Muska Ahmadsei, Alina Kröger

Kupferlagerstätten in Zypern
– Entstehungsbedingungen und Nutzungspotenzial –

Nach getaner Arbeit in der Troulloi-Mine

Jugend forscht 2015 – Eine Arbeit für den Regionalwettbewerb „Hamburg-Volkspark“

Abgabetermin: 28. Januar 2015

Inhaltsverzeichnis

	Inhalt	Seite
	Personendaten und Kurzfassung	3
1.	Einleitung	4
2.	Arbeitshypothese	4
2.1	Zielsetzung	4
2.2	Leitfragen	4
3.	Geologie	5
3.1	Entstehung Zyperns	5
3.2	Erzbildung	5
3.2.1	Black Smoker	5
3.2.2	Asbest	6
3.2.3	Kupfer	6
3.2.4	Seltenerdenelemente (SEE)	6
3.3	Kupferbergbau in Zypern	7
3.4	Vorstellung der Minen	7
4.	Methodische Vorgehensweisen	8
4.1	Vorbereitungen der Arbeit durch eine Satellitenbildanalyse	8
4.2	Arbeit im Gelände	8
4.3	Laboranalysen	8
4.3.1	Rasterelektronenmikroskopie	8
4.3.2	Röntgenfluoreszenzanalyse (chemische Analyse)	8
4.3.3	Dünnschliffanalyse (mineralogische Analyse)	9
5.	Ergebnisdarstellung	9
5.1	Chemische Zusammensetzung der Gesteinsproben	9
5.1.1	Rasterelektronenmikroskopie	9
5.1.2	Röntgenfluoreszenzanalyse	12
5.2	Mineralogische Analyse der Gesteinsproben	13
6.	Abgleich der Ergebnisse mit der Arbeitshypothese	15
7.	Fazit	17
	Quellennachweise	18
	Danksagung	19

Geo- und Raumwissenschaften
Betreuungslehrer: Wolfgang Fraedrich, Neli Heidari

Personendaten

Muska
Ahmadsei
Erich-Plate-Weg 40
22419 Hamburg
Telefon: 040-53779290
Telefon (mobil): 0176-34847075
E-Mail: muska-ah@hotmail.de
Klasse: 11
Geb.-Datum: 05.08.1998
Frühere Teilnahme: SchüEx 2013, Jufo 2014

Alina
Kröger
Fibigerstraße 291
22419 Hamburg
Telefon: 040-5323018
Telefon (mobil): - - -
E-Mail: alinakroeger@alice-dsl.net
Klasse: 11
Geb.-Datum: 27.05.1998
Frühere Teilnahme: SchüEx 2011, 2013, Jufo 2014

Thema

Kupferlagerstätten in Zypern – Entstehungsbedingungen und Nutzungspotenzial

Kurzfassung

Zypern ist das Land des Kupferbergbaus gewesen, der Name des Landes ist vom lateinischen Wort „cuprum“ abgeleitet worden. Von einer Vielzahl größerer und kleinerer Kupfererzminen ist nur noch eine einzige aktiv. Es stellt sich die Frage, ob in einer Zeit, in der Kupfer als Rohstoff vor allem in der boomenden Elektronikbranche immer begehrter wird, die Nachfrage nicht auch über die Wiederbelebung des Kupferbergbaus in Zypern dem finanzschwachen EU-Land zusätzlich Devisen bringen kann. Wir haben die Kupfererze genauer untersucht – und festgestellt, dass darin auch Seltene Erden enthalten sind.

1. Einleitung

Wir bekamen im April 2014 die Möglichkeit, mit einer kleinen Schülergruppe und unseren zwei Betreuungslehrern Herrn Fraedrich und Frau Heidari nach Zypern zu fliegen, um dort für ein Projekt im Gebiet der Geo- und Raumwissenschaften zu forschen. Die Geologie dieses Landes verschaffte uns allen die Möglichkeit, in den verschiedensten Bereichen der Geo- und Raumwissenschaft im Verlauf der insgesamt sechs Exkursionstage zu forschen. Wir untersuchten dabei verschiedene Kupferminen und eine Asbestmine im Tróodos Komplex, welche jedoch zum größten Teil schon stillgelegt sind. Vor Ort führte uns der Geologe Christodoulos Hadjigeorgiou von Geological Survey of Cyprus (Nikos ia) durch die Amiantos-Mine im Tróodos-Gebirge, erläuterte uns die Entwicklung Zyperns und die geologischen Rahmenbedingungen des Bergbaus auf Zypern und verschaffte uns auch einen Einblick in die praktische Arbeit der Minenarbeiter. In insgesamt sieben Minen nahmen wir Proben, und konnten diese im Mineralogisch-Petrographischen Institut sowie dem Zoologischen Institut der Universität Hamburg zu Dünnschliffen aufbereiten und chemisch analysieren lassen. Auf den Analyseergebnissen baut sich die folgende Arbeit auf. Als weiteres Analyseverfahren war auch die Auflicht- oder Reflexionsmikroskopie angedacht. Aufgrund technischer Probleme im Mineralogisch-Petrographischen Institut der Universität Hamburg haben wir die bereits dafür eigens präparierten Proben bisher noch nicht auf diesem Weg analysieren können.

2. Arbeitshypothese

2.1 Zielsetzung

Mithilfe der makroskopischen Betrachtung, der chemischen und mineralogischen Analyse und der Lagerstättenverortung und -beschreibung wollen wir die Minennutzung Zyperns beurteilen und analysieren. Wir konzentrieren uns dabei zunächst auf

1) die Rasterelektronenmikroskopie,
2) die Dünnschliffanalyse,
3) die Röntgenfluoreszenzanalyse.

Anhand der Analyseergebnisse werden wir beurteilen, ob sich die Mine Skouriotissa (noch in Betrieb) wirklich von den anderen Minen, die nicht mehr in Betrieb sind, unterscheidet und inwiefern sich das Erz Zyperns noch effektiver nutzen lässt.

2.2 Leitfragen

1) Wie sehen die gefundenen Erze aus und wie sind sie in das Gestein eingebunden?
2) Wie setzen sich die gefundenen Erze zusammen?
3) Wie unterscheidet sich die Skouriotissa Mine von den anderen Minen?
    a. Wie ist die Qualität der Erze im Vergleich?
    b. Wie bauen sich die Lagerstätten auf (Vergleich)?
4) Ist eine erneute Nutzung der Minen, die heutzutage nicht in Betrieb sind, sinnvoll (in Hinblick auf Kupferabbau)?

