

terhaltungsteil des Space Centers, eine Art „Disneyland der Wissenschaft“.

Den folgenden Tag nutzten wir für einen Besuch des Offshore Drilling Rigs und Museums „Ocean Star“. Das Museum ist in einem stillgelegten Jackup Rig untergebracht. Es bietet auf drei Ebenen neben der klassischen Bohrtechnik einen speziellen Einblick in die Exploration und Förderung von Erdöl und Erdgas im Offshorebereich. Dies wird mittels vieler Modelle von Transport-, Versorgungs- und Bohrschiffen sowie Ölbohrinseln aus verschiedenen Jahrzehnten sehr gut veranschaulicht. Der Tag klang mit einem ausgedehnten Besuch am Strand des Golfes von Mexiko bei angenehm warmen Luft- und Wassertemperaturen und bis zu zwei Meter hohen Wellen aus.

Am 4.10. machten wir uns dann auf den Weg nach New Orleans, um dort die alljährliche ATCE (Annual Technical Conference and Exhibition) der SPE zu besuchen. Unterwegs machten wir Halt, um die historische Bohrung Spindletop zu besichtigen. Auf der ATCE waren insgesamt elf Firmen vertreten, darunter auch große Servicefirmen wie Baker Hughes, Schlumberger und Halliburton sowie BP America und Chevron. Auch am 5.10. besuchten wir die ATCE.

Am Tag darauf sind wir von New Orleans nach Berwick gefahren, um beim Unternehmen Cameron zu Gast zu sein.

Das Unternehmen wurde uns vorgestellt. Wir hörten einen über eine Unterwasser-Produktion, Aufgaben der einzelnen Bauteile und über die generelle Organisation des Systems. Danach besichtigten wir das Firmengelände und sahen die einzelnen Bauteile. Anschließend kehrten wir wieder nach New Orleans zurück.

Unsere Weiterfahrt führte uns gen Westen nach Baton Rouge, der Hauptstadt von Louisiana, zur zweitgrößten Erdölraffinerie der USA, die von Exxon Mobil Refining & Supply betrieben wird. Nach freundlicher Begrüßung durch Jacques C. Robert, unseren Tour-Guide, bestiegen wir einen Bus für unsere Führung über die 8,5 km<sup>2</sup> umfassende Anlage. Auf einer einstündigen Fahrt über das Raffineriegelände erfuhren wir viel Wissenswertes über die Geschichte der Anlage sowie die aus Rohöl hergestellten Fertig- und Zwischenprodukte. Der Rest des Tages stand unter dem Motto „Shopping und Sightseeing“.

Bevor wir am 8.10. erneut New Orleans ansteuerten, haben wir noch die University of Louisiana in Lafayette besucht. Dort wurden wir freundlich von Mr. Boyun begrüßt, welcher als Drilling-Professor an der Uni tätig ist. Davor hat er selbstständig als Directional Driller gearbeitet und somit Praxiserfahrung gewonnen. Mr. Boyun begann mit einer Tour durch Laboratorien. Insgesamt gab

es sechs Laboratorien, in welchen die Studenten bis zum Bachelorabschluss Versuche durchführen und den Lehrstoff sehr anschaulich vermittelt bekommen. Darunter sind zum Beispiel ein Drilling-Fluid-Lab, ein Reservoir Mechanics Lab und zwei Drilling Labs. Er ermöglichte uns ebenfalls einen Besuch bei einer Offshore Trainingseinrichtung und der Servicefirma Frank's. Wir machten eine ausführliche Tour durch das gesamte Firmengelände und die Fertigungshallen. Frank's International fertigt vor allem Casing/Tubing-Running-Tools und bietet den gesamten Service dazu an. Auf unserem Rundgang konnten wir eine Vielzahl der gängigen Tools aus nächster Nähe begutachten. Darunter waren unter anderem Hydraulic Tongs, Slips, Iron Roughnecks, Diesel/Hydraulic Hammers (Conductor Pipe Installation), Stabright System. Dieser Tag war ein wirklich gelungener Abschluss für den offiziellen Teil unserer Reise. Von New Orleans aus ging wieder auf die Heimreise.

