

Dissertation

Entwicklung einer Methode zur Abschätzung von Reserven / Ressourcendaten von Begleitelementen nach Lagerstättentypen des Kupfers am Beispiel von Selen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften (Dr. techn.), eingereicht an der
TU Wien, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, von

Roman STIFTNER

Mat.Nr.: 08825445 (r.stiftner@stiftner.at)

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Rechberger

Wien, April 2021

Begutachtet von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Helmut Rechberger
Institut für Wassergüte und Res-
ourcenmanagement
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/226
A-1040 Wien

Univ.-Prof. MinRat i.R. Dr.
Leopold Weber, EurGeol
ehem. Institut für Geologie
Universität Wien
Althanstraße 14
A-1090 Wien

em. o. Univ.-Prof. Dr.
Fritz Ebner
ehem. Lehrstuhl für Geologie
und Lagerstättenlehre
Montanuniversität Leoben
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben

Für Daniela

*„Ungeachtet aller strukturellen und konjunkturellen
Veränderungen bleibt die Bereitstellung
mineralischer Rohstoffe durch Bergbau
eine der beiden unverzichtbaren Grundlagen
der menschlichen Zivilisation.*

Die andere Grundlage ist die Landwirtschaft.“

(Univ. Prof. Fettweis, 1988)

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung


Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, 31. März 2021

Stadt und Datum



Unterschrift

HAFTUNGSAUSSCHLUSS / DISCLAIMER

Alle Abbildungen in dieser Publikation unterliegen dem angeführten Copyright und sind urheberrechtlich geschützt. Nachdruck, Publikation, Vervielfältigung, auch auszugsweise sind daher verboten. Die Abbildungen in dieser Arbeit dienen ausschließlich dokumentarischem und didaktischem nichtkommerziellen Zweck.

Bei der Erstellung dieses Werkes wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen, trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Der Autor, der Betreuer und die Universität können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr. Der Autor ist für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler dankbar.

Danksagung

Nach vielen Jahren intensiver Arbeit vor allem in Urlauben und an Wochenenden neben Beruf und Familie liegt sie nun vor Ihnen: meine Dissertation. Damit ist es an der Zeit, mich bei denjenigen zu bedanken, die mich in dieser herausfordernden, aber auch ungemein lohnenden Phase meiner akademischen Laufbahn begleitet haben. Zu besonderem Dank bin ich meinen Professoren verpflichtet. Univ. Prof. Dr. Leopold Weber, EurGeol, hatte mich zu diesem Dissertationsthema inspiriert und hat mit seinen Recherchen eine Datenbasis bereitgestellt, auf der ich meine Forschungsarbeiten aufsetzen konnte. Er hat mich mit seinen Anregungen stets unterstützt, war zu jeder Uhrzeit erreichbar und hat mich motiviert, wenn es eine schwerere Phase gegeben hat.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich Univ. Prof. Dr. techn. Helmut Rechberger übermitteln. Unter seiner Leitung und durch seine wissenschaftlichen Vorarbeiten unter anderem an der Yale University mit Prof. Dr. Graedel wurde es mir möglich, eine umfassende Ausarbeitung der unterschiedlichen Aspekte der Ressourcengewinnung und –bewertung sowie der anthropogenen Rohstoffzyklen durchzuführen. Seinen Anregungen ist es zu verdanken, dass diese Arbeit klar strukturiert ist und umfassend auch auf nachhaltige Aspekte Bezug nimmt. Für seine Kollegialität und ausgezeichnete und umfangreiche Unterstützung bin ich sehr dankbar. Meine kollegiale Verbundenheit für die Bereitstellung von Selenmesswerten möchte ich darüber hinaus Alexander John Fitzpatrick ausdrücken.

An dieser Stelle ist es mir ein liebevolles Anliegen, meiner Frau Daniela zu danken, der ich auch diese Dissertation widme. Sie hat mit viel Toleranz in den vielen Stunden und Tagen, die ich für die Wissenschaft in der Freizeit verwendet habe, meine familiäre Abwesenheit geduldet, die Kinderbetreuung übernommen hat und ist trotzdem humorvoll geblieben. Auch meinen noch jüngeren Kindern Raphael und Laura sage ich Danke und entschuldige mich, dass sie auf ihren Papa manchmal verzichten mussten.

Mein immerwährender Dank gilt meinen Eltern Edeltraud und Friedrich, die die Grundlage für meine Ausbildung und so auch den akademischen Weg bereitet haben. Sie und meine Schwiegereltern Elisabeth und Werner haben oft auch den zeitlichen Freiraum für diese Arbeit durch Übernahme der Betreuung unserer Kinder geschaffen. Meinem Schwiegervater, Ing. Werner Rauch, danke ich darüber hinaus für das Lektorat und die Anregungen bei unklaren Formulierungen.

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie das Werk einer einzelnen Person, und es ist mir daher ein Bedürfnis, mich bei allen Menschen zu bedanken, die mich in diesen Jahren unterstützt, begleitet sowie wissentlich oder zufällig mit Ideen und Informationen versorgt haben und mir sohin neue Perspektiven und Sichtweisen ermöglicht haben.

Roman Stiftner

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	0
Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XII
Abstract	1
Kurzfassung.....	2
Glossar.....	3
1. Einleitung	6
1.1. Ausgangslage.....	6
1.2. Stand der Erfassung von Ressourcen und der Forschung.....	11
1.3. Zielsetzung und Nutzen.....	13
1.4. Methode.....	14
1.5. Herausforderungen der Datenerhebung von Selen	19
2. Ressourcenmanagement.....	22
2.1. Vom Mangel an Ressourcen.....	22
2.2. Vom Rohstoffvorkommen zur Lagerstätte.....	27
2.3. Reserven und Ressourcen.....	29
2.4. Rohstoffvorräte und Nachhaltigkeit	30
2.5. Kritikalität von Rohstoffen.....	32
2.6. Europäischer Kupferzyklus	37
2.7. Der anthropogene Selen-Zyklus	42
2.8. Unterschiede zwischen Kupfer- und Selenzyklus	49
3. International bzw. national geläufige Methoden zur Ressourcenerfassung.....	50
3.1. Prinzipien der Lagerstättenaufsuchung und Vorratsklassifikation	50
3.1.1. Lagerstättenforschung und Ressourcenbewertung.....	50
3.1.2. Entwicklung der Vorratsklassifikation	50
3.1.3. Interessentengruppen.....	52
3.1.4. Anforderungen an Klassifikationssysteme.....	53
3.1.5. Prinzipien von universellen Standards und Codes	54
3.1.6. Modifying Factors	56
3.1.7. Der Entscheidungsprozess zur Lagerstättenerkundung.....	57
3.2. CRIRSCO-Berichtssysteme, Codes und Richtlinien.....	60
3.2.1. Entwicklung	60
3.2.2. CRIRSCO Mitglieder	62
3.2.3. Standards und Definitionen.....	63
3.2.4. Der JORC Code (Australien).....	66
3.2.4.1. Schwächen	66
3.2.4.2. Stärken.....	67
3.2.5. Der CIM Code (Kanada).....	67
3.2.6. Der PERC Code	68

3.2.6.1.	Entwicklung und Standards	68
3.2.6.2.	Umwelt- und Sozialaspekte im PERC-Standard	69
3.2.7.	The Russian Resource/Reserve Reporting System (GKZ / NAEN Code).....	70
3.3.	United Nations Framework Classification (UNFC)	71
3.3.1.	Entwicklung	71
3.3.2.	Standards.....	72
3.3.3.	Prinzipien.....	73
3.3.4.	Aufbau und Funktionsweise	74
3.3.5.	Stakeholder	79
3.3.6.	Stärken und Vorteile	79
3.3.7.	Schwächen und Nachteile	79
3.4.	National Instrument (NI) 43-101	80
3.5.	Mineral Resource/Reserve Classification System of China (MRRCC).....	81
3.6.	Diskussion der Klassifizierungssysteme	82
3.6.1.	Allgemeines	82
3.6.2.	JORC System im Vergleich	87
3.6.3.	Vergleich CRIRSCO und UNFC.....	88
3.6.4.	Verbesserungspotentiale von Klassifizierungssystemen.....	91
4.	Kupfer: Eigenschaften, Vorkommen, Lagerstätten, Erzeugung.....	94
4.1.	Historische Bedeutung von Kupfer	94
4.2.	Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Kupfer.....	95
4.3.	Kupfererzeugung	99
4.3.1.	Grundlagen der Hütten- und Refining-Prozesse	102
4.3.2.	Behandlung von Anodenschlamm.....	103
4.4.	Kupferproduktionsmengen	107
4.5.	Kupfer-Reserven und -Ressourcen sowie die langfristige Verfügbarkeit von Kupfer	111
4.6.	Wirtschaftliche Bewertungen von Lagerstätten.....	114
4.6.1.	Reichweite (Lebensdauer)	114
4.6.2.	Zusammenhang von Reichweite und Ressourcen.....	114
4.6.3.	Optimale Nutzungsdauer einer Lagerstätte	115
4.6.4.	Rohstoffpreise.....	115
4.6.4.1.	Preiskalkulation für Nichteisenmetalle	116
4.6.4.2.	Rohstoffpreis als Indikator für Knappheit.....	117
4.6.5.	Markteintrittsbarrieren als Determinante der Lagerstättenkapazität.....	118
4.7.	Kupferlagerstätten.....	120
4.7.1.	Geologie von Kupfervorkommen	120
4.7.2.	Struktur einer Kupferlagerstätte	125
4.7.3.	Systematik der Kupferlagerstätten	126
4.7.4.	Magmatogene Lagerstätten	127
4.7.4.1.	Orthomagmatische (liquidmagmatische) Lagerstätten.....	127
4.7.4.2.	Hydrothermale Lagerstätten.....	130
4.7.4.2.1.	Porphyrische Vererzungen	131
4.7.4.2.2.	Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätte (IOCG).....	134
4.7.4.2.3.	Gang-klufftformige Vererzungen (Vein deposits)	135
4.7.4.2.4.	Hydrothermal Verdrängungslagerstätten („Skarn type deposits“)	138
4.7.4.2.5.	Karbonatite („Carbonatite type deposits“)	139

4.7.5. Sedimentogene /sedimentgebundene Lagerstätten.....	141
4.7.5.1. Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Lagerstätten und SEDEX	141
4.7.5.1.1. Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Lagerstätten	142
4.7.5.1.2. Sedimentary Exhalative (SEDEX) Lagerstätten	144
4.7.5.2. Sediment hosted deposits („afrikanischer Typ“).....	145
4.7.5.3. Seabed deposits („deep-sea nodule“).....	149
4.7.6. Metamorphogene Lagerstätten.....	151
4.7.6.1. Skarne (Skarn)	151
4.7.7. Diagenetische Lagerstätten („polnischer Kupferschiefer“).....	154
4.7.8. Zusammenfassung.....	155
4.8. Datenbasis für Kupferressourcen nach Lagerstättentypen.....	156
4.8.1. Datenbasis der Kupferressourcen und -reserven	156
4.8.2. Diskussion der Datenbasis der Kupferressourcen und -reserven.....	164
5. Selen: Eigenschaften, Vorkommen, Erzeugung und Verwendung	180
5.1. Historische Bedeutung von Selen.....	180
5.2. Eigenschaften von Selen	180
5.3. Selenverwendung	182
5.4. Selenproduktion	184
5.5. Selen-Reserven und -Ressourcen.....	187
5.6. Selenpreis.....	192
5.7. Zukünftiger Selenbedarf	194
5.8. Selengehalte in Erzlagerstätten.....	195
5.9. Umwelterwägungen, Nachhaltigkeit und Gesundheit.....	198
5.9.1. Selenquellen.....	198
5.9.1.1. Natürliche Quellen	198
5.9.1.2. Anthropogene Selenemissionen	199
5.9.2. Umweltverhalten von Selen	199
5.9.3. Selenanwendung in der Medizin	200
5.9.4. Selen in Lebensmitteln.....	201
5.9.5. Auswirkungen auf die Publizität von Selen-Ressourcen.....	202
6. Auswertung der Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten	203
6.1. Selenkonzentration in Kupferlagerstätten.....	204
6.1.1. Histogramm und statistische Verteilung	204
6.1.2. Quantile-Quantile Plot (QQ-Plot)	209
6.1.3. Ergebnis der statistischen Auswertungen	212
6.2. Selenkonzentration in orthomagmatischen Kupferlagerstätten.....	213
6.3. Selenkonzentration in porphyrischen Kupferlagerstätten.....	216
6.4. Selenkonzentrationen IOCG Kupferlagerstätten.....	219
6.5. Selenkonzentrationen von gang-kluft-förmige Vererzungen (Vein) von hydrothermalen Kupferlagerstätten.....	222
6.6. Selenkonzentrationen von Skarn Kupferlagerstätten	225
6.7. Karbonatite	227
6.8. Selenkonzentrationen von VMS Kupferlagerstätten	228
6.9. Selenkonzentrationen von SEDEX Kupferlagerstätten inkl. Massive Sulfide (MS).....	231
6.10. Selenkonzentrationen von Sediment hosted Kupferlagerstätten.....	234

6.11.	Seabed („deep-sea nodule“)	237
6.12.	Diagenetische Lagerstätten	237
6.13.	Selenkonzentrationen nicht zuordenbarer Kupferlagerstätten	238
6.14.	Gegenüberstellung der Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten	240
6.15.	Diskussion der Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten	241
6.15.1.	Überprüfung der Datenvalidität und der Fehlerbandbreite	241
6.15.2.	Festsetzung der charakteristischen Selenkonzentrationen (Kupferlagerstätten)	242
6.15.3.	Vergleich mit den bisher bekannten Selenkonzentrationen	245
7.	Diskussion der Selenkonzentration nach geologischem Alter der Lagerstätten und der Bildungstemperatur	246
7.1.	Selenkonzentration nach geologischem Alter der Lagerstätten	246
7.2.	Selenkonzentration nach Bildungstemperatur	248
8.	Geografische Verteilung der Selenmesswerte	250
8.1.	Überblick	252
8.1.	Europa	253
8.2.	Amerika	254
8.3.	Asien	256
9.	Weltweite Selenressourcen aus Kupferlagerstätten	257
9.1.	Datengrundlagen	257
9.2.	Ressourcen und Reserven an Selen	260
9.2.1.	Vorratsabschätzung aus Kupferlagerstätten	260
9.2.2.	Abschätzung der nutzbaren Ressourcen und Reserven an Selen	264
9.3.	Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätte	268
9.4.	Selenvorräte nach Regionen und Ländern	271
9.5.	Analyse der Selenressourcen	278
9.5.1.	Lagerstättengröße und -typus	278
9.5.2.	Lagerstättengröße und politisch Stabilität	282
9.5.3.	Lagerstättengröße und Regionen	284
9.5.4.	Lagerstättengröße und geologisches Alter	287
9.6.	Folgerungen	290
10.	Zusammenfassung, Ergebnisse und Empfehlungen	292
10.1.	Zusammenfassung und Ergebnisse	292
	• Methode	292
	• Vorratsklassifikationssysteme	293
	• Kupferlagerstätten	294
	• Kupfer-Reserven und -Ressourcen	294
	• Unterschiede zwischen anthropogene Selen- und Kupfer-Zyklus	295
	• Auswirkungen des zukünftigen Trends des Kupfergehaltes in Lagerstätten auf Selenressourcen	295
	• Charakteristische Selenkonzentration in Kupferlagerstätten	296
	• Ressourcen und Reserven von Selen in Kupferlagerstätten	297
	• Verhältnis von Selen- zur Kupfermenge	298
	• Bildungsalter der Selen- und Kupfervererzungen	299
	• Selenvorräte nach Regionen und Ländern	300

• Auswirkungen der Lagerstättengröße	300
• Versorgungssicherheit und geografische Lage der Selenressourcen.....	301
• Auswirkungen der Lagerstättenform und des Bildungsalters	302
10.2.Empfehlungen	302
• Klassifizierungssysteme	302
• Versorgungssicherheit	303
• Aktualisierung der Ressourcen und Reserven von Selen	303
• Selenproduktion	303
• Anwenden der Methode auf andere Begleitelemente	304
Literaturverzeichnis	305
Stichwortverzeichnis.....	314

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einfluss des Rohstoffpreises von Kupfer auf Cut-off	9
Abb. 2: Schema der Methode zur Abschätzung von Reserven / Ressourcendaten von Begleitelementen aus Kupferlagerstätten	15
Abb. 3: Knowledge about mineral resources	26
Abb. 4: McKelvey-Diagramm zur Abgrenzung von Reserven und Ressourcen.....	28
Abb. 5: USGS-Klassifikationsschema für mineralische Rohstoffe	30
Abb. 6: Ergebnisse der Studie „Kritikalität der geologischen Kupferfamilie“	33
Abb. 7: Modelle zur Verteilung mineralischer Rohstoffe in der Erdkruste	34
Abb. 8: Struktur des Kupferzyklus nach Graedel et al (2002).....	38
Abb. 9: Kupferbestandes nach Anwendungskategorien pro Kopf in den USA	39
Abb. 10: Varianz der relativen (normierten) statistischen Entropie (RSE) im Kupferzyklus	40
Abb. 11: Zyklus-Diagramm von Selen. Die wichtigsten Schritte sind Bergbau.....	43
Abb. 12: Anteil von 1000 kg Selen in Kupferproduktionsprozessen	44
Abb. 13: Kumulativer globaler Zyklus für Selen für die Jahre 1940–2010	47
Abb. 14: Aufschlüsselung des Endverbrauchs des in Gebrauch befindlichen Selenbestands	48
Abb. 15: Die Beziehung und Abhängigkeiten der Hauptinteressengruppen (Stakeholder) der Vorratsklassifikation (Reporting Codes)	53
Abb. 16: Prinzipien von Reportingcodes.....	55
Abb. 17: Phasen eines Aufsuchungsprojekts (stages of an exploration project)	56
Abb. 18: Modifying Factors	57
Abb. 19: Der Entscheidungsprozess zu den Ressourcen und Reserven	58
Abb. 20: Der Beurteilungsprozess von Lagerstätten	59
Abb. 21: Allgemeine Beziehung von Explorationsergebnissen, mineralischen Ressourcen und mineralischen Reserven	61
Abb. 22: Die weltweite Verbreitung des CRIRSCO Standards durch übereinstimmende (compliant) Berichts-Kodizes.....	63
Abb. 23: Mitgliedstaaten der UNECE - United Nations Economic Commission for Europe.....	73
Abb. 24: UNECE vereint die Codes der westlichen und östlichen Einflussphäre	74
Abb. 25: Allgemeines Element der UNFC.....	74
Abb. 26: Gesamtmenge der Lagerstättenressourcen	75
Abb. 27: Klassifikation	76
Abb. 28: UNFC angewendet auf Lagerstätten fester mineralischer Rohstoffe sowie Kohle und Uranium.....	76
Abb. 29: Darstellung der dreizahligen Kodifizierung.....	77
Abb. 30: UNFC in Matrixdarstellung angewendet auf Lagerstätten fester mineralischer Rohstoffe sowie Kohle und Uranium.	78

Abb. 31: Kategorien und Subkategorien der UNFC	78
Abb. 32: historische Entwicklung der Reporting Codes.....	83
Abb. 33: Geografische Übersicht über die vorzugsweise zur Anwendung kommenden Reporting Codes nach Ländern und Regionen.....	84
Abb. 34: Vergleich von CRIRSCO, UNFC und anderen Ressourcen und Reserven Klassifizierungen	87
Abb. 35: CRIRSCO Kodex auf UNFC umgesetzt	89
Abb. 36: Gegenüberstellung der Reporting Codes	90
Abb. 37: UNFC ermöglicht umfassende Erfassung verschiedener mineralischer (auch anthropogener) und energetischer (auch erneuerbare) Rohstoffvorkommen; Vergleich zu anderen Reporting Codes.....	92
Abb. 38: Verwendung von Kupfer: links nach Regionen, rechts nach Sektor.....	95
Abb. 39: Eigenschaften und Vorteile von Kupfer	97
Abb. 40: Produktion aus Kupferbergbau	98
Abb. 41: Weltweite Kupfervorräte nach Kategorien und Kupferproduktion 2018	98
Abb. 42: Vereinfachtes Schema der Kupfererzeugung	99
Abb. 43: Schematische Darstellung einer Aufbereitung von Kupfererz aus porphyrischen Lagerstätte... ..	100
Abb. 44: Funktionsschema für den Aufbereitungsprozess von Kupfer.....	100
Abb. 45: Flussdiagramm für die Erzeugung von Kupferkonzentrat	101
Abb. 46: Grundlegendes Flussdiagramm der Hüttenprozesse und Reinkupfererzeugung aus Kupferkonzentrat	103
Abb. 47: Beispiel für die Rückgewinnung von Edelmetallen und Selen	104
Abb. 48: Kupferanteil in der Produktion und Recycling entlang der Wertschöpfungskette	105
Abb. 49: Materialfluss der Kupferaufbereitung.....	106
Abb. 50: Weltweite Kupferproduktion und Reserven nach Ländern bzw Regionen gegliedert	107
Abb. 51: Globale (weltweite) Kupferreserven des Jahres 2019 nach Ländern.....	107
Abb. 52: Führende, international operierende kupferproduzierende Unternehmen.....	110
Abb. 53: Die größten Förderländer von Kupfer nach Bergbauproduktion von 2010 bis 2019.....	110
Abb. 54: Weltweite Kupferreserven (berichtet, USGS)	112
Abb. 55: Assessment results for identified and undiscovered copper worldwide, by region.....	112
Abb. 56: Weltweite erkundete und unerkundete Kupferreserven nach Regionen 2014.....	113
Abb. 57: Kupferpreis nominell und inflationsbereinigt	118
Abb. 58: Karte der größeren Kupfer und Molybdän Lagerstätten.....	120
Abb. 59: Klassifikation von Erzlagerstätten nach ihrer Genese	123
Abb. 60: Kreislauf der Gesteine.....	124
Abb. 61: Kupfer-Nickel-Lagerstätte bei Sudbury, Ontario, Kanada.....	128
Abb. 62: Schematisches Profil durch die Lagerstätte Noril'sk (Russland).....	129
Abb. 63: Geologische Charakteristik wichtiger Kupferlagerstätten	130
Abb. 64: Schematisches Profil durch die Lagerstätte Bingham / Utah.....	133
Abb. 65: Lagerstätte Bingham / Utah (USA)	134

Abb. 66: Erzgang mit an- und abschwelliger Struktur, die sich unterhalb einer mächtigen Schicht von undurchlässigem Tonstein in die Horizontale biegt.	135
Abb. 67: Klufförmige Vererzungen, Fahlerzvererzung, Schwaz.....	136
Abb. 68: Karbonatitlagerstätte Palabora (RSA).....	140
Abb. 69: Erzschorne und Erz Hügel auf dem Ozeanboden.....	143
Abb. 70: Hypothetische SEDEX Lagerstätte	144
Abb. 71: Zentralafrikanischer Kupfergürtel.....	146
Abb. 72: Elementzonierung innerhalb des kongolesischen Cu-Co Gürtels	147
Abb. 73: Karte Verteilung der Kupferanreicherungen in sediment-hosted und porphyrischen Lagerstätten der Erde (USGS).....	148
Abb. 74: Manganknollen	149
Abb. 75: Skarnlagerstätte bei Iron Springs, Utah (USA).....	151
Abb. 76: Vereinfachter Querschnitt einer typischen porphyrischen Kupfer-Lagerstätte mit einer integrierten Skarn-Kupferlagerstätte.....	153
Abb. 77: Ongoing construction of Kakula's copper processing plant.....	160
Abb. 78: Development of Cu grades by type of deposits	165
Abb. 79: Average size (Resources) by type of deposits (ROM).....	165
Abb. 80: Average Size (Cu -content) by type of deposits	166
Abb. 81: Development of Cu resources by political stability	167
Abb. 82: Development of Cu resources by continents	167
Abb. 83: Copper exploration projects (2018/2019) size vs grade.....	168
Abb. 84: Average Size of all Cu deposits (active and projects).....	169
Abb. 85: Average Size of all producing Cu deposits (active)	170
Abb. 86: Average Size of all Cu projects - actual size vs (weighted) grade	170
Abb. 87: Latin America (active mines and projects).....	171
Abb. 88: Farblegende für Abb. 87 bis Abb. 91.....	171
Abb. 89: North America (active mines and projects)	172
Abb. 90: Africa (active mines and projects)	172
Abb. 91: Europe (active mines and projects).....	173
Abb. 92: Asia (active mines and projects)	173
Abb. 93: Porphyry Cu-deposits (active mines) by political stability of prod. countries.....	174
Abb. 94: Porphyry Cu-deposits (projects) by political stability of prod. countries.....	174
Abb. 95: Sediment hosted Cu-deposits (projects) by political stability of prod. countries.....	175
Abb. 96: Sediment hosted Cu-deposits (active mines) by political stability of prod. countries.....	175
Abb. 97: IOCG Cu-deposits (active mines) by political stability of prod. countries.....	176
Abb. 98: IOCG Cu-deposits (projects) by political stability of prod. countries	176
Abb. 99: Cu deposits in Paleogene environments (active mines and projects).....	179
Abb. 100: Cu deposits in Neogene environments (active mines and projects).....	179

Abb. 101: Anwendungsbereiche von Selen im Jahr 2003 und prozentuelle Veränderungen zu 1998	182
Abb. 102: Flussdiagramm verschiedener Methoden zur Behandlung des Kupferanodenschlammes	184
Abb. 103: Flussdiagramm für Behandlung des Kupferanodenschlammes durch sulfatierendes Rösten (Teilrösten, sulphation roasting)	185
Abb. 104: Geschätzte weltweite Selenreserven (2019, USGS).....	189
Abb. 105: Weltproduktion von Selen, aufgeschlüsselt nach Land oder Region	190
Abb. 106: Weltproduktion von Selen (blau) von 1900 bis 2014.....	191
Abb. 107: Weltproduktion von Selen von 2009 bis 2017	191
Abb. 108: Entwicklung des Selenpreises in den Jahren 2003 bis 2005	192
Abb. 109: Entwicklung des Selenpreises in den Jahren 2011 bis 2017	193
Abb. 110: Aufbau einer CIS-Solarzelle	193
Abb. 111: Prognose der Selenproduktion und Selennachfrage in Tonnen von 2017 bis 2050	194
Abb. 112: Geschätzte weltweite Selenreserven.....	196
Abb. 113: Verteilung und Anforderungen zur Verhinderung von Se-Mangel und Toxizität	201
Abb. 114: Selenkonzentration in ppm von Kupferlagerstätten (linear).....	205
Abb. 115: Selenkonzentration in ppm von Kupferlagerstätten (gruppiert)	205
Abb. 116: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte zu einer logarithmischen Normalverteilung.....	208
Abb. 117: Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Plot) der Selenmessreihen.....	211
Abb. 118: Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten (linear)	213
Abb. 119: Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten (gruppiert)	213
Abb. 120: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung	214
Abb. 121: Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten (linear).....	216
Abb. 122: Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten (gruppiert)	216
Abb. 123: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung	217
Abb. 124: Selenkonzentration von IOCG Kupferlagerstätten (gruppiert)	219
Abb. 125: Selenkonzentration von IOCG Kupferlagerstätten (linear).....	219
Abb. 126: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von IOCG Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung	220
Abb. 127: Selenkonzentration von gang-kluft-förmigen Kupferlagerstätten (Vein) (linear).....	222
Abb. 128: Selenkonzentration von gang-kluft-förmigen Kupferlagerstätten (Vein) (gruppiert)	222
Abb. 129: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von gang-kluft-förmigen Kupferlagerstätten (Vein) zu einer logarithmischen Normalverteilung.....	223
Abb. 130: Selenkonzentration von Skarn Kupferlagerstätten (linear)	225
Abb. 131: Selenkonzentration von Skarn Kupferlagerstätten (gruppiert).....	225

Abb. 132: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von Skarn Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung.....	226
Abb. 133: Selenkonzentration von VMS Kupferlagerstätten (linear)	228
Abb. 134: Selenkonzentration von VMS Kupferlagerstätten (gruppiert).....	228
Abb. 135: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von VMS Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung.....	229
Abb. 136: Selenkonzentration SEDEX (MS) Kupferlagerstätten (linear).....	231
Abb. 137: Selenkonzentration SEDEX (MS) Kupferlagerstätten (gruppiert)	231
Abb. 138: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von SEDEX (MS) Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung.....	232
Abb. 139: Selenkonzentration von Sedhost Kupferlagerstätten (linear)	234
Abb. 140: Selenkonzentration von Sedhost Kupferlagerstätten (gruppiert).....	234
Abb. 141: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von Sedhost Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung.....	235
Abb. 142: Selenkonzentration von nicht zuordenbaren Kupferlagerstätten (gruppiert)	238
Abb. 143: Selenkonzentration von nicht zuordenbaren Kupferlagerstätten (linear).....	238
Abb. 144: Selenkonzentration in Kupferlagerstätten.....	244
Abb. 145: mittlere Selenkonzentration in ppm in Kupferlagerstätten nach geologischem Alter.....	247
Abb. 146: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten	252
Abb. 147: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa	252
Abb. 148: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa – Ausschnitt Deutschland.....	253
Abb. 149: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa	253
Abb. 150: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa – Ausschnitt Nordeuropa.....	254
Abb. 151: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in den USA	254
Abb. 152: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Kanada.....	255
Abb. 153: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Russland	256
Abb. 154: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Südostasien.....	256
Abb. 155: Verteilung der Kupfer-Ressourcen nach Lagerstättentypologie	259
Abb. 156: Verteilung der Selen-Ressourcen nach Lagerstättentypologie	259

Abb. 157: Ressourcenanteile von Selen (äußerer Ring) und Kupfer (innerer Ring) nach Lagerstättentypologie	265
Abb. 158: Verteilung der Selenressourcen und der Selenreserven nach Lagerstättentypologie	267
Abb. 159: Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätten.....	269
Abb. 160: Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätten.....	270
Abb. 161: Bedeutende Lagerstättentypologien von Selenreserven des Paläogens, Neogens, Kreide und Neoproterozoikums	270
Abb. 162: Aufteilung der Selen-Reserven und Selen-Ressourcen nach Regionen (Kontinenten)	273
Abb. 163: Selen-Reserven und Selen-Ressourcen nach Regionen (Kontinenten).....	275
Abb. 164: Worldwide Governance Indicator (WGI) 2019.....	276
Abb. 165: Selen-Reserven und Selen-Ressourcen nach politischer Stabilität	277
Abb. 166: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration auf Basis aller analysierten Lagerstätten.....	279
Abb. 167: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration auf Basis aller aktiven Lagerstätten.....	280
Abb. 168: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration auf Basis aller Lagerstättenprojekte	281
Abb. 169: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration auf Basis nicht produzierenden Lagerstätten	281
Abb. 170: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration auf Basis aller Lagerstätten in politisch stabilen Regionen	283
Abb. 171: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration auf Basis aller Lagerstätten in politisch nicht ausreichend stabilen Regionen	283
Abb. 172: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration in Abhängigkeit ihrer geographischen Lage.....	285
Abb. 173: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration in Abhängigkeit ihrer geographischen Lage.....	286
Abb. 174: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration in Abhängigkeit ihres geologischen Alters	288
Abb. 175: Durchschnittliche Lagerstättengröße an Selenressourcen auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration in Abhängigkeit ihres geologischen Alters	289
Abb. 176: Ausgewählte Kopplungen bei der Primärproduktion von seltenen Metallen	291
Abb. 177: Rohstoffbedarf ausgewählter Zukunftstechnologien 2006 effektiv und 2030 möglich	291

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittsgehalte (Clarke-Werte), Mindestgehalte und Anreicherungs-faktoren.....	28
Tabelle 2: Kupferproduktion aus Rohstoffen sortiert nach Produktionsländern.....	108
Tabelle 3: Kupferproduktion aus Rohstoffen nach politischer Stabilität.....	109
Tabelle 4: Kupferproduktion aus Rohstoffen nach staatlichem Entwicklungsstatus.....	109
Tabelle 5: Wichtige Kupfererzminerale	122
Tabelle 6: Gegenüberstellung wesentlicher Eigenschaften von Kupferlagerstätten.....	155
Tabelle 7: Weltweite Reserven und Ressourcen von im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten	158
Tabelle 8: Weltweite Reserven und Ressourcen von in Planung befindlichen Kupferlagerstätten.....	159
Tabelle 9: Weltweite Reserven und Ressourcen von sich in Wartung befindlichen Kupferlagerstätten....	161
Tabelle 10: Weltweite Reserven und Ressourcen (kumuliert) von Kupferlagerstätten.....	162
Tabelle 11: Weltweite Reserven und Ressourcen von im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten aufgeschlüsselt nach Bildungsepochen	163
Tabelle 12: Zusammenstellung der statistischen Berechnungen der Selenkonzentrationen je Kupfer- Lagerstättentypus	240
Tabelle 13: Charakteristische Selenkonzentrationen in typischen Typologien von Kupferlagerstätten....	243
Tabelle 14: Weltweite Reserven und Ressourcen an Selen auf Basis der im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten	258
Tabelle 15: Weltweite Reserven und Ressourcen von im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten	258
Tabelle 16: Selen-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstätten in Wartung	262
Tabelle 17: Kupfer-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstätten in Wartung.....	262
Tabelle 18: Selen-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstättenprojekte.....	262
Tabelle 19: Kupfer-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstättenprojekte	262
Tabelle 20: Selen-Reserven und -Ressourcen kumuliert aus den Status.....	264
Tabelle 21: Kupfer-Reserven und -Ressourcen kumuliert aus den Status der Kupfer-Lagerstätten	264
Tabelle 22: Selen-Reserven und Selen-Ressourcen in metr. Tonnen je Lagerstättentypus	267
Tabelle 23: Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätte	268
Tabelle 24: Selen-Ressourcen und –Reserven nach Regionen	273
Tabelle 25: Selen-Ressourcen und –Reserven nach Ländern und Regionen	274
Tabelle 26: Anteile der Selenmengen aus politisch stabilen und instabilen Regionen	277
Tabelle 27: Durchschnittliche Menge an Selen-Ressourcen je Typus von Kupferlagerstätten	279
Tabelle 28: Charakteristische Selenkonzentration je Kupferlagerstättentypus unter Angabe der absoluten und prozentuellen Toleranzen im 95%-Konfidenzintervall.....	297
Tabelle 29: Globale Ressourcen und Reserven von Kupfer und Selen in Kupferlagerstätten	299

Abstract

Mineral raw materials have always been in great demand in human history and have been the cause of conflicts. There is currently a race for rare elements, as these are indispensable for the transformation to climate neutrality, digitization (e.g. IoT) and sustainable mobility and energy technologies. Many of these raw materials are not mined from their own deposits but are by-elements of basic raw materials such as copper, zinc, aluminium, or nickel and can only be produced together with them. Since by-elements' geological reserves are generally not included by classification codes - such as JORC - their reserves are not sufficiently documented. Consequently, no reliable assessment of their criticality is possible.

Using statistical methods and a set of selenium data from various copper mineralization, it is shown that every type of deposit has a characteristic selenium concentration. These values are linked and extrapolated with the database of copper deposits, which is structured according to the type of deposit, copper concentration, reserves and resources, and geographic location. Finally, considering the economic importance, a ratio of refined copper to selenium is calculated.

The result is a tabular listing of selenium's geological reserves and resources according to the relevant countries and regions and the copper deposits' geological age. With these findings, the average deposit size per type and region is determined, and the framework conditions for the economic extraction of by-elements are examined. A reserve base of around 25 million tons is well over a hundred times higher than that previously known and is available to meet the prospects of increasing demand for selenium. The extraction of these reserves is, however, directly related and limited to the primary copper production.

The methodology presented is suitable for estimating other by-elements' reserves and resources, such as platinum, cobalt, bismuth, molybdenum, or tantalum, both from copper mining operations as from aluminium, zinc, nickel, lead deposits and others.

Kurzfassung

Mineralische Rohstoffe waren in der Menschheitsgeschichte immer begehrt und Ursache von Konflikten. Derzeit ist ein Wettlauf um seltene Elemente entbrannt, da diese unabdingbar sind für die Transformation zur Klimaneutralität, Digitalisierung (z. B. IoT) und für nachhaltige Mobilitäts- und Energietechnologien. Viele dieser Rohstoffe werden nicht aus eigenen Lagerstätten gewonnen, sondern sind Begleitelemente von Basisrohstoffen wie Kupfer, Zink, Aluminium oder Nickel und können nur gemeinsam mit diesen produziert werden. Da die geologischen Vorräte von Nebenelementen im Regelfall nicht durch Klassifizierungs-codes - wie JORC - erfasst werden, sind deren Reserven nicht ausreichend dokumentiert und folglich ist keine zuverlässige Bewertung deren Kritikalität möglich.