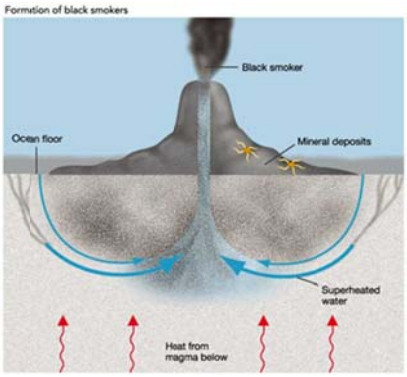
3. Geologie

3.1 Entstehung Zyperns

[1]Vor ca. 200–170 Mio. Jahren begann der Großkontinent Pangaea auseinanderzubrechen. Zunehmend häufiger ist Magma aus dem Riss der Erdkruste ausgetreten. Es hat sich ein vulkanischer Rücken im neu entstandenen Tethysmeer gebildet. Das Tethys-Ozean lag zwischen der Europäischen und der Afrikanischen Platte. Erst vor 35 Mio. Jahren nahm die Aktivität des vulkanischen Rückens ab und die Magmakammer begann abzukühlen. Das Unterwassergebirge wurde mit der Zeit von Kalkschlamm und Sand überdeckt, die sich zu Kalkstein und Sandstein verfestigten. Seit ungefähr 25 Mio. Jahren bewegt sich die Afrikanische Platte in Richtung Norden, wodurch eine Subduktionszone zwischen der Europäischen und Afrikanischen Platte entstand. Die Afrikanische Platte ist unter die Europäische Platte „getaucht". Durch die Einengung des Tethys-Ozeans infolge der anhaltenden Plattenkonvergenz wurde dessen Kruste zum Teil gehoben („herausgepresst"). Man nennt gehobene Ozeankrusten Ophiolith-Komplexe. Das heutige Tróodos-Gebirge im Südwesten (violett in der o. a. Abbildung) und die Keryneia-Kette im Norden (blau in der o. a. Abbildung) sind entstanden. Aufgrund der Abtragung des Tróodos-Gebirges und der Anlagerung des Materials am Fuße dieses Komplexes entstand das Mamonia-Gebirge im Südwesten, dabei wurden die abgelagerten Sedimente auch noch mit herausgehoben. Zwischen den beiden Gebirgen lag ein Flachmeer, das vor 2 Mio. Jahren trocken fiel und eine Landverbindung zwischen dem Tróodos-Gebirge und der Kerynia-Kette bildete, die Mesaroia- Ebene. Das heutige Zypern war entstanden.

3.2 Erzbildungen

3.2.1 Black Smoker



[2]Black Smoker treten nur an Rückensystemen auf. Sie sind meist auch in Verbindung mit Kissenlava vorzufinden. Durch poröse Stellen in der erstarrten Lava dringt das Meerwasser in die Basaltlavakruste ein, welche sich über einer Magmakammer befinden. Dadurch entsteht eine hydrothermale Quelle. Das Wasser erhitzt sich auf bis zu 350 °C und laugt die Elemente aus dem vulkanischen Gestein heraus. Mit den Elementen bzw. den Sulfiden und Salzen von Eisen, Mangan, Kupfer und Zink reichert sich das Wasser an. Wenn der erhitzte Wasserdampf aufsteigt, reagiert er mit dem kalten Meerwasser. Die Lösung übersättigt sich und kühlt ab. Es kommt zu einer dunklen Wolke aus Sulfidkristallen. Die dunkle Verfärbung kommt u. a. durch

[1] Bild 1: http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/9a1db1fca44095b4c2256fb200569781/f1191b52d1da7c03c2256fb20056a3d6/MainText/0.6E6?OpenElemFormat=jpg

[2] Bild 2: http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/summer2002/blacksmoker.jpg

den hohen Anteil des oxidierten Eisens zustande. Die abgekühlten Erzminerale fallen zu Boden und bilden einen röhrenförmigen „Kamin“ bzw. eine Mündung, aus dem/der die hydrothermalen Lösungen austreten.

3.2.2 Asbest

Asbest ist ein faseriges Silikat-Mineral, das sehr biegsam und unter anderem hitzebeständig und gegenüber Chemikalien resistent ist. Es gibt viele verschiedene Arten von Asbest. Der am häufigsten in der Industrie verwendete Asbest heißt „Serpentinasbest“ oder auch „weißer Asbest“. Es handelt sich dabei um das Schichtsilikat Chrysotil. Die Fasern sind nadelähnlich aufgebaut. Die Gefahr, die von Asbest ausgeht, ist, dass die mikroskopisch feinen Fasern (Asbeststaub) sehr schnell eingeatmet werden können und sich in der Lunge festsetzen. Sie sind hoch krebserregend. Deshalb wird heute auf jeglichen Asbest in der Industrie verzichtet und alte Gebäude mit verbautem Asbest werden aufwendig saniert.
Für uns bedeutete dies, die Asbestos-Mine nur mit spezieller Schutzkleidung und mit Mundschutz zu betreten.

3.2.3 Kupfer

Kupfer (Cu) ist ein immer stärker begehrtes Buntmetall. Es ist relativ weich, weshalb es gut verarbeitet werden kann, außerdem leitet es sowohl Wärme als auch Strom sehr gut. In den letzten Jahren ist der Kupferbedarf drastisch gestiegen, was sich natürlich auf den Kupferpreis auswirkt. In den verschiedensten Lagerstätten (sowohl hydrothermal, als auch magmatisch), wie zum Beispiel VMS („Vulkanogene massive Sulfidlagerstätten“) oder IOCG („Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagestätten“), kommt Kupfer vor. In diesen gibt es verschiedene Kupferminerale, dabei ist der Kupferkies (Chalkopyrit $CuFeS_2$) mit circa 34 % Kupfergehalt das häufigste und wichtigste Mineral für die Kupfergewinnung. Um das Buntmetall rentabel abzubauen und zu reinem Kupfer aufzubereiten, muss in diesen Lagerstätten ein Kupfergehalt im Gestein von mindestens 0,002 % vorliegen. Bei kleineren Lagerstätten müssen diese Prozentzahlen deutlich höher sein, um ein rentables Ergebnis zu erzielen.

3.2.4 Seltenerdelemente (SEE)

Die Seltenerdelemente (SEE) bilden eine Stoffgruppe des Periodensystems, welche die Gruppe der Lanthanoide (von Lanthan bis Lutetium) und die beiden Elemente Yttrium und Scandium (erste Nebengruppe) beinhaltet. Insgesamt zählen also 17 Elemente zu den „Rare Earth Elements“ (engl. REE). Alle 17 Elemente verhalten sich chemisch und physikalisch sehr ähnlich und können nur gemeinsam gefördert werden. Die SEE sind fälschlicherweise jedoch nicht so selten, wie es der Name vermuten lässt. Da diese Elemente sehr schwer von anderen bzw. von einander zu isolieren sind, bezeichnete man sie als „Seltene Erden“. Darüber hinaus ist die Aufbereitung sehr teuer, aufwendig und umweltschädigend. Alle Seltenen Erden mit Ausnahme von Cer und Europium treten als dreiwertige Kationen auf (Ce^{4+}, Eu^{2+}). Man teilt die SEE zusätzlich in zwei Gruppen auf: leichte und schwere SEE. Als Nebenelemente der SEE treten häufig Thorium und Uran auf.

3.3 Kupferbergbau in Zypern

Von unseren beprobten Minen wurde nur in der Skouriotissa-Mine Kupfer abgebaut. Aufgrund dessen werden wir im Folgenden nur auf das Verfahren des Kupferbergbaus in der Skouriotissa-Mine eingehen. Durch geplante Sprengungen in der Mine wird Gestein aus dem Berg gelöst und zerkleinert, sodass man das in dem Gestein enthaltene Kupfererz weiterverarbeiten kann. Daraufhin wird ein biotechnologisches Verfahren angewendet, in dem Bakterien und andere Mikroorganismen durch ihre Stoffwechselprozesse Metalle (hier also Kupfer) aus den Erzkörpern herauslösen. Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass es energieeffizienter und umweltfreundlicher ist als herkömmliche Trennverfahren, da auf die normalerweise verwendete Schwefelsäure verzichtet wird. Anschließend erfolgt die „elektrolytische Kupferraffination“. Die gewonnen Metalle aus dem Bakterienbad werden in eine angesäuerte Kupfersulfatlösung gegeben. Elektroplatten aus Kupfer dienen als Anoden und Edelstahlbleche als Kathoden. Die unedleren Bestandteile des „Metallgemisches aus dem Bakterienbad“ oxidieren und gehen in die Lösung über, wohingegen die edleren Metalle bei der elektrochemischen Oxidation der Anode als unlöslicher Schlamm herabfallen. An den Kathoden scheidet sich hochreines Kupfer mit einem Gehalt von 99,99 Prozent ab.