Wir möchten uns bei allen bedanken, die uns diese Exkursion ermöglicht haben. Ein besonderer Dank geht dabei an die zahlreichen Spender und die Unternehmen, die wir auf der Exkursion besuchen durften. Ohne ihre Hilfe wäre eine so spannende und lehrreiche Exkursion nicht durchführbar gewesen.

■ Caroline Kannwischer

## Lagerstätten von Peru – 2009

Exkursion des Bereichs Lagerstättenlehre und Petrologie der TU Bergakademie Freiberg und des SEG Student Chapter Freiberg Thomas Seifert

Vom 14.9. bis 5.10. 2009 führten der Bereich Lagerstättenlehre und Petrologie der TU Bergakademie Freiberg und das SEG Student Chapter Freiberg (Society of

Economic Geologists) eine lagerstätten-geologische Exkursion nach Peru durch. Daran nahmen 22 Studenten aus Freiberg und zwei Studenten aus Peru unter

Leitung von PD Dr. habil. Thomas Seifert teil (Abb. 1).

Der Kontinent Südamerika besteht aus grundsätzlich verschiedenen geologischen Einheiten: Im Osten prägen archaische Kratone und spätproterozoische mobile Gürtel sowie ein passiver Kontinentalrand die geologischen Verhältnisse. Im Westen dominieren das relativ



Abb. 1: Exkursionsgruppe und Hauptgeologin von Pierina (Barrick Gold) auf der Aussichtsplattform des Au-Ag-Erztagebaus, 4177 m ü. NN. Fotos (2): Autor

junge Anden-Orogen (Mesozoikum und Tertiär) und eine aktive Subduktionszone die geologische und metallogenetische Situation.

Die aktiven Vulkane der Anden gehören zum sog. „Zirkumpazifischen Feuergürtel“, an den eine Vielzahl von „large“ und „super-large“ Cu(-Au-Mo-), Au-Ag-, Ag-Au-Polymetall- und Sn-Polymetall-Lagerstätten gebunden sind. Die peruanischen Anden zeigen diesbezüglich eine große metallogenetische Vielfalt und ein sehr hohes Rohstoffpotenzial (Abb. 2). Im globalen Maßstab gehört Peru zu den bedeutendsten Exportländern von mineralischen Rohstoffen. Im Jahr 2007 wurden aus Erzlagerstätten in Peru 1 Mio. t Kupfer (6,9% der Weltproduktion/WP), 1,2 Mio. t Zink (12,7% WP), 306.000 t Blei (9,8% WP), 42.000 t Zinn (15,3% WP), 3000 t Silber (15,2% WP) und 173 t Gold (7% WP) produziert.

Im Verlauf der Exkursion wurden Bergbau- und Aufbereitungsbetriebe in folgenden Distrikten der peruanischen Anden befahren:

**Yanacocha Au-Ag-Cu-Distrikt** (Minera Yanacocha S.R.I; 3450–4050 m ü. NN)

Der Lagerstättendistrikt Yanacocha besteht aus einer Vielzahl von high sulfidation Au(-Polymetall)-Lagerstätten, die an miozäne intermediäre bis saure Vulkanite gebunden sind und seit 1993 bergmännisch gewonnen werden (Abb. 3). 2003 betrug die Goldvorräte 31,7 moz.