Mittels statistischer Verfahren und ermittelter Selenwerte in verschiedenen Kupfervererzungen wird gezeigt, dass Lagerstättentypen charakteristische Selenkonzentration aufweisen. Diese Werte werden mit der Datenbasis von Kupferlagerstätten, die nach Typus der Lagerstättengeneese, Kupferkonzentration, Reserven und Ressourcen sowie geografischen Lage gegliedert ist, verschnitten und hochgerechnet. Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Bedeutung wird schließlich ein Verhältnis von raffinierten Kupfer- zur Selenmenge errechnet.

Das Resultat ist eine tabellarische Aufstellung der geologischen Reserven und Ressourcen von Selen nach relevanten Ländern und Regionen sowie nach dem geologischen Alter der Kupferlagerstätten. Mit diesen Erkenntnissen werden die durchschnittliche Lagerstättengröße je Typus und Region ermittelt und Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Gewinnung von Begleitelementen beleuchtet. Für den prognostizierten steigenden Bedarf von Selen stehen mit Reserven von rund 25 Mio. Tonnen eine weit über hundertfache Reservenbasis als bisher bekannt zur Verfügung. Die Gewinnung dieser Vorräte steht jedoch in unmittelbarem Zusammenhang mit der primären Kupferproduktion.

Die vorgestellte Methode ist geeignet, die Reserven und Ressourcen auch anderer Nebenelemente, wie u.a. Platin, Kobalt, Wismut, Molybdän oder Tantal sowohl von Kupferlagerstätten als auch jene von beispielsweise Aluminium-, Zink-, Nickel- und Bleilagerstätten abzuschätzen.

Glossar

Äon	höchstrangige Einheit der geologischen Zeitskala.
Ära	zweithöchstrangige Einheit der geologischen Zeitskala.
Flugasche	mit den Rauchgasen ausgetragene feste Bestandteile von Verbrennungsrückständen.
Basaltisch, basisch	Vulkanisches Gestein, basisch, feinkörnig.
Bergbau (Mining)	Ein Bergbau dient zur Gewinnung von Rohstoffen, die in →Lagerstätten angereichert sind.
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (Dünnschicht Solarzelle)
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid (Dünnschicht Solarzelle)
CMMI	Council of Mining and Metallurgical Institutes
CRIRSCO	Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (www.crirSCO.com)
Effusiv	ruhiges Ausfließen von Lava
Effusivgestein	an der Erdoberfläche erstarrtes magmatisches Gestein.
Erosion	Abtragung durch Wind, Wasser und Gletscher
Erze	Erze sind mineralische Rohstoffe, aus denen mit wirtschaftlichem Nutzen ein Metall gewonnen werden kann. Erze lassen sich gliedern in Erze des Eisens und der Stahlveredler, in Erze der Nichteisenmetalle (Buntmetalle, Sonder- und Leichtmetalle) sowie in Erze der Edelmetalle.
Granit	plutonisches Gestein mit einem Kieselsäuregehalt von 39 bis 52 %, grobkörnig.
Holozän	Jüngste Epoche der geologischen Zeitrechnung. Sie begann vor 10.000 Jahren mit dem Ende der letzten Eiszeit.
Hot-Spot	Magmaherd im Erdinneren.
ICSG	International Copper Study Group (https://www.icsg.org/)
indicated Resources	angedeutete, angezeigte Ressourcen
inferred Resources	vermutete, abgeleitete Ressourcen
Intrusivgestein	in Nebengestein eingedrungene magmatische Gesteine.
JORC Code	Joint Ore Reserves Committee Code
Lagerstätte (Deposit)	Eine Lagerstätte ist ein Mineralvorkommen (geologischer Körper) von ausreichender Größe und Qualität, das unter günstigsten Umständen als wirtschaftlich gewinnbar angesehen werden kann.
Lava	Gesteinsschmelze an der Erdoberfläche.
Lithosphäre	Erdkruste einschl. oberster, fester Teil des Erdmantels bis ca. 100 km Tiefe.
Magma	Gesteinsschmelze unter der Erdoberfläche.
Magmatite (magmatische Gesteine)	die durch Erstarrung von Magma entstandenen Gesteine. Man unterscheidet zwischen Vulkaniten (z. B. Basalt), Plutoniten (z. B. Granit) und den dazwischenliegenden Ganggesteinen.

Mantel/Erdmantel	reicht von 60 km bis 2.900 km Tiefe.
Massenbewegung	Verlagerung von Boden- und Gesteinsmaterial.
measured Resources	nachgewiesene Ressourcen
metamorphe Gesteine	Durch Druck und Temperatur entstandene Gesteine; Orthogesteine entstammen magmatischen Gesteinen, Paragesteine sind dagegen aus Sedimenten entstanden, z. B. Quarzite, Marmor, Schiefer, Gneise.
Metamorphose	die Umwandlung und Umformung eines Gesteins durch hohen Druck und hohe Temperaturen.
Minerale	bezüglich ihrer physikalischen und chemischen Beschaffenheit stofflich einheitlichen Bestandteile der Gesteine.
National Instrument NI 43-101	Standards of Disclosure for Mineral Projects
Periode	Die am häufigsten verwendete Untereinheit der geologischen Zeitskala.
Plutonismus	Entstehung, Veränderung und Wanderung natürlicher Gesteinsschmelzen innerhalb der Erdkruste; die erstarrten Gesteine nennt man Tiefengesteine oder "Plutonite", die großen Tiefengesteinskörper in der Erdkruste "Plutone".
Plutonite (Tiefengesteine)	magmatische Gesteine, die durch Erstarren von Magma in der Erdkruste entstanden sind.
Porphyre	Sammelbegriff für magmatische Gesteine mit einzelnen größeren Kristallen (meist Alkalifeldspate und/oder Quarz) als Einsprenglinge in einer feinkörnigen und dichten Grundmasse.
probable Reserves	wahrscheinliche Reserven
proven Reserves	gemessene, nachgewiesene Reserven
Quarze	Gruppe wichtiger gesteinsbildender Minerale; liegt stets in kristallisierter Form vor.
Reserven	Vorkommen, die nach dem heutigen Stand der Technik bewertet und wirtschaftlich abbaubar sind.
Ressourcen	Vorkommen, die zwar nachweislich vorhanden sind, aber gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich gefördert werden können oder noch nicht ausreichend beurteilt sind.
Schiefer	ein durch tektonische Vorgänge und Metamorphosen entstandenes, in dünnen, ebenen Platten brechendes Gestein.
Sediment	Durch physikalische, chemische oder biologische Vorgänge abgeschiedene Mineralphasen, die durch gravitative Prozesse abgelagert wurden.
Sedimentation	Vorgang des Abscheidens oder des Absetzens von festen Stoffen, die durch Wind und Wasser transportiert werden.
Sedimentgestein (Schichtgestein)	ein durch Verfestigung von Sedimenten entstandenes Gestein; klastische Sedimente bestehen aus mechanisch zertrümmerten Gesteinsbruchstücken verschiedener Korngrößen; chemische Sedimente entstehen durch Ausfällung gelöster Bestandteile aus Flüssigkeiten, biogene Sedimente bilden sich unter

	wesentlicher Beteiligung tierischer oder pflanzlicher Organismen.
Silikate	die wichtigsten gesteinsbildenden Minerale der Erde (Silizium); zu ihnen gehören Quarze, Feldspate und Glimmer.
Subduktion	Absinken einer ozeanischen Platte unter eine andere Lithosphärenplatte.
„Tertiär“	Nicht mehr aktueller Überbegriff für das Neogen und Paläogen.
UNFC	United Nations Framework Classification
USGS	United States Geological Survey (https://www.usgs.gov/)
Viskosität	Maß für die Zähigkeit einer Flüssigkeit.
Vorkommen (Occurrence)	Ein Vorkommen ist eine Konzentration eines Minerals, die als wertvoll angesehen wird oder die von wissenschaftlichem oder technischem Interesse ist.
Vorrat	Der Begriff „Vorrat“ bezeichnet nur jene Mengen, die in absehbarer Zukunft von wirtschaftlichem Interesse sein können, also (bedingt) abbauwürdig sind. Lagerstättenvorräte sind eine Teilmenge der Vorkommen des jeweiligen Rohstoffs. Aus Vorräten können bei Eignung (feasibility) sowie regelkonformer Aufsuchung (Prospektion) Ressourcen und Reserven werden.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Industriemineralien und Metalle sind aus dem Wirtschafts- und Produktionskreislauf und auch dem Alltag der Menschen nicht wegzudenken. Trotz steigender Material- und Aufbereitungseffizienz und unter Berücksichtigung der Anstrengungen zur Implementierung einer Kreislaufwirtschaft nimmt der Bedarf an mineralischen Rohstoffen und Metallen stetig zu. Für die kommenden Jahre wird eine Beschleunigung dieses Wachstumstrends prognostiziert.¹ Die Ursachen für den Mehrbedarf sind umfassend. Das Faktum, dass immer mehr Menschen den Planeten Erde bewohnen, führt unweigerlich zu einem Mehrbedarf an Gütern des täglichen Lebens und von Infrastruktur.² Dieser demografischen Entwicklung überlagert steigt auch statistisch der Wohlstand der Weltbevölkerung. Die Vereinten Nationen sehen in der Alterung der Weltbevölkerung ein Zeichen für den steigenden Wohlstand der Mittelschicht, der immer mehr Menschen ein langes Leben ermöglicht. Die gesteigerte Lebenserwartung, auch wenn sie unterschiedlich in den Regionen verteilt ist, ist Ergebnis des technischen, medizinischen und wirtschaftlichen Fortschritts. Dieser führt zu einem Mehrbedarf an Geräten, besseren Behausungen, intensiverer Landwirtschaft sowie an Mobilität und Infrastruktur – alles Bereiche, die ohne Rohstoffe nicht realisierbar wären.³

Neben den genannten demografischen und sozioökonomischen Faktoren treiben auch von der Gesellschaft bewusst geförderte technologische Faktoren den Rohstoffbedarf stark an. Zum einen führt der Trend zu einer kohlenstoffarmen Zukunft zu einem Anstieg der Nachfrage nach einer Vielzahl von mineralischen Rohstoffen und Metallen. Die Weltbank führt in einer 2017 veröffentlichten Studie als bedeutendste Beispiel hierfür die Vervielfachung des Rohstoffbedarfs

¹ World Bank Group, The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future, The World Bank, USA, June 2017 | <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/minerals-and-metals-to-play-significant-role-in-a-low-carbon-future> (27.12.2020) [WRDB2017]

² Aus der neuesten Weltbevölkerungsprojektionen der Vereinten Nationen (UN) geht hervor, dass sich die Weltbevölkerung in den letzten 70 Jahren auf heute (2020) rund 7,7 Milliarden Menschen verdoppelt hat und bis 2050 auf 9,7 Milliarden und bis 2100 auf 10,9 Milliarden wachsen wird. Auch wenn sich das Tempo gegenüber dem Wachstum in den Nachkriegsjahrzehnten aufgrund der reduzierten Geburtenrate in Asien (mit Ausnahme von Indien) verlangsamt, treibt vor allem der afrikanische Kontinent das Bevölkerungswachstum weiter an. (<https://www.dsw.org/neue-un-projektionen-2019/> (27.12.2020))

³ Afrikaner haben nach wie vor eine weit niedrigere Lebenserwartung als etwa Europäer, obwohl sich die Kennzahl während der Nachkriegszeit nicht nur für Europa deutlich verbessert hat, sondern auch für Afrika. (<https://www.dsw.org/neue-un-projektionen-2019/> (27.12.2020))

zur Herstellung von elektrischen Speicherbatterien an (u. a. für Aluminium, Kobalt, Eisen, Kupfer, Blei, Lithium, Mangan und Nickel).⁴ Eine noch größere Nachfrage werden in Zukunft Starkmagneten haben, die für effiziente Energieerzeugung (z. B. Windkraft) oder für Antriebe (z. B. Motoren für E-Fahrzeuge) benötigt werden und zu deren Herstellung eine Vielzahl kritischer mineralischer Rohstoffe benötigt werden.

Zum anderen wird häufig der Mehrbedarf an mineralischen Rohstoffen für die fortschreitende Digitalisierung nicht ausreichend gewürdigt. Mit dem Einsatz digitaler Prozesse in Bergbau, Herstellung und Aufbereitung wird nachhaltiger und materialeffizienter produziert und damit ein Teil des Bedarfs an mineralischen Rohstoffen verringert. Dieser Effekt wird abgeschwächt durch den explosionsartigen Einsatz von digitalen Komponenten, „Internet of Things“ (IoT), autonome Mobilität sowie für die dafür nötige Kommunikationsinfrastruktur.⁵ Als Beispiel kann Kupfer dienen, ohne dem kein digitales Gerät auskommt und sich dadurch der Kupferbedarf bis 2050 um prognostizierte 300 Prozent erhöhen wird.⁶

Alle diese Faktoren führen zu einem zunehmenden weltweiten Verbrauch an Metallen und mineralischen Rohstoffen sowohl in der entwickelten Welt, aber vor allem in den aufstrebenden Industrienationen wie den BRICS-Staaten Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts besteht die strategische Herausforderung, den auf längere Sicht steigenden Bedarf an mineralischen Rohstoffen der Welt zu decken. Die Europäische Union hat 2008 eine Rohstoffstrategie beschlossen und 2020 eine aktualisierte Liste kritischer Rohstoffe herausgegeben sowie einen Aktionsplan zu kritischen Rohstoffen politisch auf den Weg gebracht.⁷

Es ist daher für die technische und ökonomische Planungssicherheit entscheidend, das Ausmaß und die regionale Verbreitung an geologischen Vorkommen von mineralischen Rohstoffen

⁴ World Bank Group, The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future, The World Bank, USA, June 2017 | <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/minerals-and-metals-to-play-significant-role-in-a-low-carbon-future> (27.12.2020) [WRDB2017]

⁵ Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Deutsche Rohstoffagentur (DERA), S.231ff; Studie durchgeführt von Fraunhofer ISI, 2016 https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2016/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf (27.12.2020)

⁶ ISI Fraunhofer, Kupfer für Zukunftstechnologien, Juli 2010 | https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2010/Bericht_FSEM_Cu.pdf (27.12.2020)

⁷ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_20_1542 (27.12.2020)

möglichst genau zu kennen. Fast zwei Drittel⁸ der von den Menschen in Mitteleuropa verbrauchten Rohstoffen (inkl. energetischer Rohstoffe wie Braun- und Steinkohle, Mineralöl, Erdgas) entfallen davon auf mineralische Rohstoffe, d. h. Metalle, Industriemineralien, Steine und Erden.

Die Konzentrationen der weltweiten geologischen Verteilung der Vorkommen von mineralischen Rohstoffen ist sehr unterschiedlich. Beispielsweise ist die EU bei den primären Metallrohstoffen vollkommen von Importen abhängig.⁹ Durch das Auseinanderfallen von Ländern mit natürlichen Rohstoffvorkommen und den hauptverbrauchenden Nationen, ist die Kenntnis der tatsächlichen Lebensdauer von mineralischen Rohstoffen auch volkswirtschaftlich und politisch essenziell.

Die Reichweite („Lebensdauer“) von mineralischen Rohstoffen kann als statischer oder dynamischer Kennwert beschrieben werden. Die statische Reichweite errechnet sich aus dem Quotienten der Reserven oder Ressourcen zur Weltproduktion. Die dynamische oder semidynamische Reichweite ergibt sich aus dem Verhältnis von Reserven oder Ressourcen zur prognostizierten Weltproduktionssteigerung.

Während der Divisor (Weltproduktion) zumeist eine greifbare Größe darstellt, ist der Dividend mit großer Unschärfe belastet, der in vielen Fällen kein zuverlässiges Ergebnis erbringt. Die statische Reichweite ist immer nur eine Momentaufnahme in einem dynamischen Gesamtsystem. Durch den technischen Fortschritt und die preisliche Entwicklung der Rohstoffe, werden laufend Ressourcen zu Reserven erschlossen. Angaben der Reichweite sind daher lediglich als Richtzahl zu interpretieren und spiegeln keineswegs die tatsächliche Vorhaltezeit wider.

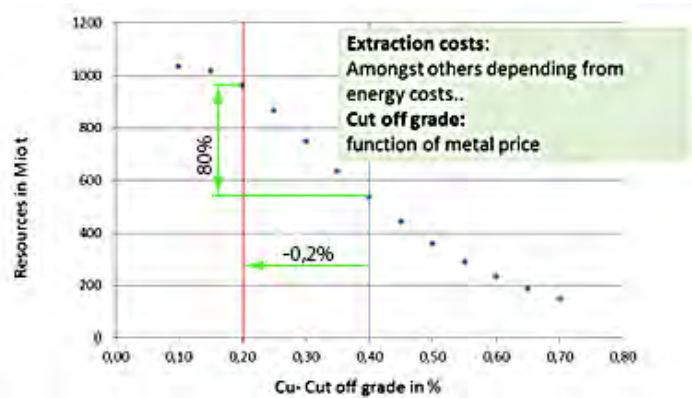
Abb. 1 veranschaulicht, wie sehr der Rohstoffpreis den **Cut-off Grade** beeinflussen kann. Daraus folgt konsequenter Weise, dass bei höheren Rohstoffpreisen ein niedrigerer Cut-off bereits wirtschaftlich ist. Daher ist eine Ressourcenklassifikation eine Momentaufnahme und kann

⁸ Diese Angabe ist von der Website der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland (BGR); [www.bgr.bund.de] (31.10.2010) entnommen. Dort findet sich folgende Tabelle:

Sand und Kies	245 t	Kaolin	4,0 t
Hartsteine	215 t	Aluminium	3,0 t
Braunkohle	170 t	Kupfer	2,0 t
Mineralöl	105 t	Torf	2,0 t
Erdgas (in 1000 m ³)	95	Bentonit	0,7 t
Kalkstein, Dolomit	70 t	Zink	0,7 t
Steinkohle	65 t	Kali (K ₂ O)	0,6 t
Stahl	40 t	Schwefel	0,5 t
Zement	27 t	Blei	0,4 t
Steinsalz	14 t	Feldspat	0,4 t
Tone	12 t	Flußspat	0,4 t
Quarzsand	9 t	Schwerspat	0,3 t
Gips, Anhydrit	7 t	Phosphate	0,1 t

Diese Tabelle der BGR gibt den Verbrauch bzw. Einsatz von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen in Deutschland im Laufe eines Menschenlebens (Lebensalter 80 Jahre, Datenbasis 2008) an. Daraus ist zu erkennen, dass bei Gewichtsbeachtung nicht die in Gesellschaft und Politik bekannteren energetischen Rohstoffe (Kohle, Mineralöl, Erdgas) überwiegen, sondern zu circa 60% mineralische Rohstoffe (inkl. Metalle). (Für Erdgas wurde eine mittlere Dichte von 0,77 kg/m³ angenommen, womit 95.000 m³ etwa 70 t entsprechen.)

⁹ [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland; www.bgr.bund.de] (29.10.2019)



**Abb. 1: Einfluss des Rohstoffpreises von Kupfer auf Cut-off:¹⁰
Ein abnehmender Cut-off-Grad steigert die verfügbaren Ressourcen. Es handelt sich hierbei um ein typisches Beispiel eines Gewinnungszieles (s. Text).**

sehr volatil sein. In der Praxis wird daher in vielen Klassifikationen auch der Cut-off in verschiedenen Größenkategorien angegeben. Der beispielhaft in der Abbildung gezeigte Cut-off Grade Verlauf illustriert anschaulich, dass jede Ressourcenangabe eine Funktion des Cut-off-grades und damit des aktuellen Marktpreises ist. Ressourcenangaben von Bergbaubetrieben können daher auch (jährlich) schwanken, ohne dass Rohstoffe abgebaut oder neue Vorräte prospektiert wurden, wenn der Cut-off-grade verändert wird. Der Cut-off Grade kann durch eine betriebswirtschaftlich neue Festlegung verändert werden indem beispielweise eine verbesserte Abbaumethode implementiert wurde, (neue) Risiken erkannt oder gebannt wurden oder sich der Marktpreis des Rohstoffs ändert. Die Bewertungen von Risiken und Abbaukosten sind ebenso keine fixen Größen, sondern hängen mit den Kalkulationsprinzipien des jeweiligen Unternehmens zusammen und folgen der marktwirtschaftlichen Freiheit, solange die entsprechenden Reporting-Richtlinien eingehalten werden.

Anschaulich macht dies beispielsweise die Lektüre der Geschäftsberichte von den drei unterschiedlichen Betreibern der Kupfermine Cerro Verde¹¹ in der Arequipa Region in Peru, die für den gleichen geologischen Gesteinskörper (zulässiger Weise) unterschiedliche Kupfer-Ressourcenwerte angeben. Die praktische Auswirkung auf Vorratsaussagen zeigt beispielhaft die Abb. 1 für einen Bergbaubetrieb. Die Veränderung des Cut-off-grades von 0,4% auf 0,2% geht mit einer Steigerung der ausgewiesenen Ressourcen um 80% einher, ohne dass Rohstoffe neu erkundet (zusätzlich ausgewiesen) oder abgebaut wurden. Der wirtschaftliche Cut-off-grade für den Kupferabbau ist im Laufe der Jahre kontinuierlich gesunken und liegt heute bei circa 0,2%. Es ist daher zulässig den Schluss zu ziehen, dass bei steigender Nachfrage im Besonderen nach Kupfer durch u.a. vermehrte Nutzung erneuerbarer Energieerzeugung und Elektromobilität, der Preis dieses Rohstoffs steigt. Ob ausreichend Kupfer zur Deckung dieses Mehrbedarfes durch die Nachhaltigkeitsbemühungen besteht, kann daher nicht durch einfache (statische) Nachschau in

¹⁰ Diagramm nach L. Weber [WEBE2020]

¹¹ http://www.fcx.com/sd/pdf/fast_facts/Cerro_Verde_Expansion_Fact_Sheet.pdf (16.08.2020)

die derzeitigen Ressourcenangaben abgeschätzt werden. Es muss zuvor eine Neubewertung der Vorräte mit dem geänderten Cut-off Grade erfolgen, der mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Ausweisung höherer Ressourcen führt (dynamische Betrachtung).

Die Begriffe für Reserven und Ressourcen werden in dieser Arbeit nach der Definition von McKelvey (vgl. Abb. 4) und angelehnt an USGS verwendet. Demnach sind Vorkommen, die nach dem heutigen Stand der Technik bewertet und wirtschaftlich abbaubar sind, als **Reserven** bezeichnet. Bei **Ressourcen** hingegen handelt es sich um Vorkommen, die zwar nachweislich vorhanden sind, aber gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich gefördert werden können oder noch nicht ausreichend beurteilt sind. Diese Unterscheidung ist insbesondere in Hinblick auf den technischen Fortschritt im Bergbau nötig, um auch zukünftigen Generationen die Nutzung von Ressourcen zu ermöglichen. Dies kann beispielsweise durch weitblickende Raumordnungsplanung mit Definition von Ressourcen-Vorratsflächen erfolgen.

Bislang wurden Zahlen von Reserven / Ressourcen¹² vom USGS (United States Geological Survey)¹³ erfasst und in den jährlich erscheinenden Mineral Commodities¹⁴ für Selen veröffentlicht. Diese Zahlenangaben insbesondere der „Reserve Base“ erwiesen sich aber aus verschiedensten Gründen als unzuverlässig. Einerseits wurden die jährlichen Explorationserfolge von Unternehmen nicht oder nur teilweise einbezogen, andererseits wurden die Vorräte verschiedener Rohstoffe gar nicht erhoben. Zudem wurde der Rohstoffpreis nicht ausreichend berücksichtigt. Dem USGS war diese Unzulänglichkeit offensichtlich seit Jahren bekannt.¹⁵ Die aktuelle Diskussion über die tatsächliche Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe hat in den vergangenen Jahren eine besondere Dimension erfahren, die zu gravierenden Fehleinschätzungen über die Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen geführt hat. USGS hat sich daher entschlossen, ab 2010 keine Daten mehr zur „Reserve Base“, also den Selen-Ressourcen mehr zu veröffentlichen,¹⁶ da diese offensichtlich zu unrealistischen Kennzahlen (Reichweiten) führen.

¹² USGS verwendet den Begriff „Reserve Base“ für den Teil einer identifizierten Ressource (identified Resources), der die festgelegten physikalischen und chemischen Mindestkriterien für die aktuellen Bergbau- und Produktionspraktiken erfüllt, einschließlich der Kriterien für Qualität, Dicke und Tiefe. „Reserve Base“ ist die vor Ort nachgewiesene measured & indicated Resource, aus der Reserven geschätzt werden und bei nachgewiesenen Potenzial in solche umgewandelt werden. „Reserve Base“ entspricht dem Terminus „Ressource“ in dieser Arbeit, da die unsicheren „inferred Resources“ für die Analysen außer acht bleiben. (vgl. auch Abb. 5.)

¹³ <http://minerals.usgs.gov/> (29.10.2019)

¹⁴ <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> (29.10.2019)

¹⁵ <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcsapp2010.pdf>; S.3 (29.10.2019)

¹⁶ <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcsapp2010.pdf>; S.3 (29.10.2019)

1.2. Stand der Erfassung von Ressourcen und der Forschung

Die Erfassung bzw. Abschätzung von Reserven / Ressourcen erfolgt weltweit nach sehr unterschiedlichen Methoden und Grundsätzen, deren Harmonisierung für weite Teile der Erde (jedoch insbesondere ohne China) im CRIRSCO-Standard in den letzten beiden Jahrzehnten Fortschritte gemacht hat. Die Basis bildet der australische JORC-Code (*Joint Ore Reserves Committee*).¹⁷ Er legt die Mindeststandards, Empfehlungen und Richtlinien für die öffentliche Berichterstattung in Australien und Neuseeland für Explorationsergebnisse sowie mineralische Ressourcen und Reserven sowie Erzreserven fest. Es handelt sich dabei um ein verbindliches System zur Klassifizierung von Tonnage- und Klassifikationsschätzungen nach geologischer Kenntnis sowie technischer und wirtschaftlicher Betrachtung. Alle, dem CRIRSCO-Template unterliegende Berichte, aber auch jene Chinas (Mineral Resource/Reserve Classification System of China (MRRCC)), verfügen über **keinen Rahmen für die Erfassung von Begleitelementen**. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Ressourcen- und Reserven-Bewertung von Nebenelementen, die keine eigenen Lagerstätten bilden am Beispiel von Selen. Die Lagerstätten erkundung ist wirtschaftlich zumeist auf den Hauptrohstoff ausgerichtet und Begleitelemente spielen – wenn überhaupt – eine untergeordnete Rolle. Daher sind globale Abschätzungen über die Verfügbarkeit derartiger Ressourcen äußerst spekulativ.

In Großbritannien (UK) wurde früher der “IMMM Reporting Code”¹⁸ (The Institution of Materials, Minerals and Mining in the United Kingdom) angewendet. Nach einer Reihe von Fusionen von professionellen Institutionen wurde dieses Reporting für mineralische Ressourcen und Reserven eingestellt und mit einem breiteren Mandat als Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC) 2001 neu konstituiert.¹⁹ Nach der Satzung des PERC²⁰ soll das Ziel verfolgt werden, die öffentliche Berichterstattung über die Explorationsergebnisse sowie über die Entwicklung von mineralischen Ressourcen bzw. Reserven zu verbessern. Es unterstützt die nationalen Berichtsorganisationen (National Reporting Organisation - NRO) in Europa und unterliegt dem CRIRSCO-Standard.

In Südafrika gilt der South African Code for Reporting of Mineral Resources and Mineral Reserves (The SAMREC²¹ Code). Die Definitionen dieses Berichtskodex wurde bereits im Jahr 1994 mit Unterstützung des Council of Mining and Metallurgical Institutions (CMMI) mit den Vereinigten Staaten, Australien, Kanada und Großbritannien vereinheitlicht und alle genannten Regionen sind heute an den CRIRSCO-Standard angepasst. In Kanada gibt es die Besonderheit,

¹⁷ <http://www.jorc.org/> (15.08.2020)

¹⁸ <http://technology.infomine.com/articles/1/6204/perc/the.pan-european.reserves.aspx> (29.10.2019)

¹⁹ <http://www.perc.co/> (29.10.2019)

²⁰ <http://www.vmine.net/percreserves/tor.htm> (29.10.2019)

²¹ <http://www.samcode.co.za/> (29.10.2019)

dass die Berichterstattung nach dem National Instrument NI 43-101 „Standards of Disclosure for Mineral Projects“ zumindest für börsennotierende Unternehmen verbindlich zu erfolgen hat.²² Das Instrument ist ein kodifizierter Satz von Regeln und Richtlinien für die Meldung und Anzeige von Informationen zu Lagerstätten und ist sehr weitreichend und von hoher Verbindlichkeit für die verpflichtende Offenlegung von Informationen.²³

Ein von allen anderen losgelöstes, unabhängiges Klassifizierungssystem ist das der Vereinten Nationen (UN), das eine Erfassung von fossilen und mineralischen Rohstoffreserven / -ressourcen ermöglicht und „United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Resources“ (UNFC) genannt wird.²⁴ Im Jahr 2018 wurde die Erfassung anthropogener Ressourcen und 2020 die Integration erneuerbarer Energien in den Berichtskodex ergänzt, der jedoch weiterhin keinerlei Verbindlichkeit und somit reduzierte Verbreitung hat. Das ist insbesondere deshalb bedauerlich, da das **UNFC als einziges Klassifizierungssystem einen Rahmen für die Erfassung von Nebenelementen**, die keine eigenen Lagerstätten bilden, zur Verfügung stellt.

Grundsätzlich haben alle Klassifikationssysteme ihre Stärken und Schwächen und richten sich teilweise an unterschiedliche Stakeholder. Ein nicht unerheblicher Teil der vorliegenden Arbeit wurde der Analyse und Gegenüberstellung wirtschaftlich bedeutender und bereit anerkannten Vorratsklassifikationssysteme gewidmet. Auf den Mangel bezüglich der Bewertung von **Begleitelementen**, die im Regelfall mit einem Hauptrohstoff mitgefördert werden, wurde bereits eingegangen. Eine weitere Herausforderung ist die Konvertierung der unterschiedlichen Klassifikationssysteme. Werden Vorratsangaben für Analysen herangezogen, ist deren qualitative Zuordnung für die Vergleichbarkeit entscheidend. In dieser Arbeit werden in Kapitel 2.6 die unterschiedlichen Klassifizierungscodes zur Bestimmung der Reserven und Ressourcen analysiert, diskutiert und gegenübergestellt.

²² [CIM2010]

²³ für weitere Details siehe Kap. 3.4

²⁴ http://www.unece.org/energy/se/unfc_2009.html | <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/unfc/home-page/UNFC-poster-download.pdf> (29.10.2019)

1.3. Zielsetzung und Nutzen

Ziel dieser Dissertation ist es, ausgehend von der oben ausgeführten Motivation, die Abschätzung von Reserven / Ressourcen auf eine neue, aussagekräftigere Basis zu stellen, und insbesondere den Fokus auf die wirtschaftlich gewinnbaren Nebenmetalle zu legen, die selbst zum Teil keine eigenen Lagerstätten bilden. Als Beispiel wurde das industriell vielfältig eingesetzte Metall Selen gewählt. Anhand dieses Rohstoffs wird eine Methode der Vorratsabschätzung entwickelt.

Im Besonderen wurden folgende Fragestellungen im Rahmen dieser Dissertation bearbeitet:

Hauptfragestellung: Unterschiedliche Kupferlagerstättentypen enthalten bestimmte charakteristische Konzentrationen an Selen.

Unterthese A: Die tatsächlichen Selenvorräte in Kupferlagerstätten sind signifikant größer als von geologischen Diensten ausgewiesen.

Unterthese B: Die Vorratsklassifikationen berücksichtigen Nebenrohstoffe nicht ausreichend.

Durch Analyse und Gegenüberstellung der relevanten und anerkannten Klassifikationssysteme sollten deren Qualität, Stärken, Schwächen und Zielgruppen transparent gemacht werden. Zusätzlich sollen die Möglichkeiten der Konvertierung von Vorratsangaben und grundsätzlichen Zielgruppen der jeweiligen Klassifikationssysteme dargestellt werden. Von besonderem Interesse ist, inwieweit Vorratsklassifizierungssysteme in der Bewertung Nebenelementen berücksichtigen, um die Verlässlichkeit bisheriger Vorratsangaben zu Selen diskutieren zu können.

Mit Hilfe der auf der oben beschriebenen Erhebungsmodalität basierenden Reserven- / Ressourcenabschätzung soll es ermöglicht werden, genauere Angaben über das wirtschaftlich gewinnbare Potenzial insbesondere von Begleitelementen zu erlangen. Die Methode wird auf Selen beschränkt, das charakteristischerweise in Kupfererzlagertstätten als Nebenmetall auftritt.

Eine genauere Abschätzung von Reserven / Ressourcen, aufbauend auf lagerstättenkundlich fundierten Basisdaten ist für rohstoffwirtschaftliche und rohstoffpolitische Fragestellungen von eminenter Bedeutung. Die Reserven- / Ressourcenzahlen können mit Kennzahlen zur politischen Stabilität der Produzentenländer verknüpft werden und hieraus wertvolle Informationen über die strategische Bedeutung bestimmter Rohstoffe bzw. die Versorgungsgefährdung erlangt werden.

In wissenschaftlichen Publikationen wird oft eine fixe Relation zwischen Kupfer und Selen angenommen diese wurde öfters zur Abschätzung der Selenvorräte herangezogen.²⁵ Diese Kennwerte wurden ohne erkennbare vertiefte Analyse abgeschätzt und führen bei universeller Anwendung zu Über- bzw. Unterschätzung von Selenressourcen. Mit den Resultaten der dieser Erhebungsmethode soll abschließend versucht werden, eine Relation zwischen Kupfer- und Selenressourcen unter Berücksichtigung der wirtschaftlich relevanten Kupferlagerstätten abzuschätzen.

25 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

Diese Verhältniszahl könnte einen Weg zu den regelmäßigen Aktualisierungen der Selenressourcen/-reserven unter Verwendung von leicht zugänglichen Ressourcen-/Reservedaten von Kupfer ermöglichen.

1.4. Methode

Die bisher international eingesetzten Methoden zur qualifizierten Ermittlung von Ressourcen und Reserven fokussieren sich auf den Hauptrohstoff bzw. die Hauptrohstoffe der prospektierten Lagerstätte(n). Es gibt bis auf Lagerstätten, die zu an bestimmten Börsen öffentlich notierenden Bergbauunternehmungen gehören, keine Verpflichtung, Reserven- bzw. Ressourcenangaben an nationale oder internationale Institutionen zu melden. Bestimmte Nebenmetalle wurden bzw. werden von den vielen Unternehmen gar nicht erhoben. Sogar gibt es keine verlässlichen Angaben über Rhenium oder Selen als Begleitelemente in Molybdän- (Mo-) oder Kupfer- (Cu-) Lagerstätten. Beide fallen aber bei der Aufbereitung von Molybdän- oder Kupfererzen bestimmter Lagerstättentypen (insbesondere Kupfer-Porphyrerze) an. Selen (Se) reichert sich in den Aufbereitungsrückständen dieser Erze an und kann durchaus als wirtschaftliche Ressource betrachtet werden. Aus dieser Datenlage resultiert, dass nationale oder globale Erhebungen von Ressourcen und Reserven unvollständig waren bzw. sind.

Beispielsweise fiel bei der Weiterverarbeitung der in Bleiberg-Kreuth gewonnenen Blei-Zinkerzen in den Elektrolyseschlamm Germanium an. Das Germanium der Hüttenschlämme wurde in der Seltenmetallhütte Langelsheim / Deutschland zu Reinstgermanium weiterverarbeitet. Österreich rangierte dabei sogar an der 4. Stelle der Weltproduktion, ohne dass je diesbezügliche Reserven / Ressourcenangaben getätigt wurden.²⁶

Da bekannt ist, dass bestimmte Lagerstättentypen ein charakteristisches Nebenmetallspektrum führen, können daraus mithilfe geostatistischer Verfahren „Normkonzentrationen“ aller technisch extrahierbarer Wertstoffe ermittelt werden. Diese Normkonzentrationen wären in der weiteren Folge für die wichtigsten Lagerstättentypen die Grundlage für eine umfassende Reserven-/Ressourcenermittlung der Nebenrohstoffe.