3.4 Vorstellung der Minen

Die untersuchten Minen sind im Tróodos-Ophiolith und seinen Ausläufern angesiedelt. Die Erze sind in verschiedenes Gestein eingebunden. Wir haben fünf stillgelegte Minen und zusätzlich auch noch eine Mine, die noch in Betreib ist, beprobt.

Die Amiantos-Mine liegt südwestlich von Nikosia im Tróodos-Gebirge. Die Asbestadern haben sich in Harzburgit bzw. Plutonit gebildet. Die Mine ist stillgelegt aufgrund des nicht mehr benötigten und schädlichen Erzes Asbest. Sie umfasst in ca. 430 m über Meereshöhe eine Fläche von ca. 113 000 m^2.

Die Mathiatis-Mine befindet sich südlich von Nikosia am Rand des Tróodos-Gebirges in einer Höhe von ca. 312 m und umfasst eine Fläche von ca. 50 000 m^2. In ihr wurde Kupfererz abgebaut. Heute ist sie stillgelegt. Die Erze bildeten sich in Kissenlava.

Die Skouriotissa-Mine ist die älteste Kupfermine weltweit, die zudem noch in Betrieb ist. Sie liegt westlich von Nikosia am Rand des Tróodos-Gebirges auf ca. 270 m Höhe. Ihre Fläche ist vergleichbar mit der der Amiantos-Mine. Hier sind die Erze verschieden eingebunden in das Gestein: Es gibt hydrothermale Bildungen, Bildungen an Black Smokers und „normale“ Einbindungen in Kissenlava.

Die östliche Mitsero-Mine (Agrokipia) und die westliche Mitsero-Mine (Kokkinopezoula) liegen südwestlich von Nikosia am Rand des Tróodos-Gebirge. Sie sind ebenfalls Kupferminen (stillgelegt). Beide umfassen jeweils eine Fläche von ca. 71 000 m^2 auf einer Höhe von ca. 410 m. Die Erze sind in Kissenlava eingebunden. Die Troulloi-Mine liegt südöstlich von Nikosia auf einer Meereshöhe von knapp 100 m und hat eine Fläche von ca. 63 000 m^2. Die ehemalige Kupfermine liegt morphologisch außerhalb des Tróodos-Gebirges, aber noch auf dem gleichen Grundgestein des Tróodos-Komplexes (Ophiolit). Die Erze sind in Kissenlava eingeschlossen.

4. Methodische Vorgehensweisen

4.1 Vorbereitungen der Arbeit durch eine Satellitenbildanalyse

Ein Aspekt, sich auf die anstehende Exkursion vorzubereiten, war eine Satellitenbildanalyse aller Minen. Wir erarbeiteten uns auf Grundlage von Minenbildern aus Google Earth eine Übersicht von unseren bevorstehenden Exkursionstagen. Außerdem versuchten wir anhand der Farbe des Gesteins schon einmal im Vorhinein abzugrenzen, wo man Proben nehmen könnte. Mithilfe von verschiedenen geologischen Karten Zyperns (siehe Quellenverzeichnis) konnten wir zudem die Minen in Bezug auf die magmatische Herkunft einordnen.

4.2 Arbeit im Gelände

Wir arbeiteten an insgesamt sechs verschiedenen Minen an vier Tagen. Bei den Beprobungen achteten wir hauptsächlich auf die „äußerlichen Merkmale“ des Gesteines. Das bedeutet, dass wir auf die Verwitterung, die Farbe und die Mineralisierung achtgaben, um möglichst verschiedene Proben zu nehmen. In der Amiantos-Mine mussten wir aufgrund des Asbestes noch Schutzkleidung tragen und zudem mussten wir darauf achten, nicht zu faserige Proben zu entnehmen, da wir sie auch nach Hamburg mitnehmen mussten, was bei einem zu hohen Kristallisationsgrad zu gefährlich gewesen wäre. Nebenbei vermerkten wir die Probeentnahmestellen auch mit GPS-Daten in unserem Feldbuch. Im Hotel arbeiteten wir die GPS-Daten dann in die Google Earth-Bilder ein und setzten Punkte an unseren Probeentnahmestellen.

4.3 Laboranalysen

4.3.1 Rasterelektronenmikroskopie

Unsere Proben wurden auf winzige Plättchen geklebt und in das Mikroskop eingesetzt. Nach kurzer Zeit konnten wir dann ein Bild unserer Probenoberfläche erkennen. In Absprache mit Frau Walter[3], die das Elektronenmikroskop bediente, haben wir dann einen geeigneten Ausschnitt ausgewählt, den wir in 200-facher und 62-facher Vergrößerung aufgenommen haben. Zusätzlich haben wir auch Elementanalysen durchgeführt, dabei werden die im Substrat des im Bild erfassten Ausschnitts enthaltenen chemischen Elemente als Oxidverbindung (z. B. Siliziumoxid = SiO_2) nachgewiesen. Diese Analyse ist wichtig für unsere Arbeit, da wir dadurch einen anderen Aspekt der Unterscheidung durch die Elemente aufzeigen können.

4.3.2 Röntgenfluoreszenzanalyse (chemische Analyse)

Mithilfe der chemischen Analyse können wir die elementare Zusammensetzung unserer Proben aufarbeiten. Die Röntgenfluoreszenzanalyse wurde im Mineralogischen Institut der Universität Hamburg durchgeführt. Hierbei werden kleinste Teile unser Probe entsprechend aufbereitet mit Hilfe von Röntgenstrahlung und einem Detektor auf ihre qualitative und quantitative chemische Zusammensetzung hin analysiert. Es ist noch einmal wichtig zu erwähnen, dass dabei keinesfalls auf die genaue Verteilung

[3] siehe Danksagung

der elementarischen Bestandteile im Gestein zu schließen ist. Die Analysewerte bekamen wir in einer Excel-Datei zugeschickt.

4.3.3 Dünnschliffanalyse (mineralogische Analyse)

Bei einer Dünnschliffanalyse werden die einzelnen Gesteinsproben auf ihr Gefüge und ihren Kristallisationsgrad hin untersucht. Mithilfe eines Polarisationsmikroskops werden die auf 30/1000 mm heruntergeschliffenen und dadurch durchsichtigen bzw. lichtdurchlässigen Gesteinsplättchen betrachtet. Die einzelnen Kristalle, wie Plagioklase oder Olivine, können jetzt genau identifiziert werden. Ein Polarisationsmikroskop arbeitet entweder mit linearem oder mit gekreuztem Licht, was es vom herkömmlichen Mikroskop unterscheidet. Daher kann man genau die einzelnen Kristalle bestimmen. Die Kristallisation ist ein wichtiger Unterscheidungsaspekt bei unseren Proben, weil sie Auskunft über die Entstehung und Bildung der Erzminerale gibt. Von den Dünnschliffen haben wir dann auch noch Fotos gemacht, um sie für unsere spätere Arbeit und Präsentation abrufbar zu behalten.

