Leonard Krebbers, Ramil Gainov, Bernd G. Lottermoser, Stephanie Lohmeier, Alexander Hennig

Applications of Industrial Computed Tomography in the Mining Sector

Industrial computed tomography (CT) is a non-destructive X-ray computerized method for studying the three-dimensional (3D) distribution and microtexture of phases within individual solid samples. For geological and mineral product samples, CT allows visualization of phases with significant density contrast as well as the recognition of gas and fluid inclusions. Also, the technique precisely defines the in-situ location of minerals of interest. In this paper, we summarize CT principles and present examples of unique 3D information for selected ore types. For the mining sector, CT scanning of mineral resources and their products provides valuable information throughout the mining value chain, from exploration to mining to metallurgical extraction.

Anwendungen der industriellen Computertomographie im Bergbausektor

Die industrielle Computertomografie (CT) ist ein zerstörungsfreies, röntgenbasiertes, computergestütztes Verfahren zur Untersuchung der dreidimensionalen (3D) Verteilung und Mikrostruktur von Phasen innerhalb einzelner Feststoffproben. Bei geologischen und mineralischen Proben können Phasen mit ausreichendem Dichtekontrast mittels CT visualisiert sowie Gas- und Flüssigkeitseinschlüsse erkannt werden. Darüber hinaus ermöglicht die Analysemethode eine präzise Bestimmung der In-situ-Lage von Mineralen von wirtschaftlichem Interesse. In diesem Artikel werden die Grundlagen der CT zusammengefasst und Beispiele für 3D-Informationen, die ausschließlich mit CT gewonnen werden können, anhand ausgewählter Erze präsentiert. Für den Bergbausektor liefert das CT-Scannen von mineralischen Ressourcen und deren Produkten wertvolle Informationen über die gesamte Wertschöpfungskette des Bergbaus hinweg, von der Exploration über den Abbau bis hin zur metallurgischen Weiterverarbeitung.

1 Introduction

Material characterization is an important and fundamental aspect in the raw materials sector. Throughout the mining value chain, which includes everything from mining the resource to delivering products to customers, processes are monitored by mineralogical, physical and chemical methods to improve the quantity and quality of mineral products or concentrates. Hence, all steps of the value chain are usually accompanied by sampling and measurements in the production sequence. Traditionally, such characterization of mineral resources and their products involves the study of minerals in terms of their size, habit, chemistry, morphology, textural position, association and other phase attributes such as solubility or hardness. Mineralogical tools like the electron microprobe provide valuable information on the quantity, composition and distribution of individual phases and in some cases reveal twodimensional (2D) information on mineral abundances and their textural arrangements. However, these established techniques require sample preparation and cannot produce three-dimensional (3D) images of phase distributions. Such a lack of geometrical information may lead to incorrect interpretations on mineral sizes and abundances (1), which in turn, may lead to sub-optimal recovery and quality of mineral products and concentrates.

1 Einleitung

Die Charakterisierung von Materialien ist ein wichtiger und fester Bestandteil im Rohstoffsektor. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Bergbau - vom Abbau der Ressource bis hin zur Produktauslieferung an die Kunden – werden sämtliche Prozesse durch den Einsatz mineralogischer, physikalischer und chemischer Methoden regelmäßig überprüft, um Quantität und Qualität von Konzentraten oder Produkten zu verbessern. Daher werden normalerweise alle Schritte im Produktionsablauf von Probenahmen und Messungen begleitet. Gewöhnlich umfasst eine solche Charakterisierung von mineralischen Ressourcen und deren Produkten die Untersuchung von Mineralen hinsichtlich Größe, Habitus, Chemismus, Morphologie, Struktur, Verwachsungen sowie anderer Phaseneigenschaften wie Löslichkeit oder Härte. Mineralogische Analysemethoden, wie beispielsweise die Elektronenstrahlmikrosonde, liefern wertvolle Informationen über die Menge, Zusammensetzung und Verteilung einzelner Phasen und geben in einigen Fällen zweidimensionale (2D) Informationen über Mineralhäufigkeiten und deren strukturelle Anordnungen. Diese traditionellen Techniken erfordern jedoch eine mitunter aufwändige Probenpräparation und erzeugen keine dreidimensionalen (3D) Abbildungen von Phasenverteilungen. Industrial computed tomography (CT) is a newly established, non-destructive X-ray computerized method for studying multicomponent materials and constructions in a 3D regime. It is currently the only method that allows the observation and analysis of internal and external microstructures of objects without sample preparation and without strong limitations on the size and shape of the objects studied. CT can also reveal volume, shape, grain size distribution and connectivity of pores, present phases and cracks. Unlike 2D imaging, CT 3D imaging can confirm not only the presence of these parameters, but CT can usually quantify them.

Moreover, the technology can be used to study geological samples as well as concrete and construction materials and may be applied to material and damage analysis of manufactured goods, including plastics, wood, building materials, metals, and composite hybrid materials (2, 3). In the last decade, the application of CT 3D imaging to geological and mineral product samples has grown significantly (4, 5, 6, 7).

In this paper, we summarize CT principles and present examples of unique CT 3D imaging for samples of diverse mineral resources. The study describes recent experiences with the innovative method and discusses the perspectives of the technique and possible applications in the raw materials sector. Results of this contribution demonstrate that CT is an additional powerful analytical tool for the mining sector throughout the mining value chain, from exploration to mining, mineral processing, and metallurgical extraction (8, 9, 10, 11).

2 Computed tomography

CT measures the attenuation of an X-ray that passes through a sample object. The X-ray attenuation depends on the material density and atomic number (12). High density materials absorb more X-ray energy than low density materials. The X-ray attenuation is therefore characteristic for each phase of which the sample is composed. A 3D – CT measurement procedure is basically the collection of sample projections. These are taken at a pre-set time interval as the sample object rotates usually stepwise between the X-ray source and the detector. The projections are then reconstructed to create 2D slices. Each slice thereby represents a certain thickness of the scanned sample. The resulting data are considered raw data, which are then processed into a full 3D image via a reconstruction software.

In general, solid samples of any type are suitable for CT analysis. The only sample preparation requirement for scanning is that one has to ensure that the sample material fits between X-ray source and X-ray detector. Sample mounting involves the use of low-density material. This holds the sample on a rotation stage and at the same time separates it from the dense rotation stage hardware. The appropriate scanning parameters are then set up in the measurement software interface of the CT scanner according to the unique properties of the sample material. Before starting the measurement, a calibration is necessary to establish the characteristics of the X-ray signal as read by the detectors under scanning conditions. The measurement or scanning time depends on the chosen parameters and usually takes a few hours. After reconstruction, the 3D image is then further processed depending on the goal of the analysis. Ein solches Fehlen von geometrischen Informationen kann zu Fehlinterpretationen von Mineralgrößen und -häufigkeiten führen (1) und somit sowohl eine suboptimale Gewinnung als auch Qualität von Mineralprodukten und Konzentraten zur Folge haben.