Mit einer jährlichen Produktion von 3,3 moz Au ist die Lagerstätte Yanacocha einer der größten Goldproduzenten von Südamerika und die größte bekannte high-sulfidation Au-Lagerstätte im Weltmaßstab. Die Au-Ag-Cu-Mineralisationen sind an fünf Mineralisationsstadien gebunden, die enge genetische Beziehungen zu andesitischen und dazitischen Domkomplexen mit Ignimbriten, phreatomagmatischen Brekzien und Brekzienschloten (Alter 8,4–12,1 Ma; Calipuy-Formation) aufweisen: (I) niedrig-gradige Au-Mineralisationen, die mit Cu-Au-Porphyry-Systemen assoziiert sind, (II) Hauptphase der high sulfidation Au(-Ag)-Mineralisation, (III) Spät-Phase einer hochgradigen Au-Vererzung, (IV) späte Cu(-Au)-Mineralisation mit Covellin und Enargit und (V) Karbonat-Sulfid-Trümer. Die Haupterzzonen sind bevorzugt an den Kontaktbereich der känozoischen Vulkanite zu den liegenden mesozoischen Metasedimenten der Chimu-Formation gebunden.

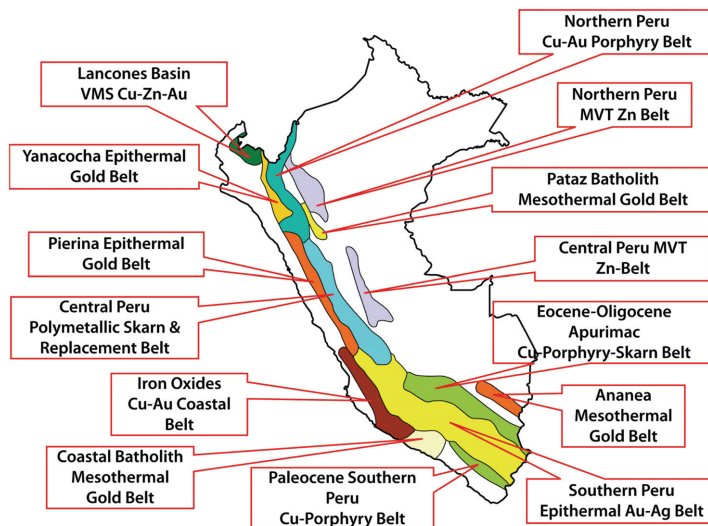


Abb. 2: Die Lagerstättengürtel von Peru (modifiziert nach Cardozo, 2002)

**Lagunas Norte Au-Ag-Distrikt** (Barrick Gold Corp.; 3800–4200 m ü. NN)

Die Firma Barrick Gold Corp. begann im Rahmen des Alto Chicama Projektes im Jahr 2001 mit der Erschließung der Lagerstätte Lagunas Norte und 2005 mit der Gewinnung von Au-Ag-Erzen. Die Au-Gesamtproduktion betrug im Jahr 2008 1,175 moz (ca. 36,5 t), wobei die Reserven und Ressourcen 230 Mio. t Erz (0,039 oz Au/t) umfassen, aus denen ca. 279 t Gold gewonnen werden können. In den o.g. Reserven wurde ein Ag-Gehalt von 0,11 oz/t Erz prognostiziert, was einem Lagerstätteninhalt von ca. 787 t Silber entspricht. Die high-sulfidation-Au-Ag-Mineralisationen zeigen klare genetische Beziehungen zu miozänen andesitischen Domkomplexen, Brekzien und Tuffen (Calipuy-Formation) und sind bevorzugt an den Kontaktbereich zu den liegenden unterkretazischen Metasedimenten und Kohlen der Chimu-Formation gebunden (vergleichbar mit dem Distrikt Yanacocha).

**Fahrt nach Pierina** mit Stopp in Huaraz: Pyramidenähnliche Bauten eines Mond- und eines Sonnentempels sowie Wohngebäude der Moche-Kultur (1.–8. Jh. u.Z.)

**Pierina Au-Ag-Distrikt** (Barrick Gold Corp.; 3720–4177 m ü. NN)

Die Au-Ag-Mineralisation im Distrikt Pierina wurde von der Barrick Gold Corporation entdeckt und erschlossen, seit 1998 erfolgt der Abbau im Tagebaubetrieb (Abb. 4). Im Jahr 2008 wurden 400.000 oz Au produziert. Die Reserven belaufen sich auf ca. 683.000 oz Au. Silber wird als Nebenprodukt gewonnen, die Reserven und Ressourcen betragen 6,652 moz Ag. Im Jahr 2009 begann die geplante Produktion aus niedrighaltigen Erzkörpern, da sich die Mine im Auslaufbetrieb befindet. Die Au-Ag-Mineralisationen und Alterationszonen im Distrikt Pierina sind überwiegend in oberflächennahen extrusiven Bimstufen sowie untergeordnet in einem älteren dazitischen Dom-Komplex ausgebildet.