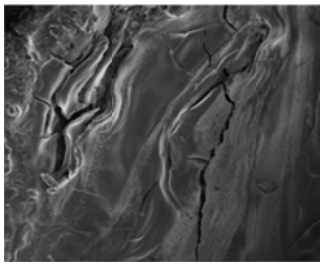
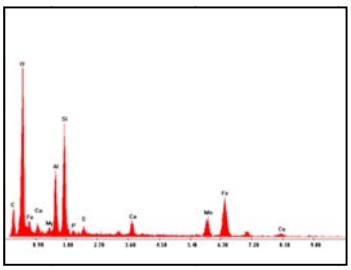
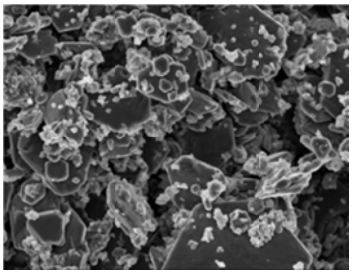
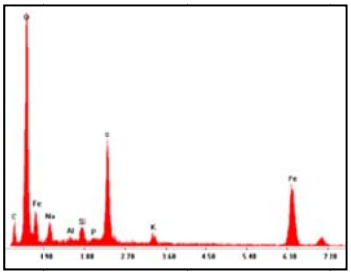
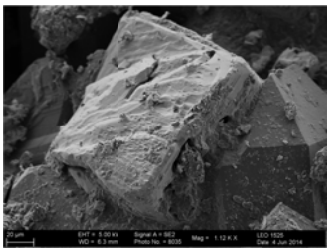
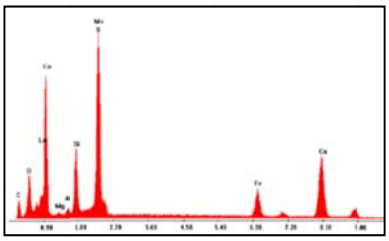
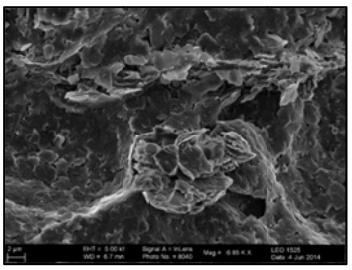
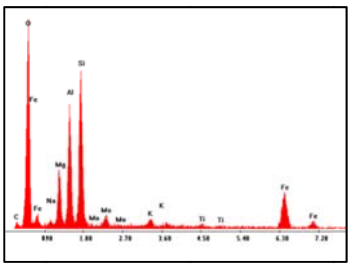
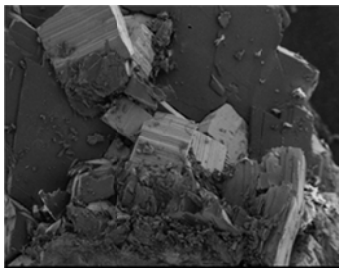
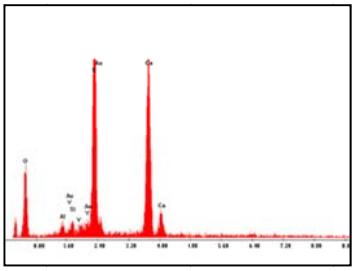
5. Ergebnisdarstellung

5.1 Chemische Zusammensetzungen der Gesteinsproben

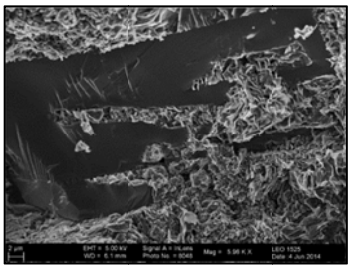
5.1.1 Rasterelektronenmikroskopie

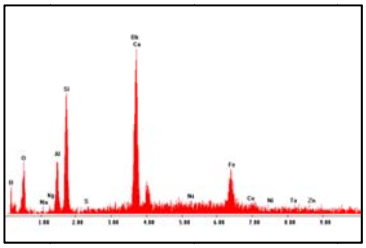
Die REM-Analyse [4] gibt einerseits Aufschluss über die punktuelle chemische Zusammensetzung einer Probe, andererseits auch über das äußere Erscheinungsbild des Gesteins. Hierbei geht es vor allem um die Kristallisation. In all unseren Proben fanden wir die Elemente eines typischen magmatischen Gesteins vor, u. a. Silizium, Magnesium, Sauerstoff und Aluminium. Zudem erfasste das Mikroskop noch in fast all unseren Proben Schwefel und Eisen. Diese Elemente in Verbindung bezeichnet man auch als Schwefelkies oder Pyrit. Es ist eines der am häufigsten vorkommenden Mineralien auf der Erde, daher kaum interessant für unsere Untersuchungen. Im Folgenden betrachten wir besonders auffällige Proben:

[4] REM = Rasterelektronenmikroskop

Spektren und Bilder	Enthaltene Elemente[5] und Kristallisation
  Probe 3 Black Smoker	• Kupfer, Mangan, Phosphor, Calcium, Kalium • beim Erstarren entstanden feine Kontraktionsrisse, wodurch das Gestein in sich labil wurde
  Probe 4 hydrothermale Bildung	• Natrium, Phosphor, Kalium • hohe und sehr feine Kristallisation => lässt auf hydrothermale Bildung schließen • Schwefelkies (Pyrit) und Quarz mit Schwefelbeimengungen
  Probe 5 Kissenlava	• Kupfer, Molybdän und Seltene Erde Lanthan • in anderem Spektrum: Seltene Erden Terbium und Gadolinium • hohe Kristallisation ähnlich Probe 15
  Probe 7 Kissenlava	• Natrium, Molybdän, Kalium, Titan • in anderem Spektrum: Calcium • sehr poröses Gestein (gasreiche Kissenlava) => Gasbläschen platzen auf, sodass „plättchenartige“ Struktur entsteht
  Probe 9 Kissenlava	• Gold und Seltene Erde Yittrium • in anderem Spektrum: Chrom, Platin • starke Krsitallisation weist auf gasreiche Kissenlava hin • zwei „Kristallphasen“: Gips und Kalk mit SO_2-Beimischungen

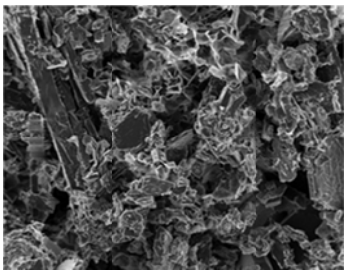
[5] ohne Si, C, O, Al, S, Fe, Mg (typische Elemente in einem magmatischen Gestein)

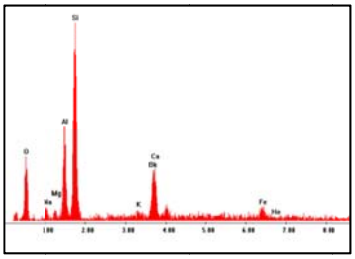




Probe 10 Kissenlava

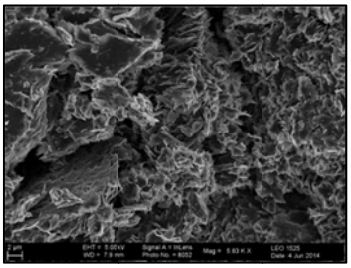
- Bor, Natrium, Berkelium, Calcium, Cobalt, Nickel, Tantal, Zink
- zudem: Seltene Erde Neodym
- in anderem Spektrum: Kalium, Titan, Mangan
- Kissenlava mit hoher Kristallisation in teilweise länglichen Feldspäten

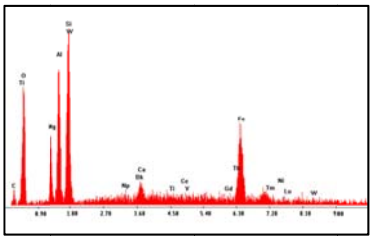




Probe 11 Kissenlava

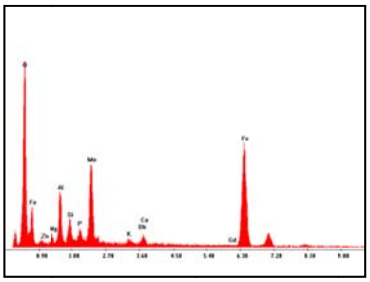
- Natrium, Kalium, Berkelium, Calcium
- in anderem Spektrum: Silber, Indium, Phosphor
- zudem: Seltene Erde Holmium
- hoher Kristallisationsgrad weist auf Kissenlava (gasreich) hin