Die industrielle Computertomographie (CT) ist eine neu etablierte, zerstörungsfreie, röntgenbasierte Methode zur Untersuchung von Mehrkomponenten-Materialien und -Konstruktionen im 3D-Regime. Sie ist derzeit die einzige Methode, welche die Beobachtung und Analyse des inneren und äußeren Mikrogefüges von Objekten ohne Probenpräparation und ohne starke Einschränkungen hinsichtlich Größe und Form der untersuchten Objekte ermöglicht. Mit CT lassen sich somit Informationen über Volumen, Form, Korngrößenverteilung und Konnektivität von Poren, vorhandenen Phasen und Rissen gewinnen. Im Gegensatz zur 2D-Bildgebung kann die CT-basierte 3D-Bildgebung nicht nur das Vorhandensein dieser Parameter bestätigen, sondern diese gewöhnlich auch quantifizieren.

Das Verfahren kann zur Untersuchung von Gesteinsproben sowie von Beton und anderen Baumaterialien eingesetzt werden und findet Anwendung bei der Material- und Schadensanalyse von Fertigungsgütern, einschließlich Kunststoffen, Holz, Metallen und hybriden Verbundwerkstoffen (2, 3). Die Anwendung der CT 3D-Bildgebung zur Analyse von geologischen und mineralischen Proben hat vor allem innerhalb des letzten Jahrzehnts erheblich zugenommen (4, 5, 6, 7).

In diesem Artikel werden die Grundlagen der CT zusammengefasst und Beispiele für 3D-Informationen, die ausschließlich mit CT gewonnen werden können, anhand ausgewählter Erze präsentiert. Zudem werden aktuelle Erfahrungen mit diesem innovativen bildgebenden Verfahren beschrieben sowie mögliche Anwendungen im Rohstoffsektor diskutiert. Die Ergebnisse dieses Artikels zeigen, dass die CT eine zusätzliche leistungsstarke Analysemethode für die gesamte Wertschöpfungskette des Bergbaus darstellt, von der Exploration über den Abbau und die Aufbereitung von Mineralen bis hin zur metallurgischen Gewinnung (8, 9, 10, 11).

2 Computertomographie

Bei der Anwendung der CT wird das Maß der Abschwächung der Röntgenstrahlung gemessen, von der ein Probenobjekt durchdrungen wird. Die Röntgenstrahlabschwächung hängt dabei vor allem von der Materialdichte sowie der Ordnungszahl der Elemente ab (12). Materialien höherer Dichte absorbieren mehr Röntgenenergie als Materialien mit geringerer Dichte. Die Röntgenstrahlschwächung ist daher für jede Phase charakteristisch, aus der die Probe besteht. Ein 3D-CT-Messverfahren besteht im Wesentlichen aus der Aufnahme einzelner Probenprojektionen. Diese werden in einem voreingestellten Zeitintervall aufgenommen, während das zwischen Röntgenröhre und Detektor angeordnete Probenobjekt schrittweise um die eigene Achse rotiert. Die Projektionen werden dann rekonstruiert, um 2D-Schnittbilder zu erzeugen. Jeder Schnitt repräsentiert dabei eine bestimmte Mächtigkeit der gescannten Probe. Die resultierenden Daten werden als Rohdaten betrachtet, welche wiederum über eine Rekonstruktionssoftware zu einem vollständigen 3D-Bild verarbeitet werden.



Fig. 1. CT equipment consisting of motion system (1), detector (2), measuring PC (3), X-ray tube (4) and sample holder (5). Bild 1. CT-Gerät bestehend aus Bewegungssystem (1), Detektor (2), Messcomputer (3), Röntgenröhre (4) und Probenhalter (5). Source/Quelle: MRE

Since January 2020, a newly established CT laboratory is operational at the Institute of Mineral Resources Engineering (MRE), RWTH Aachen University, Aachen/Germany (Figure 1). The acquired CT scanner "ProCon CT-Alpha" is designed to meet the requirements from various fields of research, including the mining, geological, biological and archaeological sciences and engineering disciplines. The CT scanner has a high level of flexibility due to its large measuring cabinet, strong X-ray tube reaching 240 kV, large panel detector, and five-axes system of X-Y-Z-rotation-tilting. Large samples with a diameter of up to 600 mm can be analysed and resolutions down to 5 μ m are possible.

3 Material characterization in the mining sector 3.1 Established techniques

Throughout the mining value chain, processes are monitored by mineralogical, physical and chemical methods to optimize quality and quantity of the mineral products or concentrates. Various mineralogical methods are applied to understand and solve challenges encountered during exploration and mining as well as processing of ores, concentrates, smelter products, and related materials. The applied techniques characterize minerals and materials and the acquired data are then interpreted to provide information relevant for exploration, mineral processing, tailings disposal and treatment, hydrometallurgy, pyrometallurgy, and refining.

To date, various techniques have been developed for mineral characterization, such as optical microscopy (OM), scanning electron microscopy equipped with an energy or wave length dispersive X-ray analyzer (SEM/E-WDX), environmental scanning electron microscopy (E-SEM), electron microprobe analyser (EMPA), proton-induced X-ray analyzer (PIXE), secondary ion mass spectrometer (SIMS), infra-red spectrometry (IR), cathodoluminescence (CL), laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), and X-ray diffraction (XRD) (e.g., 10, 13, 14; Table 1). Results of these techniques provide information on the presence and properties of minerals in raw materials and allow an improved understanding of mineral behaviour during resource processing. In some cases, the

Prinzipiell sind Feststoffproben jeder Art für die CT-Analyse geeignet. Die einzige Anforderung an die Probenvorbereitung für das Scannen ist die Sicherstellung, dass ausreichend Platz zwischen Röntgenquelle und -detektor bei der Probenplatzierung besteht. Bei der Probenmontage wird die Probe auf dem metallischen Probenhalter fixiert, der auf dem Drehtisch des Bewegungssystems befestigt wird. Grundsätzlich empfiehlt es sich, Probenhalter und Probe im Vorfeld durch einen Gegenstand von niedrigerer Dichte zu trennen, da dies die Rekonstruktion der Probe erleichtert. Auf Basis der Probenbeschaffenheit werden anschließend die entsprechenden Scaneinstellungen am Messcomputer des CT-Scanners vorgenommen. Vor dem Start der Messung ist eine Kalibrierung erforderlich, um die Eigenschaften des Röntgensignals, wie es von den Detektoren unter Scanbedingungen gelesen wird, festzustellen. Die Mess- oder Scandauer hängt von den gewählten Parametern ab und dauert in der Regel einige Stunden. Nach der Rekonstruktion wird das 3D-Bild je nach Analyseziel weiterverarbeitet.

Am Institute of Mineral Resources Engineering (MRE) der RWTH Aachen ist seit Januar 2020 ein neu eingerichtetes CT-Labor in Betrieb (Bild 1). Der CT-Scanner "ProCon CT-Alpha" ist so konzipiert, dass er den Anforderungen aus verschiedenen Forschungsbereichen wie Bergbau, Geologie, Biologie, Archäologie und Ingenieurwissenschaften gerecht wird. Durch seinen groß bemessenen Messschrank, seine 240 kV-Röntgenröhre, seinen großen Flächendetektor und sein Fünf-Achsen-System mit X-Y-Z-Rotation und Tilting ist das Gerät äußerst flexibel einsetzbar. Proben mit einem Durchmesser von bis zu 600 mm können analysiert werden und Auflösungen von bis zu 5 µm sind möglich.