Abb. 3: Begutachtung und Probenahme von Au-Ag-Cu-Erzen im Tagebau Yanacocha, Sur Pit 2

Abbauwürdige Au-Vererzungen sind vorwiegend an Zonen fortgeschrittener argilitischer Alteration gebunden (mit Alunit- oder Quarz-Alunit-Mineralisation), die vor allem im Zentral- und Südteil der Lagerstätte ausgebildet sind und mehrfach von hydrothermalen Brekzien durchschlagen werden. Im Norden der Lagerstätte treten Erzkörper mit Gehalten von bis zu 150 g/t Ag auf.

**Antamina Cu-Zn-Ag-Mo-Bi-Pb-Distrikt** (Compañía Minera Antamina S.A.; 4190–4600 m ü. NN)

Die Cu-reichen Erze der „very large“ Cu-Zn-Porphyr-Skarn-Lagerstätte Antamina (anta: Kupfer auf Quechua), die auch signifikante Mengen an Ag, Mo, Pb und Bi beinhaltet, wurde schon vor der spanischen Kolonialisierung von den ansässigen Bewohnern genutzt. Seit 2001 werden in einem der modernsten Bergbaubetriebe Südamerikas Cu-Ag- und Zn-Konzentrate sowie Pb, Mo und Bi als Beiprodukte produziert. Der jetzige Abbau erfolgt in einem gigantischen Tagebau, der zum Zeitpunkt der Exkursion eine Teufe von ca. 600 m erreicht hatte (Abb. 5). Dieser soll 2028 eine Fläche von 3×3,5 km und eine Tiefe von 1 km erreichen. Danach soll der Abbau im Untertagebetrieb erfolgen. Die z. T. sehr reichen Polymetall-Vererzungen der Porphyr-Skarn-Lagerstätte Antamina (Alter: 9,9–10,2 Ma) sind ursächlich an eine polystadiale, subvulkanische Quarz-Monzonit-Porphyr-Intrusion (9,8 Ma) gebunden, die in oberkretazische Metakarbonate intrudierte. Die somit gebildeten Skarnerzkörper beinhalten ca. 755 Mio. t Polymetallerz mit durchschnittlichen Gehalten von 1,24–5 wt.% Cu, ca. 1 wt.% Zn,

0,029 wt.% Mo und ca. 15 g/t Ag (berechnet bei 0,7 wt.% Cu cutoff grade). Hydrothermale Brekzien mit erhöhten Cu-, Ag- und lokal hohen Mo- und/oder Zn-Konzentrationen durchschlagen alle bekannten Skarnerz-Typen.

**Fahrt nach Raúl und Condestable** via Caral Lima (23.9. Treffen mit Professoren und Studenten der Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima und Kollegen von Explorationsfirmen). Die Pyramidenstadt Caral gilt als älteste Stadtanlage Amerikas (ca. 2600–1600 v. u. Z.)

**Raúl und Condestable Cu-Au-Ag-Distrikt** (Iberian Minerals Corp., Compañía Minera Condestable S.A.A.; 70–200 m ü. NN, Pazifikküste in Sichtweite)