Probe 12 Kissenlava

- Titan, Wolfram, Neptunium, Berkelium, Calcium, Vanadium, Nickel
- zudem: Seltene Erden Cer, Gadolinium, Terbium, Thulium, Lutetium
- hohe Kristallisation weist auf gasreiche Kissenlava hin



Probe 15 Kissenlava

- Zink, Phosphor, Molybdän, Kalium, Berkelium, Calcium
- zudem: Seltene Erde Gadolinium
- typische große Kristallbildung weist auf Kissenlava hin (gasreich)

Anhand der REM-Analyse lässt sich erkennen, dass wir mit unseren Analysen (sehr winziger Probenstücke) nur für die Skouriotissa-Mine Kupfer nachweisen können. Sie ist auch die einzige Mine, die noch in Betrieb ist, sodass es nicht überraschend ist, dass gerade hier Kupfer eingebunden ist. In dieser Mine gibt es verschiedene Einbindungen der Erze in das Gestein: Verhüttungsschlacke des Black Smokers, hydrothermale Entstehungen und Kissenlava. Kupfer ist nur in der Kissenlava mit höheren Werten vertreten, sodass hier auch hauptsächlich abgebaut wird. In die Verhüttungsschlacke des Black Smokers sind auch noch geringe Mengen des Kupfers und zudem noch Mangan eingebunden, wohingegen die fein kristallisierten Gesteine hydrothermalen Ursprungs keinen Kupferanteil aufweisen. Bei den Proben der Amiantos-Mine und der Mathiatis-Mine (Proben 1 und 2) sind keine Auffälligkeiten vorzufinden in Bezug auf chemische Zusammensetzung oder Kristallisation. In der Mitsero-Mine

(sowohl Agrokipia mit den Proben 7 und 8, als auch Kokkinopezoula mit den Probe 9 und 10) hingegen ist zwar kein Kupfer mehr zu finden, jedoch aber andere Erze: Gold, Platin, Chrom, Bor und Yttrium (Seltene Erde), etwas Molybdän, Titan, Kobalt, Nickel, Tantal, Zink, Berkelium, Mangan und Neodym (Seltene Erde). Auch in der Troulloi-Mine fällt auf, dass zwar kein Kupfer mit der Elementanalyse nachgewiesen werden konnte, wohl aber eine Vielzahl anderer Erzen erfasst wurde: vergleichsweise viel Berkelium und die Seltene Erde Terbium; wenig Phosphor, Silber, Indium, Seltene Erden (Holmium, Cer, Gadolinium, Thulium, Lutetium), Titan, Wolfram, Vanadium, Nickel, Zink, Neptunium und Kalium. Somit sind hier relativ viele Seltene Erden in das Gestein eingebunden. Insgesamt gesehen ist somit auf der basis der Elementanalyse mit dem Elektronenmikroskop eindeutig nur in der Skouriotissa-Mine Kupferbergbau wirtschaftlich sinnvoll, allerdings sind in den anderen Minen andere Erze von teilweise interessanten Anteilen enthalten. Die Minerale kommen bevorzugt in der Kissenlava vor, da sie dort aufgrund ihrer porösen Struktur besser auskristallisieren und so Lagerstätten bilden konnten.

5.1.2 Röntgenfluoreszenzanalyse

Die RFA[6] soll normalerweise einen Einblick in die Zusammensetzung von zum Beispiel Gesteinen gewähren. Dadurch hätten wir festmachen können, wie viel Kupfer durchschnittlich im Probenmaterial jeder unserer Minen enthalten ist und welche Elemente bzw. Erze noch in das Gestein eingebunden sind. Das lassen unsere Proben jedoch nur begrenzt zu: Nur die Proben 8, 12 und 13 konnten von dem Gerät erfasst werden und somit Ergebnisse liefern. Probe 1, 5, 6 und 9 wiesen zu hohen Asbestanteil bzw. möglichen Asbestgehalt auf, sodass hier aus Sicherheitsgründen keine Messung erfolgen konnte. Bei Probe 3 handelt es sich um Verhüttungsschlacke (Black Smoker). Die Proben 2, 3, 4, 7, 11, 14 und 15 konnten aufgrund des zu hohen Erzgehalts nicht vom Gerät erfasst werden, da die Kalibrierung auf kleinere Anteile an Erzen eingestellt ist. Somit haben wir von 15 Proben im Hinblick auf genaue chemische Zusammensetzung drei analysieren können.

Channel	Unit	MA 8	MA12	MA13
SiO2	%	61,48	55,80	98,12
Al2O3	%	13,58	13,49	0,70
Fe2O3	%	7,77	6,83	0,31
MnO	%	0,09	0,07	0,00
MgO	%	2,79	10,77	0,10
CaO	%	7,05	0,70	0,09
Na2O	%	2,06	0,00	0,03
K2O	%	1,01	0,01	0,02
TiO2	%	0,67	0,37	0,18
P2O5	%	0,08	0,01	0,00
SO3	%	0,01	0,02	0,01
L.O.I	%	3,14	10,50	1,03
SUM	%	99.73	98.57	100.59

Diese drei Proben weisen im Allgemeinen keine großen Auffälligkeiten auf. Alle drei Proben sind aus Kissenlava entnommen worden. Je höher der SiO_2-Gehalt ist, desto saurer und zäher ist das Magma beim Austritt. Das bedeutet, dass sowohl in der Troulloi-Mine als auch in der Mitsero-Mine die Erze in zähe Kissenlava eingebunden sind, da bei allen Proben viel Siliziumoxid auftritt. Der Magnesiumgehalt zeigt an, inwiefern das geförderte Magma primär ist. Primär bedeutet, dass das geschmolzene Gestein in einem Schub an die Oberfläche gekommen ist, ohne vorher im Mantel oder der Kruste lange steckenzubleiben. In dem Fall würde sich das Gestein also weder nennenswert mit Elementen aus der Kruste oder dem oberen Mantel anreichern können, da es ohne Zwischenstopp keine Zeit dazu gehabt hätte. An den Magnesiumwerten von Probe 12 (10,77 %) im Vergleich zu Probe 13 (0,1 %) lässt sich nun erkennen,