3 Materialcharakterisierung im Bergbausektor 3.1 Traditionelle Methoden

Über die gesamte Wertschöpfungskette des Bergbaus hinweg werden die Prozessabläufe mit mineralogischen, physikalischen und chemischen Methoden überwacht, um Qualität und Quantität der Mineralprodukte oder Konzentrate zu optimieren. Verschiedene mineralogische Charakterisierungsmethoden werden angewandt, um auftretende Herausforderungen bei der Exploration und dem Abbau sowie der Verarbeitung von Erzen, Konzen-

Characterisation technique	Information obtained	Information on dimen- sional geometries
Optical microscopy (OM)	Mineral identification, texture	2D
Scanning electron microscopy equipped with an energy or wave length dispersive X-ray analyzer (SEM/E-WDX)	Mineral identification, qualitative mineral chemistry, texture	2D
Environmental scanning electron microscopy (E-SEM)	Mineral identification, texture	2D
Electron microprobe ana- lyser (EMPA)	Mineral identification, quan- titative mineral chemistry	2D
Proton-induced X-ray ana- lyzer (PIXE)	Mineral identification, quan- titative mineral chemistry	2D
Secondary ion mass spec- trometry (SIMS)	Mineral identification, quan- titative mineral chemistry	2D
Cathodoluminescence (CL)	Mineral imaging	2D
Laser ablation inductively coupled plasma mass spec- trometry (LA-ICP-MS)	Trace element analysis of minerals	2D
Infra-red spectrometry (IR)	Mineral identification	Nil
Powder X-ray diffraction (XRD)	Mineral identification, crystallinity	Nil
Computed tomography (CT)	Phase identification based on density differences	3D

Table 1. Common analytical techniques used for the characterisation of mineralogical properties and dimensional geometries of geological ores and their products. Source: MRE

acquired information cannot be related to any dimensional geometries of the analysed samples, e.g., IR, XRD, whereas others techniques allow 2D visualization of the obtained mineralogical data, e.g., OM, SEM, EMPA (Table 1).

In view of the fact that ores and mineral deposits and their products represent 3D arrays of mineral assemblages, there is a need to acquire information on the 3D distribution of phases within ores, wastes and mineral products to achieve optimal material characterization and manufacturing of mineral products. Hence, in the following, recent experiences with the innovative CT method are documented.

3.2 Industrial computed tomography 3.2.1 Gold ore

There are several different types of gold ore deposits worldwide, however, most common to hard-rock gold deposits is a mineral paragenesis comprising native or invisible gold and different sulfides, especially pyrite, arsenopyrite and diverse base metal sulfides. The invisible gold occurs as gold metal, submicron- to nano-sized particles or as chemically bound gold in sulfide phases. Moreover, gold is obtained as a byproduct as from large copper and molybdenum porphyries or originates from the artisanal mining of surficial gold ores. Thus, sulfide minerals, e.g., arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, galena, are commonly associated with gold in hard-rock ore deposits. The presence of abundant sulfide minerals in gold ores does not only impact on leaching efficiencies during cyanide extraction, it may also lead to acid rock drain-

Charakterisierungsverfahren	Erhaltene Informationen	Information über dimen- sionale Geometrien
Optische Mikroskopie (OM)	Mineralidentifikation, Gefüge	2D
Rasterelektronenmikroskopie ausgestattet mit einem energie- oder wellenlängen- dispersiven Röntgenanalysator (SEM/E-WDX)	Mineralidentifikation, qualitative Mineralchemie, Gefüge	2D
Environmental scanning electron microscopy (E-SEM)	Mineralidentifikation, Gefüge	2D
Elektronenmikrostrahlsonde (EMPA)	Mineralidentifikation, quali- tative Mineralchemie	2D
Protoneninduzierte Rönt- genspektrometrie (PIXE)	Mineralidentifikation, quan- titative Mineralchemie	2D
Sekundärionen-Massen- spektrometrie (SIMS)	Mineralidentifikation, quan- titative Mineralchemie	2D
Kathodolumineszenz (CL)	Mineraldarstellung	2D
Laserablations-Massenspektro- metrie mit induktiv gekoppelter Plasmaionenquelle (LA-ICP-MS)	Spurenelementanalyse von Mineralen	2D
Infrarotspektrometrie (IR)	Mineralidentifikation	Nil
Röntgendiffraktometrie (XRD)	Mineralidentifikation, Kristallinität	Nil
Computertomographie (CT)	Phasenidentifikation basie- rend auf Dichteunterschieden	3D

Tabelle 1. Gängige Analyseverfahren zur Charakterisierung der mineralogischen Eigenschaften und dimensionaler Geometrien von geologischen Erzen und deren Produkten. Quelle: MRE

traten, Hüttenprodukten und verwandten Materialien zu verstehen. Die gewonnenen Daten werden anschließend interpretiert, um notwendige Materialinformationen für die Exploration, Mineralverarbeitung, Abraumentsorgung und -behandlung, Hydrometallurgie, Pyrometallurgie und Raffination zu liefern.

Bis heute wurden verschiedene Techniken zur Charakterisierung von Materialien entwickelt, wie z.B. optische Mikroskopie (OM), Rasterelektronenmikroskopie, ausgestattet mit einem energie- oder wellenlängendispersiven Röntgenanalysator (SEM/ E-WDX), Environmental Scanning Electron Microscope (E-SEM), Elektronenmikrostrahlsonde (EMPA), protoneninduzierte Röntgenspektrometrie (PIXE), Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS), Infrarotspektrometrie (IR), Kathodolumineszenz (CL), Laserablations-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppelter Plasmaionenquelle (LA-ICP-MS) und Röntgendiffraktometrie (XRD) (z.B. 10, 13, 14; Tabelle 1). Die Analysenergebnisse dieser Verfahren liefern Informationen über das Vorhandensein und die Eigenschaften von Mineralen in Rohstoffen und ermöglichen ein besseres Verständnis des Mineralverhaltens während der Rohstoffverarbeitung. In einigen Fällen beinhalten die erzielten Ergebnisse keine Informationen über die geometrischen Dimensionen der analysierten Proben, wohingegen andere dieser Techniken eine 2D-Visualisierung der gewonnenen mineralogischen Daten ermöglichen, z.B. OM, SEM, EMPA (Tabelle 1).

In Anbetracht der Tatsache, dass mineralische Lagerstätten und deren Rohstoffe und Produkte dreidimensionale Anordnungen von Mineralvergesellschaftungen darstellen, besteht die Notwendigkeit, Informationen über eben genau diese Verteilung von Phasen



Fig. 2. 3D visualisation of a gold ore sample from the Porgera gold-silver mine, Papua New Guinea (sample diameter approximately 7 cm). The yellow phase represents native gold. Note its skeletal texture. The blue coloured phases represent non-differentiated sulfides. Gangue material is shaded in light grey. // Bild 2. 3D-Visualisierung einer Golderzprobe aus dem Porgera Gold-Silber-Bergwerk, Papua-Neuguinea (Probendurchmesser ungefähr 7 cm). Die gelbe Phase stellt gediegen Gold dar, das skelettartig vorliegt. Die blau gefärbten Phasen zeigen nicht differenzierte Sulfide. Andere Gangminerale sind hellgrau dargestellt. Source/Quelle: MRE

age (ARD) in tailings storage facilities, waste rock dumps or heap leach piles.