Die Cu-Au-(Ag)-Mineralisationen im Distrikt Raúl und Condestable werden genetisch dem Iron-Oxide-Copper-Gold-Typ zugeordnet. Während die Lagerstätte Condestable im Tagebau gewonnen wird, erfolgt der Abbau der Lagerstätte Raúl im Tiefbau. Die Vorräte werden mit mehr als 32 Mio. t Erz (1,7 wt.% Cu, 0,3 g/t Au und 6 g/t Ag) angegeben. Darüber hinaus wurden erhöhte Gehalte von Co, Mo, Zn, Pb, As und leichten Seltenelementen nachgewiesen. Die ältesten Gesteine des Distrikts Raúl und Condestable sind jurassische und kreidezeitliche vulkano-sedimentäre Abfolgen des Cañete-Beckens (Teilbecken des westperuanischen Troges), in die verschiedene Tonalit- und Dolerit-Dikes im Zeitraum 116–115 Ma intrudierten. Die Vererzung ist genetisch an die o. g. Intrusionen, die vermutlich mit einem metasomatisch überprägten Mantel assoziiert sind, gebunden. Die Vererzungen sind in Gän-



Abb. 4: Au-Ag-Lagerstätte Pierina. Erläuterung der Geologie des Tagebaus durch die Hauptgeologin

gen, Mantos und Imprägnationszonen in folgender Mineralassoziation ausgebildet: Biotit-Aktinolith-Skapolith-Quarz-Titanit-Allanit-K-Feldspat-Apatit-Muskovit-Hämatit-Magnetit-Molybdänit-Sphalerit-Pyrrhotin-Pyrit-Galenit-Chalkopyrit-ged. Au-Chlorit.

**Fahrt nach Orcopampa** (26.–29.9.) via Cusco (ehemalige Hauptstadt des Inka-Reiches) und Aguas Caliente (Machu Pichu).

**Orcopampa Ag-Au-Distrikt** (Compañía de Minas Orcopampa/Compañía de Minas Buenaventura S.A.; 3800–3940 m ü. NN)

Die epithermalen Ag-Au-Gangvererzungen im Lagerstädtendistrikt Orcopampa wurden seit der spanischen Kolonialzeit bis ins 20. Jh. auf Silber abgebaut. 1967 begann durch die Compañía de Minas Buenaventura S.A. ein moderner Tiefbau. In den späten 1980er Jahren stieg die Produktion von 70 t Erz/d auf mehr als 1000 t/d, wobei die Gewinnung hauptsächlich im Calera-Gangsystem erfolgte. 1991 wurde der erste epithermale Au-Erzgang im Bereich des Prometida-Gangsystems entdeckt. Infolge von Explorationsarbeiten im Bereich weiterer neuer Erzgänge im Nazareno-Gangsystem (Entdeckung 1998) stieg die Produktion auf über 1,6 Moz Au im Jahr an.

Unsere ersten beiden Stops führten uns zum Nazareno-Gang im Niveau des 3290-Levels der Chipmo-Lagerstätte. Die reichen Au-Erze der Chipmo-Lagerstätte sind an epithermale Au-Tellurid-Mineralisationen gebunden, die genetisch an



Abb. 5: Haupttagebau der Cu-Zn-Ag-Mo-Bi-Pb-Porphyr/Skarn-Lagerstätte Antamina. Fotos (2): Autor

miozäne, andesitische und dazitische Intrusionen gebunden sind. Der im Bereich des Nazareno-Gangs vorkommende Andesit-Dike ist durch starke Alteration (z.B. Alunit) und assoziierte Au-Mineralisationen charakterisiert. Die Hauptminerale sind Pyrit und Milchquarz. Der durchschnittliche Au-Gehalt beträgt 20 g/t. Typische Au-, Ag- und Te-Mineralien sind ged. Au und Elektrum sowie Au-, Au-Ag-, Ag- und Bi-Telluride und ged. Tellurium. Hydrothermale Au(-Ag)-Tellurid-Lagerstätten sind geotektonisch bevorzugt an intermediäre (shoshonitische) Intrusionen im Bereich von Subduktionszonen (z.B. Au-Te-Mineralisationen in Fiji und Rumänien) gebunden. In diesem Zusammenhang ist bemerkenswert, dass Chipmo auf dem südamerikanischen Kontinent die einzige bekannte Lagerstätte mit intensiven Au- und Ag-Tellurid-Mineralisationen ist.