Kernelement der Vorratsdatenabschätzung der Nebenelemente ist eine solide Datenlage über die Ressourcen und Reserven der Wirtslagerstätten. Diese Arbeit konzentriert sich auf Kupferlagerstätten mit dem Nebenmetall Selen. Grundsätzlich sind die Angaben von Ressourcen/Reserven von Kupfer mit hoher Qualität verfügbar, da Kupfer zu den wichtigsten Basisrohstoffen zählt und über Börsen (z. B. LME in London) international gehandelt wird. Die von USGS oder der

26 Weber, Leopold, Die Blei-Zinkerzlagertstätten des Grazer Paläozoikums und ihr geologischer Rahmen, Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt 12, ISBN 3900312729, 1990 [WEBE1990].

ICSG gesammelten und (teilweise) veröffentlichten Mengenangaben sind im Regelfall nach Ländern und Regionen gegliedert und aggregiert. Über die Herkunft des Materials aus bestimmten Lagerstätten kann aus diesen Daten nicht rückgeschlossen werden. Meistens liegt der Blick bei Datenermittlung auf die resultierenden Produktionsmengen, da diese für den Markt von entscheidendem Interesse sind. Reinkupfer wird in mehreren Produktionsschritten hergestellt und zumeist aus zuvor aufbereiteten und international gehandelten Kupferkonzentrat gewonnen. Eine Rückverfolgung auf die geologische Herkunft bzw. Lagerstätte ist ausgeschlossen.

Für die hier vorgeschlagene Methode zur Ressourcenermittlung von Nebenelementen ist die Kenntnis des geologischen Typus der Wirtslagerstätte nötig. Es wird angenommen (siehe auch das folgende Kap. 1.3), dass jeder Lagerstättentypus einen charakteristischen Wert an Selenkonzentration aufweist und somit in einem weiteren Schritt auf die Reserven/Ressourcen von Selen geschlossen werden kann.

Die bekannten und verfügbaren Angaben der Ressourcen/Reservemengen von Kupfer sind wie eben erläutert für die in dieser Arbeit behandelten Methode nicht einsetzbar. Es müssen zu jeder Kupferlagerstätte die (Einzel-)Daten über die jeweilige Erzmenge, den (durchschnittlichen) Kupfergehalt, die Reserven und Ressourcen sowie der Lagerstättentypus verfügbar sein. Der Umfang der Einzeldaten sollte kumuliert nach Ressourcen/Reserven in die Größenordnung der von

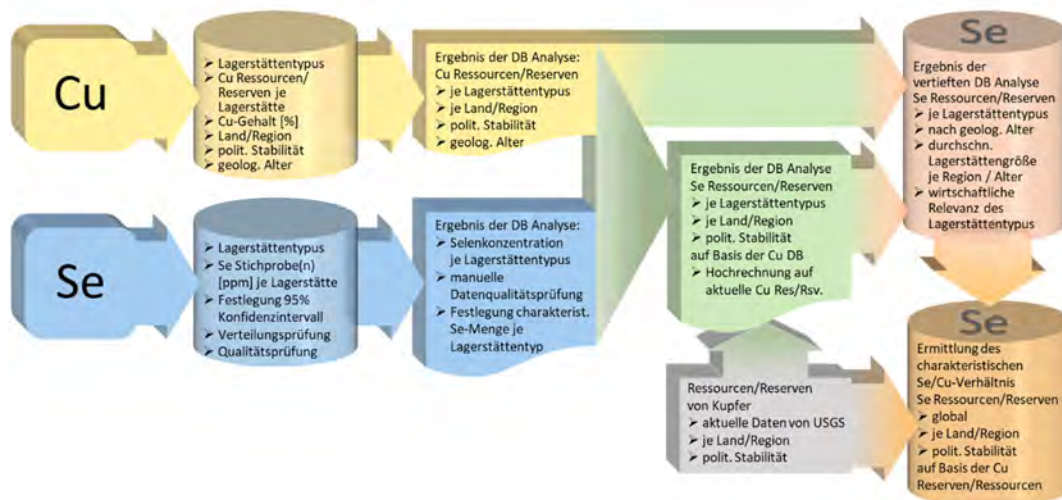


Abb. 2: Schema der Methode zur Abschätzung von Reserven / Ressourcendaten von Begleitelementen aus Kupferlagerstätten²⁷ Abkürzungen: DB = Datenbank | Se = Selen | Cu = Kupfer.

27 eigene Darstellung

USGS publizierten weltweiten Ressourcen/Reserven kommen. Weber²⁸ recherchierte anhand verschiedener Datenquellen die Vorräte der unterschiedlichen Kupferlagerstätten. Oft waren für die Datenerhebung Geschäftsberichte der Bergbaubetreiber eine gute Ausgangsbasis. In einer relationalen Datenbank sind je Kupferlagerstätte die Mengen an Kupferressourcen und –reserven sowie der durchschnittliche Kupfergehalt abgelegt. An zusätzlichen Informationen sind je Lagerstätte der geologische Typ, das Land und damit die politische Stabilität dieser Rohstoffquelle erfasst. Aus dieser Datenbank lassen sich, wie später gezeigt wird, unterschiedliche Auswertungen durchführen.

Als nächsten Schritt für die hier vorgeschlagene Methode (Abb. 2) ist es nötig, jedem Kupferlagerstättentypus eine charakteristische Selenkonzentration zuzuordnen. Dafür ist es entscheidend, ausreichende Selenmessergebnisse je Wirtslagerstättentypus zu kennen. Da Selen nicht nur ein wirtschaftlich erwünschter Rohstoff ist,²⁹ sind die publizierten Daten bezogen auf einzelne Lagerstätten sehr dürftig. Diese Tatsache war für den Autor durchaus überraschend und ist eine wesentliche Erkenntnis dieses Methodenplans. Es ist besonders bemerkenswert, dass aus schon länger zurückliegenden Studien und wissenschaftlichen Artikeln oft mehr an Daten verfügbar sind als aus wissenschaftlichen Quellen der letzten ein bis zwei Jahrzehnte. Die möglichen Ursachen dieses Datenmangels werden in dieser Arbeit eingehend analysiert. Mit dem entsprechenden Aufwand konnten dennoch ausreichend Stichproben für die relevanten Kupferwirtslagerstätten gesammelt und in einer relationalen Datenbank strukturiert gespeichert werden.

Diese Stichprobenwerte wurden geostatistisch eingehend untersucht und ein charakteristischer Wert („Normkonzentration“) für die Selenkonzentration je Kupferlagerstättentypus ermittelt. Bei diesem Schritt ist es für die Qualität der resultierenden Selenkonzentration entscheidend, die Stichprobenwerte einzeln exakt zu bewerten. Die Erfahrung zeigt, dass es Ausreißer insbesondere nach oben, d. h. mit sehr hohen Selenkonzentrationen gibt, obwohl nur geprüfte und veröffentlichte Daten für die Analyse miteinbezogen wurden. Ursachen hierfür können schlicht Probenentnahmen an einer Stelle mit zufällig untypisch hoher Selenkonzentration sein oder Mess- bzw. Rechenfehler der Datenquelle.

Es liegt die Vermutung nahe, dass die tatsächlichen Ressourcen/Reserven von Selen größer sind als von USGS publiziert, da die Ermittlung auf bekannt gemachten Selenmengen beruht und nicht die grundsätzliche Verfügbarkeit von Selen als Begleitelement praktisch jeder Kupferlagerstätte berücksichtigt. Gleichzeitig muss dem Grundgedanken der „kaufmännischen Vorsicht“ auch für die Ermittlung der Rohstoffmengen gefolgt werden, um eine Überschätzung der Ressourcen/Reserven zu vermeiden.

Zur Sicherung dieser Datenqualität wurde die stochastische Verteilung der Stichproben je Lagerstättentyp analysiert und auf dieser Basis die weiteren statistischen Analysen vorgenommen.

28 [WEBE2020]

29 Die Umweltauswirkungen von Selen sind in späteren Kapiteln dieser Arbeit ausgeführt.

Das Konfidenzintervall wurde mit 95% sehr anspruchsvoll festgesetzt. Es kann vorweggenommen werden, dass die Selenkonzentrationen logarithmisch-normalverteilt sind, wie später in dieser Arbeit (Kap. 6) bewiesen werden wird. Ausreißer wurden einzeln beurteilt und getrimmt. Da diese fast ausschließlich auf der rechten Seite zu finden waren, also untypisch große Selenkonzentrationen, kann ein Überschätzen der durchschnittlichen Selenmenge je Lagerstättentyp bereits methodisch ausgeschlossen werden. Dem Gedanken der „kaufmännischen Vorsicht“ konsequent folgend, wurden die charakteristischen Selenkonzentrationen je Lagerstättentyp in einem manuellen Schritt festgelegt und gerundet in ppm ausgewiesen.

Die ermittelten Normkonzentrationen von Selen je Lagerstättentyp wurden mit den Ressourcen/Reserven der Kupferlagerstätten der oben erwähnten Kupferdatenbank des gleichen Lagerstättentyps verschnitten. Die weltweit verfügbaren Reserven/Ressourcen von Kupfer sind in den Veröffentlichungen von USGS und ICSG periodisch ausgewiesen und naturgemäß umfassender (größer) als die kumulierten Reserven/Ressourcen in der Datenbank, die jedoch repräsentative Daten je Lagerstättentyp aufweist. Es wurde in einem weiteren Schritt je Lagerstättentyp die Reserven/Ressourcen von Selen auf die Reserven/Ressourcen von Kupfer gemäß den Veröffentlichungen von USGS und ICSG hochgerechnet. In diesem Zusammenhang wurde auch das durchschnittliche Verhältnis von Kupfer-Ressourcen und –Reserven ermittelt und in das Modell integriert.

Schon in den 1970er Jahren versuchte USGS, ein Verhältnis von identifizierten Kupferressourcen zur Selenkonzentration anzugeben. Das damals abgeschätzte Verhältnis ist unter Berücksichtigung heutiger Technologien wesentlich besser abschätzbar und nutzbar (für Details siehe Kap. 9.2.1, S.260). Dem aus der Geologie gegebenen Cu/Se-Verhältnis ist der technologische Aufbereitungsprozess von Selen nachgelagert. Der wirtschaftliche Fokus in der Nutzung der Wirtslagerstätte liegt auf dem Hauptelement (hier Kupfer). Selen wird wirtschaftlich immer als Nebenmetall bei der Kupfererzeugung gewonnen. Dieser Priorisierung folgt ein notwendiger prozessbedingter Abschlag für das Nebenelement Selen und ein Abschlag für den technologischen Aufbereitungsprozess. Aus diesen Abschlägen folgt ein technisch nutzbarer Anteil der Selenkonzentration, ein praktisch nutzbares Se/Cu-Verhältnis, das ebenfalls in oben genannten Kapitel 9.2.1 (S.260) und Kapitel 9.2.2 (S.264) abgeleitet wird. Mit diesem Verhältniswert kann von den bekannten Reserve- und Ressourcendaten von wirtschaftlich relevanten Kupferlagerstätten auf die Selenreserven und –ressourcen mit hoher Robustheit geschlossen werden.

Das wirtschaftliche, rohstoffpolitische und strategische Interesse liegt im Besonderen an der Kenntnis des Ursprungslandes eines Rohstoffs, insbesondere, wenn ein Land oder eine Region über eine überdurchschnittliche Menge an Ressourcen/Reserven verfügt. Die Ressourcen/Reserven von Kupfer werden regelmäßig mit großer Genauigkeit publiziert und für die Länder mit größeren Vorräten einzeln ausgewiesen. Durch das in dieser präsentierten Methode ermittelte Verhältnis von Se zu Cu wird die Möglichkeit gegeben, auch zukünftig die direkte Ermittlung der

Ressourcen/Reserven von Selen aus den (jeweils aktuellen) Kupfervorratsdaten zu berechnen. Die Ressourcen/Reserven von Selen lassen sich mit diesem Modell Ländern und Regionen zuordnen und die Versorgungssicherheit nach der politischen Stabilität des jeweiligen Herkunftslandes ermitteln.

Weitere Analysen, wie die durchschnittliche Größe einer „Selenlagerstätte“ (gemeint ist die Selenmenge in einer Kupferlagerstätte) und damit die Wirtschaftlichkeit der Separation und Aufbereitung und das geologische Alter können durch diese hier vorgeschlagene Methode für das Nebenmetall ebenfalls abgeschätzt werden.

Es wurde untersucht, inwieweit das geologische Alter signifikante Selenkonzentrationen sichtbar macht und ob daraus Rückschlüsse ableitbar sind. Der geografische Ort könnte darüber hinaus Anhaltspunkte geben, beispielsweise ob sich in speziellen geologischen Strukturen - wie Küstenstreifen, Gebirgszügen oder Kontinenten – Korrelationen zu Selenkonzentrationen ableiten lassen.

1.5. Herausforderungen der Datenerhebung von Selen

In dieser Arbeit steht die industrielle Nutzung von Selen im Fokus. Selen ist ein Element, das zwar breit industriell genutzt wird, aber kein Primärprodukt einer Erzlagerstätte ist. Analysen und Angaben über Selenvorkommen sind daher rar. Weitere Einschränkungen der Datenverfügbarkeit resultieren aus den im Kapitel 5.9.5 (S.202) zusammengestellten Bedenken von den verantwortlichen Unternehmen.

Fitzpatrick (2008)³⁰ fasst zusammen, dass die Analyse von Selenkonzentrationen ein Gebiet von historischem Interesse ist. Selen wurde erstmals in Sulfiderzen im 19. Jahrhundert entdeckt.³¹ Seit damals ist die Bestimmung der Selenkonzentration eine Herausforderung geblieben. Die frühen arbeitsintensiven Methoden der Trennung, Isolierung und gravimetrischen Bestimmung verlagerten sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf die indirekte fluorimeterische Messung mit allmählichen Verbesserungen der analytischen Leistung.^{32,33} Obwohl instrumentelle Methoden in den 1950er Jahren zunehmend zur bevorzugten Messmethode für die meisten Elemente wurden, basierte die Selenbestimmung noch in den 1980er Jahren auf der klassischen fluorimetrischen Technik.³⁴ Die analytische Schwierigkeit resultiert aus geringen Konzentrationen und Interferenzen, die während der Messung auf Selen wirken. Abhängig von der Analysetechnik und der Probenmatrix können in verschiedenen Phasen der Probenvorbereitung und -messung Störungen auftreten.

Des Weiteren erläutert Fitzpatrick (2008),³⁵ führt beispielsweise die Messung von Selen durch Atomabsorptionsspektrometrie zu einer Überlappung von Peaks im Absorptionsspektrum von Selen mit denen anderer üblicher Elemente wie Fe und P (als Phosphat). Interferenzen wie diese, haben zur Entwicklung von Hydridzerzeugungstechniken geführt (Dédina und Tsalev 1995).³⁶ Ein großer Teil der Literatur zur Selenbestimmung hat sich daher auf bestimmte Anforderungen an die Vorbereitung spezifischer Proben konzentriert (Dédina und Tsalev 1995). Die Bestimmung des Selengehalts in geochemischen Proben, insbesondere Sulfiden, bleibt weiterhin eine Herausforderung.

Die Komplexität der Messverfahren zur Bestimmung des Selen-Gehaltes erklärt nur zu einem Teil die Tatsache, dass sich in der Literatur und Geschäftsberichten nur wenig Angaben über das

30 Fitzpatrick (2008): [FITZ2008], p.4f

31 Berzelius, J. J. (1818). "Des Recherches sur un nouveau corps minéral, trouvé dans le soufre fabriqué à Fahlun." Ann. Chem. Phys. Series 2: 9: 160-180,225-267, 337-365. (French).

32 Clennell, J. E. (1906). "Assay of bullion containing selenium." Eng. Min. J. 82: 1057-1059.

33 Franke, K. W., R. Burris and R. S. Hutton (1936). "A new colorimetric procedure adapted to selenium determination." Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 8: 435-436.

34 Association of Official Analytical Chemists (1990). Selenium in plants. Official Methods of Analysis. Arlington, VA, Association of Official Analytical Chemists.

35 Fitzpatrick (2008): [FITZ2008], p.2f

36 Dédina, J. and D. L. Tsalev (1995). Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry.

Selen-Vorkommen von Lagerstätten finden. Selen wird industriell immer als Nebenelement mit-
abgebaut, aber das primäre wirtschaftliche Interesse liegt auf dem oder den Hauptmetallen. In den
meisten Fällen wird Selen gemeinsam mit der Kupferproduktion gewonnen. In weiterer Folge
wird in dieser Arbeit auf die Selen Konzentrationen der unterschiedlichen Kupferlagerstätten ein-
gegangen und den Lagerstättentypologien charakteristische Selen-Konzentrationen zugeordnet.

Ein weiterer Aspekt, warum Selen keinen oder keinen prominenten Platz in Geschäftsberich-
ten und Publikationen einnimmt, ist mutmaßlich in der umweltgefährdeten Wirkung von Selen
zu suchen.³⁷ In Anbetracht der Anforderungen der Politik, Gesetzgebung und Gesellschaft auf
eine möglichst umweltschonenden Bergbau- und Aufbereitungsbetrieb und ferner weil das Selbst-
verständnis der meisten Unternehmungen auf Nachhaltigkeit ausgerichtet ist, ist diese Selbstbe-
schränkung der Offenlegung nachvollziehbar. Nach einer Umfrage im Jahr 2006 haben von 56
weltweit agierenden Kupferaufbereitern 52 bestätigt, dass Selen Bestandteil des Anodenschlam-
mes ist, jedoch nur die Hälfte des Selens separiert und gewonnen wird.³⁸ Für die wirtschaftliche,
geologische und strategische Analyse des Rohstoffvorkommens ist Tatsache der nicht verlässli-
chen Datenlage bedauerlich.

Geschäftsberichte der Kupferproduzenten geben sehr guten Aufschluss neben dem Haupt-
produkt Kupfer über die Fördermengen von Gold, Silber und Molybdän. Beharrlich wird Selen
praktisch kaum erwähnt. Wenn Selen genannt wird, dann meist ohne Mengenangaben. Durch
sehr aufwendige Recherchen konnten eine Reihe einzelner Selenwerte als „Nebenprodukt“ von
manchen Publikationen aufgestöbert werden. Früher war Selen vor allem in der Sowjetunion ein
wichtiger Rohstoff. Es ist daher nicht verwunderlich, dass insbesondere in historischen Analysen
und hier überwiegend diesen geografischen Raum betreffend, Selenangaben, die Lagerstätten zu-
geordnet werden konnten, für diese Arbeit übernommen werden konnten.

Fitzpatrick (2008)³⁹ befasste sich mit dem Verhältnis von Selen zu Schwefel in sulfidischen
Erzlagerstätten und ermittelte daher Selenkonzentrationen in unterschiedlichen Erzen. Nach di-
rekter Kontaktaufnahme war Alexander Fitzpatrick behilflich und stellte die von ihm ermittelten
Selendaten dem Autor dieser Arbeit zur Verfügung, da sich diese nur in konsolidierter Form in
der zitierten Publikation veröffentlicht wurden. Die vom Autor ermittelten Selenstichproben
konnten so durch diese Daten ergänzt werden.

Auf der Hand lag der Versuch, Selenkonzentrationen durch direkte Ansprache von Firmen,
Bergbaubetrieben oder Organisationen zu erhalten. Da der Autor durchaus gute Kenntnisse über
die Rohstoffindustrie hat und auch Kontakte zu Verbänden unterhält, wurden Versuche in diese
Richtung unternommen. Leider blieb dieser Weg erfolglos, da die Unternehmen nicht nur die
Selenwerte nicht publizieren, sondern auch nicht aktiv erheben. Ausgenommen davon sind jene

37 siehe auch Kapitel 5.9.5 (S.233).

38 [KAVL2013], p.18.

39 Fitzpatrick (2008): [FITZ2008], p.2f

Betriebe, die Selen als Nebenprodukt verkaufen und deren Daten daher ohnehin in den Geschäftsberichten transparent verfügbar sind und daher bereits in die Datensammlung dieser Arbeit eingeflossen sind. Jene Organisationen, die sich hauptsächlich mit der Weltkupferproduktion befassen, wie beispielsweise ICSG⁴⁰ oder IWCC⁴¹, führen keine Statistiken über Selen.

Es konnten schließlich 258 statistisch auswertbare Datensätze aus Kupferlagerstätten zusammengestellt werden, die – weitestgehend – einem Kupferlagerstättentyp zugeordnet werden konnten. Darüber hinaus wurde die geografische Position (geografische Länge und Breite) zugeordnet sowie das Land und die Region und das geologische Alter der Lagerstätte, soweit bekannt. Wünschenswert wäre eine größere Anzahl an Messwerten, um die statistischen Verfahren mit höherer Genauigkeit durchführen zu können, doch dieser Wunsch blieb trotz großer Mühe aus oben genannten Gründen unerfüllt. Die Datenqualität ist jedoch ausreichend, um (a) die Durchführbarkeit der vorgeschlagen Methode zur Abschätzung von Reserven- und Ressourcendaten von Begleitelementen aus Kupferlagerstätten am Beispiel von Selen zu zeigen und (b) die Thesen (Kap. 1.3) zu überprüfen. Mittels der angewendeten statistischen Verfahren konnte (c) die charakteristische Selenkonzentration für fast jeden Lagerstättentypus und jedenfalls für alle wirtschaftlich relevanten Vererzungen mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Die gut verfügbaren Daten des Hauptrohstoffs Kupfer konnten genutzt werden, um Zusammenhänge zwischen Ressourcen- und Reserve-Mengen zu errechnen und die Toleranzen aus der Selenermittlung (d) für die Abschätzung der Ressourcen und Reserven von Selen auf Länderbasis zu kompensieren.

40 The International Copper Study Group (ICSG) is an intergovernmental organization of copper producing and using countries that serves to increase copper market transparency and promote international discussions and cooperation on issues related to copper. (www.icsg.org).

41 The IWCC works for and with the member companies across the world to support the copper and copper alloy fabricating industry. They do this by holding international events and meetings, producing relevant and accurate statistics and data, and representing the industry in external bodies. (www.coppercouncil.org).

2. Ressourcenmanagement

2.1. Vom Mangel an Ressourcen

In der Geschichte der Menschheit gab es wiederholt Phasen mit knappen natürlichen Ressourcen. „So war beispielsweise Salz um 650 – 475 v. Chr. ein kostbares Gut, dass damals im Untertagebau gewonnen werden musste. Mit Verbesserungen der Gewinnungstechnologie und schließlich durch industrielle Fertigung verlor es an Knappheit. Im 18. Jahrhundert in England hingegen musste Eisenerz mit Holzkohle geschmolzen werden, was eine bedrohliche Rodung der Wälder zur Folge hatte. Die verringerten Waldbestände stellten damals die maßgebliche Grenze wirtschaftlichen Wachstums dar. Erst die Erfindung des Kokshochofens von Abraham Darby 1709 ermöglichte eine weitere Ausdehnung der Eisenproduktion bei gleichzeitiger Minderung der Knappheit des Waldbestandes. 1865 prognostiziert der englische Wirtschaftswissenschaftler William Stanley Jevons in seinem Buch mit dem Titel ‚The Coal Question‘, eine rapide Erschöpfung der Kohleressourcen. Ursache dieser Verknappungsthese der Kohle, war die Erfindung der Dampfmaschine, welche mit einer immensen Zunahme der Nachfrage einherging. Heute stellt sich die Frage, ob die zur Neige gehenden Ölvorräte eine langfristige Wachstumsschranke errichten.“⁴²

Die Wirtschaftsgeschichte ist gesät von Zeitspannen extremer Ressourcenknappheit, die auch regelmäßig zu Hungersnöten und kriegerischen Auseinandersetzungen geführt haben. Der Autor der vorliegenden Arbeit hat 2013 in einem Artikel folgenden Befund über der Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe gegeben: „Seit Beginn der Siebzigerjahre des vorigen Jahrhunderts wird sowohl in wissenschaftlichen Kreisen wie auch in der Öffentlichkeit darüber diskutiert, ob Ressourcen und Rohstoffe in wenigen Jahren oder Jahrzehnten erschöpft sein werden und damit das Ende des menschlichen Daseins in der uns bekannten Form bedeuten würde. Dieser Sorge liegt folgende Überlegung zu Grunde. Auf unserem Planeten steht uns ein bestimmter Vorrat an natürlichen Ressourcen zur Verfügung. Dieser wird von der Industriegesellschaft stetig verzehrt. Es sei daher nur eine Frage der Zeit, bis alle Vorräte erschöpft sind. Dies hätte unweigerlich den Kollaps der Wirtschaft, globaler Volkswirtschaften und der uns vertrauten Gesellschaftsformen zufolge. Diese pessimistischen Prognosen veröffentlichte 1972 Dennis Meadows in seiner Studie zur Zukunft der Weltwirtschaft an den *Club of Rome*⁴³. Dieser Bericht war genährt durch die unmittelbare Erfahrung der breiten Auswirkung der ersten Ölpreiskrise.“⁴⁴

42 [HOHN2010], S.25.

43 [MEDO1972], Die Grenzen des Wachstums (engl. Originaltitel: *The Limits to Growth*); „Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit.“ Aus dem Amerikanischen von Hans-Dieter Heck. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1972

44 [STIF2013], p.396

Als *Ölkrise* bzw. genauer *Ölpreiskrise* bezeichnet man Phasen starker Ölpreisanstiege, die gravierende gesamtwirtschaftliche Auswirkungen haben. Im engeren Sinne werden nur die starken Erhöhungen des Rohölpreises 1973 und 1979/80 als Ölkrise bezeichnet, da beide in den Industrieländern deutliche Rezessionen auslösten. Jedoch waren bereits die realen Preissteigerungen und Nachfragesprünge zu Anfang der modernen Ölförderung bis 1900 mit den neuzeitlichen Ölkrisen vergleichbar. Anfang der 1950er Jahre führten Krisen wie der Putsch im Iran und am Suez zwar nicht zu einem Ölpreisschock in Europa, aber beispielsweise zur breiten Umstellung der französischen Stromversorgung auf Kernenergie und zu einer intensiven Erdölprospektion in der damaligen DDR.

In unterschiedlichen Szenarien wurde für den Bericht an den Club of Rome mittels Computersimulation von Donella und Dennis Meadows und dessen Mitarbeitern Jorgen Randers und Jay W. Forrester am Institut für Systemdynamik eine Systemanalyse mit einem Rechenmodell durchgeführt, das an sich die hohe Vernetzung globaler Prozesse berücksichtigt. Es wurden Modelle mit unterschiedlich hoch angesetzten Rohstoffvorräten der Erde berechnet und dabei unterschiedliche Effizienz von landwirtschaftlicher Produktion, Geburtenkontrolle oder Umweltschutz angesetzt.⁴⁵ Das Simulationsergebnis der meisten Szenarien ergab ein weitergehendes Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum bis zu einer ziemlich jähen Umkehr der Tendenz um das Jahr 2030. Nur sofortige, durchgreifende Maßnahmen zum Umweltschutz und zur Geburtenkontrolle würden dieses Systemverhalten ändern.⁴⁶

Die angewendete wissenschaftliche Methode wurde jedoch unmittelbar nach dem Erscheinen der Studie als unzureichend kritisiert. Als Hauptkritikpunkt kristallisierte sich die Nichtberücksichtigung von Marktreaktionen durch die angenommene Ressourcenverknappung heraus. Besonders wurden die Rohstoffprognosen angezweifelt und „die Ausblendung technischen Fortschritts in einer reinen Trendextrapolation“ kritisiert⁴⁷. In dem Computermodell wurden uneinheitliche Wachstumsfunktionen verwendet. Während beispielsweise Bevölkerung, Kapital und Umweltverschmutzung exponentiell wuchsen, wurde bei den entsprechenden Technologien zur besseren Ressourcennutzung und verringerter Umweltverschmutzung – wenn überhaupt – nur lineares Wachstum angenommen.⁴⁸ In dem Zusammenhang wurde Meadows, mit Referenz auf den Engländer Thomas Robert Malthus (1766–1834), auch *neomalthusianisches* Vorgehen unterstellt. Malthus stellte die These auf, dass die Bevölkerungszahl exponentiell wachse, die Nahrungsmittelproduktion aber nur linear. Das habe sinkende Reallöhne (bis unter das Existenzminimum) sowie Armut, Hunger, Seuchen und dadurch schrumpfende Bevölkerung zur Folge, bis der Zyklus von neuem beginne. Malthus versuchte mit dieser Hypothese die sozialen Unruhen in den englischen Großstädten seiner Zeit zu erklären und glaubte nicht an die Problemlösungsfähigkeit

45 [MEDO1972]

46 <http://www.clubofrome.at/about/limitstogrowth1.html> (31.10.2011)

47 Julian L. Simon: *The Ultimate Resource II*. 1996, ISBN 0-691-00381-5

48 ebd.

der Marktwirtschaft. Seine These gilt heute durch den breiten sozialen Wohlstand in den marktwirtschaftlich organisierten Volkswirtschaften als empirisch widerlegt.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Marktwirtschaft für die Bewältigung von Angebotsverknappungen ein außerordentlich leistungsfähiges System ist. Steigende Ressourcenpreise führen in der Regel zu Investitionen und damit Innovationen und umgekehrt. Der technische Fortschritt kann zur verbesserten Prospektion in bereits bekannten oder unbekanntem Lagerstätten führen, zu höherer Effizienz im Umgang mit Ressourcen motivieren oder auch Substitutionsprozesse auslösen.

Um realitätsnahe, langfristige Prognosen erstellen zu können, bedarf es erweiterter Wachstumsmodelle. Als einer der ersten entwickelte Joseph Stiglitz 1974 ein Systemmodell, das auch den Umgang mit nicht nachwachsenden Ressourcen berücksichtigt.⁴⁹ Scholl und Semmler erweiterten 2000 das Modell zu einem Simulationssystem für die Betrachtung von nachhaltigem Wachstum bei endlichen Ressourcen.⁵⁰ Mit diesen Modellen kann gezeigt werden, dass ein langfristiges Wachstum trotz endlicher, nicht nachwachsender Ressourcen möglich ist. Die postulierten Schreckensszenarien eines globalen Kollapses sind daher unter Nutzung der Marktmechanismen und mit Vertrauen auf die Innovationskraft und verantwortungsvollen, nachhaltigen wirtschaften vermeidbar.

Die bedeutendste Frage bei der Nutzung erschöpfbarer Bestandsressourcen ist, wie lange die Vorräte in die Zukunft reichen. Die Geologie bezeichnet Vorräte je nach Kenntnisstand und wirtschaftlicher und technischer Abbaumöglichkeit als Ressourcen oder Reserven. Auch wenn die oben zitierte Ölpreiskrise bereits ein halbes Jahrhundert zurückliegt, hat sich in der Gesellschaft die Vorstellung von der Endlichkeit von Ressourcen eingebrannt. Der zeitliche Zusammenfall mit dem Erscheinen des Berichtes des Club of Rome ist folglich kein Zufall und demgemäß würden wir bereits heute ohne zahlreiche erschöpfbare natürliche Ressourcen auskommen müssen.

Die Prognose hat sich aus zwei Gründen nicht bewahrheitet. „Für viele Rohstoffe stehen alternative Produkte als Substitute zur Verfügung. Die steigende Nachfrage, nach beispielsweise Öl, bewirkt einen Anstieg dessen Preises, was die wirtschaftliche Nutzung der Substitute erst ermöglicht. [...] Der zweite Grund liegt in der Variabilität der Reserven der Ressource begründet. Preissteigerungen bei erschöpfbaren Ressourcen lösen nicht nur Substitutionsprozesse aus, sondern erhöhen ebenso die Explorationstätigkeit und sind Antriebskraft für Investitionen in technologischen Fortschritt. Explorationen decken neue, zuvor unbekannte Ressourcenvorkommen auf.

49 Joseph Stiglitz, Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. The Review of Economic Studies Vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources (1974), pp. 123-137, Published by Oxford University Press.

50 Almuth Schollz and Willi Semmler, Sustainable Economic Growth and Exhaustible Resources: A Model and Estimation for the U.S., 2000

Der technologische Fortschritt ermöglicht einerseits die Förderung zuvor unerreichbarer bekannter Vorkommen und erhöht andererseits die Effizienz der Explorationen. Somit wird der Bestand an Reserven der Ressource insgesamt ausgeweitet.⁵¹

Gleichzeitig ist es notwendig festzustellen, dass die Förderung nicht nachwachsender Rohstoffe noch nie in der Menschheitsgeschichte solche Ausmaße angenommen hat. Insbesondere in den letzten drei bis vier Jahrzehnten hat sich die industrielle Produktion beschleunigt und folglich wuchs auch der Wohlstand der meisten Menschen auf der Erde. Die Nutzung der Rohstoffmengen in der Vergangenheit ist nicht mit der dynamischen Nachfrage von heute und der steigenden Prognosen vergleichbar. Durch die veränderten Mengenverhältnisse und Rahmenbedingungen kann nicht geschlossen werden, dass allein der Markt und Technologiesprünge Ressourcenengpässe in Zukunft zu verhindern vermögen. Vor allem Metalle lassen sich gut recyceln und daher wiederverwenden. Beispielsweise sind circa 85% des im Laufe der Menschheitsgeschichte abgebauten und genutzten Kupfers nach wie vor in Verwendung.⁵² Für die Sicherstellung der Ressourcenverfügbarkeit in der Zukunft es ist von Bedeutung, dass nachhaltige Konzepte Berücksichtigung finden und insbesondere der Rohstoffkreislauf möglichst geschlossen gehalten werden kann. Dabei ist nicht nur auf die Einsatzmenge des mineralischen Rohstoffs selbst abzustellen, sondern insbesondere die nötige Energiemenge für seine Herstellung. Im Regelfall ist die primäre Rohstoffgewinnung sehr energieintensiv und daher mit den derzeit zur Verfügung stehenden Energieformen mit großen CO₂ Emissionen verbunden. Die sekundäre Wiederaufbereitung des Rohstoffs, insbesondere von Metallen, benötigt nur einen kleinen Teil der für die Primärerzeugung nötigen Energiemenge. Geschlossene Rohstoffkreisläufe schonen nicht nur die (primären) Rohstofflagerstätten, sondern Reduzieren den Energieeinsatz und somit klimaschädliche Emissionen.

Gordon et al.⁵³ führen aus, dass die Entdeckung neuer Kupfererzlagerstätten nicht mit der Menge des gewonnenen Erzes Schritt gehalten habe, um den Mehrbedarf an Kupfer und die Verluste bei der Entsorgung von Altprodukten auszugleichen. Wenn sich die historischen Trends der Entdeckung und Gewinnung fortsetzen, impliziert das eine eventuelle Knappheit. Für diese Perspektive wird das Szenario vorausgesetzt, dass jeder Erdenbewohner ein Wohlstandsniveau mit der gleichen Pro-Kopf-Menge an Kupfer genießt, wie es sich derzeit nur die Einwohner wohlhabender Nationen leisten können. Für diesen Fall wird geschlussfolgert, dass der Preis für Neukupfer ansteigen und die Knappheit widerspiegeln würde.

51 [HOHN2010], S.9.

52 [GORD2007], p.26.

53 [GORD2007], p.27

Die technische und ökonomische Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen unterliegt komplexen, nichtlinearen und dynamischen Zusammenhängen, die in einfachen Modellen nicht annähernd aussagekräftig abgebildet werden können. Es ist in der Tat sehr schwierig, die zukünftigen Auswirkungen durch den technologischen Fortschritt, noch nicht erkundete geologische Gegebenheiten, die politische Stabilität der Förderländer, die Nachfrage und Preiselastizität des Rohstoffes, allfällige Substitutionsmöglichkeiten sowie die globale Wettbewerbssituation zu prognostizieren und in Modellen zuverlässig zu verknüpfen. Die nachfolgende Darstellung (Abb. 3) soll illustrieren, dass die aktuell bekannten und genutzten Ressourcen/Reserven nur einen sehr kleinen Teil der in der Erdkruste verfügbaren Rohstoffmengen darstellen und daher eine begrenzte Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen oft nicht geologischer Natur ist.