To date, a number of investigations have documented the occurrence and distribution of gold in diverse ores using CT imaging (15). Results of these works have demonstrated that gold is of favorable density for CT imaging (e.g., 8, 16, 17, 18). In this study, a representative gold ore sample was obtained from the Porgera gold-silver mine, Papua New Guinea. Disseminated Porgera ore is characterized by fine-grained sulfides, comprising largely pyrite, marcasite, sphalerite, galena, pyrrhotite and freibergite present within a propylitic altered mudstone. In addition, there is a veinlet-related sulfide mineralization with carbonaceous quartz-gold-roscoelite veinlet-infill. CT imaging of these veinlets reveals three different phases of different density ranges, comprising gold, gangue minerals and diverse sulfides (19). High-density gold particles appear as bright objects, whereas less dense sulfide particles are distinctly paler (Figure 2). The low-density carbonate-mica-quartz gangue infill is reflected by greyish colors. Gold particles can be identified and particles sizes recorded. By contrast, the majority of sulfide particles occur as small grains that are disseminated throughout the ore matrix. These sulfides do not only show on the surfaces of the hand specimen, but a cloud of sulfides occurs in the entire rock volume. Normally this information would require systematic dissection of the specimen and the examination of many polished sections and/or a geochemical assay of the sample. Consequently, CT scanning provides valuable information in Erzen, Abfällen und mineralischen Produkten zu gewinnen, um eine optimale Materialcharakterisierung und Herstellung von mineralischen Proben zu erreichen. Nachfolgend werden daher beispielhaft aktuelle Erfahrungen mit der innovativen CT-Methode beschrieben.

3.2 Industrielle Computertomographie 3.2.1 Golderz

Weltweit gibt es verschiedene Arten von Goldlagerstätten. In primären Goldlagerstätten liegt Gold als gediegenes oder unsichtbares Gold zusammen mit einer Mineralparagenese aus verschiedenen Sulfiden vor, insbesondere Pyrit, Arsenopyrit und diversen Basismetallsulfiden. Das für das menschliche Auge nicht sichtbare Gold (invisible gold) tritt dabei als submikronbis nanometergroße Goldmetallpartikel oder als chemisch gebundenes Gold in Sulfidphasen auf. Darüber hinaus wird Gold als Nebenprodukt, z.B. aus großen porphyrischen Kupfer- und Molybdänlagerstätten, gewonnen oder stammt aus oberflächennahen Lagerstätten aus artisanaler Produktion. Sulfidminerale, z.B. Arsenopyrit, Pyrit, Chalkopyrit, Pyrrhotin, Bleiglanz, sind daher in Festgesteinslagerstätten häufig mit Gold vergesellschaftet. Das Vorhandensein von größeren Anteilen an Sulfidmineralen in Golderzen wirkt sich nicht nur auf die Auslaugungseffizienz bei der Zyanid-Laugung aus, son-

dern kann auch zu sauren Grubenwässern (Acid Mine Drainage) in Bergeteichen, Bergehalden oder Laugungsrückständen führen.

Das Vorkommen und die Verteilung von Goldpartikeln in Golderzen wurde in einer Reihe von Studien mit CT untersucht (15). Die Ergebnisse dieser Arbeiten haben gezeigt, dass Gold eine geeignete Dichte für die CT-Bildgebung aufweist (z.B., 8, 16, 17, 18). Für diesen Beitrag wurde eine repräsentative Golderzprobe aus dem Porgera Gold-Silber-Bergwerk in Papua-Neuguinea verwendet. Das disseminierte Porgera-Erz ist durch feinkörnige Sulfide – hauptsächlich Pyrit, Markasit, Sphalerit, Bleiglanz, Pyrrhotin und Freibergit - die in einem propylitisch alterierten Mudstone vorliegen, gekennzeichnet. Darüber hinaus weist die Probe eine aderartige Sulfidmineralisierung mit kohlenstoffhaltigen Quarz-Gold-Roscoelith-Aderfüllungen auf. Die CT-Bildgebung dieser Adern zeigt drei verschiedene Phasen mit unterschiedlichen Dichtewerten, welche Gold, Gangminerale und diverse Sulfide repräsentieren (Bild 2) (19). Goldpartikel mit hoher Dichte erscheinen als helle Objekte, während weniger dichte Sulfidpartikel deutlich blasser sind. Die niedrigdichte Karbonat-Glimmer-Quarz-Gangfüllung zeigt gräuliche Farben. Die Goldpartikel können identifiziert und ihre Partikelgrößen erfasst werden. Im Gegensatz dazu tritt die Mehrzahl der Sulfidpartikel als kleine Körner auf, die disseminiert in der gesamten Gesteinsmatrix sind. So wird deutlich, dass diese Sulfide nicht nur an den Oberflächen der Handstückprobe, sondern ebenfalls fein verteilt im gesamten Gesteinsvolumen vorliegen. Normalerweise würden diese Informationen eine systematische Zerlegung der Probe und die Untersuchung vieler polierter Schnitte und/oder on gold and sulfide abundances and particle distribution. Such data are of major interest for mineral processing and ARD risk assessment.

3.2.2 Salt ore

Rock salt and potash deposits contain the crystallised minerals derived from the evaporation of sea-water and intracontinental lakes. Rock salt deposits contain halite, ranging in grain size from a few micrometres to some decimetres, with intercalations and impurities of other phases, including gypsum, anhydrite, clay or MgCl₂ salts. By contrast, potash ore is composed of different K-bearing minerals such as sylvite, carnallite, bischofite and kieserite. Impurities of halite and other evaporate minerals plus clay are common. CT has successfully been applied to salt core samples to visualise the spatial distribution of fluid inclusions and to quantify the sample's porosity (20). Also, Hammer et al. (2015) successfully used CT to visualize the distribution of hydrocarbons in rock salt samples and, based on these findings, calculated the amount of hydrocarbons within their samples (21). In addition, CT imaging has been performed on rock salt samples to map anhydrite impurities expressed as clusters or layers (22).

To illustrate the application of CT on salt ores, a representative sample was used from the Hessian-Thuringian salt district in Germany. The sample is composed of large subhedral to euhedral intergrown crystals of halite and sylvite. In addition,



Fig. 3. Representative tomographic 2D slice image of salt ore from the Hessian-Thuringian salt district in Germany, showing grey-scale differentiation of halite (H), sylvite (S) and anhydrite (A). The red and blue coloured areas indicate the volumetric fraction of sylvite in the specimen in a selected rectangle area.

Bild 3. Repräsentatives 2D-CT-Schnittbild eines Salzes aus dem hessisch-thüringischen Salzrevier in Deutschland, das die Graustufendifferenzierung von Halit (H), Sylvin (S) und Anhydrit (A) zeigt. Die rot und blau gefärbten Bereiche zeigen den volumetrischen Anteil von Sylvin in der Probe in einem ausgewählten rechteckigen Bereich an. Source/Quelle: MRE

eine geochemische Untersuchung der Probe erfordern. CT-Untersuchungen von Golderzen liefern folglich wertvolle und schnelle Informationen über die Gold- und Sulfidhäufigkeit und deren Partikelverteilung. Derartige Daten sind von großem Interesse für die Aufbereitung und die Acid Mine Drainage-Risikobewertung.