[6] RFA = Röntgenfluoreszenzanalyse

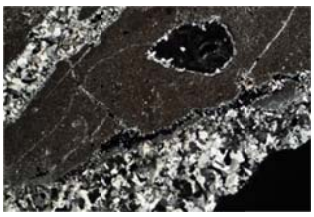
dass bei der Bildung der Troulloi-Lagerstätte bzw. deren Gebiet sich verschiedene Typen von Lava am Prozess beteiligt haben. Der Tróodos-Komplex hob sich über viele Millionen Jahre, sodass auch das Gebiet der heutigen Troulloi-Mine mehrere Millionen Jahre gebraucht hat, um sich zu heben. Die Probe 12 weist durch ihren relativ hohen Magnesium-Anteil und ihren Silizium-Anteil von ca. 55,8 % auf einen Austritt von flüssig bis zähem Magma hin, welches zudem sehr schnell vom Ursprung im oberen Mantel an die Oberfläche gekommen ist. Es ist also primäres Magma. Zudem sind hier hohe Werte von Kupfer, Chrom und Zink vorzufinden. Dies lässt sich durch die Subduktionszone der Afrikanischen und Europäischen Platte erklären: An dem Rückensystem kommen vermehrt Black Smoker und Kissenlavaaustritte vor, sodass hier hohe Erzgehalte vorzufinden sind[7]. Von der Europäischen Platte sind auch Teile mit in die Konvektionsströme der Subduktionszone eingetreten, da sie beim Abtauchen der Afrikanischen Platte an dieser hängengeblieben sind und so mit aufschmolzen. Daher haben die austretenden Magmen teilweise andere Konzentrationen an Mineralen und Erzen. Die Probe 13 hingegen muss zu einem anderen Zeitpunkt entstanden bzw. an der Oberfläche ausgetreten sein, da hier ganz andere Zusammensetzungen vorzufinden sind: Die Lava ist sehr lang im oberen Mantel bzw. in der Kruste stecken geblieben, da hier ein Magnesiumanteil von ca. 0,1 % vorzufinden ist. Außerdem zeigt der sehr hohe Siliziumgehalt (ca. 98 %), dass das Magma hochgradig zähflüssig gewesen sein muss. Diese Hypothese deckt sich auch mit dem Magnesiumanteil, sodass dieses Gestein in der Kruste vermutlich stecken geblieben ist und dort zum zähflüssigen Magma auskühlte. Dann stieg es durch erneuten Druck vom Inneren hoch und trat aus. Die Mitsero-Mine mit Probe 8 zeigt ähnliche Siliziumwerte wie Probe 12. Daher ist das Magma beim Austritt zähflüssig bis flüssig gewesen. Trotzdem zeigen die Magnesiumwerte an, dass es Zwischenstopps vermutlich in der Kruste beim Aufstieg gegeben hat. Es ist also im Vergleich zu Probe 12 langsamer aufgestiegen und im Vergleich zu Probe 13 etwas zähflüssiger gewesen. Aufgrund des Aufenthaltes in der Kruste oder im oberen Mantel konnte es sich bedingt mit einigen Elementen anreichern und so zum Beispiel Cobalt und Zink einschließen.

5.2 Mineralogische Zusammensetzungen der Gesteinsproben

Von der Probe 1 liegt kein Dünnschliff vor, da der Asbestanteil eine Aufbereitung des Schliffs von Hand nicht möglich machte. Folgende Dünnschliffe zeigen die exemplarischen Unterschiede der Kristallisation der Proben auf:

[7] siehe Erzbildung

Dünnschliff	Erläuterungen

Probe 2 (exemplarisch für Probe 5 bis 15)
 
	• zwei Kristallphasen: erste dunkel mit amorpher Masse, zweite hell mit größeren Kristallen
	• Lava kühlt durch Meerwasser schnell ab
	  o außen amorphe Masse, innen dunkle Phase (winzige Kristalle)
	• durch erneuten Lavaschub: dunkle Phase reißt auf (Risse im Dünnschliff)
	  o helle Phase füllt Risse und kühlt langsam ab
	  o größere Kristalle konnten sich bilden

Probe 3 	• durch Kontakt der hydrothermalen Lösung mit Meerwasser sofortige Abkühlung und Bildung der Sulfidkristalle • Ablagerung der Sulfidkristalle am Black Smoker • durch neuen Ausstoß: Kontraktionsrisse innerhalb der Ablagerungen o Verwitterung der Kristalle am Riss

Probe 4
 	
	• Hydrothermale Lösung kam langsam in Kontakt mit Meerwasser
	  o Temperatur sank langsam
	  o daher: feine Kristallisation und kaum amorphe Masse

Anhand der drei verschiedenen Dünnschlifftypen (Bildung in Kissenlava bei Probe 2, 5–15; Bildung am Black Smoker bei Probe 3; Bildung durch hydrothermale Quelle bei Probe 4) lässt sich erkennen, dass bei fast all unseren Proben das Erz auf ähnliche Weise in Kissenlava eingebunden ist. Es gab immer mindestens zwei „Kristallisationsphasen“ bei der Erzbildung in der Kissenlava (ausgenommen der Black Smoker und die hydrothermale Quelle). In der ersten bildete sich fein kristallisiertes Erz aus, welche durch die zweite Phase aufriss und mit neu gebildeten Kristallen aufgefüllt wurde. Diese sind aufgrund von langsam sinkender Temperatur und mehr Platz größer auskristallisiert. Es sind auch teilweise Hohlräume vorhanden, in denen sich markante Kristalle gebildet haben, die man später auch ohne mikroskopische Vergrößerung erkennt. Beim Black Smoker sind die zuerst entstandenen Sulfidkristalle durch den Kontakt mit dem Meerwasser sofort erstarrt und somit nicht weiter „zusammengewachsen“. Beim erneuten Ausbruch bzw. Ausstoß des Black Smokers entstanden in den sofort erstarrten Schichten der zu Boden gesunkenen Sulfidkristalle feine Kontraktionsrisse, die im Dünnschliff durch die „Verschiebung“ zu erkennen sind. Dadurch wurde das Gestein in sich labil. Bei der hydrothermalen Quelle kam das heiße, elementreiche Wasser langsamer in Kontakt mit dem Meerwasser, sodass die Kristalle sich fein und mit sehr wenig amorpher Masse ablagerten.

6. Abgleich der Ergebnisse mit der Arbeitshypothese

1) Wie sehen die gefundenen Erze aus und wie sind sie in das Gestein eingebunden?

Die Erze, die sich in der Kissenlava, der hydrothermalen Quelle und in dem Black Smoker gebildet haben, unterscheiden sich aufgrund ihrer äußeren und ihrer chemischen Zusammensetzung sehr stark voneinander. Die einzige Gemeinsamkeit ist, dass sie alle in magmatischem Gestein eingebunden sind. Die Erze der Kissenlava lassen sich in drei Untergruppen unterteilen: Die erste Gruppe lässt sich anhand ihrer Oberfläche charakterisieren. In die unebene Oberfläche des magmatischen Gesteins sind oktaedrische Kristalle eingebunden. Die Oberfläche der Kristalle ist aufgrund von Verwitterung rau und zerbrochen. Dies ist sehr gut in der Probe Nummer 9 zu sehen und in den Proben Nummer 2, 5, 6, 10, 11, 12, 14 und 15 wiederzufinden. Die zweite Gruppe weist eine Oberfläche auf, welche sich aus „plättchenartigen“ Kristallen zusammensetzt. Es fällt auf, dass die Oberfläche nicht ebenmäßig ist, da viele Vertiefungen existieren. Markant hierfür ist Probe 7. Die Erze der dritten Gruppe weisen eine stark nach außen gewandte Struktur auf (kugelartige Auskristallisation mit feinen Spitzen um eine Art „Kern“[8]). Dies ist sehr gut in der Probe Nummer 8 und 13 zu erkennen. Die Erze des Black Smokers weisen eine nadelförmige Struktur auf. Sie sind von amorpher Masse umgeben. Durch das sofortige Abkühlen der hydrothermalen Lösungen kam es zur sofortigen Bildung von Sulfidkristallen und amorpher Masse[9]. Die Minerale der hydrothermalen Quelle weisen eine sechseckige Struktur auf. Auffällig hierbei ist, dass sich auf größeren Kristallen mehrere kleinere Kristalle angelagert haben. Alle Kristalle sind eingebunden in amorphe Masse, wenn auch sehr fein und gleichmäßig. Insgesamt kann man sowohl beim Black Smoker als auch bei den hydrothermalen Bildungen mit bloßem Auge keine Kristallisation erkennen. Nur in der Kissenlava lassen sich erste Anzeichen in Form von größeren Kristallen für Erzeinschluss entdecken.

2) Wie setzen sich die gefundenen Erze zusammen?