Die vorliegende Arbeit möchte einen Beitrag leisten, auf Basis von Fakten und geologischen Daten, die Verfügbarkeit am Beispiel von Selen transparent zu machen. Absolute Wachstumsgrenzen sind genauso wenig hilfreich, wie unbekümmerte Rohstoffnutzung oder wie manchmal zu lesen ist „Rohstoffausbeutung“. Durch Wissen, Erkenntnis und Kreativität des Menschen, die zu Innovationen auf allen Gebieten führen, können scheinbare Wachstumsgrenzen gedehnt und oft durchbrochen werden und sohin die Nutzung auch nicht nachwachsender natürlicher Ressourcen mit langfristigem Wachstum vereinbar gemacht werden.

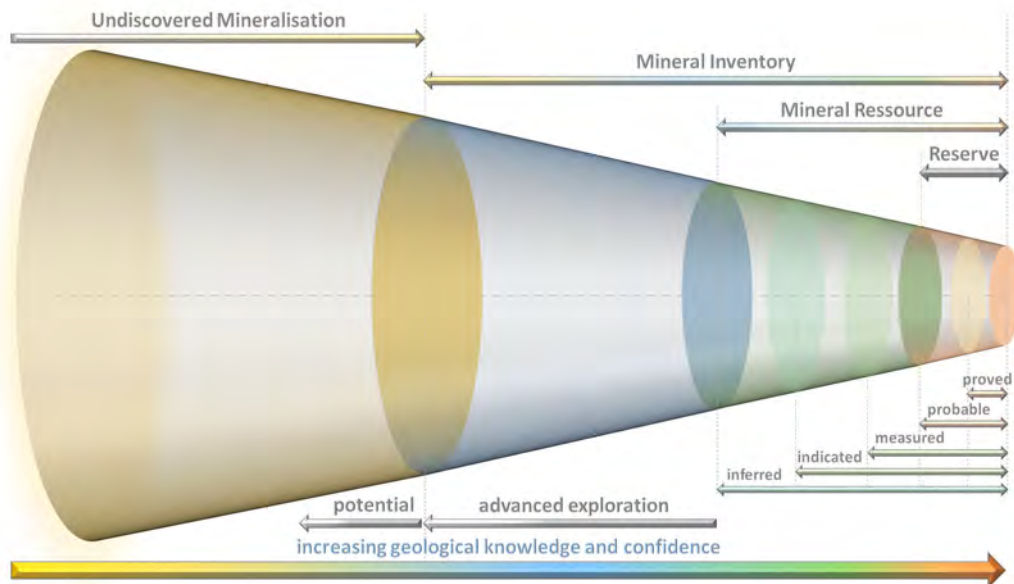


Abb. 3: Knowledge about mineral resources⁵⁴

⁵⁴ eigene Darstellung

2.2. Vom Rohstoffvorkommen zur Lagerstätte

Die Konzentrationen der weltweiten geologischen Verteilung der Vorkommen von mineralischen Rohstoffen ist sehr unterschiedlich. Beispielsweise ist die EU bei den primären Metallrohstoffen vollkommen von Importen abhängig.⁵⁵ Durch das Auseinanderfallen von Ländern mit natürlichen Rohstoffvorkommen und den hauptverbrauchenden Nationen, ist die Kenntnis der tatsächlichen Lebensdauer von mineralischen Rohstoffen auch volkswirtschaftlich und politisch essenziell.

Mineralische Rohstoffe sind in Lagerstätten angereichert. Eine **Lagerstätte** ist eine überdurchschnittliche Anreicherung von Elementverbindungen in der Erdkruste, wobei der Clarke-Wert um ein Mehrfaches überschritten wird.⁵⁶ Der *Clarke-Wert* bezeichnet in der Geochemie den mittleren Massenanteil eines chemischen Elementes an der Zusammensetzung der Erdkruste bis in eine Tiefe von 15 Kilometern. Die Angaben werden in Gramm pro Tonne (1 Clarke = 1 g/t) oder in Prozent gemacht. Benannt wurde die Größe nach dem Chemiker und Geologen Frank Wigglesworth Clarke (1847-1931). Die Anreicherung von mineralischen Rohstoffen erfolgt nicht zufällig, sondern ist durch natürliche chemische und physikalische Vorgänge bestimmt. Die Clarke-Werte zeigen, dass die mengenmäßig häufigsten Elemente der Erdkruste Silicate (Aluminium, Eisen, Kalzium, Natrium, Kalium und Magnesium) sind und dass technisch und industriell wichtige Elemente wie Zink, Zinn, Blei, Nickel u.a. im Durchschnitt selten in der Erdkruste vorkommen (vgl. Tabelle 1, S.28). Häufigstes Element ist der Sauerstoff mit einem Anteil von 46,6%, gefolgt von Silizium mit 27,7%, an dritter Stelle steht Aluminium mit 8,1%. Die Anreicherungsfaktoren geben an, bei welcher Konzentration eine bauwürdige Lagerstätte vorliegt.

Für diese Arbeit sind die Elemente Kupfer und Selen von besonderem Interesse. **Kupfer** hat ein durchschnittliches Vorkommen von 0,005% oder 50ppm. **Selen** ist recht selten und mit lediglich 0,05ppm am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Damit besitzt das Halbmetall eine Häufigkeit in der Größenordnung von Silber und Indium.⁵⁷

⁵⁵ [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland; www.bgr.bund.de] (29.10.2010)

⁵⁶ aus Weber, Leopold: Vorlesung Angewandte- und Umweltgeologie II, Universität Wien, 2011

⁵⁷ [FRAU2009], S.317.

	Durchschnittliche Gehalte in der Erdkruste [%]	Durchschnittliche Mindestgehalte für den Abbau [%]	Anreicherungs-fakt
Aluminium	8	30	3,75
Eisen	5	25	5
Kupfer	0,005	0,4	80
Nickel	0,007	0,5	71
Zink	0,007	4	571
Mangan	0,09	35	389
Zinn	0,0002	0,5	2500
Chrom	0,01	30	3000
Blei	0,001	4	4000
Gold	0,0000004	0,0001	250

Tabelle 1: Durchschnittsgehalte (Clarke-Werte), Mindestgehalte und Anreicherungs-faktoren wichtiger Metalle⁵⁸

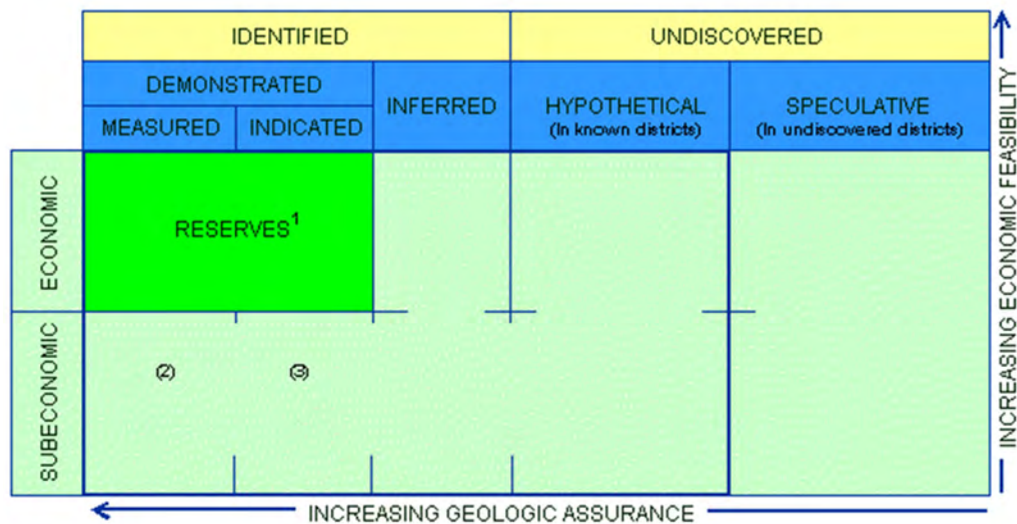


Abb. 4: McKelvey-Diagramm zur Abgrenzung von Reserven und Ressourcen⁵⁹ (Index (1) = Reserven (dunkelgrün); Indizes (2) und (3) = Ressourcen (hellgrün))

58 [EVAN1992], Evans, Anthony M., Erzlagerstättenkunde, Stuttgart, 1992, S.9.
 59 aus: USGS | <https://www.usgs.gov/media/images/mckelvey-diagram> (16.08.2020).

Lagerstätten sind folglich

- durch Prozesse,⁶⁰ die auf naturwissenschaftlichen Gesetzen beruhen (*und damit nicht „zufällig“*), gebildet worden und
- sich der erzführende Gesteinskörper durch eine Vielzahl von geologischen Prozessen gebildet hat und wo
- eine Anreicherung natürlicher Rohstoffe innerhalb der Erdkruste besteht,
 - die für wirtschaftliche oder industrielle Zwecke verwendet werden können,
 - für die begründete Aussichten auf einen wirtschaftlichen Gewinn bestehen und
 - die rechtlich, ökonomisch und technisch machbar abzubauen sind.

Wissenschaftlich unterscheidet man zwischen einer *Lagerstätte (Deposit)*, einem *Vorkommen (Occurrence)* und dem *Auftreten (Showing)*.⁶¹ Eine Lagerstätte kann hinsichtlich ihrer Entstehung (Genese), den Lagerstättenverhältnissen zum Nebengestein und dem Grad der räumlichen Ausdehnung eingeteilt werden.

2.3. Reserven und Ressourcen

In dieser Arbeit werden Vorkommen, die nach dem heutigen Stand der Technik bewertet und wirtschaftlich abbaubar sind, als **Reserven** bezeichnet. Bei **Ressourcen** hingegen handelt es sich um Vorkommen, die zwar nachweislich vorhanden sind, aber gegenwärtig noch nicht wirtschaftlich gefördert werden können oder noch nicht ausreichend beurteilt sind. Die historische Definition im McKelvey-Diagramm ist in Abb. 4 illustriert; die Begriffsverwendung von USGS in Abb. 5. Diese Unterscheidung ist insbesondere in Hinblick auf den technischen Fortschritt im Bergbau nötig, um auch zukünftigen Generationen die Nutzung von Ressourcen zu ermöglichen. Dies kann beispielsweise durch weitblickende Raumordnungsplanung mit Definition von Ressourcensicherungsflächen erfolgen.

⁶⁰ Beispielsweise durch Einwirkungen von Druck, Temperatur, chemische Reaktionen.

⁶¹ Eine Lagerstätte (Deposit) ist ein Mineralvorkommen von ausreichender Größe und Qualität, das unter günstigsten Umständen als wirtschaftlich gewinnbar angesehen werden kann.

Ein Vorkommen (Occurrence) ist eine Konzentration eines Minerals, das als wertvoll angesehen wird oder das von wissenschaftlichem oder technischem Interesse ist.

Das Auftreten (Showing) ist nicht einheitlich definiert; meist wird damit das erste Auftreten (Erkennen) eines Mineralganges (veins) bezeichnet oder auch das Oberflächenvorkommen von Mineralien.

Cumulative Production	Identified Resources			Undiscovered Resources	
	demonstrated		inferred	Probability Range	
	measured	indicated		Hypothetical	Speculative
ECONOMIC	Reserve Base		Inferred Reserve Base		
MARGINALLY ECONOMIC					
SUBECONOMIC					
Other Occurrences	Includes nonconventional and low-grade materials				

Abb. 5: USGS-Klassifikationsschema für mineralische Rohstoffe⁶²

2.4. Rohstoffvorräte und Nachhaltigkeit

Nicht nachwachsende Ressourcen sind endlich und daher irgendwann erschöpft. Der Zeitpunkt, des Eintretens hängt von vielen dynamischen Einflussfaktoren ab. Einflussparameter sind beispielsweise die wirtschaftlich nutzbaren Vorräte, die jährliche Fördermenge, weitere Erschließungen, technologische Innovationen, die Preisentwicklung etc. Entsprechend schwierig sind exakte Prognosen, obwohl diese immer wieder versucht wurden und werden.

Die Hauptakteure für die Bereitstellung von nicht nachwachsenden Ressourcen sind die Bergbauunternehmen. In der Regel besitzen diese Unternehmungen die formalen Rechte und auch das technologische Know-how, um Rohstoffe fördern zu können. Ressourcenbesitzer stehen vor der Alternative, die Rohstoffe zu extrahieren und die Profite am Kapitalmarkt zum Marktzins zu veranlagen oder sie belassen die Ressourcen im Boden.

Der sich aufgrund der Knappheit der Ressource ergebende Preis unterliegt Schwankungen, wobei ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen Preis, Reserven des entsprechenden Wertstoffes, den Substitutionsmöglichkeiten und dem technologischen Fortschritt zu beobachten ist, wie oben bereits ausgeführt wurde. Ressourcen, insbesondere Metalle, die aus Produkten nach Ende ihrer Lebens- bzw. Nutzungsphase zurückgewonnen werden, haben nicht erst seit Einführung der Kreislaufwirtschaft einen festen Stellenwert in der Wirtschaft. Die Stahlproduktion basiert seit Jahrzehnten auf den Einsatz von Schrotten, sowohl im klassischen Hochofenprozess und noch bedeutender beim Einschmelzen in einem Elektrolichtbogenofen (EAF – Electric Arc Furnace). Edlere Metalle wurden seit jeher von der Menschheit gesammelt, beispielsweise Gold(reste). Auch Kupfer hat relativ gesehen einen hohen Marktwert und daher haben auch Kupferschrotte einen Marktpreis und es gibt weltweit ausgefeilte Aufbereitungsprozesse, die aus Kupferschrotten hochreines Kupfer herstellen („Sekundärkupfer“), dass dem des Primärkupfers (also „jungfräulich“ aus dem Bergbau gefördert und aufbereitet) identisch und nicht mehr zu unterscheiden ist.

⁶² aus: [WEBE2013], S.132.

Trotz aller dieser technologisch verfügbaren Einrichtungen ist festzustellen, dass es Verluste entlang der Wertschöpfungskette gibt. Gordon⁶³ bezeichnet die Kupferabfälle, die bei der Erzwinnung, Schmelzen und Aufbereitung des Metalls anfallen, als einen potenziell wichtigen Bestandteil des technologischen Kupferkreislaufs. Da umfassende Aufzeichnungen über Kupferproduktionsabfälle fehlen, versuchte er die Größenordnung dieser Abfälle historisch aufzuarbeiten. Gemeinsam mit Graedel wurden an der Universität Yale eine umfassende Darstellung der anthropogenen Mobilisierung von Kupfer und anderen Metallen in der industriellen Wirtschaft ausgearbeitet. Die zur Jahrtausendwende publizierten Werte zeigen deutlich, dass bis in die späten 1960er Jahre die Hälfte des jemals geförderten Kupfers Verwendung fand. Der enorme Bedarf ist erst in den letzten drei Jahrzehnten des letzten Jahrhunderts immer stärker angewachsen. Im letzten Jahrzehnt des vergangenen Jahrhunderts (1990-1999) wurde ein Viertel des jemals in der Menschheitsgeschichte geförderten Kupfers produziert.⁶⁴ Wie in den folgenden Kapitel noch ausgeführt wird, hat sich dieser Trend im 21. Jahrhundert weiter beschleunigt.

Die Berechnungen von Gordon⁶⁵ am Beispiel der US-amerikanischen Kupferindustrie zeigen hohe Verluste des Metalls im Produktionsprozess. Nach diesen Daten gehen 14% des Kupfers, das im Erz enthalten ist, während des Mahlvorganges und im Hüttenprozess verloren. Diese historischen Abfälle sind heute eine gute Quelle für die Kupfererzeugung. Die Abfälle aus den früheren Aufbereitungsprozessen weisen oft höheren Kupferanteil auf als aktuell viele (porphyrische) Lagerstätten aufbieten können.

Das relativ moderne SXEW-Verfahren⁶⁶ für die Kupferproduktion hat sich bereits als wirtschaftlicher Weg erwiesen, Kupfer aus Rückständen zu gewinnen, die einen etwas höheren Kupfergehalt aufweisen als diejenigen, die normalerweise aus US-amerikanischen Hüttenwerken verbleiben.⁶⁷ Die Daten zeigen, dass in den USA das Verhältnis der Abfälle aus der Neukupferproduktion zu den Abfällen aus entsorgten Altprodukten etwa 0,35 beträgt, in Europa jedoch nur 0,08. Kupfer in Tailings und Schmelzschlacken sind daher eine ungenutzte Ressource und eine potenzielle Umweltgefährdung, die in den USA relativ wichtiger ist als in Europa.⁶⁸

Nicht nur aufgrund der Verluste aus den Produktionsprozessen wird in der Fachwelt die nachhaltig gesicherte Verfügbarkeit diskutiert und in Frage gestellt. Bei dieser Analyse ist es von Interesse wieviel die Menschheit vom Kupfererzvorrat der Erde bereits gefördert hat, wie viel Kupfer aktiv genutzt wird (z.B. in Produkten) und welche Menge des Metalls als Abfall geendet hat oder recycelt worden ist. Die Literatur gibt die Menge an Kupfer, die in den Industrienationen

63 [GORD2002], p.87

64 [GORD2002], p.88

65 [GORD2002], p.101

66 Der Kupferaufbereitungsprozess wird in Kapitel 4.5.1 (S.118) genauer beschrieben.

67 [GORD2002], p.103

68 ebd.

im Einsatz ist, recht übereinstimmend mit circa 200 kg pro Person an,⁶⁹ jedoch mit dem Hinweis, dass sich diese Menge im Laufe des 20. Jahrhunderts stetig erhöht hat und kein Hinweis auf ein Ende dieses Trends zu erkennen ist. Diese Entwicklung wird durch das stetige Bevölkerungswachstum sowie wirtschaftliche und soziale Aufholeffekte in Nicht-Industrienationen befeuert. Auch kann aus den bisherigen Trends, dass als Ressourcen/Reserven klassifizierten Rohstoffmengen (jährlich) immer wieder „aufgefüllt“ und damit konstant gehalten oder sogar ausgeweitet werden konnten, nicht geschlossen werden, dass dies bei steigendem Rohstoffverbrauch auch in Zukunft verlässlich gegeben sein muss. In diesem Fall wäre eine absolute Verknappung gegeben.

2.5. Kritikalität von Rohstoffen

Aufgrund der Endlichkeit und Erschöpfung mineralischer Lagerstätten wird ab einem gewissen Zeitpunkt bei konstanter oder steigender Nachfrage diese nicht mehr gedeckt werden können.⁷⁰ Bei Vorliegen einer absoluten Verknappung kann ein Missverhältnis zwischen Angebot und Nachfrage nicht mehr (ausreichend) ausgeglichen werden, da die regulierenden Kräfte des Marktes nicht mehr greifen können. Eine langfristige Versorgung setzt daher voraus, verschiedene kritische Faktoren zu berücksichtigen. Kritische Faktoren sind beispielsweise die geologische bzw. geochemische Verfügbarkeit, die geopolitische Stabilität, der technologische Stand oder ökonomische, soziale oder ökologische Faktoren und können jeweils einzeln oder in Kombination zu kritischen Versorgungssituationen führen.

Die führenden Industrienationen setzen sich daher mit der Kritikalität von Rohstoffen für ihre jeweilige Volkswirtschaft und global auseinander. Der Wissenschaftsrat der USA (NRC)⁷¹ hat 2008 eine Studie zur Kritikalität von Ressourcen vorgelegt, in deren Folge weitere Regierungsaktivitäten auf den Weg gebracht wurden (bspw. US Department of Defence (DoD); Department of Energy (DoE)). Die im selben Jahr 2008 herausgegebene Rohstoffinitiative der Europäischen Union (EU) zielt unter anderem darauf ab, Handels- und Wettbewerbsverzerrungen auf internationalen Rohstoffmärkten zu beseitigen.⁷² Kurze Zeit später folgte die EU mit einer Studie zur Kritikalität von Ressourcen (EC 2010), die in einer Liste kritischer Rohstoffe mündete. Diese sind

69 z.B. [GORD2007], p.24

70 [GORD2007], p.27

71 National Research Council (NRC), Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy, 2008 | <https://www.nap.edu/catalog/12034/minerals-critical-minerals-and-the-us-economy> (06.01.2021)
Ökologische Aspekte wurden hier erstmals adressiert. „Environmental and social availability“ ist darin eine von fünf betrachteten Dimensionen. Die weiteren Dimensionen sind: Geologie (Vorkommen), Technik (Abbaubarkeit), Politik (Regierungseinfluss auf Verfügbarkeit, Stabilität) und Ökonomie (Kosten-/Preisakzeptanz).

72 Die Vorarbeiten der Republik Österreich mit dem österreichischen Rohstoffplan, die 2002 starteten, galten als „best practice“ und waren Spiritus Rector für die europäische Rohstoffinitiative. (Vgl. [WEBE2012, S.27]; Weber, L. (Hsg.), Der österreichische Rohstoffplan, Archiv für Lagerstättenforschung, 2012, Band 26, Geologische Bundesanstalt.

definiert als solche Rohstoffe mit hohem Versorgungsrisiko und großer wirtschaftlicher Bedeutung. Diese Auflistung soll dazu beitragen, Recyclingtätigkeiten und Substitutionsbemühungen zu verstärken sowie Anreize für die Erzeugung und Abbau kritischer Rohstoffe in Europa zu schaffen. Der Katalog wird nach Analyse und Bedeutung der Rohstoffe alle drei Jahre aktualisiert und es ist über die Jahre eine kontinuierliche Steigerung der Anzahl der kritischen Rohstoffe – vor allem der Hochtechnologierohstoffe – erkennbar. Die Liste wurde im September 2020 um weitere vier kritische Rohstoffe erweitert.⁷³

Auch die Europäische Kommission hat in der oben genannten Mitteilung (EC2010) die Umwelt Risiken als „dritte Dimension“ für Kritikalität genannt. Hierzu wurde der „Environmental Performance Index“ (EPI) analog dem Versorgungsrisiko durch Verrechnung mit dem Länder-

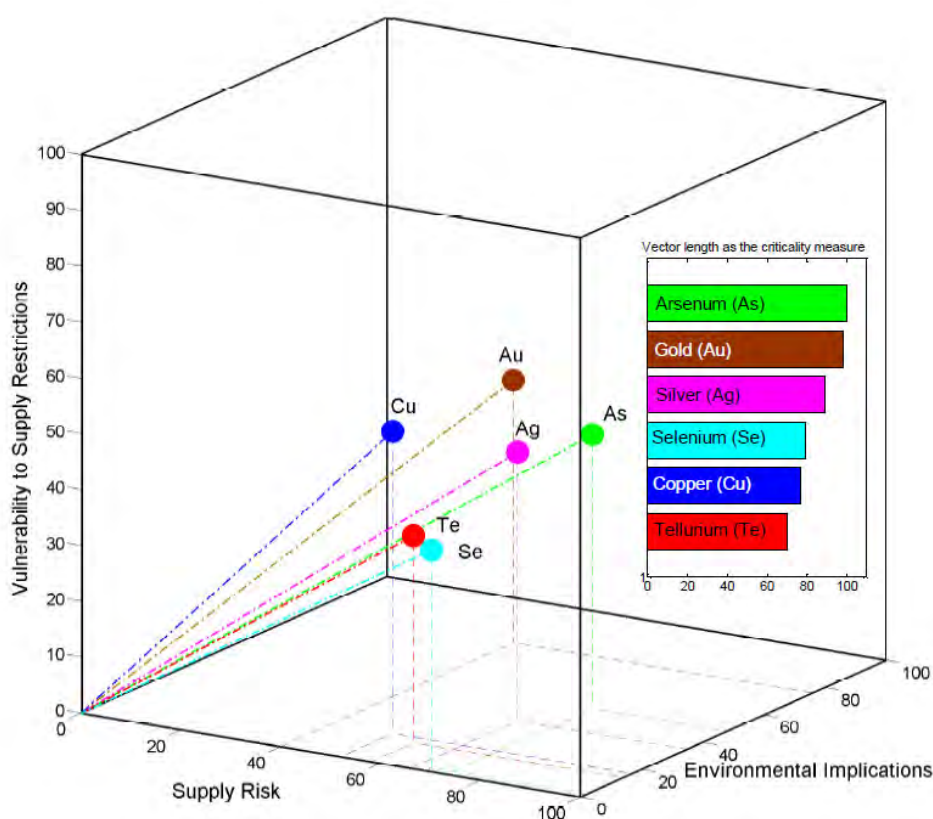


Abb. 6: Ergebnisse der Studie „Kritikalität der geologischen Kupferfamilie“ von Graedel et al. (2012) auf nationaler Ebene (US-Wirtschaft). Die Kritikalität wird nicht mehr innerhalb der Kritikalitätsmatrix, sondern innerhalb eines Kritikalitätsraums bewertet unter Berücksichtigung der dritten Dimension der Umweltauswirkungen: Die Gesamtkritikalität eines Rohmaterials wird durch die Vektorlänge definiert, wie durch die gestrichelten Linien dargestellt.⁷⁴

konzentrationsrisiko, der Substituierbarkeit und der Recyclingrate aggregiert. Im Unterschied zu

⁷³ COM(2020) 474 final: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN> (06.01.2021)

⁷⁴ aus [GLOE2015], p.18.

Graedel et al. (2012) wurde diese dritte Dimension „Umweltrisiko“ nicht für ein dreidimensionales Koordinatensystem vorgeschlagen, sondern der „environmental country index“ wurde ergänzend zum Versorgungsrisiko der ökonomischen Bedeutung gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigte sich nach den Analysen von Glöser et al (2015),⁷⁵ dass alle daraus ermittelten kritischen Materialien bereits über das Versorgungsrisiko identifiziert worden waren. Es bestand somit kein Bedarf, ein Material nur aufgrund des „environmental country risk“ hinzuzufügen. Da zudem der EPI aufgrund des geringen Bezugs zum Bergbau als Indikator wenig geeignet ist bzw. die Realität des Bergbausektors teils nicht abbildet, wurde die Bewertung des Umweltrisikos in der folgenden Version der Mitteilung der EU-Kommission seit 2014 nicht fortgeführt.

Besonders anschaulich und exakt ist die Kritikalitätsbewertung nach Graedel et al. (2012).⁷⁷ Das Augenmerk wird dabei insbesondere auf die Verortung von Rohstoffen in einer dreidimensionalen Kritikalitätsmatrix gelegt, und als Ergebnisse für die geologische Kupferfamilie einschließlich des Gesamtkritikalitätsniveaus in dieser Studie für die USA präsentiert. Die Rohstoffe sind in einem „kritischen Raum“ so eingeordnet, dass die Vektorlänge das Maß der Kritikalität

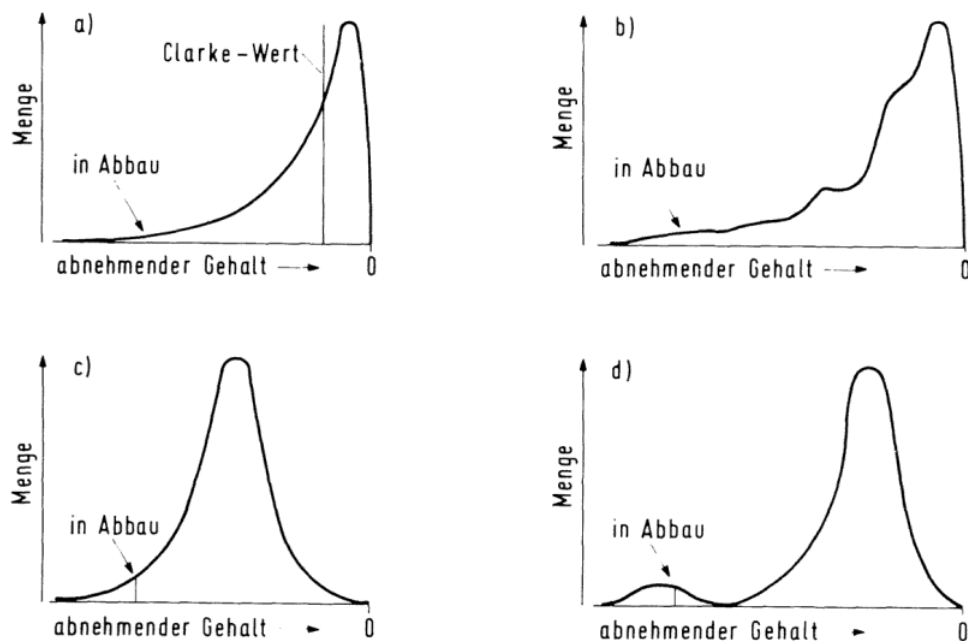


Abb. 7: Modelle zur Verteilung mineralischer Rohstoffe in der Erdkruste
 a) log-normale Verteilung (Fettweis 1975)
 b) Verteilungskonzept mit Teilkollektiven (Fettweis 1980)
 c) kontinuierliche eingipflige Verteilung für häufige Elemente wie Fe, Al, Ti (Skinner 1976)
 d) zweigipflige Verteilung für seltene Elemente (Skinner 1976)⁷⁶

75 [GLOE2015], p.19

76 aus [GOCH2013], S.75.

77 [GRAD2012]

bestimmt (Abb. 6). Glöser et al (2015)⁷⁸ geben jedoch zu bedenken, dass Umweltrisiken und Versorgungsrisiken nicht unabhängig voneinander sind und der Ansatz in EU-Kommission, das Umweltrisiko im Versorgungsrisiko zu subsumieren, sinnvoll erscheint.

Gemeinsam mit der oben genannten umfangreichen Mitteilung der Europäischen Kommission zu kritischen Rohstoffen (EC 2010)⁷⁹ wurde ein Aktionsplan beschlossen, der eine Zukunftsstudie über kritische Rohstoffe für strategische Technologien und Sektoren für die Zeiträume bis 2030 und bis 2050 beinhaltet sowie Maßnahmen, um die Abhängigkeit Europas von Drittändern zu verringern und Versorgungsquellen zu diversifizieren. Zudem ist erklärtes Ziel der EU-Kommission, die Ressourceneffizienz steigern, die Kreislaufwirtschaft zu stärken und weltweit die verantwortungsvolle Rohstoffbeschaffung zu fördern. Es ist absehbar, dass sich das Regelwerk der EU einerseits auf die Transparenz von Lieferketten und deren Finanzierung (Taxonomy) fokussieren wird, andererseits auf die Entkopplung der Abhängigkeit von China. Bei einigen kritischen Rohstoffen beträgt die Abhängigkeit der europäischen Mitgliedsstaaten von China „100%“.⁸⁰

Im folgenden Kapitel 2.6 wird genauer auf die Definition von Vorratskategorien (Reserven, Ressourcen) eingegangen und die Geologie der Kupferlagerstätten wird in Kapitel 4.6 erläutert. Es ist aber vorweg angebracht, prinzipiell auf Konzepte globaler Vorratsermittlung einzugehen. Dabei kommt es weniger auf das (grundsätzliche) Vorhandensein eines Rohstoffs in der Erdkruste an (vgl. Clarke-Werte in Kap. 2.2, S.27), da die chemischen Elemente sehr unterschiedlich in der Lithosphäre verteilt und angereichert sind.

Oft wird bei der Vorstellung über die Verteilung der Elementgehalte in der Erdkruste von der „logarithmisch normalen Verteilung der mineralischen Rohstoffe ausgegangen, doch werden auch begründete Bedenken gegen eine so gleichmäßige Verteilung vorgebracht“⁸¹ (Abb. 7-a). Das führte schließlich auch zu anderen Verteilungsmodellen, „entweder getrennt nach Elementgruppen (Abb. 7-c /-d) oder ‚stufenweise‘ mit erkennbaren Teilkollektiven (Abb. 7-b)“⁸². Den globalen Schätzungen über die Ressourcen an mineralischen Rohstoffen liegen verschiedene Konzepte zugrunde. Diese lassen sich unterteilen in

- das Erdkrustenkonzept (Extremfall, dass der Inhalt der gesamten Erdkruste zur Verfügung steht)
- das geologische Konzept (alle geologisch möglichen Mineralkonzentrationen in der Erdkruste als Vorräte betrachtet)
- das wirtschaftsgeologische Konzept (wie das geologische Konzept, aber unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Nutzung in absehbarer Zukunft (25 Jahre))

78 [GLOE2015], pp.18.

79 COM(2020) 474 final: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN> (06.01.2021)

80 [OFFE2019], p.14.

81 [GOCH2013], S.74-75.

82 ebd.

- das bergwirtschaftliche Konzept (konkretisiertes wirtschaftsgeologisches Konzept, das die Zeiträume auf Grundlage der bergtechnischen Gewinnungsmöglichkeiten angibt)
- das Lagerstättenkonzept (das von den technisch-wirtschaftlichen Verhältnissen der Gegenwart ausgeht und nur die schon entdeckten, bauwürdigen Vorräte berücksichtigt).

„Welchem Konzept der Vorzug gegeben wird, hängt letztlich von der persönlichen Grundeinstellung eines Rohstoffwirtschaftlers oder Futurologen ab. Optimisten neigen mehr zum geologischen Konzept, Pessimisten mehr zum Lagerstättenkonzept.“⁸³ Jedoch verwenden ökologisch orientierte Wissenschaftler auch geologische Modelle und Gordon et al (2007)⁸⁴ sieht das Modell der zweipfligen Verteilung (Abb. 7-d) von Skinner (1976) als brauchbares Erklärungskonzept zur Ermittlung von Knappheit und Kritikalität. Das Skinner-Modell besagt, dass von der Gesamtmasse eines Elements in der Erdkruste nur ein relativ kleiner Anteil hochkonzentriert in Erzen vorliegt, während der weitaus größere Teil in nur viel geringeren Konzentrationen in Gesteinen vorkommt. Folgt man dieser Theorie, verblieben nach der Erschöpfung der Erzlagerstätten nur mehr Vorkommen mit deutlich geringeren Elementkonzentrationen. Der für die Förderung erforderliche viel größere energetische und finanzielle Aufwand würde sich nicht mehr rentieren. Dieser Übergang wird deshalb auch als „mineralogische Barriere“ bezeichnet.⁸⁵

Das Modell konnte mangels verfügbarer Daten in der Studie nicht verifiziert werden, jedoch trifft diese Limitation auch auf die Ermittlung von (qualifizierten) Reserven und Ressourcen zu. Da Explorationsbohrungen teuer sind, werden diese von den Bergbaubetrieben nur im nötigen Ausmaß und an Orten mit vermuteter wirtschaftlicher Rohstoffkonzentration durchgeführt. Daher ziehen Gordon et al (2007)⁸⁶ den Schluss, dass das Lagerstättenkonzept mit der Ermittlung von Ressourcen/Reserven zu einem definierten Zeitpunkt nicht geeignet ist, allgemeine Aussagen zu Ressourcenknappheit und Kritikalität zu tätigen. Da geologische Institutionen wie USGS auf diese unternehmensgenerierten Daten zurückgreifen, sind auch diese Daten kein Indiz für Kritikalität und allgemeiner Rohstoffverfügbarkeit. Aus Sicht der Autoren sind daher die Daten zu Ressourcen/Reserven nicht transparent, weil die wirtschaftlichen Annahmen dahinter nicht bekannt seien.⁸⁷ Sie führen als Beweis dafür die sprunghafte Entwicklung der weltweiten Kupferressourcen zwischen 2002 (1.600 Mio (metrische) Tonnen) und 2006 (3.000 Mio t) in den Angaben von USGS an. Die Hintergründe über die Steigerungen bleiben unerwähnt und die Autoren geben sich sicher in der Vermutung, dass diese plötzliche Steigerung nicht durch neue Explorationsergebnisse zustande gekommen ist. Auch wenn sich bisher die Ressourcen/Reserven immer wieder

83 [GOCH2013], S.76.

84 [GORD2007], p.25

85 [SKIN1976]

86 [GORD2007], p.26

87 ebd.

(jährlich) mit den Fördermengen gleichförmig entwickelt haben, ist die Annahme, dass das auch für alle Zukunft gilt, weit hergeholt und jedenfalls liegt für diese Annahme kein wissenschaftlicher Beweis vor.⁸⁸ Weiterführende Ausführungen zum Kupferzyklus sind im Kapitel 2.6 (S.37) zusammengestellt.

