der Mine *El Teniente* gezeigt, dass das lokale Spannungsfeld stark von strukturgeologischen Gegebenheiten sowie von der Abbaumethode und der Topographie beeinflusst sind (Windsor et al. 2006). Die Orientierung der maximalen Horizontalspannung wird mit NNW-SSO und O-W bis ONO-WSW angegeben (Windsor et al. 2006). Spannungsmessungen und beobachtete Bohrlochausbrüche in Kernbohrungen aus anderen Gebieten nördlich der Mine *El Teniente* bestätigen die strukturgeologische Abhängigkeit der Orientierung. Die gemessenen Magnituden der maximalen Horizontalspannung bei Überlagerungen von 1000 m haben sich im regionalen Bereich als recht konstant erwiesen und liegen zwischen 40 und 60 MPa. Die minimale Horizontalspannung hingegen variiert stark und liegt teils über oder unter der Vertikalspannung.

Durch die erhöhten Gebirgsspannungen kommt es im Untertagebau immer wieder zu spannungsbedingten Überbrüchen bis hin zu Bergschlag. Selbst bei geringen Überlagerungen von 300 m sind Bergschlagereignisse dokumentiert. Dies erfordert spezielle Vortriebsmethoden und stellt besondere Herausforderungen an die Arbeitssicherheit. Um Bergschlagereignisse besser quantifizieren zu können werden teilweise aufwendige Micro-seismische Überwachungssysteme installiert, um die Lage im Raum sowie die freigegebene Energie zu ermitteln.

Bergschlagereignisse sind meist an extrem steife, hoch-feste und sehr feinkörnige Gesteine mit einaxialen Druckfestigkeiten bis zu > 250 MPa gebunden. Diese hohen Festigkeiten treten zumeist bei andesitischen Ganggesteinen und hypabyssischen Intrusivgesteinen auf. Zudem kommt es in Kontaktbereich zu Schichtpaketen mit geringerer Gesteinsfestigkeiten zu Spannungskonzentrationen.

Erhöhte Grundwasserzuflüsse im Tunnelbau stellen seit jeher besondere Herausforderungen dar und haben direkte Auswirkung auf die Vortriebsleistung. Im Bearbeitungsgebiet hat sich gezeigt, dass Tunnel in der Nähe von größeren Oberflächengewässern oder unter der Talsohle von Hauptentwässerungen entlang von aufgelockert-entfestigtem Gebirge (geringe Horizontalspannungen) konstante Zuflüsse auftreten, welche systematische Abdichtungen des Gebirges mittels Injektionen sowohl vorausseilend als auch im Nachlauf erforderlich machten. Hydrogeologische Untersuchungen haben ergeben, dass Berg- und Oberflächenwasser in direkter Verbindung stehen.

Zudem treten erhöhte Zuflüsse entlang von Störzonen auf, die meist in Verbindung mit Ganggesteinen stehen. In diesen Kontaktbereichen sind singuläre Zuflüsse mit über 100 l/s und über 15 bar Wasserdruck dokumentiert. Dies benötigte in Tunnelabschnitten das Herstellen von rückverankerten Betonsohlen mit Wasserfassungen um diese singulären Zuflüsse zu kontrollieren.

Schlussfolgerungen

Die Erfahrungen aus den Zentralanden zeigen deutlich, wie essentiell die Berücksichtigung der geologisch-tektonischen Rahmenbedingungen sowohl in der Planung als dann später in der Ausführung von Projekten ist. Besonders die vorherrschenden erhöhten Horizontalspannungen und veränderlich feste Gesteine in Kombination mit extrem kompetenten Gesteinen stellen große Herausforderungen in den Anden dar.

Die genaue Kenntnis der geologischen Verhältnisse in Lage und ihre felsmechanischen Eigenschaften ist einerseits durch ein entsprechendes (Vor-) Erkundungsprogramm als auch durch eine baubegleitende, detaillierte ingenieur-geologische Ansprache und Dokumentation sicherzustellen. Erfahrungsgemäß spielt bei einer unzureichenden geologisch-geotechnischen Vorerkundung die baubegleitende geologisch-geotechnische Dokumentation inkl. Labor und in-situ Versuche eine umso wichtigere Rolle in Bezug auf richtige Interpretation des Gebirgsverhaltens. Dies kann bei der Ausführung von Bauprojekten eine entscheidende Rolle über Erfolg oder Misserfolg darstellen.

Literatur

Alvarado et al., (2009): Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. – Physics of the Earth and Planetary Interiors 175 (2009), S. 26 – 36.

Armijo, R. et al. (2010): The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. – Tectonics, Vol. 29, S. 1 – 34.

Brenning, A. (2005): Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33–35°S). – Permafrost and Periglacial Processes, 16, S. 231 - 240.

Carrasco, J., F. et al. (2005): Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. – Hydrological Science Journal, 50 (6), S. 933 – 948.

- Carter, T. et al. (2010): Tunnelling Issues with Chilean tertiary volcanoclastic rocks. – Mir Conference; Problemi Distabilità nelle Opere Geotecniche, Capitolo, Torino, Vol. 11.
- Clapperton, C., M. (1994): The quaternary glaciation of Chile: a review. – Revista Chilena de Historia Natural, 67, S. 369 – 383.
- Deckart, K. et al. (2014): New insights on the origin of the Mesón Alto deposit, Yeso Valley, central Chile: A composite deposit of glacial and landslide processes? – Andean Geology, 41 (1), S. 248 – 258.
- Farías, M., Charrier, R. et. al. (2008): Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33° - 35°S). – Tectonics, Vol. 27.
- Galera et. al. (2014): Risk Associated with Swelling Rocks in Volcanic Formations in the Design of Hydro-Tunnels. – ISRM Regional Symposium-EUROCK 2014, International Society for Rock Mechanics.
- Muñoz, M. et al. (2014): Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene-Oligocene Abanico Basin case, central Chile Andes (33°-35°S). – Andean Geology 41 (1), 28 S.
- Piaggio, G. (2015): Swelling Rocks Characterization: Lessons from the Andean Region. – ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, Konferenz Langfassung, 10 S.
- Sepúlveda, S. A. et. al. (2008): New Findings on the 1958 Las Melosas Earthquake Sequence, Central Chile: Implications for Seismic Hazard Related to Shallow Crustal Earthquakes in Subduction Zones. – Journal of Earthquake Engineering 12: 3, 432 – 455.
- Sepúlveda, S. A. et al. (2015): Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. – Landslides 12: S. 115 – 133.
- Windsor, C., R. et al. (2006). Rock stress tensor measurements at El Teniente Mine, Chile.