Unsere gefundenen Erze setzten sich aus vielen verschiedenen Elementen zusammen, wie beispielsweise typischen magmatischen Elementen[10], die in fast jeder unserer Proben vorzufinden waren. Des Weiteren sind Elemente wie Kalium, Mangan, Metalle und Phosphor vorhanden. Zudem haben wir verschiedene Elemente der Seltenen Erden nachweisen können.

3) Wie unterscheidet sich die Skouriotissa-Mine von den anderen Minen?

a. Wie ist die Qualität der Erze im Vergleich?

Bei der Beurteilung der Qualität von Erzen haben wir eigene Maßstäbe entwickelt, die die Qualität des Erzes im Allgemeinen beurteilen und vergleichen:

⇒ Kristallisationsgrad der Mineralien innerhalb des Gesteins,

⇒ Reinheit des Erzes (wenig oder viele Beimischungen von anderen Elementen),

⇒ Anteil des Erzes insgesamt (Fläche der Mine im Verhältnis zu dem Erzanteil im Gestein).

---

[8] Vergleich: https://www.dropbox.com/sc/4m56czorsvkqiuv/AABranSz-ACOz1sCGXwlSW8Ga

[9] siehe Erzbildung

[10] Silizium, Magnesium, Kohlenstoff, Sauerstoff, Eisen, Schwefel, teilweise Calcium und Aluminium

Mithilfe dieser drei Kriterien beurteilen wir, inwiefern sich das Erz der Minen qualitativ von der Skouriotissa-Mine unterscheidet.

Das Probenmaterial der Skouriotissa-Mine hat im Allgemeinen einen relativ hohen Kristallisationsgrad. Der Kristallisationsgrad lässt auf ein hohen Anteil an Mineralien und auch Erzen im Gestein schließen. Beim Erstarren von Magma kristallisieren die Mineralien aus. Somit sind große und viele gleichartige Minerale im Gestein gut zur Erzgewinnung geeignet. Zur Erzanreicherung kam es vor allem in der Kissenlava. Im Gegensatz dazu stehen der Black Smoker und die hydrothermale Quelle. Hier kann man nur eine relativ feine Kristallisation mit bloßem Auge erkennen, die dann im Dünnschliff erst wirklich sichtbar wird. Das Erz wird in dieser Mine noch abgebaut, sodass man annehmen kann, dass auf jeden Fall das Kupfererz von den Beimengungen getrennt werden kann, ohne einen großen Reinheitsverlust zu bewirken. Unter der Voraussetzung, dass hauptsächlich Kupfer aus der Kissenlava extrahiert wird, erkennt man anhand der REM-Spektren, dass Kupfer eines der am stärksten vertretenen Nebenelemente ist. Weitere Beimischungen sind nur in geringem Maße vorhanden. Das bedeutet, dass die Skouriotissa-Mine auch eine „hohe Reinheit“ des Erzes Kupfer im Gestein vorzuweisen hat. Außerdem ist zu erkennen, dass gerade bei den Proben 5 und 6 (Kissenlava) ein vergleichsweise hoher Anteil des Gesteins aus Kupfer besteht. Insgesamt hat die Skouriotissa-Mine wie erwartet einen wirtschaftlich relevanten Anteil Kupfer im Gestein eingebunden, einen hohen Kristallisationsgrad des Kupfers und eine relative Reinheit des Kupfers als Erz im Gestein. Nur die Mitsero-Minen (Proben 7–10) und die Troulloi-Mine haben ähnliche Kristallisationsgrade in einigen Proben erreicht. Allerdings sind hier kaum Kupferanteile im Gestein vorhanden, sondern eher Elemente wie Seltene Erden, Metalle und Edelmetalle (wie Gold, Titan, Platin, Chrom und Wolfram). Von diesen sind jedoch keine wirklich ausschlaggebend oder dominant in ihrer Probe wie der Kupfer im Probenmaterial der Skouriotissa-Mine. Somit haben wir in keiner der beprobten Minen einen vergleichbaren Anteil von einem Element im Vergleich zu den anderen Elementen. Auch die Reinheit ist somit in allen anderen Minen nicht gegeben. Insgesamt ist die Qualität des Erzes in fast allen unseren Proben nicht gut genug, um dies das Erz aufzubereiten wie in der Skouriotissa-Mine. Ansatzweise vom Kristallisationsgrad und von der Elementeinbindung kommen noch die Mitsero-Minen und die Troulloi-Mine an die Qualität des Erzes der Skouriotissa-Mine heran. Jedoch sind meist zu viele Beimengungen in dem Gestein enthalten, sodass es zu aufwendig wäre, das Erz aufzubereiten.

b. Wie bauen sich die Lagerstätten auf (Vergleich)?

Die Kupferminen sind im Allgemeinen ähnlich aufgebaut (auch bei verschiedenen Größen und Erztypen). Ein relativ großer See liegt meist zentral in dem Minengebiet. Hier wurde so lange Gestein und das darin enthaltene Erz abgetragen, bis man auf das Grundwasser stieß. Danach ließ man die Tagebaue volllaufen und baute an einer anderen Stelle ab. Außerdem sind die inneren Hänge der Minen terrassenartig abgestuft. Sie sind zum Transport der geborgenen Erze/Gesteinsbrocken angelegt und geebnet worden, um das Material mit schweren Fahrzeugen aus dem Tagebau herausbringen zu können. Würde man die Minen nach ihrem Aufbau der Lagerstätten bewerten, so sind folgende Kriterien zu beachten:

⇒ Größe der Mine,

⇒ Anbindung an die Infrastruktur,

⇒ Erzaufbereitungsmöglichkeiten (Platz und Wert des Erzes im Vergleich zum Aufwand),

⇒ Aufbereitungsart.

Die Skouriotissa-Mine hat mit einer Fläche von ca. 113 000 m² eine vergleichbare Fläche wie die Amiantos-Mine. Im Vergleich dazu sind die Mitsero-Minen mit jeweils ca. 71 000 m² etwas kleiner. Die Troulloi-Mine und die Mathiatis-Mine sind die kleinsten (von uns untersuchten) Minen mit jeweils 63 000 m² und 50 000 m² Fläche. Alle Minen sind relativ gut an das Straßennetz angebunden, sodass ein Transport von Erzen möglich wäre. Im Wesentlichen würde die Aufbereitung in allen Minen ähnlich ablaufen, da vermutlich dasselbe Unternehmen die Minen betreiben würde (Hellenic Copper Mines Ltd[11].) wie in der Skouriotissa-Mine. Somit würde in allen Minen biotechnologisches Mining betrieben werden (siehe Kupferbergbau in Zypern, vgl. Abschnitt 3.3). Die Möglichkeiten für eine Nutzung würden am besten bei den Mitsero-Minen gegeben sein: Sie sind relativ gut an das Straßennetz angebunden, haben eine vergleichsweise große Fläche (zusammen) und sind mit verschiedenen Erzen ausgestattet, die ansatzweise an die Qualität des Erzes der Skouriotissa-Mine herankommen.

4) Ist eine erneute Nutzung der Minen, die heutzutage nicht in Betrieb sind, sinnvoll (in Hinblick auf Kupferabbau)?