2.6. Europäischer Kupferzyklus

Wie bereits ausgeführt, ist Kupfer ein essenzielles Industriemetal, dessen zukünftige Verfügbarkeit stark diskutiert wird. Tilton (2002) führt aus, dass Kupfer geochemisch ein seltenes Metall sei, da die heute (noch) verfügbaren Kupferlagerstätten eine immer geringere Kupferkonzentration aufweisen.⁸⁹ Andere Wissenschaftler hingegen sehen diese Grenze als nicht so absolut und erinnern an die Innovationsfortschritte in der Rohstoffgewinnung in der Vergangenheit. Es ist jedoch unbestritten, dass Kupfer aus heutiger Sicht nur in Ausnahmefällen substituierbar ist und daher eine ständige Unterversorgung disruptiv auf die Weltwirtschaft und insbesondere den Elektrizitätssektor wirken würde. Im Unterschied zu fossilen Rohstoffen haben Metalle das Potential für eine praktisch unendliche Wiederverwendung ohne Qualitätsverlust.⁹⁰ Es ist daher notwendig, den Verbleib der in den letzten Jahrzehnten stark gestiegenen in Umlauf gebrachten Kupfermengen zu analysieren, um diese nach Nutzungsende wieder in den Rohstoffkreislauf als Sekundärmaterial nachhaltig einzubringen.

Durch die quantitative Bewertung der Kupferbestände und Materialflüsse während des gesamten Technologiezyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Entsorgung kann auf die Ressourcenpolitik, das Umweltbewusstsein und die Abfallwirtschaft Einfluss genommen werden. Bereits 2002 haben sich Graedel, Rechberger, Gordon et al.⁹¹ mit dem technologischen Zyklus von Kupfer eingehend auseinandergesetzt. Aufbauend auf den Arbeiten des „Stocks and Flows Project“ (STAF) des Center for Industrial Ecology an der Yale University, wurde der Materialfluss des Metalls Kupfer beginnend von der bergmännischen Gewinnung, Aufbereitung, Produktion, Nutzungsphase und dem Abfallmanagement sowie Recycling analysiert und eine Jahresbilanz aufgestellt. Diese Forschungsmethode stützt sich notwendigerweise auf Daten unterschiedlicher Qualität und Quantität, die aus verschiedenen Quellen wie Regierungsbehörden, Handels- und Industrieverbänden, Marktforschungsunternehmen und der Forschungsliteratur stammen. Diese

⁸⁸ ebd.

⁸⁹ [TILT2002], p.12, 24.

⁹⁰ u.a. [GORD2006], p.1209.

⁹¹ Die Ergebnisse des STAF-Projekts sind in einer Serie von vier Artikeln zusammengefasst: [GRAD2002] beschreibt die Methode; [SPAT2002] erläutert die Ableitung des europäischen Kupferzyklus für ein Jahr; [BERT2002] analysiert das Abfallmanagement- und Recycling-System, [RECH2002] legt das Augenmerk auf die statistische Entropie des Kupferzyklus, der das Verständnis des industriellen Metabolismus („Stoffwechsel“) verbessert.

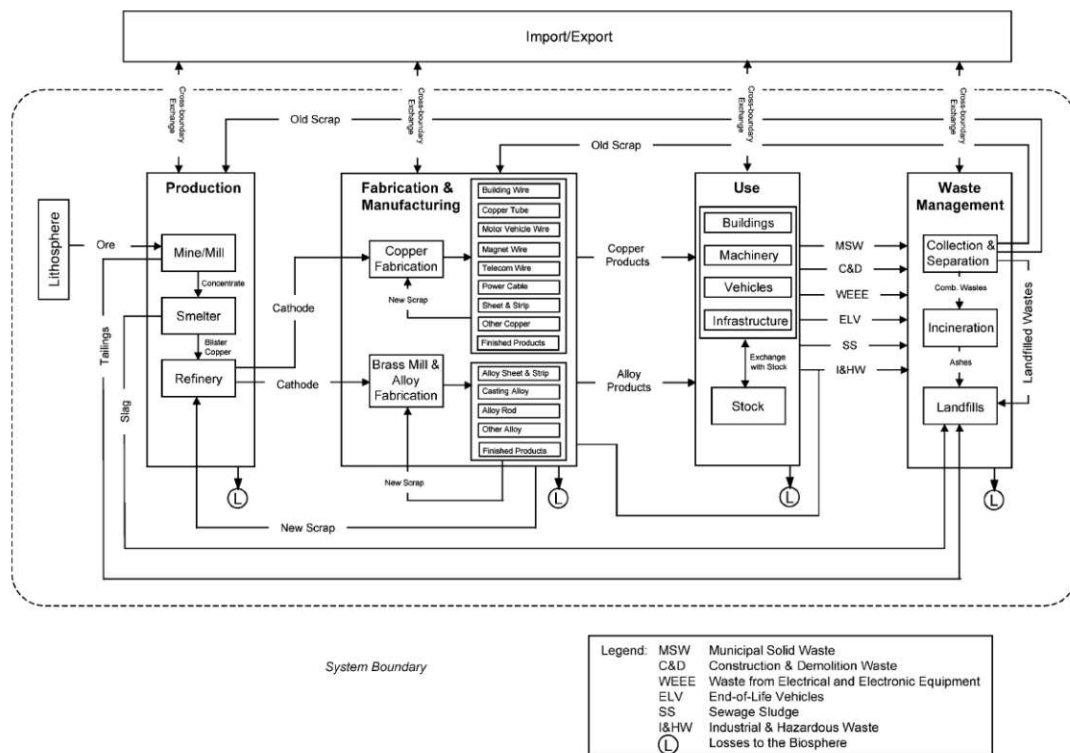


Abb. 8: Struktur des Kupferzyklus nach Graedel et al (2002). Das Diagramm veranschaulicht die Lebenszyklusprozesse einschließlich des Imports und Exports von Waren und Fertigprodukten von Kupfer und zeigt die Materialflüsse wie auch die Bestände an. Die gestrichelte Linie zeigt die Systemgrenze an.⁹²

Daten wurden zu einem vollständigen Technologiezyklus zusammengefasst. Es wurde die vorliegende Datenqualität für die Durchflussdaten der Metallproduktion positiv bewertet, hingegen waren die Informationen für die Entsorgung am Ende der Lebensdauer spärlich.

Die Bestände wurden bestimmt, indem die Ströme über die Zeit integriert wurden, d.h. indem die Produktionsdaten und die Produktlebensdauern geschätzt wurden und die resultierende Akkumulation von kupferhaltigen Produkten in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus berechnet wurden. Diese Daten wurden in das Flussdiagramm, wie in Abb. 8 dargestellt, übernommen.

Die Autoren gehen davon aus, dass 85% des im Laufe der Menschheitsgeschichte abgebauten und genutzten Kupfers nach wie vor verwendet wird, weil es erst im letzten halben Jahrhundert zu einer enormen Steigerung des Kupfereinsatzes gekommen ist und diese Anwendungen eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten haben. Das heißt, das Kupfer ist in Rohren und Kabeln in Haushalten, Stromkabeln auf der Straße sowie in Automobilen, Elektrogeräten und Klimaanlage enthalten. Als Resultat der Studie halten die Autoren fest, dass der Großteil des Kupfers im Wirtschaftsprozess weiterhin vorhanden ist. Die Recyclingquote wird in dieser Analyse mit relativ hohen 57% in Europa und 60% in Nordamerika angegeben. Hier kann mit einiger Sicherheit

⁹² aus [GRAD2002], p.11.

gemutmaßt werden, dass in den zwei Jahrzehnten nach Publikation der Arbeit die Recyclingquoten weiter angewachsen sind.

Diese Tatsache ist auch nicht überraschend, da Sekundärkupfer einen hohen Marktwert hat und gute Aufbereitungstechnologien installiert sind. Dennoch ist festzuhalten, dass in manchen Regionen Aufholbedarf besteht, damit nicht zweistellige Prozentsätze des jährlichen Kupferverbrauchs auf Mülldeponien landen.

Rechberger (2002)⁹⁴ hat im Zusammenhang mit dem STAF Projekt Untersuchungen zur statistischen Entropie im Kupferzyklus angestellt. Er untersuchte, das Verteilungsmuster der Substanz Kupfer im Kupferzyklus, der im Prinzip als einfache Kette von den vier Prozessen der primären Kupfergewinnung (Bergbau und Aufbereitung), der Herstellung von Produkten, der Nutzung und Lagerung (z. B. Infrastruktur) von Waren sowie dem Recycling und der Deponierung (Abfallwirtschaft) definiert werden. Relevante Recyclingströme (neuer und alter Schrott) innerhalb oder zwischen Produktions-, Herstellungs- und Abfallentsorgungsprozessen sind ebenfalls immanenter Systembestandteil. Während des gesamten Lebenszyklus von Kupfer variiert die statistische Entropie zwischen den oben genannten Prozessen erheblich und deckt etwa 50% des möglichen Bereichs zwischen der Gesamtdissipation und der maximalen Konzentration des Gesamtdurchsatzes von Kupfer ab. Das derzeitige Kupfermanagement zeigt jedoch keinen klaren

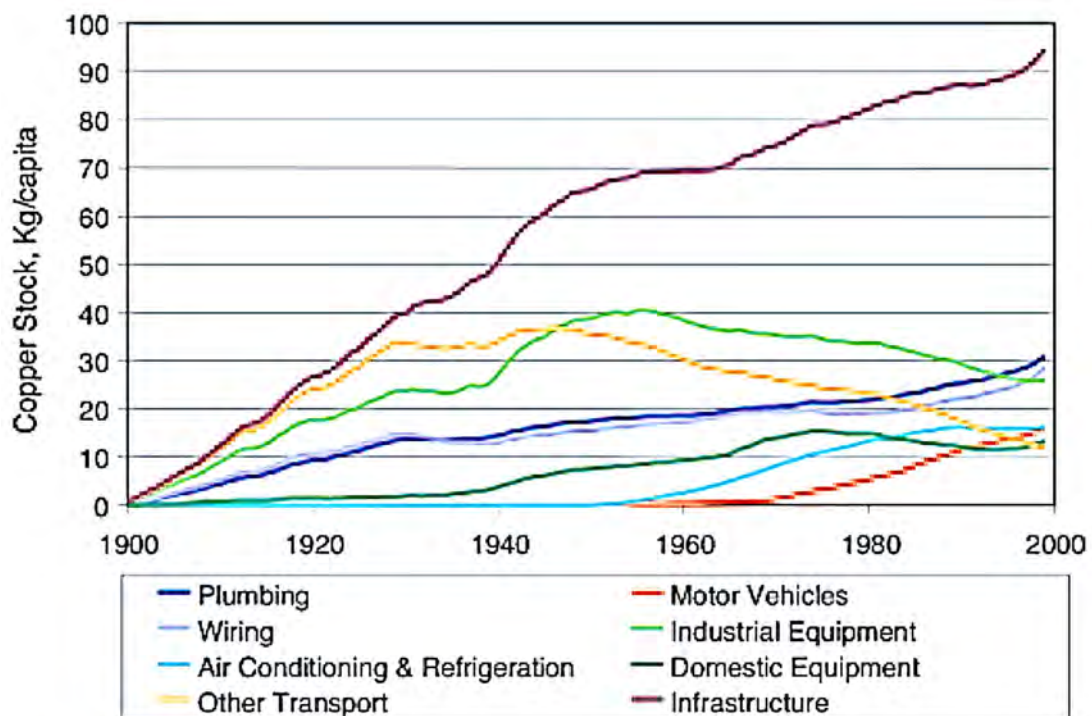


Abb. 9: Kupferbestandes nach Anwendungskategorien pro Kopf in den USA⁹³

93 aus [GORD2006], p.1211.

94 [RECH2002]

Entropietrend über seinen gesamten Lebenszyklus. Das Gesamtsystem dissipiert oder konzentriert Kupfer signifikant nach dieser Studie im Hinblick auf das ursprüngliche Erz. Selbst ein optimiertes Abfallmanagementsystem mit höherer Recyclingeffizienz hätte diesen Befund nicht wesentlich ändern können, da die Kupferströme am Ende des 2. Jahrtausends (Studienzeitpunkt) in die Abfallwirtschaft im Vergleich zum Kupferverbrauch gering waren.

Insbesondere die in den letzten beiden Jahrzehnten eingerichtete und erneuerte Infrastruktur stellt heute ein großes Reservoir für Kupfer dar. Der Kupfereinsatz hat sich in vielen Waren und Produkten enorm gesteigert, die nun nach Ende der Lebens- bzw. Nutzungszeit recycelt werden können. Infolge dieser größeren Abfallströme können abnehmende Gesamtentropietrends realisiert werden, sofern effiziente Recyclingtechnologien angewendet werden. Diese Betrachtung und Analyse ermöglicht ein langfristiges und nachhaltiges Kupfermanagement und hat schon sehr früh aufgezeigt, von welcher immensen Bedeutung anthropogene Lagerstätten („Urban Mining“) heute und in der Zukunft sein können und werden.

Gordon et al (2006)⁹⁶ stellte den Kupferbestand je Einwohner in den USA zusammen (Abb. 9), der diese Entwicklung bestätigt. Insbesondere die Steigerung des „Kupferinventars“, der in

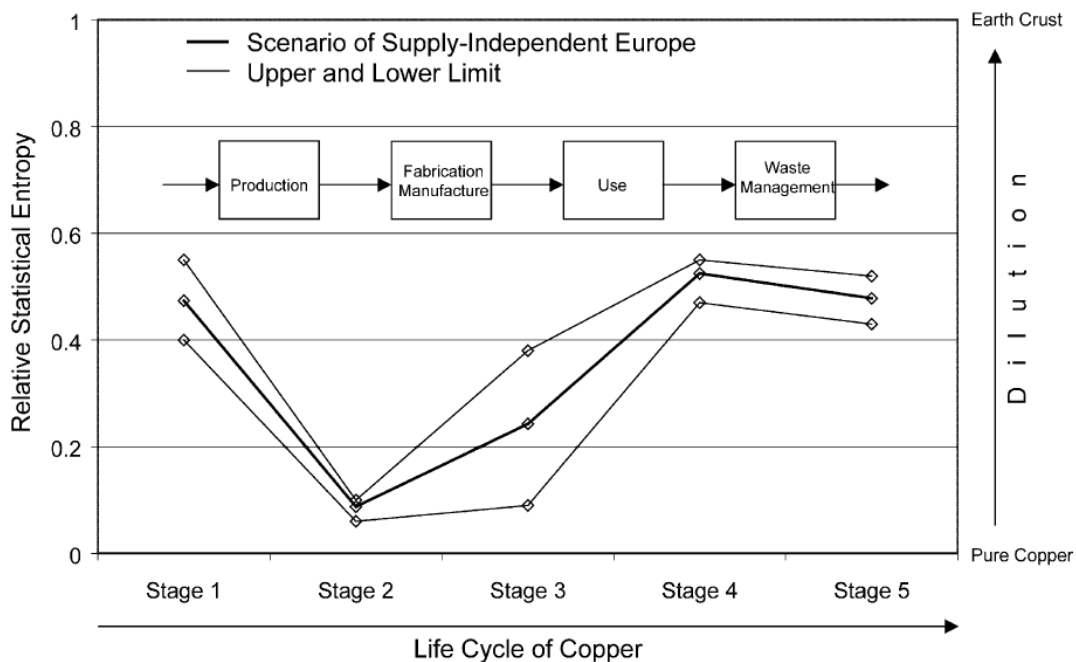


Abb. 10: Varianz der relativen (normierten) statistischen Entropie (RSE) im Kupferzyklus⁹⁵

⁹⁵ aus [RECH2002], p.69. | Es wird angenommen, dass das Maximum der Entropie erreicht ist, wenn die Dissipation (Zerstreuung, „Vergeudung“) gleich der Konzentration derselben Substanz in der Erdkruste ist (Kupfer: 0,00006 bzw. 0,006% – vgl. Clarke Wert) ([RECH2002], p.63). Ist das Element in einem System vollständig konzentriert, ist die statistische Entropie null. Dieser Zustand ist naturgemäß nach der Aufbereitung in Form von reinem Kupfer (Stage 2) in größtmöglicher Näherung gegeben.

⁹⁶ [GORD2006]

der Infrastruktur „gespeichert“ ist, übertrifft damit die Summe der nächsthöheren drei Kategorien, nämlich den Kupferinhalt von Industrieanlagen, (Wasser-)Rohren und Kabeln. Es werden zumindest 200 kg Kupfer pro Kopf benötigt, um die Volkswirtschaften wohlhabender Nationen wie der Schweiz, Australiens oder der USA mit aktueller Technologie zu versorgen.⁹⁷

Die Nachfrage nach neuen Dienstleistungen und Technologien ist nach Gordon et al. tief in die westliche Kultur eingebettet, die Wachstum und Entwicklung als absolut ansieht und bequeme Dienstleistungen oder luxuriöse Gerätschaften rasch in Notwendigkeiten für alle umwandelt. Die Autoren zeigen sich besorgt, dass dieser Trend insbesondere dann die Verfügbarkeit von Kupfer aus der Lithosphäre überfordert, wenn ein ähnlicher Kupferbestand wie in den westlichen Industrienationen für einen größeren Teil der Weltbevölkerung zur Erfüllung ähnlicher Bedürfnisse herangezogen werden würde. Szenarien, die die zukünftige Nutzung von Kupferressourcen darstellen, gehen auch von einer weltweiten Steigerung in den postindustriellen Nationen, gemessen am Pro-Kopf-Verbrauch, aus, selbst wenn das Preisniveau ansteigen sollte. Die Studienautoren rechnen mittelfristig mit einer Steigerung der Materialeffizienz und mit Substitutionseffekten, die den Kupfergrundeinsatz abmildern. Erst langfristig wird eine Entkopplung der Wirtschaft vom Kupferverbrauch, dessen Verwendung nur auf spezielle Anwendungen beschränkt sein wird, durch Metallsubstitution umzusetzen sein.⁹⁸

Gradel et al. (2004)⁹⁹ haben basierend auf ihren bereits oben ausgeführten Überlegungen im Rahmen des STAF-Projektes erweitert und die Zyklen einzelner Länder analysiert. Die Unterschiede betragen bis zum Faktor 2 zwischen an sich vergleichbaren Volkswirtschaften in Bezug auf das Recycling. Das größte Potenzial für das Kupferrecycling haben Anwendungen mit hohen Kupferkonzentrationen, wie Elektronik, elektrischen Geräte und Fahrzeuge. Zum Zeitpunkt der Studie wurden weltweit etwa 53% des Kupfers zurückgewonnen, wiederverwendet oder recycelt. Das meiste Kupfer geht in Deponien verloren, aber auch bei der Kupfergewinnung (tailings). Etwa 30% des Neukupfers wird dazu verwendet, um bereits im Zyklus befindliches, aber am Nutzungsende verlorenes Metall zu ersetzen. Die Studie empfiehlt nach diesen Erkenntnissen, den Recyclinganteil durch bessere Sammelsysteme und gezieltes Schrottmanagement zu erhöhen und fordert staatliche und industrielle Initiativen zur Optimierung der Kupferbestände und -ströme. Schließlich müssen zukünftig auch die Umweltauswirkungen von Kupferverbrauch und -verlust genauer analysiert und berücksichtigt werden.

Dazu gehören (a) Studien zur Verfügbarkeit von Ressourcen jetzt und in Zukunft, die sich aus den Recyclingquoten sowie der Menge und Art des im Bestand befindlichen Kupfers ergeben; (b) Analyse der Auswirkungen des Kupferkreislaufs auf den Energieverbrauch insgesamt und in seinen verschiedenen Stadien; (c) Charakterisierung der Umweltauswirkungen von Kupferverbrauch

97 [GORD2006], p.1211.

98 ebd.

99 [GRAD2004]

und -verlust und (d) Überlegungen zu potenziellen staatlichen und industriellen Initiativen im Zusammenhang mit den Kupferbeständen und -strömen. Jeder dieser Bereiche kann auf verschiedenen Organisationsebenen oder für bestimmte Länder, bestimmte Regionen oder den Planeten angesprochen werden.

2.7. Der anthropogene Selen-Zyklus

Selen ist wie ausgeführt ein wichtiges Industriemineral, dessen Nutzung vielfältig und im Laufe der industriellen Entwicklung Veränderungen unterworfen war. Zukünftig spielt der Einsatz vor allem in Dünnschicht-Solartechnologien eine größere Rolle. Kavlak und Gradel (2013)¹⁰⁰ haben die globalen Zyklen, Bestände und Ströme von Selen für den Zeitraum der Jahre 1940 bis 2010 anhand von Prinzipien der Materialflussanalyse (MFA) analysiert. Die Studie betrachtet die Phasen Produktion, Herstellung, Verwendung und Abfallwirtschaft von Selen während dieses Zeitraums. Die Untersuchungen bestätigen die auch in dieser vorliegenden Arbeit gemachte Annahme, dass die Kupferproduktion die Hauptquelle für Selen ist und es in Ermangelung anderer Informationsquellen sinnvoll ist, die Selen im Zusammenhang mit der Kupferproduktion zu betrachten. Selen ist das führende Nebenprodukt der elektrolytischen Kupfererzeugung und lagert sich im Anodenschlamm ab, der zu circa 90% die Quelle der Selenerzeugung ist. Der Rest wird über die Blei-, Zink, Nickel und Silbererzeugung gewonnen.¹⁰¹

Die Prozesse des Selenflusses bestehen aus der Gewinnung (Bergbau) und der Verhüttung, der Reinigung durch Raffination und Elektrolyse (R=Refinery) gefolgt von der Herstellung von Waren und Produkten, die anschließend in der vorgesehenen Anwendung genutzt werden (Nutzungsphase) und schließlich in der Abfallwirtschaft (Recycling, Deponierung) münden (Abb. 11). Die Methode setzt die Massenerhaltung des Elements voraus. Somit muss die Massenbilanz aus allen Einträgen und allen Strömen, die das System verlassen sowie der Aufbau des Materialbestandes in jedem Prozessschritt ausgeglichen sein.

Die Konzentration von Selen im Anodenschlamm wird in dem Studienpapier mit 2 - 25% gemessen an der Masse angegeben. Die Materialflüsse während der Produktionsphase werden berechnet, indem das raffinierte Selen bis zu seiner Quelllagerstätte zurückverfolgt und die aus der Literatur erhaltenen Rückgewinnungs- und Verlustraten angewendet werden. Wie im Flussdiagramm in Abb. 12 gezeigt, beträgt die Rückgewinnungsrate während der Konzentrationsvorganges 10%, während des Hüttenprozesses 50% und bei der Behandlung des Anodenschlammes 90%. Der Grund für die hohe Rückgewinnungsrate bei der Anodenschlammbehandlung, liegt in der grundsätzlichen Optimierung dieses Prozesses, der darauf ausgelegt ist, so viel Material wie

100 [KAVL2013]

101 [KAVL2013], p.18.

möglich, insbesondere Edelmetalle, aus den Anodenschlämmen zu filtern. Das aus dem Anodenschlammbehandlungsprozess resultierende Selen wird als Rohselen bezeichnet und muss vor der Weiterverarbeitung aufbereitet werden.

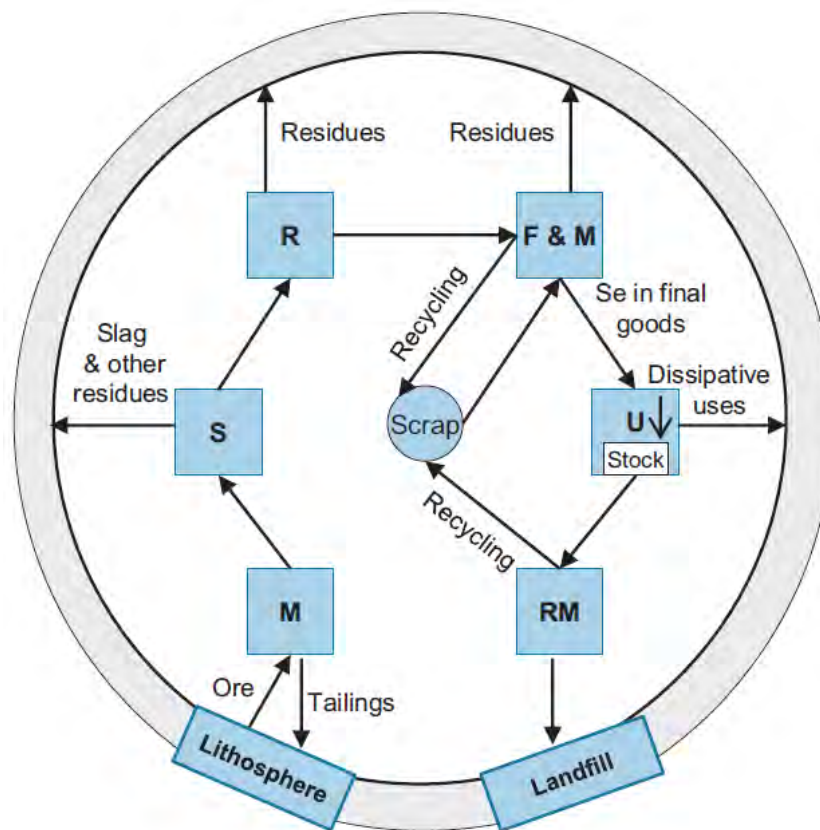


Abb. 11: Zyklus-Diagramm von Selen. Die wichtigsten Schritte sind Bergbau (M=Mine), Hüttenwerk (S=Smelter), Raffination und Elekt-

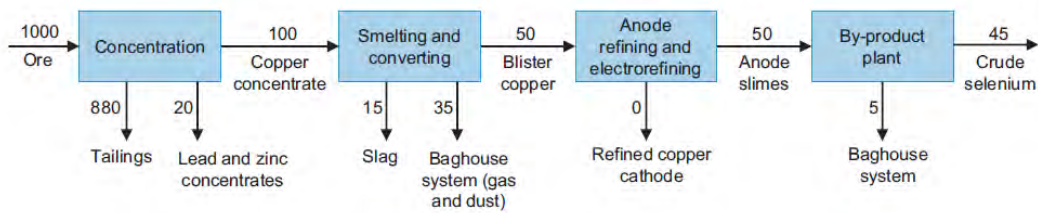


Abb. 12: Anteil von 1000 kg Selen in Kupferproduktionsprozessen. Die Zahlen repräsentieren das Selen in kg, das bei jedem Schritt vorhanden ist.¹⁰³

Der Prozessschritt der Herstellung von Waren und Produkten (F&M) wurde in sieben Endverbrauchssektoren unterteilt: Glasherstellung, Chemikalien und Pigmente, Fotorezeptoren,

rolyse (R=Refinery), Herstellung und Produktion (F&M=Fabrication&Manufacturing), Nutzungsphase (U=Use) und Abfallwirtschaft (Ressourcen Management - RM)¹⁰²

¹⁰² aus [KAVL2013], p.18.

¹⁰³ aus [KAVL2013], p.19.

Gleichrichter, Photovoltaik, biologische Verwendungen und metallurgische Anwendungen. In der Herstellungsphase wird aus der Kupferproduktion gewonnenes Rohselen zu handelsüblichem Selen (Reinheit 99,5%) mit einer Verlustrate von 5–10% hergestellt. Für andere Endanwendungen ausgenommen Elektronik wird handelsübliches Selen in Selenite aus Natrium, Barium oder Zink umgewandelt, die für die Glasherstellung verwendet werden. Selensäure wird zur Elektrolyse von Mangan verwendet, Natriumselenit, findet in Tierfutter Verwendung und Selenulfid wird als Zusatz in Antischuppenshampoos eingesetzt. Die Verlustrate in diesem Prozessschritt beträgt 1–3% woraus die Gesamtverlustrate bei der Herstellung (F&M) mit 10% abgeschätzt werden kann, einer Größenordnung, die industriell durchaus üblich ist.

Für den Einsatz in der Elektronikindustrie wird handelsübliches Selen zu hochreinem Selen veredelt. Die Umwandlung des handelsüblichen Selens in Selen mit einer Reinheit von 99,9% und später in noch reinere Formen wie 4N (99,99%) und 5N (99,999%) führt bei jedem Schritt zu einem Verlust von 1–3%. Für diese Produkte wird in diesem Modell eine Gesamtverlustrate bei der Fertigung von 15% angenommen. Diese hochreinen Selen-Zwischenprodukte werden zur Herstellung von Endprodukten wie Gleichrichtern, Fotokopierern und Photovoltaikmodulen verwendet. In der Fertigung von Elektronikkomponenten gehen nach Schätzungen der Industrie ungefähr 60% des Selens in das Produkt, während 10% verloren gehen und 30% recycelt werden.¹⁰⁴

Der Herstellungsphase (F&M) folgt in Abb. 12 die Nutzungsphase für diesen Sektor. Der Abfluss aus der Nutzung wurde von den Studienautoren anhand eines Lebensdauermodells berechnet. Bei diesem Ansatz bestimmen die jeweilige Lebensdauer der Waren, wie lange diese Produkte in Gebrauch bleiben. Die Menge an Material, die sich in der Nutzungsphase ansammelt, bildet den in Gebrauch befindlichen Bestand. Wenn ein Produkt das Ende seiner Lebensdauer erreicht, verlässt es die Verwendungsphase und gelangt in den Abfallstrom. In der Phase der Abfallwirtschaft wird das in den Produkten enthaltene Selen abhängig von der Recyclingrate am Ende der Lebensdauer entweder zusammen mit dem Produkt auf Deponien verbracht oder tritt wieder in den Materialkreislauf als sekundärer Rohstoff ein.

Selen hat verschieden große dissipative Endanwendungen: Glasherstellung, chemische Produkte und Pigmente, biologische Verwendungen wie Düngemittel, Futtermittelzusatzstoffe und Pharmazeutika sowie metallurgische Verwendungen wie Legierungszusätze und Manganherstellung. Aufgrund ihrer dissipativen Natur ist das funktionelle Selenrecycling (d. h. das Recycling, bei dem die Seleneigenschaften erhalten bleiben) aus diesem Endverbrauchsrecycling schwierig bis unmöglich. Die Selenanwendungen sind jedoch Veränderungen unterworfen. In der Vergangenheit war Selen für die Funktion von Gleichrichtern und Fotokopieren essenziell; diese Anwendungen sind weitgehend ausgelaufen. Selengleichrichter haben eine Lebensdauer von durchschnittlich 10 Jahren. Während Fotokopierer eine durchschnittliche Lebensdauer von ebenfalls

104 [KAVL2013], pp.18-19.

etwa 10 Jahren haben, wurde die selenbeschichtete Trommel alle 5 Jahre ausgetauscht. Daher wurde die Lebensdauer in diesem Modell von den Studienautoren mit 5 Jahren angenommen. Am Ende der Lebensdauer wurde die Recyclingrate für Gleichrichter und Fotokopierer mit 50% angenommen. Der Schrott von Gleichrichtern und Fotokopierern am Ende der Lebensdauer war in den 1970er und 1980er Jahren die Hauptquelle für sekundäres Selen, obwohl das sekundäre Selen nur 10% der Selenversorgung ausmachte.¹⁰⁵

Ein weiterer wesentlicher und **anwachsender anthropogener Selenbestand** ist auf Endprodukte wie CIGS- und CIS-Photovoltaikzellen¹⁰⁶ zurückzuführen. Photovoltaikmodule haben eine Lebensdauer von circa 25 Jahren, jedoch haben die Dünnschichtsolarzellen derzeit (noch) keinen großen Marktanteil. Daher ist das Volumen für das Recycling am Ende der Lebensdauer derzeit wirtschaftlich kein Faktor. (siehe auch Kap. 5.7, S.194)

Abb. 13 zeigt die kumulierten Selenflüsse für den gesamten Zeitraum von siebzig Jahren 1940–2010, der in dieser Studie untersucht wurde. Während dieses Zeitraums waren ungefähr 2 Mio. metrische Tonnen Selen in Erz enthalten, das aus Kupferminen gewonnen wurde, und 1,8 Mio. t dieser Menge gingen durch Tailings verloren. Von den 200 tausend metrischen Tonnen Selen, die zusammen mit Kupfer geschmolzen wurden, gingen 100 tausend t Selen während der Schmelzvorgänge an Rückstände wie Schlacke, Gas und Staub verloren. 90 tausend t davon wurden durch die Anodenschlammbehandlung zurückgewonnen. Während der F&M-Phase ging ein Sechstel des Selens verloren, und 88 tausend t Selen gingen durch Produkte in die Nutzungsphase über. Darüber hinaus war ein Recycling aus dem neuen Schrott möglich, der bei der Herstellung von Solarzellen, Fotokopierern und Gleichrichtern erzeugt wurde, aus denen 9 tausend t Selen recycelt und zur erneuten Verarbeitung in die F&M-Phase zurückgeführt wurde.¹⁰⁷

105 [KAVL2013], p.20.

106 CIGS-Solarzellen (Chalkopyrite) bestehen aus **Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid** (CIGS) bzw. **Kupfer-Indium-Disulfid** (CIS). Dieses Material findet Anwendung in Dünnschichtsolarzellen und hierfür ist CIGS das leistungsstärkste Material mit Laborwirkungsgraden von über 22%. Dieser Solarzellentechnologie wird große Bedeutung für die Zukunft vorausgesagt.

107 [KAVL2013], pp.20-21.

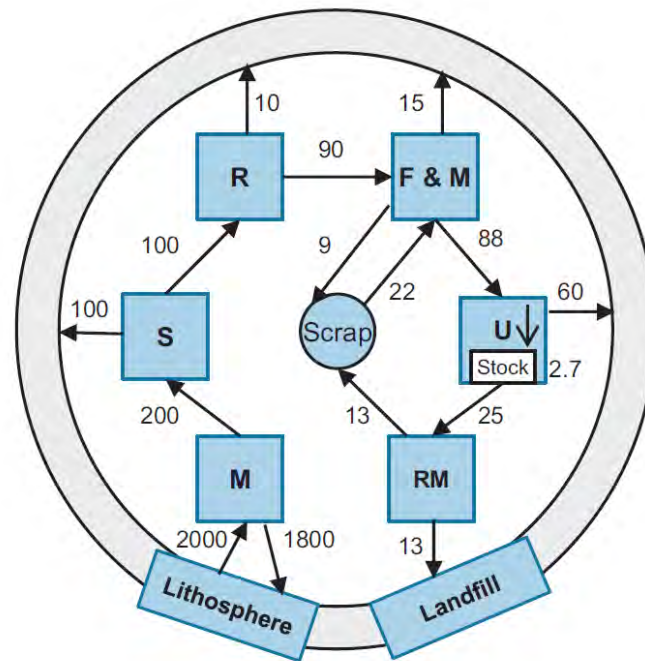


Abb. 13: Kumulativer globaler Zyklus für Selen für die Jahre 1940–2010. Die Einheiten sind Gigagramm (tausend Tonnen) Selen. Zahlen können aufgrund von Rundungen nicht addiert werden.¹⁰⁸

Aus diesen Studienergebnissen geht hervor, dass die Kupferproduktion nicht für die Selenrückgewinnung optimiert wurde, was zu erheblichen Verlusten führt. Es wurde festgestellt, dass Selen nur aus dem pyrometallurgischen Kupfererzeugungsprozess gewonnen werden kann, der zur elektrolytischen Raffination von Kupfer führt. Andere Methoden der Kupferherstellung wie die hydrometallurgische oder das Lösungsmittel-extraktions- und das SX/EW-Verfahren ergeben keine Selengewinnung. Daraus kann logisch geschlossen werden, dass die Selenversorgung gefährdet sein könnte, wenn der Anteil dieser Prozesse im Verhältnis zur Pyrometallurgie an der Kupferproduktion zunimmt. Im Gegensatz dazu kann eine bessere Selenversorgung sichergestellt werden, wenn die Rückgewinnungseffizienz im pyrometallurgischen Prozess verbessert wird.

Mit dieser Studie konnte die **große Dissipation von Selen** verdeutlicht werden, die bemerkenswerte 68% des in Nutzung befindlichen Selens von 88 tausend metrischen Tonnen von 1940 bis 2010 (d.s. 60 tausend t) erreicht hat. Die Studienautoren beschreiben den Befund als ernüchternd, wenngleich ob der Anwendungsfälle nachvollziehbar, dass ein so hoher Anteil an Selen nur einmalig eingesetzt wurde. Die Jahresbetrachtung indiziert, dass dieser Trend über die Jahre sogar zugenommen hat. Neben der Unmöglichkeit des Recyclings aus vielen Endanwendungen sind die Umweltauswirkungen der Selendissipation ein Problem, da Selen als toxische Substanz eingestuft wird. Zum Beispiel wird Düngemitteln Selen zugesetzt, um den Selenmangel im Boden auszugleichen. Die Pflanzen können jedoch nicht das gesamte künstlich eingebrachte Selen aufnehmen und es wird daher aus dem Boden ausgeschwemmt mit unabsehbarer biologischer Auswirkung.