3.2.2 Salz

Steinsalz- und Kalilagerstätten setzen sich aus Mineralen zusammen, welche das Verdunstungsprodukt interkontinentaler Seen und von Meerwasser darstellen. Steinsalzlagerstätten bestehen aus Halit mit Korngrößen von einigen Mikrometern bis hin zu einigen Dezimetern sowie Einlagerungen und Verunreinigungen anderer Phasen wie Gips, Anhydrit, Ton oder MgCl₂-Salzen. Im Gegensatz dazu setzt sich Kalisalz aus verschiedenen K-haltigen Mineralen wie Sylvin, Carnallit, Bischofit und Kieserit zusammen. Häufig liegen Verunreinigungen aus Halit und anderen Evaporiten sowie Ton vor. Die CT wurde erfolgreich für die Untersuchung von Salzkernen angewandt, um die räumliche Verteilung von Fluideinschlüssen zu visualisieren und die Porosität der Bohrkernproben zu quantifizieren (20). Des Weiteren nutzten Hammer et al. (2015) die CT erfolgreich zur Visualisierung der Verteilung von Kohlenwasserstoffen in Steinsalzproben und kalkulierten daraus die Menge an Kohlenwasserstoffen innerhalb der Proben (21). CT-Scans wurden ebenfalls an Steinsalzproben durchgeführt, um die Verunreinigung, welche als Cluster oder Schichten vorlagen, von Anhydrit zu kartieren (22).

> Um die Anwendungsmöglichkeiten von der CT im Hinblick auf die Analyse von Salzen aufzuzeigen, wurde eine repräsentative Probe aus dem hessisch-thüringischen Salzrevier verwendet. Die Probe besteht aus großen hypidiomorphen bis idiomorphen, verwachsenen Kristallen aus Halit und Sylvin. Zudem sind geringe Anteile von Anhydrit in der Salzprobe enthalten. Die CT-Bildanalyse der Probe zeigt drei unterschiedliche Grauwertbereiche, die Halit (dunkelgrau), Sylvin (mittelgrau) sowie Anhydrit (hellgrau) zuzuordnen sind (Bild 3). Risse und Spaltbarkeiten sind ebenfalls erkennbar. Die CT-Ergebnisse zeigen, dass die Korngrenzen der Salzminerale verzahnt bzw. unregelmäßig ausgeprägt sind und somit nicht durch deren Spaltbarkeit kontrolliert werden. An einigen Stellen ist Sylvin von Halit umschlossen. Darüber hinaus tritt xenomorpher Anhydrit gelegentlich als Füllung zwischen großen Halitund kleineren Sylvinkristallen sowie entlang von Spaltflächen von Halit auf.

> Computertomographische Analysen von Steinsalzproben können zur Berechnung der modalen Häufigkeit der Salzkomponenten durchgeführt werden. Weiterhin liefert die CT wertvolle Informationen zur Partikelgröße und -verteilung. Diese gewonnenen Daten sind vor allem für die salzverarbeitende Industrie von Bedeutung. Weiterhin ermöglicht die CT die Evaluation der detaillierten Verteilung von An

some portions of anhydrite are present. CT image analysis of the sample reveals three different grey value ranges which can be referred to halite (dark grey), sylvite (medium grey), as well as anhydrite (light gray) (Figure 3). Cracks and cleavages are also apparent. CT imaging shows that the grain boundaries of the salt minerals are interlocked or irregular, respectively, and are thus not controlled by the minerals' cleavage. Locally, sylvite is enclosed by halite. Furthermore, anhedral anhydrite appears occasionally as infill between large halite and smaller sylvite crystals and along halite cleavage planes.

CT scanning of hardrock salt samples can be used to calculate the modal salt components and provides valuable information on particle sizes and distributions. Such data are of major interest for salt processing. Moreover, CT imaging may allow to assess the detailed distribution of anhydrite within salt deposits and thus contributes to mine safety as sulfate intercalations are potential zones of mechanical weakness (31).

3.2.3 Graphite ore

Commercial sources of graphite are found in a variety of geological settings and result from the conversion of carbonaceous matter through metamorphic processes into graphite (graphitization). Graphite ore bodies can be quite variable, with graphite



Fig. 4. Representative tomographic 2D slice image of graphite ore, showing greyscale differentiation of graphite (C), zoisite (Z), kaolinite (K), combined quartz and feldspar (Qtz + Fs), clay minerals (CM), combined zoisite and biotite (Z+Bt), and limonite (L) in a graphite gneiss sample from Tanzania. The white box shows a selected region of interest with segmented volume of aligned subhedral graphite flakes.

Bild 4. Repräsentatives tomographisches 2D-Schnittbild von Graphiterz, das die Graustufendifferenzierung von Graphit (C), Zoisit (Z), Kaolinit (K), kombiniertem Quarz und Feldspat (Qtz + Fs), Tonmineralen (CM), kombiniertem Zoisit und Biotit (Z+Bt) sowie Limonit (L) in einer Graphitgneisprobe aus Tansania zeigt. Der weiß eingerahmte Bereich zeigt eine ausgewählte Untersuchungsregion mit segmentiertem Volumen von ausgerichteten hypidiomorphen Graphitflocken. Source/Quelle: MRE

hydrit in Salzlagerstätten und erlaubt somit auch Aussagen zur Standsicherheit von Sulfateinschaltungen, da sie potentielle Bereiche von mechanischer Schwäche darstellen (31).

3.2.3 Graphiterz

Wirtschaftlich abbaubare Graphitvorkommen treten in einer Vielzahl von geologischen Settings auf und sind das Ergebnis der Umwandlung von kohlenstoffreichem Material im Zuge von metamorphen Prozessen in Graphit (Graphitisierung). Die Graphiterzkörper können sehr unterschiedliche Gefügemerkmale aufweisen. Graphit liegt dabei in Form von kleinen Lagen, mächtigen Flözen, als Gang oder Stockworks vor. Darüber hinaus kann Graphit als Bestandteil von Brekzien oder fein verteilt im metamorphen Wirtsgestein vorkommen. Grundsätzlich wird zwischen drei Graphittypen unterschieden: mikrokristalliner Graphit, Flockengraphit und Ganggraphit. Verallgemeinert gesagt, bestimmen metamorphe Fazies sowie Fluidphasen die Korngröße des Graphits und die mineralogische Zusammensetzung des Graphiterzes und somit seine wirtschaftliche Bedeutung (23). Mineralogische Untersuchungen von Graphiterzen wurden bisher nur durch eine Kombination etablierter Techniken, wie oben beschrieben, durchgeführt. Die CT eignet sich ebenfalls, um zwischen weniger dichtem Graphit (Dichte von 2,26 g/cm³) und

> dichteren Mineralen, welche die Gangphasen bilden, z. B. Quarz mit einer Dichte von 2,65 g/ cm³, zu unterscheiden.