#### Arcata Ag-Au-Polymetall-Distrikt (Compañía Minera Ares S.A.C./Hochschild Mining plc; 4600–5000 m ü. NN)

Ca. 35 km nördlich des Distrikts Orcopampa befindet sich der Lagerstädtistrikt Arcata, dessen Ag-Au-Polymetall-Gangmineralisationen dem „intermediate sulfidation“-Typ zugeordnet werden. Hochschild Mining plc ist mit einer Ag-Gesamtproduktion von 13,6 moz in Peru, Argentinien und Mexiko (Stand 2007) einer der großen Ag-Produzenten in Lateinamerika, Au wird als Nebenprodukt gewonnen (2007: 210 koz Au). Arcata war die erste Ag-Mine von Hochschild Mining plc in Südamerika, der Bergbau begann hier im Jahr 1964. Die Gesamtreserven beliefen sich im Dezember 2007 auf nachgewiesene Vorräte von 1,84 Mio. t Erz (476 g/t Ag, 1,19 g/t Au) und prognostische Vorräte von 3,58 Mio. t Erz (526 g/t Ag, 1,41 g/t Au). Im Jahr 2009 wurden in Arcata 643.059 t Erz (503 g/t Ag, 1,56 g/t Au) mit konventioneller und mechanisierter „cut-and-fill breast und sublevel stoping“-Methode gewonnen. Durch Flotation wurden 22.352 t Konzentrat mit 13,36 kg Ag/t und 0,04 kg Au/t produziert, woraus 9,542 moz (296,78 t) Ag und 28,64 koz (890,8 kg) Au hergestellt wurden. Die Ag(-Au)-Erzgänge sind sehr wahrscheinlich mit rhyolithischen Lavadomen und rhyodazitischen Dikes (Alter: ca. 6–5,5 Ma) assoziiert, die in obermiozäne andesitische Flows, Ignimbrite und Vulkanoklastite intrudiert sind (Abb. 6). Dies belegen Altersdatierungen der jüngsten Ag-führenden Mineralisa-

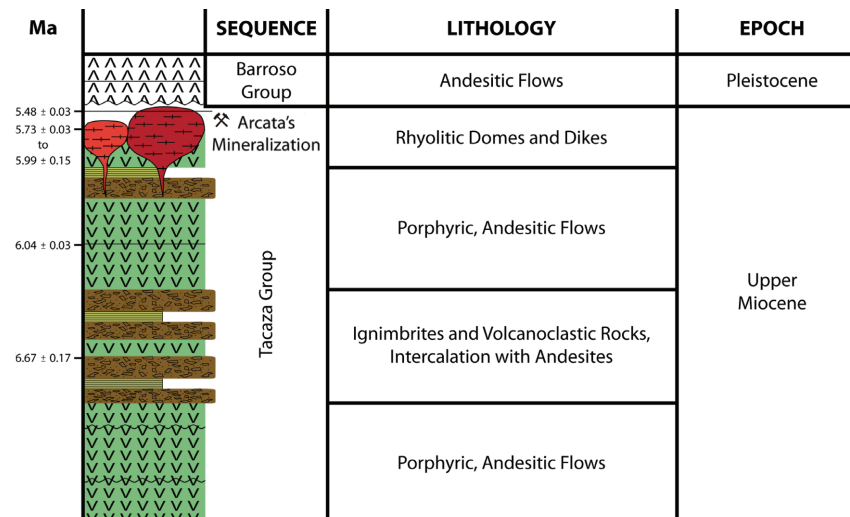


Abb. 6: Zeitliche Abfolge der (Sub)Vulkanite und assoziierten Ag(-Au)-Mineralisationen im Arcata-Distrikt. Schematische Intrusion in dunkelrot: rhyolithische Lavadome; Intrusion in hellrot: rhyodazitische Dikes (verändert nach Hochschild Mining plc)

tionen (Ar-Ar-Alter von Adular: 5,48 ± 0,03 Ma).