¹⁰⁸ aus [KAVL2013], p.20.

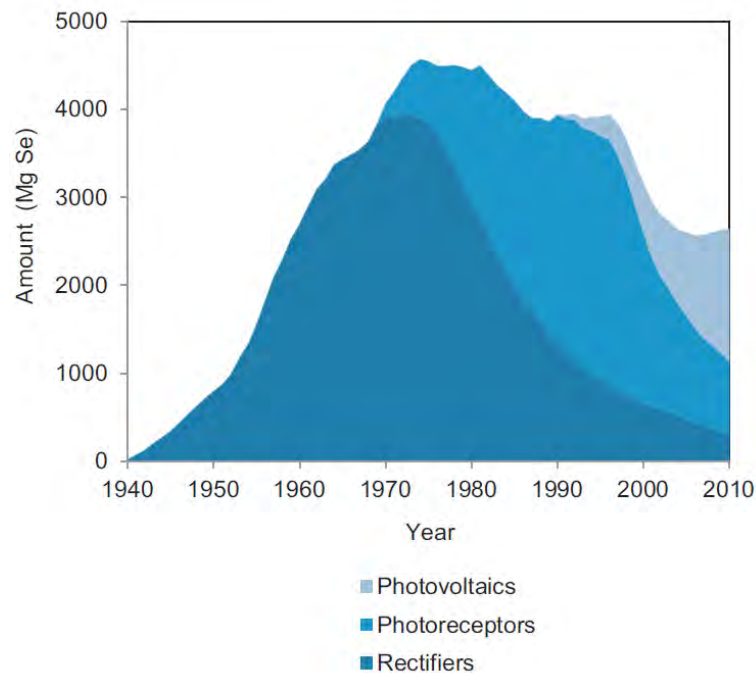


Abb. 14: Aufschlüsselung des Endverbrauchs des in Gebrauch befindlichen Selenbestands. In Betrieb befindliche Selenbestände in Gleichrichtern und Photorezeptoren sind rückläufig, während der Bestand in der Photovoltaik ab 2010.¹¹⁰

Ein weiteres Beispiel für die Umweltauswirkungen von Selen ist die Verschmutzung durch Selen, das bei der Manganraffinerie verwendet wird. Mangan ist ein Metall, das häufig bei der Herstellung von Stahl und Aluminium verwendet wird. Die Selenemissionen können bei der Herstellung oder dem Recycling von manganhaltigen Legierungen hohe Werte erreichen. Darüber hinaus sind noch andere Beispiele für Umweltauswirkungen bekannt, die ihre Ursache in der Selenkontamination haben.¹⁰⁹

Der Aufbau des in Nutzung befindlichen Selenvorrats begann in den 1940er Jahren mit dem Aufkommen von Selengleichrichtern, die in Radio- und Fernsehgeräten, Batterieladegeräte und verschiedenen industriellen Produkten Anwendung fanden (Abb. 14). Aufgrund der Entwicklung kostengünstigerer Siliziumgleichrichter wurden weniger Selengleichrichter nach den 1980er Jahren gebaut und Ende der neunziger Jahre fast vollständig durch Silizium ersetzt. Abb. 14 zeigt, dass der gesamte in Nutzung befindliche Selenbestand in den 1970er Jahren ein Maximum von ungefähr 4,5 tausend Tonnen erreichte. Diese Bestandsspitze entstand durch einen noch hohen Gleichrichteranteil und durch die zunehmende Verwendung von Selen-Photorezeptoren in Fotokopierern. Diese zweitgenannte Anwendung führte Mitte der neunziger Jahre zu einem zweiten, aber niedrigeren Spitzenwert des Selenbestandes (circa 3,9 tausend t). Seitdem wurde Selen in Photorezeptoren weitgehend durch organische Fotoleiter und amorphes Silizium ersetzt und es begann der Selenbestand zu sinken und ist heutzutage praktisch unbedeutend.

¹⁰⁹ [KAVL2013], p.21.

¹¹⁰ aus [KAVL2013], p.21.

Umrechnung: 1 tausend metrische Tonnen (tt) = 1 Giga Gramm (Gg) = 1.000 Mega Gramm (Mg)

Stark an Bedeutung für die Selenutzung gewinnen die CIGS- und CIS-Solarzellen, deren Lebensdauer mit 25 Jahren geschätzt wird (siehe auch Kap. 5.7, S.194). Relevante Mengen früher erzeugter CIGS-Solarzellen werden daher erst in einigen Jahren als anthropogene Selenquellen zur Verfügung stehen können. Für das Selenrecycling muss auf größere Mengen gewartet werden, um es wirtschaftlich rechtfertigen zu können. Der kumulierte Abfluss aus dem in Nutzung befindlichen Selenbestandes betrug über den betrachteten Zeitraum von siebzig Jahren ungefähr 25 tausend t. Die Studie geht davon aus, dass die Hälfte dieser Menge voraussichtlich recycelt und die andere Hälfte deponiert werden wird. In Zukunft hängt die Rückgewinnung von Selen vom Bemühen ab, der Rückgewinnung und dem Recycling von Selen besondere Priorität einzuräumen.¹¹¹

2.8. Unterschiede zwischen Kupfer- und Selenzyklus

Obwohl Selen gemeinsam und praktisch ausschließlich als Nebenelement bei der Kupfererzeugung gewonnen wird, unterscheiden sich die Zyklen der beiden Metalle ganz erheblich. Während der Kupferzyklus in hohem Maße geschlossen ist und geschätzte 85% des im Laufe der Menschheitsgeschichte abgebauten und genutzten Kupfers nach wie vor verwendet wird, ist Selen äußerst dissipativ. Über zwei Drittel (68% des in Nutzung befindlichen Selen von 1940 bis 2010) des primär erzeugten Selen ging verloren. Wenngleich diese Tatsache aus den – vor allem früheren – Anwendungsgebieten für Selen nachvollziehbar erscheinen könnte, ist es bemerkenswert, dass sich dieser Trend über die Zeit zu verstärken scheint. Das hat den Hintergrund, dass aktuell Selen vermehrt in Photovoltaikzellen Verwendung finden und diese in Solarpanelen für die nachhaltige Energieproduktion eingesetzt und somit für viele Jahre produktiv gebunden sind.

Der in dieser Arbeit unternommene Versuch, die Vorräte von Selen mit höherer Genauigkeit zu erfassen und allfällige Versorgungsengpässe sichtbar zu machen, ist durch die geringe Recyclingquote von Selen umso sinnvoller und notwendiger. Jedoch entbinden diese Ergebnisse nicht von der Aufgabe, Verbesserungen zur Verringerung der Dissipation einzuleiten, könnten aber den Spielraum vergrößern.

111 ebd.

3. International bzw. national geläufige Methoden zur Ressourcenerfassung

3.1. Prinzipien der Lagerstättenaufsuchung und Vorratsklassifikation

3.1.1. Lagerstättenforschung und Ressourcenbewertung

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt in der Bewertung der Vorräte von Nebenelementen am Beispiel von Selen. Die Lagerstättenerkundung ist wirtschaftlich zumeist auf den Hauptrohstoff gerichtet und Begleitelemente spielen, wenn überhaupt, erst später eine Rolle. In diesem Kapitel werden die wirtschaftlich bedeutenden und anerkannten Vorratsklassifikationssysteme analysiert und gegenübergestellt. Werden qualifizierte Vorratsangaben für weitere wissenschaftliche Untersuchungen herangezogen, ist die Qualität der Bewertungen von Interesse. Angaben, die aus unterschiedlichen Klassifikationssystemen resultieren, müssen konvertiert und somit vergleichbar gemacht werden. Dazu ist die Kenntnis der Systematik, aber auch die Entwicklung des jeweiligen Klassifikationssystems und die dahinterliegende Motivation hilfreich. Im Folgenden wird daher auf die Entwicklung der Klassifikationssysteme und deren Prinzipien eingegangen. Am Kapitelende befindet sich eine Zusammenfassung, die die Eigenschaften, Stärken und Schwächen der Klassifikationssysteme mit Bezug auf den bevorzugt prospektierten Rohstoff und die Begleitelemente illustriert.

Die Lagerstättenforschung gliedert sich in vier Abschnitte:

- a. Ermittlung der Verteilung der Elemente auf der Erde
- b. Erforschung der Anreicherungsprozesse, die zu nutzbaren Vorkommen führen
- c. Prospektion und Exploration (Suche dieser Vorkommen)
- d. Untersuchung und Bewertung der Vorkommen

3.1.2. Entwicklung der Vorratsklassifikation

Die ersten Bemühungen zur Entwicklung formaler Berichtssysteme zur Quantifizierung und Klassifizierung von Mineralvorkommen reichen über 100 Jahre zurück. Dies war zunächst auf die Bedürfnisse der Minenbetreiber zurückzuführen, die an verlässlichen Schätzungen Interesse hatten, um die Produktionsmengen abschätzen zu können. Durch die Störungen der Transportwege

in Folge der Weltkriege, sahen westliche Regierungen die Notwendigkeit zur Bewertung strategischer Metallagerstätten, um den Eigenversorgungsgrad mit mineralischen Rohstoffen in Krisenzeiten für die industrielle Produktion abschätzen zu können. Es wurden Kategorien erstellt, um das zusätzliche Rohstoffpotential zu quantifizieren, die zu Reserven wurden. Begriffe wie hypothetische und unentdeckte Ressourcen wurden entwickelt. Kapitalmärkte wurden in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts Opfer von betrügerischen Offenlegungen von Mineralvorkommen durch Explorationsunternehmen.

Mit der Entwicklung der Globalisierung gab es zahlreiche Berichterstattungen, die inakzeptable Praktiken transparent machten und die 1969 in einen Skandal (Poseidon Nickel boom and bust) in Australien mündeten.¹¹² Dieser Vertrauensverlust hatte die Forderung der australischen Bergbauindustrie nach geeigneten Standards für die Berichterstattung zur Folge. Es wurde 1971 das *Joint Ore Reserve Committee* (JORC)¹¹³ mit dem Ziel gegründet, Empfehlungen und Richtlinien für die öffentliche Berichterstattung zu entwickeln. Die erste Version des „Australasian Code for Reporting of Identified Mineral Resources and Ore Reserves“ (JORC Code) wurde 1989 publiziert.

Dennoch reichten die Bemühungen nicht aus. Es erschütterte der waghalsigste und sorgfältig durchgeführte Schwindel der Bergbaugeschichte die Branche. Im Bre-X-Skandal (1995-97) wurden die verwendeten Gesteinsproben massiv und systematisch verfälscht, um so die größte jemals entdeckten Gold-Lagerstätten zu der Welt vorzutäuschen.¹¹⁴

Staatliche Wertpapieraufsichtsbehörden drängten folglich auf die Entwicklung von glaubwürdigen Berichtcodes (z. B. SEC Industry Guide 7: 1981; JORC 1989; SAMREC 1994, CIM 2000).¹¹⁵ Um internationale Anerkennung der Ressourcen- und Reserven-Definitionen zu erreichen, haben Australien, die USA, Kanada, Südafrika und Großbritannien ihre bestehenden Berichtstandards abgeändert oder sie führten neue Klassifikationssysteme in den späten 1990er Jahren ein. Die Zusammenarbeit mit den Vereinten Nationen hat zu einer allgemeinen Akzeptanz der übereinstimmenden Definitionen geführt. Das Londoner Institute of Materials, Minerals and Mining (IMMM) hat gemeinsam mit der European Federation of Geologists (EFG) und dem irischen Geologieinstitut (IGI) einen gemeinsamen Reporting Code (Code for Reporting of Mineral Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves) 2001 erstellt. Die Geological Society of London (GSL) hat diesen Code 2002 angenommen. Damit basieren diese Codes auf einem gemeinsamen Konzept und verwenden nahezu identische Definitionen; Unterschiede gibt es nur in Details.

¹¹² <http://www.jorc.org/history.asp> (09.01.2012)

¹¹³ <http://www.jorc.org/history.asp> (09.01.2012)

¹¹⁴ <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/bre-x-und-der-goldschwindel-von-borneo> (09.01.2012)

¹¹⁵ [CIM2010], p.5.

Repräsentative Organisationen aus den wichtigsten westlichen Bergbauländern haben allgemein vereinbart, dass es nur drei Kategorien von mineralischen Ressourcen geben sollte (measured, indicated, inferred) und zwei Kategorien von mineralischen Reserven (proven, probable). Dies wurde 1997 mit der „Denver Übereinstimmung“ vereinbart. Die Akzeptanz der Standardterminologie mag einfach gewesen sein. Doch die Herausforderung für das 21. Jahrhundert besteht darin, die Industrie und Staaten als weltweit zustimmenden Partner zu gewinnen. In den letzten Jahren hat es eine spürbare Bewegung in diese Zielrichtung in der EU gegeben. Dies spiegelt sich teilweise in den aktualisierten Berichtscodes von JORC, CIM, SAMREC und PERC wider, ebenso auch in der Entwicklung der CRIRSCO International Reporting Templates.¹¹⁶

Diese modernen Berichtscodes basieren größtenteils auf diesen Definitionen und Richtlinien, und sie geben der „kompetenten Person“ (competent person) Spielraum, um ihr professionelles Urteilsvermögen einzusetzen und die Definitionen der Ressourcen- und Reservekategorien anzuwenden. Obwohl die aktualisierten Berichtscodes alle eine klare Unterscheidung zwischen einem „mineral inventory“ und einer „mineral resource“ treffen, gibt es erhebliche Meinungsverschiedenheiten über das Minimum technischer und wirtschaftlicher Informationen, die erforderlich sind, um eine angemessene Bewertung zu ermöglichen.¹¹⁷

3.1.3. Interessentengruppen

Die Vorratsklassifikation richtet sich hauptsächlich an folgende Zielgruppen:

- a. Bergbaugesellschaften und Bergbaubetriebe
 - Einzelne Betriebe für die Bewertung ihrer Produktion (Weiterentwicklung der Exploration, Kapitalaufbringung)
 - Bergbaugesellschaften und Konzerne für die Erfassung und Klassifizierung ihrer gesamten Vorräte (Langzeitplanung, Investitionsplanungen, Betriebserweiterung)
 - für strategische Planungen und Investitionsentscheidungen
 - zur Beobachtung der Vorratssituation der Mitbewerber
 - zur Beobachtung der Vorratsentwicklung in einzelnen Regionen, Ländern und global zur Analyse des Angebotes
- b. Investoren und Banken
 - zur Entscheidung über die Finanzierung von Bergbauprojekten
 - für Anleger und Aktionäre (Rendite, Sicherheit, Spekulation)
 - für Börse Verantwortung als Verantwortung für den Marktplatz, Festlegung von Zugangsregelungen und Reporting
 - zur Abschätzung von Risiken, Chancen und Potenzial

¹¹⁶ [CIM2010], p.5.

¹¹⁷ [CIM2010], p.6.



Abb. 15: Die Beziehung und Abhängigkeiten der Hauptinteressengruppen (Stakeholder) der Vorratsklassifikation (Reporting Codes)

- c. Behörden und internationale Organisationen
 - Staatliche Organisationen: Sicherstellung der nationalen Rohstoffproduktion und -versorgung durch geeignete Rahmenbedingungen:
Entwicklung nationaler Klassifikationssysteme und Rohstoffpläne
 - Internationale Organisationen: Sicherstellung der Versorgung weltweit:
Entwicklung globaler Klassifikationssysteme

Die Vorratsklassifizierung (Reporting Code) bildet eine grundlegende, standardisierte Basis für alle weiteren Aktivitäten, wie Exploration, Finanzierung, Reporting oder Verkaufs- oder Übernahmestrebungen. Abb. 15 veranschaulicht die Beziehung und Abhängigkeiten der Hauptinteressengruppen für die ein einheitlicher Reporting Code (Klassifizierung) und klare Kapitalmarktregeln essenziell sind.

3.1.4. Anforderungen an Klassifikationssysteme

Die Klassifikation muss mindestens folgende **Grundprinzipien** erfüllen:

- a. Allgemeinverständlichkeit (Nachvollziehbarkeit nicht nur für Experten und Geologen, wie sicher die Schätzung ist)
- b. Einheitlichkeit (klare Definitionen)
- c. möglichst breite Akzeptanz (von möglichst vielen Interessengruppen und Organisationen anerkannt)

Vorratsklassifikationen sind immer Momentaufnahmen und geben Abschätzungen wieder. Um die Schätzungen möglichst genau vornehmen zu können, ist die Einhaltung folgender Kriterien relevant:

- a. Erkundungsgrad (Nachvollziehbarkeit der Methode der geologischen Betrachtung („Wie sicher ist die Schätzung?“))
- b. Wirtschaftlichkeit („Rechnet sich der Abbau?“)
- c. Bewertungsstadium (handelt es sich um eine neu zu erschließende Lagerstätte (Greenfield Projekt = lediglich „Prospektion“), oder um ein „advanced Projekt“ = bereits exploriert). Ein Abbau muss in diesem Stadium noch nicht erfolgen.

3.1.5. Prinzipien von universellen Standards und Codes

Die Hauptprinzipien aller genannten Codes sind Transparenz (*Transparency*), Vollständigkeit (*Materiality*) und Kompetenz (*Competency*).¹¹⁸

Transparenz im Sinne dieser Definition bedeutet, dass der Bericht öffentlich ist und ausreichende, klare sowie unzweideutige Informationen zur Verfügung stellt, die allgemein verständlich, nachvollziehbar und begründbar sind.

Vollständig ist der Bericht dann, wenn der öffentliche Report eine umfassende Darstellung aller relevanten Informationen beinhaltet, die für Investoren, Berater und Experten vernünftiger Weise benötigen, um nachvollziehbare und ausgewogene Beurteilungen betreffend der Explorationsergebnisse und der mineralischen Reserven und Ressourcen treffen zu können (Abb. 16 (links)).

Kompetenz bedeutet, dass der Bericht auf einer Arbeit einer qualifizierten und in diesem Bereich erfahrenen Person beruht, die sich verpflichtenden und einklagbaren Standesregeln (rules of conduct) unterwirft und sich öffentlich zu einer klaren ethischen Verhaltensweise (professional code of ethics) bekennt. Eine solche „*Competent Person*“¹¹⁹ muss Mitglied in einer professionellen und dafür anerkannten Organisation sein, die die Einhaltung der Standesregeln überwacht und durchsetzt. Es ist dafür eine Erfahrung auf dem Gebiet der Beurteilung von mineralischen Erzlagerstätten von mindestens fünf Jahren erforderlich. Soll ein Aufsuchungsbericht erstellt werden, hat diese Person Erfahrung im Explorationsbereich nachzuweisen. Wenn die kompetente Person Abschätzungen über mineralische Ressourcen oder Reserven durchführt oder überwacht, sind Erfahrungen in der Beurteilung und Bewertung von Lagerstätten und deren Abbau erforderlich. Diese „kompetente Person“ muss öffentlich namhaft gemacht werden und ist für den Bericht verantwortlich, jedoch nach derzeitiger Rechtslage nicht haftbar (z.B. gegenüber einem Anleger).

¹¹⁸ CRIRSCO-Template (2006) p.3

¹¹⁹ CRIRSCO-Template (2006) p.5

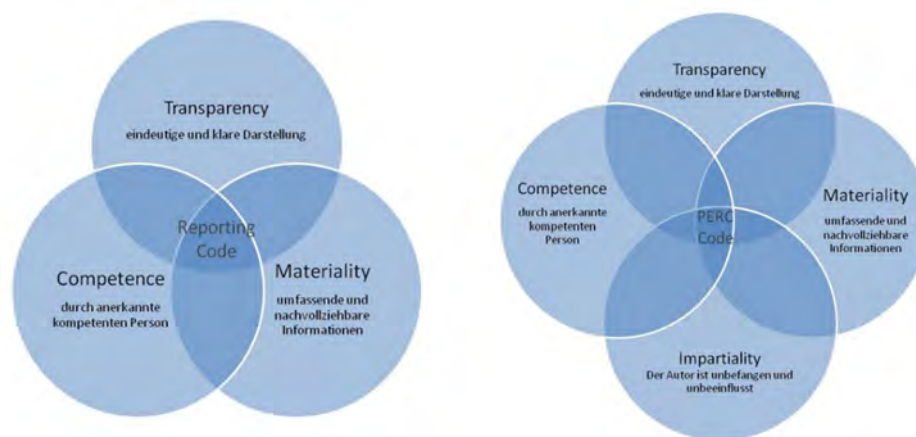


Abb. 16: Prinzipien von Reportingcodes:

Links: Universelle Mindeststandards für Klassifizierungssysteme

Rechts: Der PERC-Code verpflichtet darüber hinaus zum Prinzip der Überparteilichkeit.

Der europäische PERC Reporting Code hat die grundlegenden Prinzipien um den Punkt der Unparteilichkeit (*Impartiality*) erweitert (Abb. 16 (rechts)). Unparteilichkeit setzt voraus, dass der/die Verfasser/in des öffentlichen Berichts ohne Einschränkung bestätigen kann, dass seine/ihre Arbeit nicht von der Organisation, dem Unternehmen oder der Person beeinflusst wurde, die den Auftrag für den Bericht erteilt hat. Das Prinzip umfasst darüber hinaus, dass alle Annahmen dokumentiert und alle wesentlichen Aspekte offengelegt sind, einschließlich aller relevanten direkten oder indirekten Beziehungen (wie Beschäftigung oder Besitz von Aktien) zwischen der kompetenten Person und den Eigentümern des Projekts.¹²⁰ Dieses Prinzip ist in dieser Form ein Alleinstellungsmerkmal vom PERC-Code und findet sich nicht in den Kodifizierungen von CRIRSCO, JORC oder SAMREC.

¹²⁰ [PERC2017], p.4, lit 2.14.

3.1.6. Modifying Factors

Die oben erläuterten sind die wichtigsten Parameter für wirtschaftsgeologische Bewertungen einer Lagerstätte die Quantität und Qualität der mineralischen Ressource bzw. Reserve. Darüber hinaus sind aber eine Fülle komplexer geologischer, geotechnischer, berg- und verfahrenstechnischer, rechtlicher, juridischer, ökonomischer, sozialer und umweltrelevanter Faktoren („Lagerstättenbonität“ (FETTWEIS 1997)¹²²) zu berücksichtigen. Diese Faktoren bestimmen, welcher Teil einer Ressource sich als bauwürdig einstufen lässt.

Diese Faktoren werden „**Modifying Factors**“¹²³ genannt und berücksichtigen umfassend die Gesichtspunkte beim Abbau (Abb. 18).

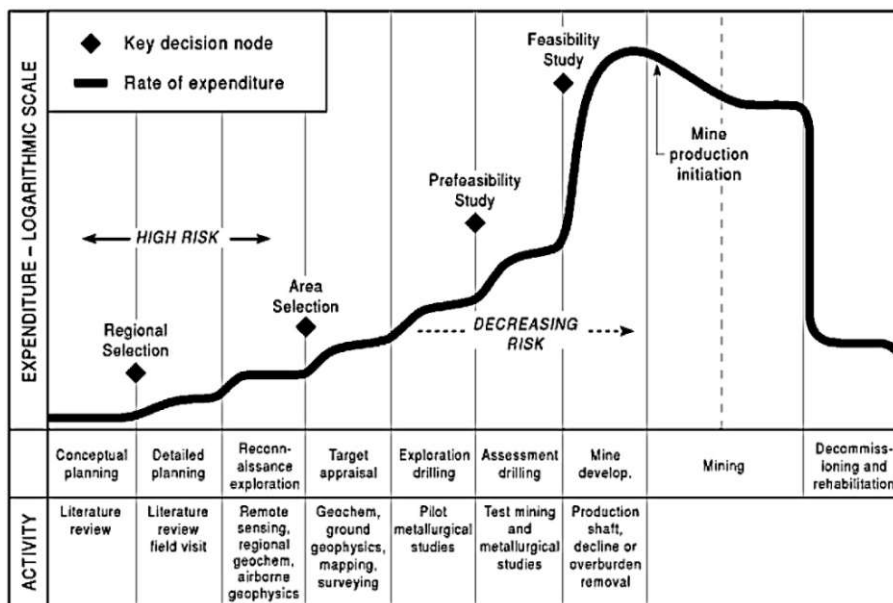


Abb. 17: Phasen eines Aufsuchungsprojekts (stages of an exploration project)¹²¹

¹²¹ [MOON2006], Moon, Introduction to Mineral Exploration, 2010, p.52

¹²² FETTWEIS, 1997 in [WEBE1997], S.19-41.

¹²³ vgl. Kap. 4.6.4

3.1.7. Der Entscheidungsprozess zur Lagerstätten erkundung

Ein Aufsuchungsprojekt teilt sich in verschiedene Phasen, die mitsammen verknüpft sind. Mit – oft stark – steigenden Investitionen gehen in der Regel sinkende Projektrisiken einher (Abb. 17). Gestartet wird mit der Planungs- und Erkundungsphase, die die Grundlage über Kaufentscheidung des Lagerstättengrundes bildet. Währenddessen werden die Rohstoffarten, die Lagerstättentypen, die möglichen Aufsuchungsmethoden und die Organisation festgelegt. Es folgt die Prefeasibility-Phase, in der die Probebohrziele definiert werden. Verläuft diese Analyse positiv, wird die Machbarkeitsstudie (Feasibility Study) durchgeführt.

Je nach Ergebnis der einzelnen Phasen erfolgt die Entscheidungsfindung (Abb. 19), ob aus **Vorräten**¹²⁵ Ressourcen oder Reserven werden können. Zur Minimierung der Risiken ist ein enges Zusammenspiel von geologischer Analyse, der möglichen Abbaumethoden und der Aufbereitungsprozesse erforderlich. Jeder Gewinnungsanalyseschritt ist dynamisch verknüpft mit der geologischen Analyse, die zur Beurteilung der verfügbaren Ressourcen führt. Dafür stehen eine

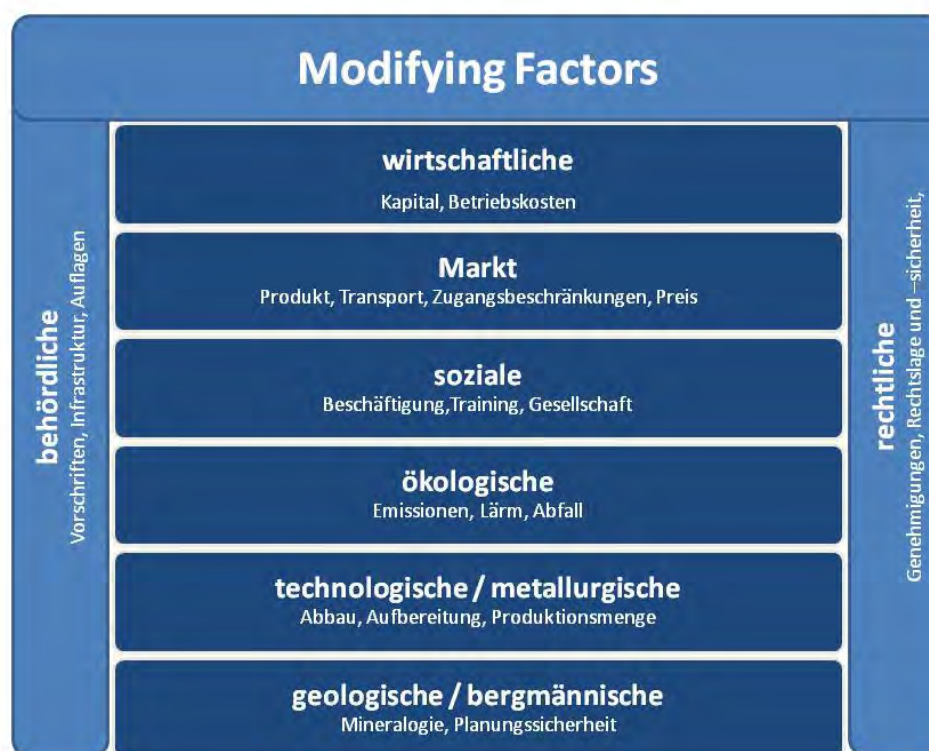


Abb. 18: Modifying Factors¹²⁴

¹²⁴ Darstellung vom Autor, angelehnt an CRIRSCO-Template (2006), p.7

¹²⁵ Der Begriff „**Vorrat**“ bezeichnet nur jene Mengen, die in absehbarer Zukunft von wirtschaftlichem Interesse sein können, also (bedingt) abbauwürdig sind. Lagerstätten **vorräte** sind eine Teilmenge der **Vorkommen** des jeweiligen Rohstoffs. (Vgl. [WEBE1997]: Leopold Weber: Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs (S.21).)

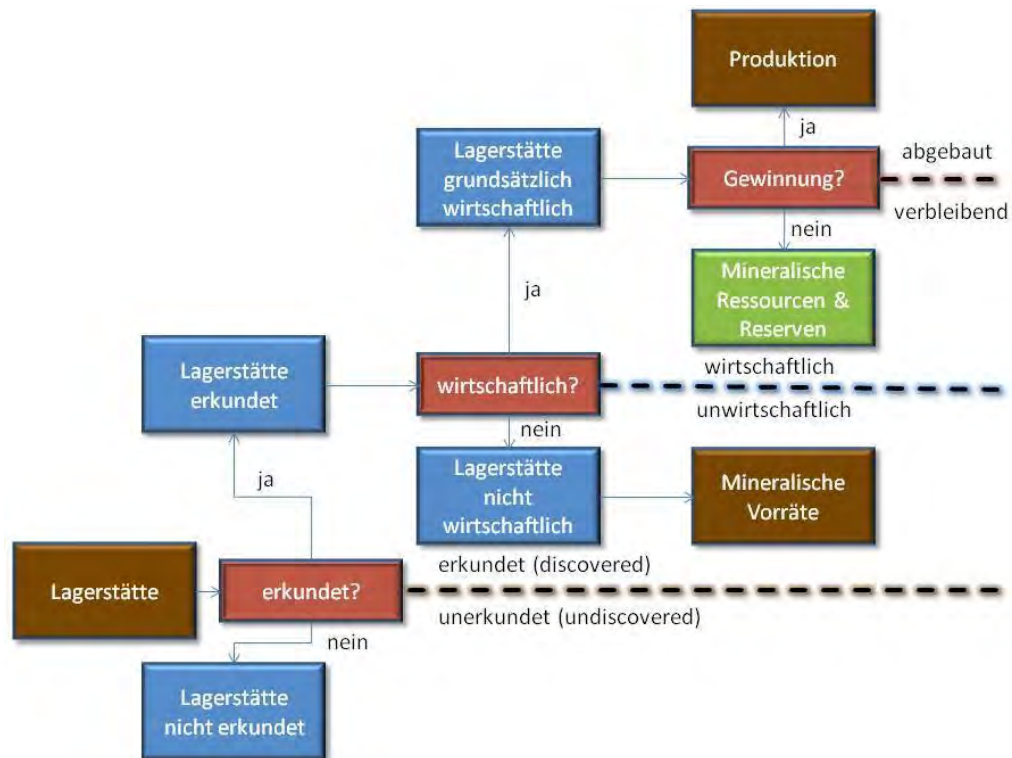


Abb. 19: Der Entscheidungsprozess zu den Ressourcen und Reserven

Vielzahl an Untersuchungsmethoden zur Verfügung (Abb. 20). Dabei ist es für eine robuste, risikominimierende Schlussfolgerung entscheidend, dass die geologische Interpretation, die Modellierung, die geotechnische Entwicklung und die Abbauplanung nicht voneinander isoliert erfolgen. Die sich ergebenden Erkenntnisse befruchten sich gegenseitig und es kommt zwangsläufig zu Iterationsschritten. Je mehr Informationen während der Abbauphase systematisch erfasst werden und diese in die geologischen Modelle eingearbeitet werden, desto besser kann die Klassifizierung von Ressourcen (und Reserven) erfolgen und das Gesamtprojekt – auch betriebswirtschaftlich – optimiert werden.¹²⁶

Zusammenfassend sollte immer im Bewusstsein bleiben, dass eine **Vorratsklassifikation** immer eine **Momentaufnahme** (ähnlich einer Unternehmensbilanz) ist und letztendlich immer nur auf einer **Schätzung** beruht.

¹²⁶ McCuaig, Dynamic Links Between Geology and the Mining Process, p.12ff in: [MOON2006], Moon, Introduction to Mineral Exploration, 2010, p.198ff, p.244

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Dissertation ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this doctoral thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

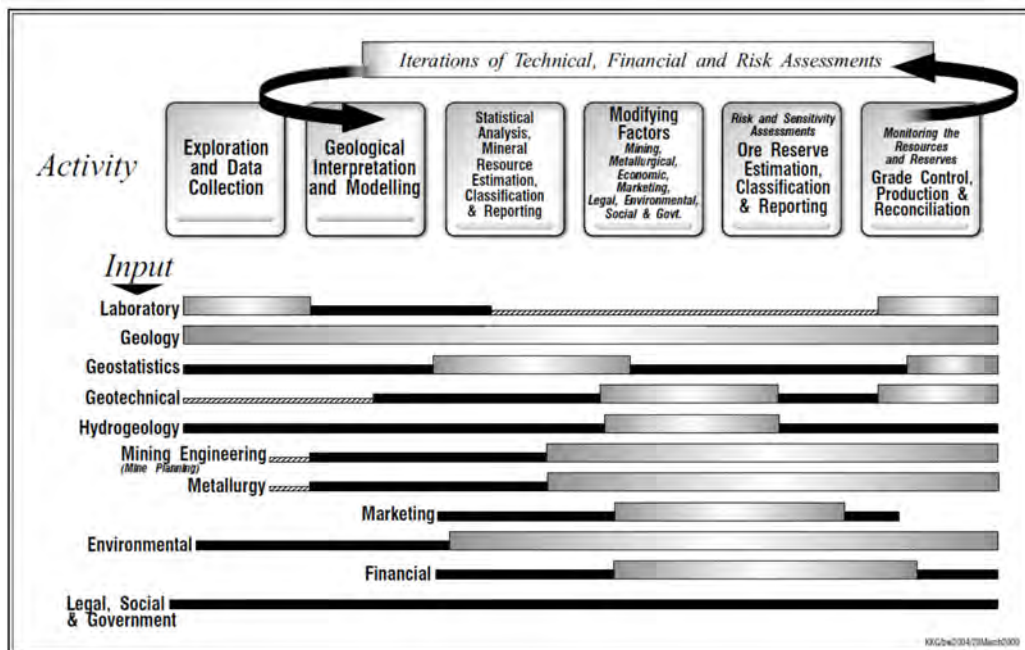


Abb. 20: Der Beurteilungsprozess von Lagerstätten¹²⁷

¹²⁷ McCuaig, Dynamic Links Between Geology and the Mining Process, p.15

3.2. CRIRSCO-Berichtssysteme, Codes und Richtlinien

3.2.1. Entwicklung

Seit den 1980er Jahren gab es mehrere Versuche, „Berichtssysteme“ und „Codes“ zu entwickeln, um die verschiedenen Kategorien von Ressourcen und Reserven zu definieren und mineralische Rohstoffvorratsmengen zu zertifizieren. Die bestehenden Klassifizierungssysteme für mineralische Ressourcen und Reserven wurden von Regierungen und wissenschaftlichen Organisationen, wie dem US-Bureau of Mines und dem US Geological Survey (USGS), der Russischen staatlichen Kommission für Mineralressourcen (GKZ), dem chinesischen Bewertungszentrum für Mineralressourcen und Reserven usw. entwickelt.¹²⁸

Alle diese Systeme sollten die identifizierten wirtschaftlich und nichtwirtschaftlich gewinnbaren mineralischen Rohstoffen klassifizieren und die potenziellen Vorräte eines Lagerstättenprojekts für die nahe Zukunft identifizieren. Klassifizierungs-codes für Primärressourcen basieren in der Mehrheit auf die von McKelvey 1972 definierten Unterteilungen (vgl. Abb. 4).¹²⁹ Diese Kriterien differenzieren mineralische Ressourcen in Gruppen von Rohstoffen mit mehr oder weniger begründeter Aussicht auf wirtschaftliche Gewinnung auf Basis aktueller Erkenntnisse und Daten. Nach dieser Grunddefinition sind mineralische *Reserven* solche Vorkommen, die unter gegenwärtigen Bedingungen wirtschaftlich abbaubar sind. Dies ist immer eine Momentaufnahme, da äußere Faktoren wie etwa die Förder- und Aufbereitungstechnologien, Markt und Preise, Rechtlage, politische Gegebenheiten, Stand der Explorationsarbeiten etc. die Grenzen zwischen Ressourcen und Reserven verändern.