> Um die Anwendbarkeit der CT zur Untersuchung von Graphiterzen zu demonstrieren, wurde eine repräsentative Probe aus Tansania ausgewählt. In dieser Probe liegt Graphit in Form von mittelkörnigen Flocken in einem alterierten, folierten Schiefer vor, dessen Foliation auf die subparallel angeordneten Graphitflocken zurückzuführen ist. Die Grundmasse besteht hauptsächlich aus Quarz mit Feldspat, Kaolinit, Zoisit, alteriertem Biotit und Sekundärmineralen (Tonminerale und Eisenhydroxide). Die CT-Analysen zeigen sechs verschiedene Grauwerte, welche 1) Graphit, 2) Quarz und Feldspat, 3) Kaolinit, 4) Zoisit und Biotit, 5) Limonit und 6) Tonmineralen zugeordnet werden können (Bild 4). Die Graphitflocken erscheinen als dunkle Partikel, wohingegen dichtere Minerale hellere Grauwerte in den CT-Aufnahmen aufweisen. Eisenhydroxide erscheinen aufgrund ihrer hohen Dichte am hellsten in der vorliegenden Paragenese. Des Weiteren zeigt die CT-Bildgebung die Verteilung und Orientierung der Graphitkristalle sowie deren hypidiomorphe Kristallform und tabularen, flockigen Habitus. Das berechnete Volumen der Graphitpartikel beträgt zwischen 0,04 und 0,95 mm³.

> Da Reinheit und Korngröße die Hauptfaktoren sind, die den Graphitpreis bestimmen, kann die CT angewandt werden, um die Menge und die Arten der Verunreinigungen im

occurring as tiny layers, larger seams, lenses, and as veins, locally forming stockworks. Moreover, graphite can occur as part of breccia matrix or forms disseminations within metamorphic host rock. Three types of graphite are known: microcrystalline graphite, flake graphite and vein graphite. Generalized, the metamorphic facies and overprinting fluids dictate the grain size of graphite ore and the bulk mineral assemblage and thus the economic significance of graphite ores (23). To date, mineralogical investigations of graphite ores have been carried out only by a combination of established techniques as outlined above. However, CT is suited to distinguish between less-dense graphite (density of 2.26 g/cm³) and denser minerals forming the groundmass, i.e. quartz with a density of 2.65 g/cm³.

To demonstrate the applicability of CT on graphite ores, a representative example from Tanzania was chosen. Graphite occurs in an altered foliated schist in which foliation is defined by sub-parallel oriented medium-grained graphite flakes. The groundmass is composed of quartz with minor feldspar, kaolinite, zoisite, altered biotite and secondary minerals (clay minerals and iron oxy-hydroxides). CT imaging reveals six different grey colour values which can be assigned to 1) graphite, 2) combined quartz and feldspar, 3) kaolinite, 4) combined zoisite and biotite, 5) limonite, and 6) clay minerals (Figure 4). Graphite flakes occur as dark items, whereas denser minerals have brighter colours in CT images. Iron oxy-hydroxides are the brightest phases as they have the highest densities in the present mineral assemblage. In addition, CT imaging illustrates the distribution and orientation of graphite crystals as well as the subhedral, tabular, and flaky shape of graphite which range in volume from 0.04 to 0.95 mm³.

As purity and grain size are the factors that set the graphite price, CT analysis can be used to evaluate quantity and type(s) of impurities in graphite concentrate after crushing and grinding. In addition, CT can be used to measure flake sizes. All these are valuable information for improving mineral liberation and process design for further purification.

3.2.4 Copper ore

Copper minerals are usually found in nature in association with sulfur-bearing minerals. Copper metal is generally produced from mining and processing of low-grade ores containing copper as copper sulfides, oxides, sulfates and rarely as native copper. In calc-alkaline porphyry-Cu deposits, the ore is characterized by disseminated chalcopyrite, chalcocite, bornite and pyrite, whereas iron oxides and pyrrhotite are part of the mineral assemblage in alkaline types. Covellite and copper sulfosalts evolved during supergene or hypogene overprints and can form high-grade ores, which are currently mined, e.g., in the Andean cordillera. Depending on the conditions during formaGraphitkonzentrat nach dem Brechen und Mahlen zu bewerten. Darüber hinaus kann die CT genutzt werden, um die Korngröße der Flocken zu messen. All dies sind wichtige Informationen für die Verbesserung der Mineralfreisetzung und des Prozessdesigns der erforderlichen Aufbereitung.

3.2.4 Kupfererz

Kupferminerale liegen in der Natur gewöhnlich in Verbindung mit schwefelhaltigen Mineralen vor. Kupfermetall wird generell durch den Abbau und die Aufbereitung von niedriggradigen Erzen produziert, die Kupfersulfide, -oxide, -sulfate und in seltenen Fällen gediegenen Kupfer enthalten. In kalk-alkalischen, porphyrischen Kupferlagerstätten zeichnet sich das Erz durch disseminierten Chalkopyrit, Chalkosin, Bornit und Pyrit aus, wohingegen Eisenoxide und Pyrrhotin in Mineralvergesellschaftungen in alkalischen Kupferporphyren auftreten. Covellin und Kupfer-reiche Sulfosalze, die während der supergenen oder hypogenen Alteration entstehen, können hochgradige Erze formen, die zurzeit beispielsweise in den Anden abgebaut werden. Je nach Bildungsbedingungen können ebenfalls (unsichtbares) Gold, Silber und Molybdänit in Verbindung mit Kupfermineralen oder Pyrit auftreten.

CT-Untersuchungen von Kupfererzen wurden bereits durchgeführt, um Informationen über deren mineralogische und strukturelle Zusammensetzung zu erhalten. Das Verfahren wurde erfolgreich angewandt, um zwischen Kupfermineralen von relativ ähnlicher Dichte zu unterscheiden (24). Darüber hinaus wurde die CT zur Abschätzung der Mineralfreisetzungseigenschaften von Kupferporphyren genutzt (25, 26). Bild 5 zeigt eine rekonstruierte 3D-Aufnahme einer porphyrischen Kupferbohr-



Fig. 5. Rendered 3D CT image of a porphyry-copper ore drill core sample from the Grasberg mine, Indonesia (sample diameter approximately 6 cm). The rainbow colour range marks the volumetric distribution of the Cu-mineralisation with minor pyrite. Cu-mineralisation either is disseminated or occurs as veinlet infill (stockworks). The non-coloured parts of the rock model correspond to gangue material. // Bild 5. Gerendertes 3D-CT-Bild einer Kupferbohrkernprobe der Grasberg-Mine, Indonesien (Probendurchmesser ungefähr 6 cm). Der Regenbogenfarbbereich markiert die volumetrische Verteilung der Kupfer-Mineralisierung mit geringfügigem Anteil von Pyrit. Die Kupfer-Mineralisierung ist entweder disseminiert oder tritt als Aderfüllungen (Stockworks) auf. Die Gangart ist durch die nicht eingefärbten Bereiche des Gesteinsmodells dargestellt. Source/Quelle: MRE

tion (invisible) gold, silver and molybdenite are associated with copper minerals or with pyrite.