Aufgrund der chemischen Analysen der Gesteinsproben aus den Minen, welche nicht aktiv betrieben werden, können wir belegen, dass ein erneuter Betrieb hinsichtlich des Abbaus von Kupfer nicht sinnvoll wäre. Der Anteil des Kupfers im Gestein ist einfach zu niedrig. Dieser muss bei mindestens 0,002 % liegen, damit der Abbau vom Erz gewinnbringend wäre. Im analysierten Probenmaterial dieser Minen haben wir keinerlei Kupfer nachweisen können. Wir vermuten, dass die ehemaligen Minenbetreiber das Kupfererz der Minen schon durch lange Nutzung erschöpft haben und deshalb die Minen auch stillgelegt haben. Wahrscheinlich liegt nun nur noch Gestein vor, welches einen Kupfergehalt von unter 0,002 % hat. Somit wäre es nicht sinnvoll, die Minen in Betrieb zu nehmen, da die Kosten der Gewinnung höher wären als der Gewinn aus dem Kupferverkauf. Jedoch ist zu erwähnen, dass unsere Proben nur Stichproben aus den Minen sind und unsere Antwort somit nur auf den Ergebnissen von generalisierten Werten basiert. Um eine eindeutigere Antwort auf die Leitfrage zu finden, müsste man aus jeder Mine ein breiteres Spektrum an Proben haben. Dies war bei uns aufgrund der Größe der Minen und unserem engen Zeitfenster nicht möglich.

7. Fazit

Anhand unserer Analyseergebnisse und unserer Recherchen können wir eindeutig bestätigen, dass sich der Kupferabbau in den stillgelegten Minen nicht rentieren würde. Allerdings haben wir Elemente vorgefunden, die in relativ großen Mengen vorkommen und auch ähnlich dem Kupfer abgebaut werden könnten. Zu diesen Elementen zählen die Selten Erden und dabei vor allem Gadolinium, Yittrium und

[11] http://hcm.com.cy/site/

Terbium (schwere Seltene Erden). Möglicherweise könnten sich also auf Zypern Erzlagerstätten der Seltenen Erden befinden. Somit wäre eine erneute Nutzung der Minen möglich, jedoch nicht im Bereich des Kupferabbaus. Für einen rentablen Abbau der Seltenen Erden muss ein Gehalt des Erzes im Gestein von ca. 1 % vorhanden sein. Diesen können wir bei unseren Proben leider nicht konkret errechnen, da wir erstens nur stichprobenartig die Minen beprobt haben und andererseits keine konkreten Zahlenwerte bei der RFA herausbekommen haben. Wir vermuten aber, dass sich der Gehalt eher im Bereich von 0,1–0,01 % bewegt, da generell die Seltenen Erden auch in normalem Gestein vorkommen. Ungewöhnlich ist es nur, dass wir gerade in der Mitsero-Mine und in der Troulloi-Mine so viele Elemente der Seltenen Erden nachweisen konnten, sodass wir dort auch weiterhin forschen wollen, ob sich hier nicht doch eine Lagerstätte entwickeln könnte. Neben den Seltenen Erden haben wir in der Mitsero-Mine auch noch relativ viel Gold, Platin und Chrom gefunden. Somit wäre auch die Mitsero-Mine interessant in Hinblick auf einen weiteren Erzabbau. Da zum Beispiel ein rentabler Goldabbau nur einen prozentualen Anteil von 0,001 % im Gestein benötigt, könnten unsere Proben von Bedeutung für den Erzabbau des Landes Zypern sein. Wir werden uns mit den zuständigen Geologen und Mineralogen der Hellenic Copper Mines Ltd. in Skouriotissa in Verbindung setzen und vorschlagen, die Mitsero-Minen und die Troulloi-Mine daraufhin noch einmal näher zu analysieren. Außerdem werden wir eine weitere Analyse unserer Proben durchführen (Auflicht-/Reflexionsmikroskopie), um die Erze noch genauer zu bestimmen und möglicherweise auch neue Erkenntnisse über die Minen bzw. deren Erzangebot bekommen zu können.

Quellennachweise

Internetquellen (letzter Zugriff am 29.12.2014):
http://copperalliance.de/aus--und-weiterbildung/kupferwissen-f%C3%BCr-sch%C3%BCler/chemie-kupferabbau
http://copperinvestingnews.com/7264-copper-mining-in-cyprus.html
http://jungle-world.com/artikel/2009/42/39575.html
http://www.bgr.bund.de/DE/Home/homepage_node.html
http://www.chemie.de/lexikon/Erz.html
https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=41626&pNid=0
https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Black%20smokers
https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Erz
https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Kupfer/Verhüttung
https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Seltene%20Erden/Definition%20der%20Seltenen%20Erden
http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Geologisches%20Portrait/Lagerstätten/VHMS?lang=en&language=english&
http://www.moa.gov.cy/moa/Mines/MinesSrv.nsf/all/8586AC4EB8686A2EC22574EA0031B407/$file/Copper%20and%20gold%20mines.pdf?openelement
http://www.onmeda.de/weitere-ratgeber/asbest.html
http://www.selteneerden.de/
http://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/asbest
http://www.zypern.de/geologie.html

Textquellen:

Economic Geology Section [2012]: Environmental rehabilitation: Asbestos Mine Cyprus. Lefkosia: Press and Information Office of the Geological Survey Department Cyprus.
Hadjigeorgiou, Chr. [2008]: The Building and Decorative stones of Cyprus. Lefkosia: Press and Information Office of the Geological Survey Department Cyprus.
Neukirchen, F. & Ries, G. [2014]: Die Welt der Rohstoffe – Lagerstätten, Förderung und wirtschaftliche Aspekte. Heidelberg: Springer/Spektrum 2014.
Petrides, G. et al. [2004]: The Mineral Resources of Cyprus. Lefkosia: Press and Information Office of the Geological Survey Department Cyprus.
Schmincke, H.-U. [2000]: Vulkanismus. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
Fortbildungstag für Lehrerinnen und Lehrer – Bericht: „Unscheinbar, unersetzlich, teuer: Seltene Metalle als strategische Rohstoffe“.

Danksagung

Wir danken

- Herrn Peter Stutz vom Mineralogisch-Petrographischen Institut der Universität Hamburg für die Präparation unserer Dünnschliffe und die RFA-Analysen.
- Herrn Dr. Kay Heyckendorf, der uns die hochwertigen Polarisationsmikroskope für unsere Dünnschliffanalysen zur Verfügung stellte.
- Frau Walter von der Universität Hamburg für die Begleitung bei der Analyse unserer Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop.
- Herrn Christodoulos Hadjigeorgiou vom Geological Survey of Cyprus, der uns das Betreten und Beproben der Minen in Zypern erst ermöglicht und uns wertvolle Hinweise zur Geologie Zyperns im Allgemeinen und zur Geologie der Minen im Besonderen gegeben hat.
- dem Geschäftsführer von Hellenic Copper Mines Ltd., Herrn Dinos Xydas, der uns einen längeren Besuch der Skouriotisssa-Mine und die Beprobung im Tagebau ermöglichte und uns für ein längeres Gespräch zur Verfügung stand,
- Frau Marianna Tzioni, die unseren Minenbesuch in Skouriotissa logistisch vorbereitet hat,
- den Wissenschaftlern der Hellenic Copper Mines Ltd. in Skouriotissa, Lazaros Georgios (Geologe) und George Kalogeropoulos (Mineraloge), George Manos und Niobi Charalambais (Chemiker), die uns durch die Tagebaue, das Labor und die Kupferproduktionshallen der Skouriotissa-Mine führten und den Weg für unseren Vergleich zwischen der Skouriotissa-Mine und den stillgelegten Minen ebneten.
- unseren Betreuern, Herrn Fraedrich und Frau Heidari. Sie haben sich viel Zeit für uns genommen und jede unserer Fragen beantwortet. Ohne sie wäre die Durchführung dieses Projektes nicht gelungen.
- der Freien und Hansestadt Hamburg sowie der Agnes-Gräfe-Stiftung in Hamburg, die uns unser Projekt mit Fördergeldern erst ermöglicht haben.