In den 1990er Jahren übernahmen australische und US-amerikanische Geologen und Bergbauexperten die Führung bei der Ausarbeitung eines Kodex für die Berichterstattung über Explorations- und Bergbauergebnisse mit dem Ziel, (potenzielle) Investoren mit vertrauenswürdigen Daten zu informieren. Viele Bergbau- und Geologie-Verbände in Kanada, Südafrika, Europa und Lateinamerika folgten und es wurden auf dieser Basis nationale Codes ausgearbeitet. 1997 wurde ein Ausschuss für internationale Berichtsstandards für mineralische Rohstoffe („Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards“ - **CRIRSCO**) eingerichtet, der Teil des Council of Mining and Metallurgical Institutes (CMMI) ist. Das Hauptziel war, die bestehenden Kodizes und Richtlinien für die Offenlegung zu vereinheitlichen und zusammenzuführen.¹³⁰

¹²⁸ <https://www.micon-international.com/ru/mineral-resource-reporting-differences-between-cim-jorc-and-others/> (13.05.2020)

¹²⁹ [MCKE1972]

¹³⁰ ebd.

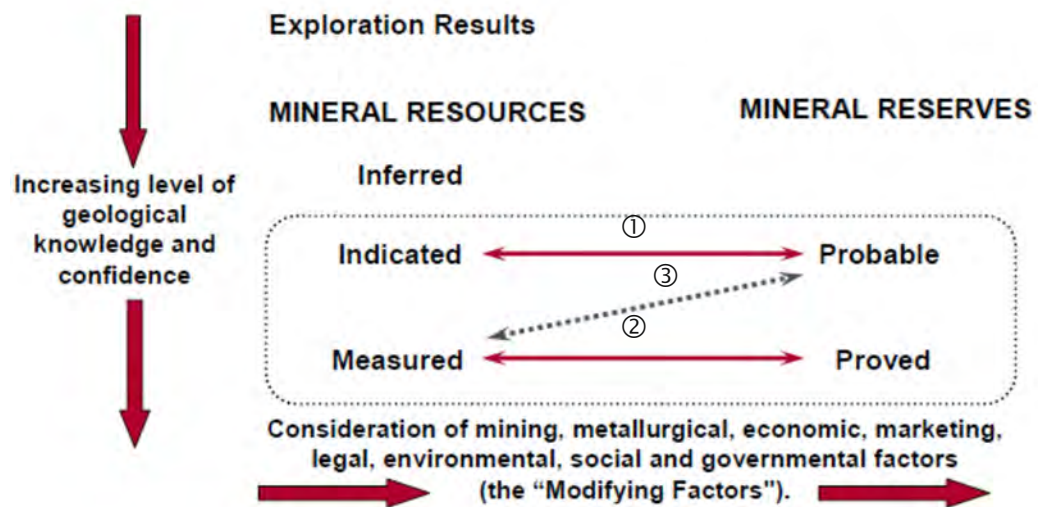


Abb. 21: Allgemeine Beziehung von Explorationsergebnissen, mineralischen Ressourcen und mineralischen Reserven¹³¹

- ① Für diesen Übergang ist eine „Pre-Feasibility-Study“ nötig
- ② Für diesen Übergang ist eine „Feasibility-Study“ erforderlich
- ③ Auch eine direkte Ab- und Aufwertung ist grundsätzlich möglich, entsprechend des Ergebnisses der Untersuchungen.

Im selben Jahr einigten sich die Teilnehmer (der „Denver Accord“) auf die Beschreibung und Definition von Explorations- und Bergbauprojekten. Das 2012 veröffentlichte Update von CRIRSCO (2012) enthält Definitionen der folgenden Begriffe: Öffentlicher Bericht, kompetente Person, Änderungsfaktoren, Explorationsziel, Explorationsergebnisse, Mineralressource, abgeleitete Ressource, angezeigte Ressource, gemessene Ressource, Mineralreserve, wahrscheinliche Reserve, nachgewiesene Reserve und (Pre-)Machbarkeitsstudie. Es wurde beschlossen, mineralisiertes Material in zwei Hauptkategorien einzuteilen: in mineralische Ressourcen und Reserven. Jede Kategorie verfügt über Unterkategorien, wie gemessene, angezeigte und abgeleitete Mineralressourcen sowie nachgewiesene und wahrscheinliche Mineralreserven. Die Angaben basieren auf Analysen der Wirtschaftlichkeit und dem geologischen Vertrauen (siehe Abb. 21). In der neuesten Fassung vom November 2019 wurden die Codes und Standards weitgehend konsistent und auf die nationalen Codes der Mitglieder vereinheitlicht abgestimmt.¹³²

¹³¹ [CIM2010], CIM Special Volume 56, Mineral Resource/Reserves and Valuation Standards, CIM, Westmount, Quebec, 2010, p.48; CRIRSCO-Template (2006) p.8

¹³² [CRIR2019] | http://www.crirSCO.com/templates/CRIRSCO_International_Reporting_Template_November_2019.pdf (06.12.2020)

3.2.2. CRIRSCO Mitglieder

Die CRIRSCO-Mitglieder haben ihre jeweiligen nationalen Berichtsstandards, die der CRIRSCO-Vorlage sehr nahekommen. Einige von ihnen verfügen jedoch über eine andere nationale Reserve- und Ressourcenklassifizierung für die Berichterstattung an die Regierung bzw. Behörde. Die CRIRSCO-Codes können keinen anderen Kodex, Berggesetze oder sonstige Vorschriften auf nationaler oder regionaler Ebene ändern, ersetzen oder für ungültig erklären.

Aktuelle **CRIRSCO-Mitglieder** und ihre Berichtscodes sind:¹³³

- Australia and Australasia — JORC Code (2012) — the Australian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC)
- Brazil — CBRR Guide — Brazilian Resource and Reserve Commission
- Canada — CIM Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves (CIM)
- Chile and Peru- Commission Minera de Chile (2004) Certification Code for Exploration Prospects, Mineral Resources and Ore Reserves
- Europe and United Kingdom — PERC Code — Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC)
- Kazakhstan — KAZRC — Kazakhstan Reporting Code
- Mongolia — MRC Code (2014) — Mongolian Code for Public Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves
- Russia — NAEN Code — Russian Code for the Public Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves
- South Africa — SAMREC (2016) -the South African Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves (SAMREC)
- United States — SME Guide for Reporting Exploration Results, Mineral Resources, and Mineral Reserves has been adopted by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc. (SME) in the USA

¹³³ [MCKE1972]

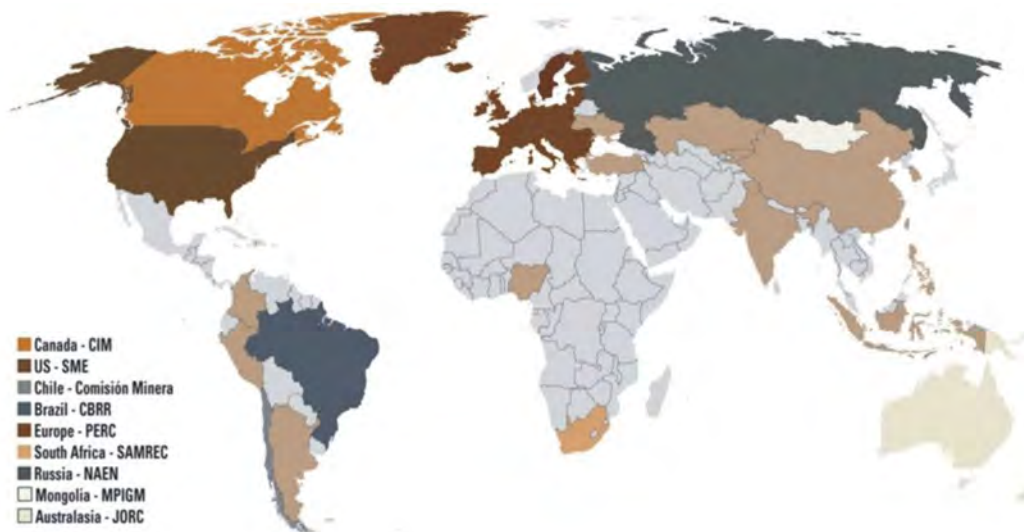


Abb. 22: Die weltweite Verbreitung des CRIRSCO Standards durch übereinstimmende (compliant) Berichts-Kodizes¹³⁴

3.2.3. Standards und Definitionen

Die Kodizes der CRIRSCO-Mitglieder legen die Mindeststandards für die öffentliche Berichterstattung über Explorationsergebnisse, Mineralressourcen und Erzreserven fest. Sie bieten ein obligatorisches System zur Klassifizierung von Tonnage- / Gehaltsschätzungen nach dem geologischen Vertrauen und technischen / wirtschaftlichen Erwägungen. Der Code fordert, dass öffentliche Berichte auf Arbeiten einer kompetenten Person basieren und beschreibt die Qualifikationen und die Art der Erfahrung, die erforderlich sind, um als kompetente Person anerkannt zu sein. Das System bietet umfassende Richtlinien zu den Kriterien, die bei der Erstellung von Berichten über Explorationsergebnisse, Mineralressourcen und Erzreserven zu berücksichtigen sind. Dieser Standard ist für alle Bergbauunternehmungen, die an der australischen und neuseeländischen Börse notiert sind, bindend.

Das CRIRSCO-Template legt jedoch nicht die Verfahren, mit denen kompetente Personen mineralische Rohstoffressourcen und Erzreserven schätzen und klassifizieren, fest. Es werden auch keine Vorgaben über die internen Klassifizierungs- oder Berichtssysteme von Unternehmen gemacht. Der Standard legt auch keine Sanktionen für Verstöße gegen den Kodex durch Unternehmen oder Personen fest.

Der Code stellt klar, wie die Ausweisung von Mineralressourcen und Erzreserven zu erfolgen haben, da oftmals Unsicherheiten bestehen, ob die **Mineralressourcen** die **Erzreserven** einschließen oder addiert werden müssen. Gemäß JORC und dem CRIRSCO-Template bestehen beide

¹³⁴ [MINL2019], p.6.

Angaben **unabhängig** voneinander und sind **nicht zu addieren**. Große Unterschiede in den Mengenangaben von Ressourcen und Reserven können ein Hinweis darauf sein, dass nicht alle Ressourcen den Anforderungen nach angemessener Prospektion für die geplante wirtschaftliche Gewinnung gemäß dem Standard genügen.

Das Template schreibt in Anlehnung an den JORC-Code fest, dass die relevanten Informationen zur Probenahme beschrieben werden, wie z. B. die Bohr- und Probenentnahmedichte, die Methode und Angaben zur Qualität. In den Berichten über Ressourcen und Reserven müssen alle Bewertungskriterien erwähnt werden, für die unzureichende oder minderwertige Daten vorliegen, die die Schätzung oder Klassifizierung der Mengenangaben wesentlich beeinflussen.

Der Grundsatz, dass die in den veröffentlichten Berichten angegebenen Ressourcen und Reserven Schätzungen sind, wird allgemein akzeptiert, jedoch werden keine Vorschriften erlassen, wie die Schätzungen zu erfolgen haben. Es wird weder die zu verwendende Methode noch die erforderliche Genauigkeit oder Präzision von Schätzungen definiert.

Es wird jedoch vorausgesetzt, dass die zuständige kompetente Person („*competent person*“) über ausreichende Erfahrung und Know-how verfügt, um zu wissen, was erforderlich ist. Es ist vor allem die Reputation der gutachtenden Person, die bei Fehlern auf dem Spiel steht; eine finanzielle Haftung ist nicht vorgesehen. Einige hilfstellende Anleitungen sind in den Definitionen implizit enthalten.

Eine „**Measured Mineral Resource**“ ist der Teil einer Ressource, für den Tonnage, Dichte, Form, physikalische Eigenschaften, Gehalt und Mineralgehalt mit einem hohen Maß an Sicherheit geschätzt werden können. Diese Angabe basiert auf detaillierten und zuverlässigen Explorations-, Probenahme- und Testinformationen, die durch geeignete Techniken an Orten wie Aufschlüssen, Gräben, Gruben, Arbeiten und Bohrlöchern gesammelt wurden. Die Standorte sind eng genug voneinander entfernt, um die geologische Kontinuität und den Metallgehalt bzw. die Wertstoffkonzentration zu bestätigen.¹³⁵

Die Schätzung dieser Kategorie erfordert ein ausgesprochen hohes Maß an Vertrauen in die Lagerstätte sowie Verständnis der Geologie und Bergbau(technik). Das Vertrauen in die Schätzung reicht aus, um die Anwendung technischer und wirtschaftlicher Parameter zu ermöglichen und um eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen. Eine gemessene Ressource hat ein höheres Maß an Sicherheit als eine angezeigte Mineralressource.

Eine „**Indicated Mineral Resource**“ ist der Teil einer Ressource, für den Tonnage, Dichte, Form, physikalische Eigenschaften, Gehalt und Mineralgehalt mit einem angemessenen Maß an Sicherheit geschätzt werden können. Die Angabe basiert auf Explorationserkenntnissen, Probenahme- und Testinformationen, die durch geeignete Techniken an Orten wie Aufschlüssen, Gräben, Gruben, Arbeiten und Bohrlöchern gesammelt wurden. Die Standorte sind zu weit oder

¹³⁵ [JORC2004], Australasian Code for Reporting of Exploration Results, The JORC Code, 2004 Edition, p.8, lit 22. (http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf) (13.08.2011)

unangemessen weit voneinander entfernt, um die geologische Kontinuität und/oder den Grad der Kontinuität zu bestätigen. Sie sind jedoch eng genug beisammen, um eine Kontinuität anzunehmen.¹³⁶ Eine angezeigte Mineralressource hat eine niedrigere Konfidenz als die Angabe für ein gemessene Ressource; sie hat aber ein höheres Maß an Vertrauen als die Angabe einer abgeleiteten Mineralressource.

Eine „**Inferred Mineral Resource**“¹³⁷ ist der Teil einer Ressource, für den Tonnage und Wertstoffkonzentration nur mit geringem Vertrauen geschätzt werden können. Die Angabe wird aus geologischen Beweisen abgeleitet und angenommen, aber nicht geologisch verifiziert. Sie basiert auf Informationen, die durch geeignete Techniken von Orten wie Aufschlüssen, Gräben, Gruben, Arbeiten und Bohrlöchern gesammelt wurden, die möglicherweise begrenzt oder von ungewisser Qualität und Zuverlässigkeit sind.¹³⁸ Eine abgeleitete Mineralressource hat ein geringeres Vertrauensniveau als das für eine angezeigte Mineralressource.

Eine „**Proved Ore Reserve**“¹³⁹ ist der wirtschaftlich abbaubare Teil einer gemessenen Mineralressource. Sie enthält nicht verwertbare Bestandteile oder taubes Gestein und Wertberichtigungen für Verluste, die beim Abbau des Materials auftreten können. Es wurden geeignete Bewertungen und Studien durchgeführt, die die Berücksichtigung und Änderung durch realistisch angenommene bergbauliche, metallurgische, wirtschaftliche, marktbedingte, rechtliche, ökologische, soziale und staatliche Faktoren umfassen. Diese Bewertungen zeigen zum Zeitpunkt der Meldung, dass die Gewinnung vernünftigerweise gerechtfertigt sein könnte („*extraction could reasonably be justified*“).¹⁴⁰

Eine nachgewiesene Reserve repräsentiert die höchste Vertrauenskategorie der Reserveschätzung. Der Art der Mineralisierung oder andere Faktoren könnten aber (dennoch) bedeuten, dass nachgewiesene Erzreserven in einigen Lagerstätten nicht gewinnbar sind.

Eine „**Probable Ore Reserve**“¹⁴¹ ist der wirtschaftlich abbaubare Teil einer angezeigten und unter bestimmten Umständen gemessenen Mineralressource. Sie enthält Verdünnungsmaterialien und Wertberichtigungen für Verluste, die beim Abbau des Materials auftreten können. Es wurden geeignete Bewertungen und Studien durchgeführt, die die Berücksichtigung und Änderung durch realistisch angenommene bergbauliche, metallurgische, wirtschaftliche, marktbedingte, rechtliche, ökologische, soziale und staatliche Faktoren umfassen. Diese Bewertungen zeigen zum Zeitpunkt

¹³⁶ [JORC2004], Australasian Code for Reporting of Exploration Results, The JORC Code, 2004 Edition, p.8, lit 21. (http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf) (13.08.2011)

¹³⁷ übersetzt in etwa: „abgeleitete Mineralressource“

¹³⁸ [JORC2004], Australasian Code for Reporting of Exploration Results, The JORC Code, 2004 Edition, pp.7, lit 20. (http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf) (13.08.2011)

¹³⁹ übersetzt in etwa: „nachgewiesene Erzreserve“

¹⁴⁰ [JORC2004], Australasian Code for Reporting of Exploration Results, The JORC Code, 2004 Edition, p.10, lit 30. (http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf) (13.08.2011)

¹⁴¹ übersetzt in etwa: „wahrscheinliche Erzreserve“

der Berichterstattung, dass die Gewinnung vernünftigerweise gerechtfertigt sein könnte („*extraction could reasonably be justified*“).¹⁴²

Eine wahrscheinliche Erzreserve hat ein geringeres Vertrauen als ein nachgewiesenes, ist aber von ausreichender Qualität, um als Grundlage für eine Entscheidung über die Entwicklung des Bergbaus zu dienen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das CRIRSCO-Template und der dominierende JORC-Code der Notwendigkeit kontinuierlicher Verbesserungen und besseren Überwachung unterliegen. Sie sind für Unternehmungen (Projekte) ausgelegt und *nicht geeignet* für Länderübersichten, wie beispielsweise UNFC.

3.2.4. Der JORC Code (Australien)

In Australien wird der Australasian *Joint Ore Reserves Committee Code* (JORC Code)¹⁴³ angewendet. Er legt die Mindeststandards, Empfehlungen und Richtlinien für die öffentliche Berichterstattung in Australien und Neuseeland für Explorationsergebnisse sowie mineralische Ressourcen und Reserven sowie Erzreserven fest. Es handelt sich dabei um ein verbindliches System zur Klassifizierung von Tonnage- und Klassifikationsschätzungen nach geologischer Kenntnis sowie technischer und wirtschaftlicher Betrachtung.¹⁴⁴

3.2.4.1. Schwächen

Der JORC-Code wurde nach einer Zeit schlechter Berichtsstandards in der Branche geboren und ist das Ergebnis einer Reaktion auf Fehlentwicklungen. Der Code regelt die Mindeststandards und die Berichtsstandards müssten verbessert und stärker überwacht werden.

Der JORC-Code regelt nicht die Verfahren (Methode), die von kompetenten Personen zur Schätzung und Klassifizierung von Mineralressourcen und Erzreserven angewendet werden. Der Kodex gibt keine verbindlichen Regeln, wie unternehmensinterne Klassifizierungs- oder Berichtssysteme gestaltet sein müssen oder sollten.

Ein starker Kritikpunkt ist die fehlende Sanktionierung bei Verstößen, was der Glaubwürdigkeit der Berichte nicht zuträglich ist. Nur die australische Börse zieht Konsequenzen aus Pflichtverletzungen, doch ist dies naturgemäß auf ASX-notierende Unternehmungen beschränkt. Der JORC-Code selbst sanktioniert Zuwiderhandlungen gegen den Kodex nicht. Nicht börsennotierende Unternehmungen können daher nicht durch den Code selbst – jedoch allfälliger Weise

¹⁴² [JORC2004], Australasian Code for Reporting of Exploration Results, The JORC Code, 2004 Edition, p.10, lit 29. (http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf) (13.08.2011)

¹⁴³ <http://www.jorc.org/> (13.08.2011)

¹⁴⁴ Australasian Code for Reporting of Exploration Results, The JORC Code, 2004 Edition, S.2 (http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf) (13.08.2011)

durch andere, landesspezifische Vorschriften – in die Pflicht genommen werden. Competent persons sind durch den Ethikkodex des „Australian Institute of Geoscientists“ (AIG) oder des „Australasian Institute of Mining Engineers“ (AusIMM) oder der jeweiligen „recognised overseas professional organisations“ (ROPOs) verpflichtet.¹⁴⁵

3.2.4.2. Stärken

Der JORC-Code dient als Modell für andere nationale Ressourcen- und Reserven-Kodexes und ist daher wirkmächtig in den Vorgaben, insbesondere für die CRIRSCO-Familie. Als besondere Stärke zu nennen ist seit 1989 die Verbindlichkeit dieses Codes für Unternehmungen, die an der australischen Börse (ASX) notieren. Der Code ist ein Ergebnis von mehr als drei Jahrzehnten an Erfahrung und Kompetenz und diese Kodifizierung wird durch regelmäßige Aktualisierung an die jeweiligen Anforderungen angepasst.

3.2.5. Der CIM Code (Kanada)

Mit den CIM-Definitionsstandards für mineralische Rohstoffe wurden Definitionen und Leitlinien für die Offenlegung von Ressourcen und Reserven sowie Bergbaustudien in Kanada eingeführt, die von öffentlich berichtenden kanadischen Bergbauunternehmen verwendet werden, unabhängig davon, ob sich ihre Lagerstätten in Kanada oder anderswo auf der Welt befinden. Sie wurden 2001 von der kanadischen Börsenaufsicht verabschiedet und in das „National Instrument 43-101“ als Offenlegungsstandards für Mineralrohstoffprojekte (NI 43-101) aufgenommen (s. Kap. 3.4, S.80).¹⁴⁶ Mit der letzten Aktualisierung im Jahr 2014 wurden die CIM-Definitionsstandards für alle öffentlichen Offenlegungen geologischer und technischer Informationen für Mineralexplorations- und Bergbauprojekte an den Grundsätzen und Definitionen der CRIRSCO-Vorlage ausgerichtet. Die Kategorie, der eine Mineralressource (measured, indicated, inferred Resources) oder eine Mineralreserve (proven, probable Reserves) zugeordnet wird, hängt vom Vertrauensniveau der für die Minerallagerstätte verfügbaren geologischen Informationen sowie von der Qualität und Quantität der Lagerstättendaten ab. Weitere Kriterien sind der Detaillierungsgrad der technischen und wirtschaftlichen Informationen, die über die Lagerstätte erkundet wurden und die Interpretation der Daten und Informationen. Das Instrument (NI 43-101) verlangt, dass technische Berichte, die bei der kanadischen Provinz- oder Territorial-Wertpapieraufsichtsbehörden eingereicht werden, bestimmte Offenlegung von Mineralexplorations-, Entwicklungs- und Produktionsaktivitäten erfüllen und soll Hilfestellungen für Investitionsentscheidungen geben.¹⁴⁷

¹⁴⁵ <http://www.jorc.org/competent.asp> (21.05.2020)

¹⁴⁶ <https://www.micon-international.com/ru/mineral-resource-reporting-differences-between-cim-jorc-and-others/> (13.05.2020)

¹⁴⁷ [CIM2010], p.23

Festzustellen ist jedoch der **grundlegende Unterschied zwischen CIM und dem NI**. Das NI 43-101 ist im Gegensatz zum CIM-Code *kein* Klassifizierungsstandard (Resource Code) für Vorräte, sondern ein Berichtskodex (Reporting Code), der den Mindestgrad an Offenlegungspflichten festlegt. Nähere Details sind im Kapitel 3.4 (Seite 80) erläutert.

Zusätzlich gibt es auch eine Begleitrichtlinie, die eine Anleitung zur Hilfestellung ist, aber nicht verbindlich anzuwenden ist. Sie beschreibt die Ansichten der Canadian Securities Administrators (CSA) auf welche Art und Weise bestimmte Bestimmungen von NI 43-101 anzuwenden sind. Diese „Companion-Policy“ verweist auf die CIM-Best-Practice-Richtlinien für die Mineralexploration und die Ressourcen und Reserven, und betont, dass begutachtende „competent persons“ dieser folgen sollten.

3.2.6. Der PERC Code

3.2.6.1. Entwicklung und Standards

In Großbritannien, Irland und West Europa wird der PERC Code als Reporting Standard verwendet.¹⁴⁸ PERC¹⁴⁹ ist die Abkürzung für „**P**an-**E**uropean **C**ode for **R**eporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves“ und wurde vom „Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee“ entwickelt. Dieses permanente Komitee wurde unter der Schirmherrschaft einiger professioneller Organisationen, wie dem Institute of Materials, Minerals and Mining (IoM3), der Geological Society of London (GSL), der European Federation of Geologists (EFG) und dem Institute of Geologists of Ireland (IGI) gegründet und daher ist der Code für ihre jeweiligen Mitglieder bindend.¹⁵⁰ Der PERC Code löste den alten IMMM Reporting Code 2001 ab und wurde von den britischen Finanzmarktaufsicht und einigen Börsen anerkannt.

CRIRSCO hat weiterhin Verbesserungen und Änderungen eingeführt, die in aufeinanderfolgenden Jahrestreffen vereinbart wurden. In den Jahren 2011 bis 2012 wurde eine Reihe gemeinsamer Standarddefinitionen vereinbart, die es allen CRIRSCO-Mitgliedern ermöglichen, identische Formulierungen für die Schlüsseldefinitionen zu verwenden, nicht nur für Ressourcen und Reserven, sondern auch für öffentliche Berichte, Kompetenzkriterien und Machbarkeits- / Pre-feasibility-Berichte.

PERC selbst war von 2006 bis 2011 als informelle Gruppe tätig. Es wurde jedoch sichtbar, dass die weitere Entwicklung einer gemeinsamen europäischen Rolle eine gewisse Formalisierung erfordert. Von 2011 bis 2013 entwickelte ein „acting committee“ die neue Struktur, die PERC

¹⁴⁸ <https://inspire.ec.europa.eu/codelist/ClassificationAndQuantificationFrameworkValue/PERC>

¹⁴⁹ http://www.vmine.net/percreserves/documents/PERC_REPORTING_CODE_jan2009.pdf

¹⁵⁰ http://www.vmine.net/percreserves/documents/PERC_REPORTING_CODE_jan2009.pdf, p.2

eine rechtliche Identität mit einer formalen Beziehung zwischen PERC und seinen Mutterorganisationen verleiht. Es wurde eine strategische Entscheidung getroffen, dass PERC in Brüssel und im Büro einer seiner Mutterorganisationen, der European Federation of Geologists, registriert werden soll. Die Ausgabe 2017 des PERC Reporting Standard ersetzt alle früheren Ausgaben und Standards einschließlich des IMM Reporting Code, des PERC Code, des PERC Standard 2013 und der empfohlenen Regeln für die öffentliche Berichterstattung über Explorationsergebnisse, Durchführbarkeitsstudien und Schätzungen von Mineralressourcen und Mineralreserven in Schweden, Finnland und Norwegen.¹⁵¹

PERC ist das europäische Äquivalent zu JORC in Australasien, des SAMREC in Südafrika und ähnlicher Vorratsmengenstandards in den USA, Kanada, Chile und Russland und mit ihnen ein konstituierendes Mitglied des Komitees für internationale Berichtsstandards für Rohstoff-Reserven (CRIRSCO - www.criirSCO.com). Die Vertretung bei PERC umfasst wichtige und junge Bergbausektoren, Industriemineralien, Zuschlagstoffe, Kohle, die Investitions- und Finanzgemeinschaft sowie die professionellen Akkreditierungsorganisationen.¹⁵² Wie bereits erwähnt, hat der PERC Reporting Code zusätzlich zum CRIRSCO-Standard das Prinzip der Unparteilichkeit (*Impartiality*) verankert (s. Kap. 3.1.5, S.54f).

3.2.6.2. Umwelt- und Sozialaspekte im PERC-Standard

Der PERC-Code beinhaltet auch eine Check-Liste als Hilfestellung für die den Bericht erstellende Person hinsichtlich ökologischer und sozialer Aspekte. Diese umfassen sowohl die Ergebnisse der Mineralexploration als auch Kriterien für die Angabe von Ressourcen und Reserven. Die Checkliste ist nicht bindend und die Prinzipien haben immer höhere Priorität. Die Integration der Nachhaltigkeitsaspekte sind jedoch mit Nachdruck empfohlen und sollen nach dem für CSR häufig verwendeten Ansatz beschrieben werden. Dieser sieht vor, dass grundsätzlich der Bericht auch diese Aspekte - wo sinnvoll - beleuchtet. Jedoch kann ein „opt-out“ für nicht zweckmäßige Bereiche gewählt werden. Diesfalls sollte aber eine Begründung angeführt werden, also nach dem Prinzip „comply or explain“ verfahren werden.

Die Umweltaspekte schließen für die Lagerstätte oder das Projekt auch Angaben zu Vereinbarungen oder wesentlichen Probleme mit Dritten, wie Partnerschaften, historische Stätten, Wild- oder Nationalpark-, Umweltauflagen oder Joint Ventures mit ein.¹⁵³ Diese Angaben können auch wirtschaftliche Auswirkungen haben, da trotz Vorliegen geologisch vielversprechender Reserven, der Abbau durch (soziale) Konflikte verunmöglicht, verzögert oder verteuert werden kann. Diese Informationssicherheit zum Zeitpunkt der Berichterstellung unter Einschluss aller bekannten Hindernisse für die Erlangung einer Betriebsgenehmigung in dem Gebiet, ist sehr aufschlussreich.

¹⁵¹ [PERC2017], p.2

¹⁵² <http://www.vmine.net/PERC/about.asp> (21.05.2020)

¹⁵³ [MINL2019], pp.28.

Es wird jedoch in diesem Bericht über Ressourcen und Reserven nach dem PERC-Code kein Rechtsgutachten verlangt. Ziel ist, dass die (meist technisch kundige, aber nicht unbedingt juristisch erfahrene) Person, die den Bericht verantwortet, kurze und klare Beschreibung der sozialen und umweltrelevanten Aspekte vornimmt.¹⁵⁴ Kriterien dafür können mögliche Hindernisse für den Bergbau wie der Zugang zur Lagerstätte („access to land“), umwelt- und rechtliche Aspekte zur Erlangung der Betriebsgenehmigungen oder lokale Konflikte sein.

3.2.7. The Russian Resource/Reserve Reporting System (GKZ / NAEN Code)

Das russische Klassifizierungssystem verfolgte die **Idee einer nationalen Rohstoffbasis**. Motivation für die Vorratsdatenerfassung waren weniger die Versorgung der Industrie und wirtschaftliche Aspekte als vielmehr strategische und militärische. Dem folgt konsequenterweise auch der rechtliche Rahmen, nachdem alle Rohstoffrechte der Staat besitzt. Die Berichte wurden vom GKZ (State Commission on Mineral Reserves) verfasst und konsequenterweise wurde der Vorsitzende des GKZ durch den russischen Präsidenten ernannt. Die Grundlagen des Klassifizierungssystems gehen auf den Entwicklungszeitpunkt 1960 zurück und wurden 1981 überarbeitet, aber konnte den modernen Anforderungen nicht mehr gerecht werden.

Mit der Privatisierung vieler russischer Bergbauunternehmen Anfang der neunzehn-neunziger Jahre stellte sich zunächst die Frage der internationalen Finanzierung russischer Bergbaubetriebe. Alle Bergbaubetriebe verfügten zwar über eigene Ressourcen- / Reserven-Schätzungen, deren Klassifizierungsstandard jedoch nicht mit anderen international üblichen Codes, wie den CIM-Standards und dem JORC-Code in Einklang gebracht werden konnte.

Im Jahr 2006 wurde von CRIRSCO und GKZ gemeinsam eine Arbeitsgruppe eingerichtet, um ein Richtlinienokument für die Umrechnung der russischen Daten in international übliche Codes zu entwickeln. Im Jahr 2010 wurde ein entsprechendes Leitliniendokument verabschiedet und veröffentlicht.¹⁵⁵ Dieses Dokument enthält allgemeine Leitlinien für die Umstellung von russischen klassifizierten mineralischen Ressourcen/Reserven auf internationale CRIRSCO-klassifizierte Klassifizierungen. Unter allen Umständen liegen die tatsächlichen Umwandlungen und endgültigen Entscheidungen im professionellen Urteil der „competent person“. Die Umstellung erfolgt nur in eine Richtung, vom russischen System in das internationale; die entgegengesetzte Richtung ist nicht möglich, da die russische Klassifikation eine größere Anzahl von Kategorien aufweist und es ergibt auch keine praktischen Erfordernisse nach einer Konvertierung in das russische Klassifikationssystem.

¹⁵⁴ ebd.

¹⁵⁵ http://www.crirSCO.com/news_items/naen_code.pdf (06.12.2020)

Im Jahr 2011 wurde offiziell der nun NAEN-Code (The Russian Code for the Public Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves) genannte Berichtsstandard veröffentlicht. Diese Publikation beinhaltet auch die Konvertierung der Vorratsdaten in den CRIRSCO Public Reporting Standard und wurde 2014 aktualisiert.

3.3. United Nations Framework Classification (UNFC)

3.3.1. Entwicklung

Seit 1992 arbeitet die UN-ECE (United Nations Economic Commission for Europe) an der Entwicklung eines internationalen Rahmens für die Klassifizierung von mineralischen Ressourcen und Reserven (solid fuels and mineral commodities).¹⁵⁶ Der Zweck der UNFC („United Nations Framework Classification“) ist eine Basis für die Vergleichbarkeit der vielen unterschiedlichen nationalen Klassifizierungen weltweit zu bilden, insbesondere für Länder, die sich erst in Richtung freier Marktwirtschaften entwickeln. Nach einer Reihe von Workshops und Arbeitsgruppenmeetings wurde die finale Version der UNFC 1997 verabschiedet.

2004 wurde die Klassifikation erweitert um die Anwendbarkeit auf Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten sowie Uranvorkommen und wurde umbenannt in „UNFC for Fossil Energy and Mineral Resources“ (UNFC-2004).¹⁵⁷

Um die weltweite Anwendbarkeit dieses Klassifikationsrahmens weiter zu unterstützen, wurde der Rahmen 2009 vereinfacht und kann nun auf alle fossilen Energieträger und mineralischen Reserven und Ressourcen, die auf oder unter der Erdoberfläche liegen, angewendet werden (UNFC-2009).¹⁵⁸

In der weitem Folge wurden zwischen 2016 und 2018 auch die Klassifikation für erneuerbare Energien, Untertagespeicher für CO₂ und anthropogene Ressourcen in den Code aufgenommen. Erst kürzlich (2019) wurde die 4. Version der UNFC veröffentlicht, in der Anpassungen der Terminologie vorgenommen wurden, um alle Arten von Ressourcen erfassen zu können.

¹⁵⁶ <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/UNFC/UNFCemr.pdf> (07.02.2013)

¹⁵⁷ http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/unfc2009/UNFC2009_ES39_e.pdf (p. iii) (07.02.2013)

¹⁵⁸ ebd.

3.3.2. Standards

Die Rahmenklassifikation der Vereinten Nationen für fossile Energie- und Rohstoffreserven und -ressourcen 2009 (UNFC-2009) ist ein allgemein akzeptables und international anwendbares System für die Klassifizierung und Berichterstattung fossiler Energie- und Rohstoffreserven und -ressourcen. Diese weltweite Akzeptanz ist ein Alleinstellungsmerkmal dieses Kodex. Es wurde von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE - United Nations Economic Commission for Europe) ausgearbeitet und wird vom Wirtschafts- und Sozialrat der Vereinten Nationen (ECOSOC) in der am 18. Juli 2004 erlassenen Entscheidung Nr. 2004/33 empfohlen.¹⁵⁹ Die UNECE-Region umfasst mehr als 47 Millionen Quadratkilometer. Zu den Mitgliedstaaten zählen die Länder Europas, aber auch Länder in Nordamerika (Kanada und USA), Zentralasien (Kasachstan, Kirgisistan, Tadschikistan, Turkmenistan und Usbekistan) und Westasien (Israel) (insgesamt 56 Länder, siehe Abb. 23).

UNFC-2009 gilt für fossile Energie- und mineralische Rohstoffreserven sowie für Ressourcen, die sich auf oder unter der Erdoberfläche in der Lithosphäre befinden. Der Code wurde so konzipiert, dass soweit wie möglich, die Studien in Bezug auf Energie und Rohstoffe, Ressourcenmanagement sowie Geschäftsprozesse der Unternehmen und Rechnungslegungsstandards angewendet werden können.