CT scanning has been conducted to obtain mineralogical and textural data on different copper ores. The technique was applied to differentiate, successfully, between copper minerals, which have relatively similar densities (24). Moreover, CT has been used to assess the liberation characteristics of porphyry copper ore (25, 26). Figure 5 shows the CT image of a porphyry copper ore drill core sample. The sample is composed of finegrained Cu sulfides (predominantly chalcopyrite) present within a groundmass of quartz and minor feldspar. Moreover, there is a veinlet-infill of Cu sulfides and minor pyrite. CT imaging of the copper ore reveals two different phases of density ranges, comprising sulfides and gangue material. Cu sulfides appear as bright objects. Low-density groundmass (quartz, feldspar) is reflected by greyish colours. CT image analysis reveals a disseminated sulfide assemblage as it is typical for such ore. Also, it exposes the typical veinlet mineralisation, represented by two small quartz veinlets with Cu sulfide infill and minor pyrite. Volumetric image segmentation of Cu sulfides turns it into a simple task to identify these structures as stockwork mineralisation, or truncating veinlets, more specifically, due to the offset of the diagonal veinlet. As stockwork veinlets are pathways and traps for mineralising fluids, recognition of the 3D distribution of stockwork formations and related disseminated mineralisation is critical for exploration and mine design of porphyry deposits.

Porphyry-Cu deposits are generally characterized by large tonnages and low-grade ores, with the copper being hosted by various ore minerals and host rocks. Different alteration assemblages are common and indicative, and such materials have to be treated differently during ore processing and their mechanical instability have to be considered for geotechnical mine planning and assessments. Therefore, CT helps to differentiate between different copper-ore minerals from groundmass phases and allows the recognition of variable altered and overprinted host rocks, some of them with poor mechanical stability.

4 Outlook

CT analysis is a powerful tool for imaging 3D details of natural or synthetic materials on a micron scale. The technique can be applied to any ore where the density contrast between target minerals and gangue material(s) can be resolved. Such CT image based analysis provides quantitative 3D microstructural information, e.g., grain sizes and distributions, mineral orientations, shapes, intergrowth characteristics, porosity and cracks, as shown before that cannot obtained by any other technique. In the mining industry, CT may become part of ore characterisation studies to provide a better understanding of ore mineralogy and parameters required to optimise exploration, mining, comminution and refining of the extracted and processed resources. Moreover, recent developments in CT technology allow the application of small CT scanners at mine sites to scan core samples and to obtain 3D images of mineral distributions in drill cores at mine and exploration sites. Thus, the technology now moves from the laboratory to production sites.

kernprobe. Die Probe besteht aus Kupfersulfiden - hauptsächlich Chalkopyrit - eingebettet in eine Grundmasse bestehend aus Quarz und etwas Feldspat. Des Weiteren ist eine Ader aus Kupfersulfiden und Pyrit vorhanden. CT-Aufnahmen des Kupfererzes zeigen zwei verschiedene Phasen mit unterschiedlicher Dichte. Die Kupfersulfide erscheinen als helle Objekte. Die Grundmasse (Quarz, Feldspat) hingehen weist graue Töne auf. Die CT-Bildanalyse zeigt eine disseminierte Sulfidvergesellschaftung, wie sie für ein solches Erz typisch ist. Weiterhin ist eine für Kupferporphyre charakteristische Adermineralisation zu erkennen, welche aus zwei kleinen Quarzadern mit Kupfersulfid und Pyrit besteht. Durch die volumetrische Bildsegmentierung der Kupfersulfide wird es zu einer trivialen Aufgabe, diese Strukturen als Stockworks-Mineralisationen, genauer gesagt als truncating veinlets, aufgrund des Versatzes der diagonalen Ader, zu identifizieren. Da Stockworks-Adern Wegsamkeiten und Fallen für mineralisierende Fluide sind, ist die Erkennung der 3D-Verteilung der Stockworks und der damit verbundenen disseminierten Mineralisation entscheidend für die Exploration sowie das Design des Abbauverfahrens und des Grubengebäudes von Porphyry-Lagerstätten.

Porphyrische Kupferlagerstätten sind im Allgemeinen durch große Volumina mit geringem Kupfergehalt gekennzeichnet, wobei das Kupfer von verschiedenen Erzmineralen stammt und in verschiedenen Wirtsgesteinen beherbergt wird. Unterschiedliche Alterationsparagenesen sind dabei üblich und charakteristisch für eine Lagerstätte. Diese Materialien müssen während der Erzaufbereitung unterschiedlich behandelt werden und ihre mechanische Instabilität muss bei geotechnischen Aspekten der Bergwerksplanung und -bewertung berücksichtigt werden. Computertomographische Untersuchungen helfen dabei zwischen verschiedenen Kupfermineralen und Gangphasen zu unterscheiden. Weiterhin ermöglicht die Technologie die Erkennung von unterschiedlich alterierten Wirtsgesteinen, von denen manche eine mechanische Instabilität aufweisen.