Die Exkursion begann mit der Befahrung des Ag(-Au)-führenden Polymetall-sulfid-Erzganges Solidad Sur in der Ag-führenden „base metal zone“, die in den tiefsten Abbaufeldern der Lagerstätte aufgeschlossen ist. Die Mineralisationen der „base metal zone“ sind mit dem „kb-Erztyp“ im Zentralteil des Distrikts Freiberg/Erzgebirge vergleichbar. Anschließend wurde der Ag-Erzgang Rosita-West in der „Sb-Ag zone“ befahren. Die z.T. extrem Ag-reichen Erzgänge der „Sb-Ag zone“ von Arcata zeigen in ihrer mineralogischen und geochemischen Charakteristik eine bemerkenswerte Ähnlichkeit zum Ag-reichen „eb-Erztyp“ im Lagerstättenrevier Brand-Erbisdorf (Distrikt Freiberg). Weiterhin wurden die Aufbereitung (Flotation) und übertägig anstehende epithermale Erzgänge in ca. 5000 m ü. NN befahren.

#### Cerro Verde Cu-Mo-Distrikt (Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.; 2710–2770 m ü. NN)

Die zum Cerro Verde-Distrikt gehörenden Tagebaue, Cerro Verde und Santa Rosa, befinden sich im paläozänen, südperuanischen Porphyry-Cu(-Mo)-Gürtel. Während die Lagerstätte Santa Rosa ausschließlich an paläogene Granitoide gebunden ist, ist die Lagerstätte Cerro Verde im Kontaktbereich von paläogenen Granitoiden und präkambrischen Gneisen („Charcani Gneis“) ausgebildet. Die dazitischen und monzonitischen Porphyry-Intrusionen von Cerro Verde und Santa Rosa wurden vor ca. 61 bis 62 Ma

gebildet. Das Alter der hydrothermalen Aktivität wird ebenfalls mit 61–62 Ma angegeben. Die Lagerstätten Cerro Verde und Santa Rosa beinhalten Vorräte von ca. 595 Mio. t Erz mit 0,6 wt.% Cu. Vorherrschende Cu-Mineralien der Oxidationszone sind Brochantit, Chrysokoll und Malachit, während Chalkosin und Covellin typische Bildungen der Zementationszone sind. Primäre Sulfidminerale sind Chalkopyrit und Molybdänit. Im Bereich des Haupt-Turmalin-Brekzienkörpers beeinflussten supergene Prozesse die Lagerstätte Cerro Verde bis in eine Tiefe von über 300 m.

**Danksagung:** Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen Kolleginnen und Kollegen der o.g. Bergbaugesellschaften und Frau Prof. Silvia Rosas Lizarragu von der Pontificia Universidad Católica del Perú in Lima für die Organisation und Unterstützung sehr herzlich bedanken. Für die finanzielle Unterstützung der Exkursion danken wir den Firmen KSL – Kupferschiefer Lausitz und MIBRAG sowie der Society of Economic Geologists (SEG) und der International Association on the Genesis of Ore Deposits (IAGOD). Wir danken terra mineralia und der TU Bergakademie Freiberg sowie dem Verein Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V. für ihre freundliche Unterstützung. Weiterhin danken wir unseren Busfahrern aus Lima, die mit ihrem Reisebus Unmögliches möglich machten sowie der Firma Shangri La Freiberg. Unser allerherzlichster Dank gilt Frau Manuela Wagner vom Bereich Lagerstättenlehre und Petrologie für die Unterstützung bei der organisatorischen Vorbereitung dieser Exkursion.

#### Referenzen

Die verwendeten Quellen sind im Vor- und Nachbericht „Lagerstätten von Peru – 2009“ (TU Bergakademie Freiberg, 2009, 2010) enthalten. Die Exkursionsberichte sind auf der TUBAF-Webseite [www.mineral.tu-freiberg.de/econgeology/index.html](http://www.mineral.tu-freiberg.de/econgeology/index.html) veröffentlicht.