4 Ausblick

Die CT-Analyse ist eine leistungsfähige Methode zur 3D-Darstellung von natürlichen oder synthetischen Materialien im Mikrometerbereich. Die Technologie kann für all jene Erze angewandt werden, bei denen der Dichteunterschied zwischen Wert- und Gangmineral aufgelöst werden kann. Eine CT-basierende Analyse liefert, wie hier aufgezeigt, quantitative 3D-Mikrogefügeinformationen, z.B. Korngrößen und -verteilungen, Mineralorientierungen, Kornformen, Verwachsungsmerkmale, Porosität und Risse, die mit keinem anderen Verfahren ermittelt werden können. In der Bergbauindustrie kann CT zu einem festen Bestandteil bei Erzuntersuchungen werden, um ein besseres Verständnis der Erzmineralogie und von jenen Parametern zu erhalten, die für die Optimierung von Exploration, Abbau, Zerkleinerung und Veredelung der gewonnenen und verarbeiteten Ressourcen erforderlich sind. Aufgrund der jüngsten Entwicklungen in der CT-Technologie ist es ebenfalls möglich, kleinere CT-Geräte an Bergwerksstandorten zu installieren, um Bohrkernproben zu scannen und 3D-Bilder von Mineralverteilungen in den Bohrkernen an Bergwerks- und Explorationsstandorten zu erhalten. Somit rückt die Methode nun vom Labor in die Produktionsstätten vor.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Spencer, S.; Sutherland, D. (2000): Stereological correction of mineral liberation grade distributions estimated by single sectioning of particles. In: Image Anal. Stereol., vol. 19, no. 3, p. 175, doi: 10.5566/ias.v19.p175–182.
- (2) Maire, E.; Withers, P. J. (2014): Quantitative X-ray tomography. In: Int. Mater. Rev., vol. 59, no. 1, pp 1–43, doi: 10.1179/1743280413Y.000000023.
- (3) Vásárhelyi, L.; Kónya, Z.; Kukovecz, Á.; Vajtai, R. (2020): Microcomputed tomography–based characterization of advanced materials: A review. In: Mater. Today Adv., vol. 8, p. 100084, doi: 10.1016/ j.mtadv.2020.100084.
- (4) Cnudde, V.; Boone, M. N. (2013): High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. In: Earth-Sci. Rev., vol. 123, pp 1–17, doi: 10.1016/ j.earscirev.2013.04.003.
- (5) Saif, T.; Lin, Q.; Butcher, A. R.; Bijeljic, B.; Blunt, M. J. (2017): Multiscale multi-dimensional microstructure imaging of oil shale pyrolysis using X-ray micro-tomography, automated ultra-high resolution SEM, MAPS Mineralogy and FIB-SEM. In: Appl. Energy, vol. 202, pp 628–647, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.039.
- (6) Vukmanovic, Z.; Fiorentini, M. L.; Reddy, S. M.; Godel, B. (2019): Microstructural constraints on magma emplacement and sulfide transport mechanisms. In: Lithosphere, vol. 11, no. 1, pp 73–90, doi: 10.1130/L743.1.
- (7) Voigt M. J.; Miller, J.; Bbosa, L.; Govender, R. A.; Bradshaw, D.; Mainza, A.; Becker, M. (2019): Developing a 3D mineral texture quantification method of drill core for geometallurgy. In: J. South. Afr. Inst. Min. Metall., vol. 119, no. 4, doi: 10.17159/2411-9717/590/2019.
- (8) Kyle, J. R.; Ketcham, R. A. (2014): Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing. In: Ore Geol. Rev., vol. 65, pp. 821–839, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.09.034.
- (9) Becker, M.; Jardine, M. A.; Miller, J. A.; Harris, M. (2016): X-ray computed tomography a geometallurgical tool for 3D textural analysis of drill core? In: Proceedings of the 3rd AusIMM International Geometallurgy Conference, pp 15–16.
- (10) Miller, J. D.; Lin, C. L. (2018): X-ray tomography for mineral processing technology 3D particle characterization from mine to mill. In: Miner. Metall. Process., vol. 35, no. 1, pp 1–12, doi: 10.19150/ mmp.8052.
- (11) Guntoro, P. I.; Ghorbani, Y.; Koch, P.-H.; Rosenkranz, J. (2019): X-ray microcomputed tomography (μCT) for mineral characterization: A review of data analysis methods. In: Minerals, vol. 9, no. 3, pp. 20–26, doi: 10.3390/min9030183.
- (12) Berger, M. J.; Hubbell, J. H.; Seltzer, S. M.; Chang, J.; Coursey, J. S.; Sukumar, R.; Zucker, D. S.; Olsen, K. (2010): NIST standard reference database 8 (XGAM). Natl. Inst. Stand. Technol. Gaithersburg MD USA.
- (13) Butler, I. B.; Nesbitt, R. W. (1999): Trace element distributions in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: Insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA– ICP–MS). In: Earth Planet. Sci. Lett., vol. 167, no. 3, pp 335–345, doi: 10.1016/S0012-821X(99)00038-2.
- (14) Stromberg, J. M.; van Loon, L. L., Gordon, R.; Woll, A.; Feng, R., Schuman, D.; Banerjee, N. R. (2019): Applications of synchrotron X-ray techniques to orogenic gold studies; examples from the Timmins gold camp. In: Ore Geol. Rev., vol. 104, pp 589–602, doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.015.
- (15) Dominy, S. C.; Platten, I. M.; Howard, L. E.; Elangovan, P.; Armstrong, A.; Minnitt, R. C. A.; Abel, R. L. (2011): Characterisation of gold ores by X-ray computed tomography Part 2: Applications to the determination of gold particle size and distribution. In: Proceedings of the 1st AusIMM International Geometallurgy Conference, pp 293–309.

- (16) Kyle, J. R.; Ketcham, R. A. (2003): In situ distribution of gold in ores using high-resolution X-ray computed tomography. In: Econ. Geol., vol. 98, pp 1697–1701.
- (17) Chisambi, J.; von der Heyden, B.; Tshibalanganda, M.; Le Roux, S. (2020): Gold exploration in two and three dimensions: Improved and correlative insights from microscopy and X-ray computed tomography. In: Minerals, vol. 10, no. 5, 476, doi: 10.3390/ min10050476.
- (18) Dominy, S.; Platten, I.; Xie, Y.; Cuffley, B.; O'Connor, L. (2016): Characterisation of gold from the Nick O'Time shoot (Tarnagulla, Australia) using high-resolution X-ray computed tomography. In: Proceedings of the 3rd AusIMM International Geometallurgy Conference, pp 241–254.
- (19) Gainov, R.; Lottermoser, B. G.; Kolobov, S.; Szabo, G. (2020): Computed tomography of gold ore from the Porgera mine, Papua New Guinea: Implications for acid rock drainage prediction. Book of Abstracts of the 10th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2020), Wels, Austria, pp. 215–216.
- (20) Thiemeyer, N.; Pusch, M.; Hammer, J.; Zulauf, G. (2014): Quantification and 3D visualisation of pore space in Gorleben rock salt: Constraints from CT imaging and microfabrics. In: Z. Dtsch. Ges. für Geowiss., pp 15–25, doi: 10.1127/1860-1804/2014/0050.
- (21) Hammer, J.; Pusch, M.; Häger, A.; Ostertag-Henning, C.; Thiemeyer, N.; Zulauf, G. (2015): Hydrocarbons in rock salt of the Gorleben salt dome – amount, distribution, origin, and influence on geomechanical properties. In: Mechanical behavior of salt VIII: Proceedings of the conference on mechanical behavior of salt, SALTMECH VIII. CRC Press/Balkema, Leiden, Netherlands, pp 69–75.
- (22) Thiemeyer, N.; Habersetzer, J.; Peinl, M.; Zulauf, G.; Hammer, J. (2015): The application of high resolution X-ray computed tomography on naturally deformed rock salt: Multi-scale investigations of the structural inventory. In: J. Struct. Geol., vol. 77, pp 92–106, doi: 10.1016/j.jsg.2015.05.014.
- (23) Jara, A. D.; Betemariam, A.; Woldetinsae, G.; Kim, J. Y. (2019): Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. In: Int. J. Min. Sci. Technol., vol. 29, no. 5, pp 671–689, doi: 10.1016/j.ijmst.2019.04.003.
- (24) Kyle, J. R.; Mote, A. S.; Ketcham, R. A. (2008): High resolution X-ray computed tomography studies of Grasberg porphyry Cu-Au ores, Papua, Indonesia. In: Miner. Deposita, vol. 43, no. 5, pp 519–532, doi: 10.1007/s00126-008-0180-8.
- (25) Reyes, F.; Lin, Q.; Udoudo, O.; Dodds, C.; Lee, P. D.; Neethling, S. J. (2017): Calibrated X-ray micro-tomography for mineral ore quantification. In: Miner. Eng., vol. 110, pp 122–130, doi: 10.1016/ j.mineng.2017.04.015.
- (26) Reyes, F.; Lin, Q.; Cilliers, J. J.; Neethling, S. J. (2018): Quantifying mineral liberation by particle grade and surface exposure using X-ray microCT. In: Miner. Eng., vol. 125, p. 75–82.

Authors / Autoren

Leonard Krebbers M.Sc., Dr. rer. nat. Ramil Gainov, Univ.-Prof. Bernd G. Lottermoser Ph.D., Dr. rer. nat. Stephanie Lohmeier, Dr.-Ing. Alexander Hennig, Institute of Mineral Resources Engineering (MRE), RWTH Aachen University, Aachen/Germany