Das Hauptziel von UNFC-2009 besteht darin, die internationale Kommunikation zu verbessern, indem ein allgemeiner Klassifizierungsrahmen für die Berichterstattung über fossile Energie sowie mineralische Rohstoffreserven und -ressourcen bereitgestellt wird, auch wenn solche Schätzungen möglicherweise mithilfe von Klassifizierungs- oder Berichtssystemen erstellt wurden, die¹⁶⁰

- möglicherweise unterschiedliche Terminologie für vergleichbare Schätzungen oder dieselbe Terminologie mit unterschiedlichen Bedeutungen haben;
- anwendungsspezifische Anwendungsrichtlinien enthalten;
- klassische bergmännische Extraktion von Feststoffen oder den flüssigen Abbau mittels Bohrlochbergbau widerspiegeln.

¹⁵⁹ [MINL2019], p.30.

¹⁶⁰ ebd.

3.3.3. Prinzipien

UNFC-2009 ist ein verallgemeinertes prinzipienbasiertes System, bei dem Mengen anhand der drei grundlegenden Kriterien

- wirtschaftliche und soziale Realisierbarkeit (E),
- Status und Durchführbarkeit des Bergbauprojektes (F) und
- geologisches Wissen (G)

definiert und beschrieben werden.

Es wird ein numerisches, sprachunabhängiges Codierungsschema verwendet.¹⁶² Die Kombinationen dieser Kriterien ergeben ein dreidimensionales System. Die Kategorien (z. B. E1, E2, E3) sind für jedes der drei Kriterien definiert. Die Definitionen der UNFC-2009 Kategorien und Unterkategorien wurden vereinfacht, und die am häufigsten verwendeten Klassen werden im Klartext definiert, wodurch eine harmonisierte generische Terminologie auf einer für die globale Kommunikation geeigneten Ebene bereitgestellt wird.¹⁶³

Abseits von UNFC lassen sich alle Klassifizierungssysteme in zwei Gruppen einteilen. Jene, die in der westlichen Welt eingesetzt werden und die „östlichen“, beispielsweise in Russland und China. Das dreidimensionale UNFC-System versucht, diese beiden Welten zueinander zu bringen. Allen Klassifizierungssystemen ist gemein, dass sie auf klarer geologischer Analyse basieren (G-Achse). Die Codes der östlichen Hemisphäre sind darüber hinaus vor allem auf die Machbarkeit



Abb. 23: Mitgliedstaaten der UNECE - United Nations Economic Commission for Europe¹⁶¹

¹⁶¹ [MINL2019], p.30.

¹⁶² [UNFC2009], pp.5.

¹⁶³ [MINL2019], p.31.

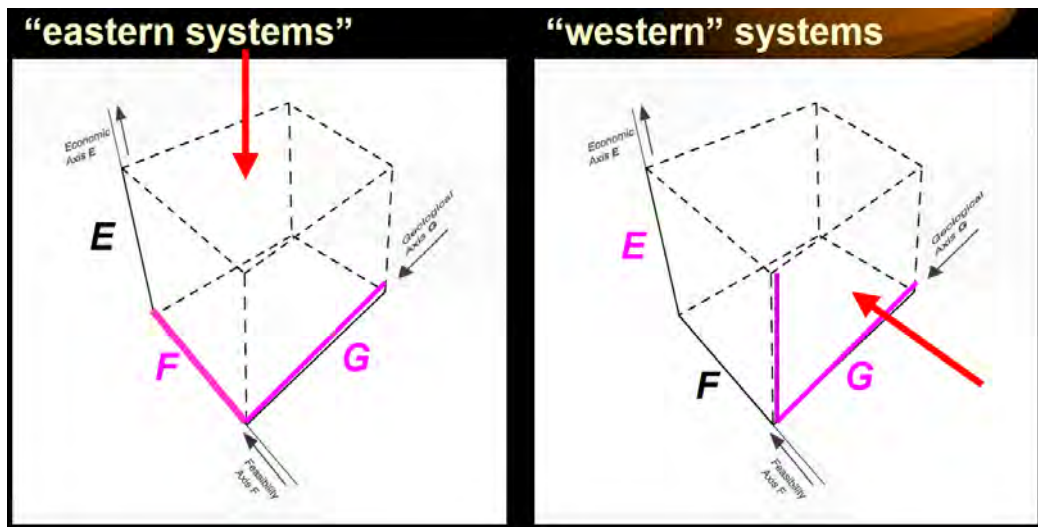


Abb. 24: UNECE vereint die Codes der westlichen und östlichen Einflussphäre¹⁶⁴

konzentriert (F-Achse). Die Bewertungskodizes der westlichen Welt legt den Fokus naturgemäß auf die wirtschaftliche Realisierbarkeit (E-Achse). Mit diesem Kunstgriff ist es der UN gelungen, ein weltweit anwendbares Klassifizierungssystem akzeptiert zu bekommen, dass die Möglichkeit schafft, die Rohstoffvorräte weltweit vergleichen zu können.

3.3.4. Aufbau und Funktionsweise

Das UNFC besteht aus einem dreidimensionalen System mit den folgenden drei Achsen: (Abb. 25)¹⁶⁵

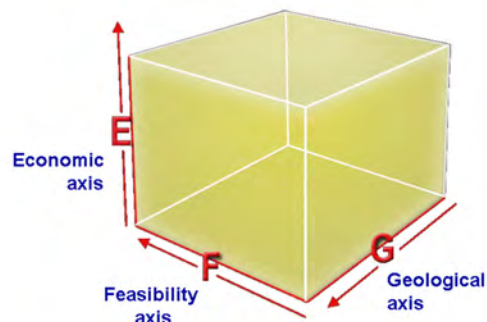


Abb. 25: Allgemeines Element der UNFC

¹⁶⁴ <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC.pdf> (21.05.2020)

¹⁶⁵ <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/UNFC/UNFCemr.pdf> (p.8ff) (07.02.2013)

- die Wirtschaftlichkeit und der Grad und Gewissheit der Bauwürdigkeit (*economic and social viability* (E)),
- die Machbarkeit gemäß des bergtechnisch-bergwirtschaftlicher Untersuchungsstandes (*field project status and feasibility* (F)) sowie
- die geologische Bewertung (geologischer Untersuchungsstand) (*geological knowledge* (G)).

Die ursprünglich vorhandenen, gesamten Ressourcen an Energie und Mineralien werden durch folgende Begriffe beschrieben:

- produzierte Mengen,
- verbleibende abbauwürdige Mengen,
- weitere in der Lagerstätte verbleibende Mengen.

Der Hauptfokus von UNFC liegt auf den verbleibenden abbauwürdigen Mengen (Abb. 26). Für nicht erneuerbare Ressourcen ist die ursprüngliche Menge an Vorräten konstant und Abweichungen müssen folglich evaluiert und erklärt werden. Die produzierten Mengen wurden in die UNFC aufgenommen, um die Veränderungen der Lagerstättenmengen, die auf den Abbau zurückzuführen sind, erklären zu können. Die produzierte Menge umfasst die Summe aus verkauften und nicht verkauften Rohstoffen zu einem Stichtag. Die verbleibenden abbauwürdigen Mengen sind die verkaufbaren und nicht verkaufbaren Rohstoffe zum Betrachtungsstichtag. Die weiter in der Lagerstätte verbleibenden Mengen errechnen sich aus der ursprünglichen Lagerstättengröße vermindert um die produzierten und abbauwürdigen Mengen. Diesem Restbestand wird kein ökonomischer Wert zuerkannt.

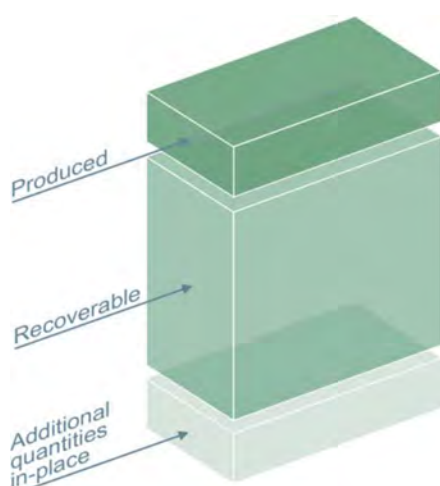


Abb. 26: Gesamtmenge der Lagerstättenressourcen

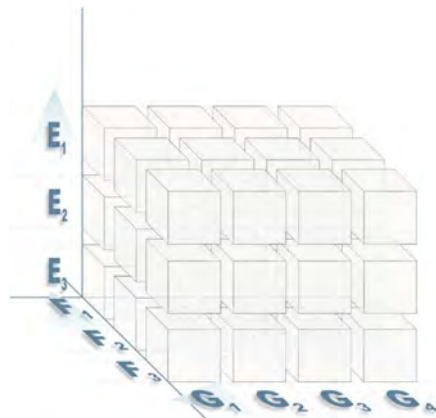


Abb. 27: Klassifikation

Zur genaueren Beschreibung des Elements in seinen drei Achsen E, F und G wird der Würfel in *Sub-Cubes* geteilt (Abb. 27). Diese Sub-Cubes werden nummeriert. Dem allgemeinen Verständnis folgend, wird der Nummer 1 der höchste (beste) Wert zugeordnet. E1 bedeutet folglich, dass auf der Wirtschaftlichkeits-Achse E die bestmögliche ökonomische Bewertung zugeteilt wurde. Analog wird der Machbarkeits-Achse F mit der Zahl 1 der höchstmögliche (positive) Projektfortschritt dokumentiert. Eine eingehende und umfassende geologische Analyse bzw. Prüfung wird auf der G-Achse mit G1 beschrieben. Es hat sich die universelle, sprachenunabhängige Schreibweise in der Reihenfolge der Achsen EFG eingebürgert, sodass beispielsweise E1; F2; G3 mit 123 oder E2; F1; G2 mit 212 abgekürzt geschrieben wird (Abb. 28).

Diese Darstellung zeigt sehr übersichtlich wirtschaftlich interessante Reserven. Eine 111-Klassifizierung hat naturgemäß die höchste Aufmerksamkeit von Investoren. Damit wird angezeigt,

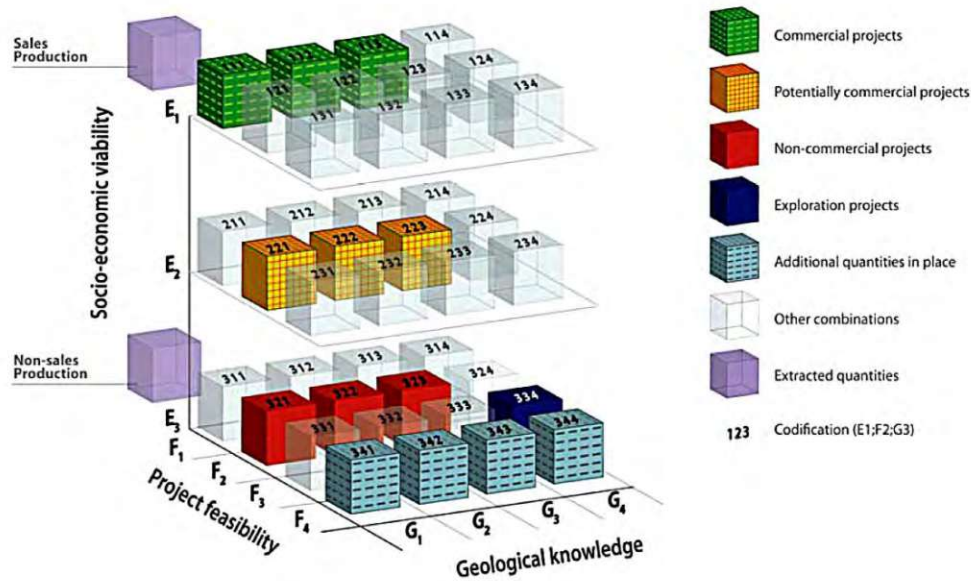


Abb. 28: UNFC angewendet auf Lagerstätten fester mineralischer Rohstoffe sowie Kohle und Uranium.

dass das Mineral wirtschaftlich (kommerziell) abbaubar ist (Ziffer 1 als erste Zahl), die technische Förderung der Lagerstätte sehr positiv bewertet wurde (Ziffer 1 als zweite Zahl) und die Analyse auf geologisch gesicherten Daten beruht (Ziffer 1 als dritte Zahl) (Abb. 29). Diese Art der Kodifizierung hat den Vorteil, dass sie eine prägnante, unzweideutige Klassifizierung von Reserven/Ressourcen ermöglicht, die die Daten einfach vergleichbar macht und diese Informationen mittels Computersysteme einfach verarbeitet werden können.

Für die praktische Anwendung kann das dreidimensionale Modell auch in eine zweidimensionale Matrix (Abb. 30) übergeführt werden, wobei die dritte (wirtschaftliche) Dimension (E-Achse) durch individuelle Kästchen beschrieben wird. Entlang der vertikalen Achse wird die Machbarkeitsbeurteilung dargestellt, entsprechend der Detailliertheit, mit der sie durchgeführt wurde. Das reflektiert die Sicherheit der Angaben der Ressourcen/Reserven hinsichtlich der ökonomischen Bedeutung. Aus Abb. 31 sind die Regeln für die Zuordnung der Kategorien ersichtlich, die auch eine Referenz zu anderen Klassifizierungs-codes ermöglicht.

Auch wenn der UNFC vom Prinzip nicht darauf ausgelegt ist, Daten in andere Klassifizierungs-codes zu transformieren, können Ähnlichkeitsbeziehungen hergestellt werden.

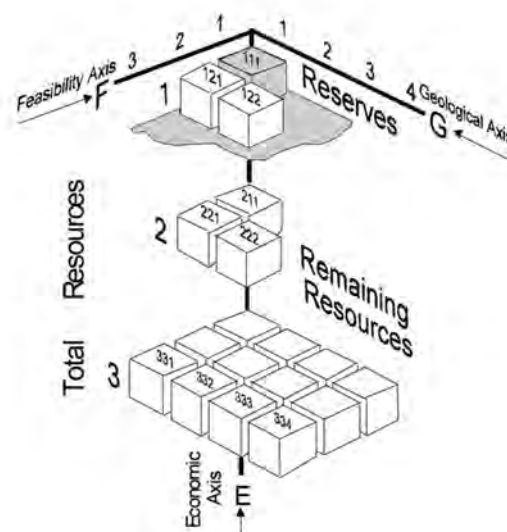


Abb. 29: Darstellung der dreizahligen Kodifizierung

- G1 detailed exploration → measured
- G2 general exploration → indicated
- G3 prospecting → inferred
- G4 reconnaissance study → predicted

UN International Framework		Detailed Exploration	General Exploration	Prospecting	Reconnaissance
	National System				
Feasibility Study and/or Mining Report		1 (111)	usually		
		2 (211)			
Prefeasibility Study		1 (121) + (122)	not relevant		
		2 (221) + (222)			
Geological Study*)		3 (331)	3 (332)	3 (333)	3 (334)

Economic Viability Categories: 1: economic 2: potentially economic 3: intrinsically economic (economic to potentially economic)

Abb. 30: UNFC in Matrixdarstellung angewendet auf Lagerstätten fester mineralischer Rohstoffe sowie Kohle und Uranium.

Categories and subcategories	
E1	Economic
E1.1	Normal Economic
E1.2	Exceptional Economic
E2	Potentially Economic
E2.1	Marginal Economic
E2.2	Sub-Marginal Economic
E3	Intrinsically Economic
F1	Mining Report and/or Feasibility Study
F1.1	Mining Report
F1.3	Feasibility Study
F2	Pre-feasibility Study
F3	Geological Study
G1	Detailed Exploration
G2	General Exploration
G3	Prospecting
G4	Reconnaissance Study

Abb. 31: Kategorien und Subkategorien der UNFC¹⁶⁶

¹⁶⁶ Eine genaue Beschreibung der Kategorien ist unter <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ic/se/pdfs/UNFC/UNFCemr.pdf> (p.19ff) verfügbar. (07.02.2013)

3.3.5. Stakeholder

Der UNFC stellt auf dieselben Stakeholder wie der JORC-Code ab, jedoch anstatt an die Investoren wendet sich UNFC an die Regierungen. Somit lassen sich die Stakeholder für folgende Bereichen definieren:

- Gutachter für die Schätzung bzw. Festlegung der Ressourcen und Reserven
- Unternehmensführung des Bergbaubetriebes (Industrie)
- Finanzierungsinstitutionen
- Regierungen (Ressourcenmanagement).

3.3.6. Stärken und Vorteile

Die UN ist eine neutrale Plattform, auf der alle Stakeholder vertreten sind. Daher ist UNFC als offenes und transparentes System ausgestaltet. Das UNFC gibt Hilfestellung für eine sehr detaillierte Klassifikation der Vorräte. UNFC ist ein globales Projekt und ermöglicht daher eine gute, auch internationale Vergleichbarkeit der Vorratsdaten. Sowohl die Systeme der östlichen Einfluss-sphäre als auch der westlichen Welt lassen sich in das System umrechnen und damit trotz ihrer Unterschiede harmonisiert darstellen. Der Standard inkludiert auch Rohstoffe, die (derzeit) „undiscovered“ und „uneconomic“ sind. Zu guter Letzt erleichtert das UNFC sehr gut die Planungen der weiteren Tätigkeiten.

Das UNFC zielt auf eine „Corporate Responsibility“ ab, die im optimierten Gleichgewicht des Dreiecks zwischen ökonomischen, ökologischen und sozialen Erfolg liegt. Daher kann dieses Klassifizierungssystem auch für Überlegungen zur Nachhaltigkeit herangezogen werden. Ein Beispiel sind die Integration in die SDG der UN und könnte für ein Bergbauprojekt bedeuten, dass der Abbau umfassend sein muss (z. B. auch Nebenrohstoffe), ohne Abfälle (z. B. Reuse, Recycling) zu erzeugen, und zum Nutzen und ohne Schaden für alle Teile der Bevölkerung und Gesellschaft.

3.3.7. Schwächen und Nachteile

Das UNFC hat keinen Bezug zu Finanzwelt. Daher kann das System nicht für börsennotierende Unternehmungen angewendet werden. Es wird auch keine „competent person“ vorgeschrieben, also eine Person, die verantwortlich zeichnet. Das wirft das Problem der Qualitätskontrolle naturgemäß stark auf. Das UNFC ist kein öffentlicher Berichtsstandard. Dieses Bewertungssystem eignet sich daher eher für statistische Erhebungen als für Investitionsplanungen. Das System ist nur freiwillig anzuwenden, auch die UN gibt keine Vorgaben oder Sanktionen.

Das UNFC versteht sich als Prozess und nicht als reines System zur Vorratsdatenklassifikation. Am Beginn stehen das Verständnis und Kenntnis über die Lagerstätte. Dem folgen die Projektentwicklung und schließlich die Untersuchung der sozialen, gesellschaftlichen und ökonomischen Auswirkungen.

3.4. National Instrument (NI) 43-101

NI 43-101 ist ein vom kanadischen Gesetzgeber vorgeschriebenes Regelwerk, das festlegt, wie Emittenten (wertpapierrechtlich) wissenschaftliche und technische Informationen über Mineralrohstoffprojekte der Öffentlichkeit in Kanada offenlegen. Die Offenlegungsstandards gelten sowohl für mündliche Erklärungen als auch für schriftliche Dokumente und Websites. NI 43-101 gilt nicht für Offenlegungen in Bezug auf Erdöl, Erdgas,¹⁶⁷ bituminösen Sand oder Schiefer, Grundwasser oder Methankohle.¹⁶⁸

Das NI 43-101 ist ein von „Canadian Securities Administrators“ (CSA) festgelegtes und überwachtetes Berichterstattungsverfahren für Bergbauunternehmen zum Schutz von Investoren. Es trat erstmals am 1. Februar 2001 in Kraft und wurde 2005 überarbeitet und 2011 neu aufgelegt. Das „National Instrument“ (NI) wurde als Verpflichtungen per Gesetz in jeder Provinz- und Territorialgesetzgebung für ganz Kanada erlassen. Das NI ist in drei Teile gegliedert:¹⁶⁹

- Instrument (the “regulations”)
- Companion Policy (the guidance)
- The Form (Technical Report format)

Das NI 43-101 ist jedoch kein Reporting Code! Es berücksichtigt nur durch Referenz die „CIM Definition Standards on Mineral Reserves and Mineral Resources“. Es sind jedoch alle Codes, die der CRIRISCO-Vorlage folgen, zugelassen, also insbesondere auch die für Kanada „fremden“ Codes wie JORC, PERC, SAMREC sind akzeptiert.

Festgelegt sind im NI 43-101 die Mindestanforderungen hinsichtlich der zu veröffentlichen Informationen. Das Instrument verpflichtet Projektbetreiber dazu, wesentliche Daten durch unabhängige Fachleute (Qualified Persons) erstellen oder überprüfen zu lassen. Solche, durch Dritte verifizierte Berichte, erhöhen das Vertrauen der Investoren und sind daher zwischenzeitlich in der Realität ein de facto Marktstandard. Ohne derartige Unterlagen ist es schwer, an Risikokapital und Investoren zu kommen. Für eine Notierung des Unternehmens an der Toronto-Stock-Exchange ist das NI Voraussetzung.

¹⁶⁷ Für Erdöl und Erdgas gilt das National Instrument 51-101.

¹⁶⁸ [CIM2010], p.9.

¹⁶⁹ [CIM2010], pp.10.

Das NI legt fest, dass alle wissenschaftlichen oder technischen Informationen, einschließlich Reserve- und Ressourcendaten gegenüber dem Emittenten offengelegt werden müssen und von einer qualifizierten Person oder unter zumindest unter deren Aufsicht erstellt wurden. Das National Instrument 43-101 erfordert eine substanziell vertiefte technische Offenlegung gegenüber dem Markt als der JORC-Code. Diese Tatsache ist aus der Herkunft der Codes erklärbar. Der JORC-Code in erster Linie ein Code zur Berichterstattung über mineralische Reserven und Ressourcen und wurde von den Branchenverbänden mitgestaltet. Das NI 43-101 ein Code zur Offenlegung von Projekten für Investoren, der von der kanadischen Wertpapierbehörde erstellt wurde.

Die technischen Informationen, die in einer Erklärung nach NI 43-101 für Reserven und Ressourcen erforderlich sind, übertreffen die im JORC-Code enthaltenen, vor allem durch die Bestimmung, dass bestimmte geologische Parameter des Mineralvorrates in einem Bericht beschrieben, vollständig veröffentlicht und auf besondere Weise dargestellt werden müssen. Umgekehrt werden JORC-konforme technische Berichte in der Regel nicht vollständig an der australischen Börse veröffentlicht, da dies von den australischen Aufsichtsbehörden nicht verlangt wird. Daher wird häufig eine Zusammenfassung der wichtigsten Punkte veröffentlicht. Es ist daher möglich, dass wirtschaftlich sensible Informationen nicht publik werden.¹⁷⁰

3.5. Mineral Resource/Reserve Classification System of China (MRRCC)

Das chinesische Klassifizierungssystem baut auf einer alten UNFC-Version auf und befindet sich derzeit in Diskussion, ob eine Revision erfolgen soll. Der Code wurde 1999 als nationaler Standard eingeführt. Es gibt jedoch keine vollständige Überschneidung zwischen den CRIRSCO-Kategorien und den UNFC-Kategorien.

Diese Kategorien stimmen jedoch weder in der Definition noch in der Zuordnung mit dem UNFC überein und viele Termini können mehrdeutig ausgelegt werden. Die vordergründige Komplexität des MRRCC könnte auf eine Genauigkeit der Beschreibung von Ressourcen/Reserven schließen lassen, die das Klassifizierungssystem in der Praxis jedoch nicht leisten kann. Ob im Hintergrund auch politische oder strategische Überlegungen der Supermacht eine Rolle spielen, kann nur gemutmaßt werden.

¹⁷⁰ ebd.

3.6. Diskussion der Klassifizierungssysteme

3.6.1. Allgemeines

Die Entwicklung und Pflege internationaler Standards für die Klassifizierung von mineralischen Reserven und Ressourcen sowie die Erfassung von Abbauergebnissen sind von essenzieller Wichtigkeit. Waren bisher diese Informationen vor allem für Investoren interessant, gewinnt durch Globalisierung der Wirtschaft, aber auch durch die Agglomeration von Bergbaubetrieben zu supranationalen Industriekonzernen die einheitliche Bewertung von mineralischen Rohstoffen auch für Staaten und ganze Wirtschaftsräume an Bedeutung. In den letzten Jahren haben sich Zusammenschlüsse von Bergbaubetrieben (*mergers and acquisitions* – M&A) über nationale Grenzen hinweg stark erhöht. Oft notieren Publikumsgesellschaften gleichzeitig an mehreren Börsen weltweit. Investoren, aber auch Sparer auf der Suche nach besseren Renditen, investieren heute in Ländern abseits der Heimat, oft in Entwicklungsländern am asiatischen, afrikanischen oder südamerikanischen Kontinent.

Es sind im Konkreten drei Interessentengruppen, die von einer einheitlichen Klassifikation berührt sind. Dies sind

- Bergbaugesellschaften und Bergbaubetriebe,
- Investoren und Banken sowie
- Behörden und internationale Organisationen.

Bergbaugesellschaften und Bergbaubetriebe haben ihren Fokus auf die einzelbetriebliche Produktionsplanung und auf Investitionsentscheidungen für ihre strategischen Planungen. Die meist als Großkonzerne organisierten Bergbaugesellschaften benötigen verlässliche Informationen über die gesamte Erfassung und Klassifizierung ihrer Vorräte und beobachten die Vorratssituation der Mitbewerber. Des Weiteren ist die Beobachtung der Vorratsentwicklung in den einzelnen Produktionsländern und -regionen sowie global zur Analyse des Angebotes essenziell.

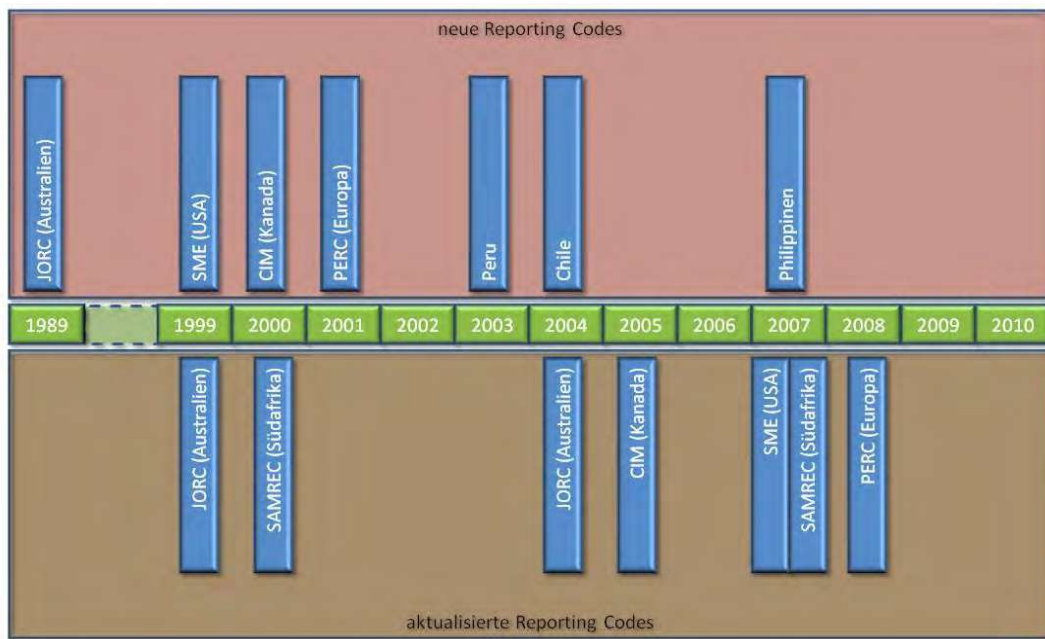


Abb. 32: historische Entwicklung der Reporting Codes

Ein neues (junges) Bergbauunternehmen hat mit zahlreichen Herausforderungen zu kämpfen. Das primäre Ziel liegt in der Weiterentwicklung der Exploration, jedoch ist aufgrund beschränkter finanzieller Ressourcen noch kein Nachweis von Reserven wirtschaftlich möglich und daher sind Kreditlinien schwierig zu bekommen. Die primäre Sorge des Unternehmens gilt daher, das geringe, verfügbare Kapital durch Partner zu vergrößern. Eigenkapital kann über die Börse für Projekt-Entwicklung oder durch ein Initial Public Offering (IPO) lukriert werden. Die Eigentümerstruktur verändert sich mit so einem Vorgehen unter Umständen massiv. Wenn keine Anteile abgegeben werden sollen, so muss Fremdkapital über eine Bank aufgenommen werden, die in aller Regel Sicherheiten im Gegenzug fordert. Eher selten verfügen solche jungen Unternehmen bereits eine Organisationsstruktur, die in der Lage ist, den JORC-Kriterien Genüge tun zu können oder die Vorräte nach einem anderen, anerkannten Klassifizierungssystem festgestellt zu haben, was das Herankommen an internationale Finanzmittel deutlich erleichtern würde.

Die Bergwerkseigentümer haben Interesse an einer Langzeitplanung und reduzieren die Vorräte durch den Abbau. Die Abbaugeschwindigkeit und damit Produktionsmenge wird von der Marktpreisentwicklung bestimmt und kann durch Planung einer Bergbauerweiterung gesteigert werden. In dieser Phase sind vor allem Zwischenfinanzierungen beispielsweise für neues Equipment oder Erweiterungen nötig. Weiterentwicklungen und Wachstum des Betriebes können organisch oder anorganisch (extern) erfolgen und können zu Beteiligungen und Übernahmen führen.



Abb. 33: Geografische Übersicht über die vorzugsweise zur Anwendung kommenden Reporting Codes nach Ländern und Regionen¹⁷¹

Investoren und Banken finanzieren Bergbauprojekte und benötigen daher die Vorratsdaten zur Abschätzung von Risiken, Chancen sowie Potential und Information an die Anleger und Aktionäre. Banken haben ebenso Interesse am Umsatzwachstum des finanzierten Betriebes, da es Risiken vermindert. Geldinstitute beobachten für ihre Anleger diverse Marktsegmente und sind an strategischer Geldanlage und Risikostreuung interessiert. Anleger erwarten eine klare Übersicht über die Anlagesicherheit und zu erwartende Rendite. Je nach Risikobewusstsein werden die Präferenzen auf Sicherheiten oder bei bewussten Investments in Risikopapiere („zocken“) in hohe Gewinnerwartungen durch Investition in Explorationsfirmen liegen, die eine große Hebelwirkung in ihrer Wertentwicklung haben können.

Die Börse als Handelsplattform trägt die Verantwortung für den jeweiligen Marktplatz und bildet (meist mehrmals täglich) den Marktpreis. Ein IPO oder die Emission von Aktien ermöglicht den Firmen den Zugang zu Eigenkapital. Für die Reputation des Handelsplatzes ist es entscheidend, klare und transparente Festlegungen der Zugangsregelungen zum Markt zu definieren und die Frequenz, Tiefe und Qualität der Berichte festzulegen, zu überprüfen und einzufordern.

Behörden und staatliche Organisationen sind für die Sicherstellung der nationalen Rohstoffproduktion und -versorgung verantwortlich. Dafür werden in der Regel geeignete Rahmenbedingungen definiert, die auch zur Entwicklung nationaler Klassifikationssysteme führten. Internationale Organisationen sorgen für Transparenz und Sicherstellung der Versorgung weltweit. Ihr Hauptaugenmerk liegt daher in der Entwicklung globaler Klassifikationssysteme.

¹⁷¹ <http://www.umrek.com.tr/eng/images/Harita-uyeler.jpg> (08.05.2020)

Für alle Stakeholder-Gruppen ist der Bedarf einer international einheitlichen Beschreibung der Bestände (vor allem der Lagerstätten) in den Bilanzen von Bergbauunternehmen, aber auch der verfügbaren Reserven und Ressourcen von Ländern und Wirtschaftsregionen gegeben. Dabei geht es um die Definition einer einheitlichen Terminologie, die über Landes- und Sprachgrenzen hinweg verständlich und eindeutig ist. Im Laufe der Jahre wurden in einigen Nationen Klassifizierungssysteme - meist unabhängig voneinander - entwickelt. In einigen Ländern wurde die Festschreibung der Kodifizierung von hoheitlichen Behörden („governmental“) vorgenommen, in anderen wurden die Systeme von Experten oder von Wirtschaftsorganisationen entwickelt. Im Allgemeinen wird in diesem Zusammenhang von Systemen (*systems*) gesprochen, wenn es sich um Klassifikationen handelt, die hoheitlichen Ursprungs sind und das Ziel haben, Lagerstätten für die Nation nach ihrer (volks)wirtschaftlichen Bedeutung und Erkundungsphase zu beschreiben. Codes bezeichnen im allgemeinen Bestimmungen mit (von Unternehmungen) verpflichtend einzuhaltenden Regelwerken eines Landes. Davon werden Richtlinien unterschieden, die Empfehlungen definieren und die Klassifizierungen unterstützen können. Oftmals entstehen diese aus Erfahrungen mit bewährten Methoden (*best practice*). Oft sind in der Realität die Zielsetzungen aller drei Klassifizierungsbestimmungen sehr ähnlich, auch wenn die daraus resultierenden Dokumente unterschiedlich sind.¹⁷²

Einige Codes wurden von vorneherein mit dem Ziel definiert, von Regierungen und Behörden eingesetzt zu werden, andere waren von Anbeginn für die kommerzielle Verwendung bestimmt. Klassifizierungsmethoden, die derart unterschiedliche Hintergründe und Zielsetzungen haben, sind nur schwer zu harmonisieren. Es treten, ähnlich wie in der Zusammenarbeit internationaler Teams, nicht nur sprachliche Schwierigkeiten, sondern auch kulturelle Unterschiede und damit Kommunikations- und Verständnisprobleme zu Tage.

Die Entwicklung der Reporting Codes erfolgte in der westlichen Welt, wie in Abb. 32 illustriert ist, auch wenn historisch der osteuropäische Raum (vor allem Russland und Polen) die ursprünglichen Lieferanten von mineralischen Rohstoffen waren. Besonders Australien war ein Vorreiter, aber auch Südafrika, USA und Kanada, gefolgt von Europa (im Besonderen vom Vereinigten Königreich) trieben die Festschreibung von Standards voran. Alle Reporting-Standards folgen der Idee, dass geologisch erkundete Ressourcen durch technische und ökonomische Maßnahmen in Reserven umgewandelt werden. Dies erfolgt im Allgemeinen in Pre-Feasibility-Studien und Machbarkeitsanalysen (Feasibility Studies) unter Anwendung und genauer Dokumentation der sogenannten *Modifying Factors*. Das Ergebnis sind Angaben über Abbaumengen und mineralischen Re-

¹⁷² Weatherstone, Niall. International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves - Status, Outlook and Important Issues, World Mining Congress & Expo 2008, p.1.
http://www.criresco.com/isr_mineral_resources_reserves0908.pdf (08.02.2013)

serven und Ressourcen. Auch wenn (geologisch) Reserven eine Teilmenge der Ressourcen darstellen, müssen sie für die Beurteilung einer Lagerstätte zusammengezählt werden; die angegebenen Ressourcen beinhalten also die Reserven „nicht mehr“.

Die sichtbarste Veränderung in der Bergbauindustrie sind wohl die Steigerungen der Produktion in China und Russland. Während Russland viele angrenzende osteuropäische und zentralasiatische Staaten nach wie vor hauptsächlich auf den Export von mineralischen und energetischen Rohstoffen setzen, hat sich China zum weltweit größten Rohstoffproduzenten aber auch -konsumenten entwickelt. Im Gegenzug machen sich westliche Länder Gedanken, woher die zukünftige Versorgung mit mineralischen Rohstoffen gedeckt werden soll und wie zuverlässig diese Quellen sind. Es wäre daher von allgemeinem Interesse, wenn die Reporting-Standards dieser Produzentländer mit jenen der westlichen Welt harmonisiert werden, da sowohl mineralische Rohstoffe als auch Kapital (Investitionen) zwischen diesen Wirtschaftsregionen ausgetauscht werden. Darüber hinaus könnten Betrachtungen über die Nachhaltigkeit der Mineralrohstoffwirtschaft zuverlässiger angestellt werden. Aufgrund des modernen Entwicklungsstandards von CRIRSCO kann empfohlen werden, dass sich das chinesische und russische Klassifizierungssystem diesem Code anpasst. Die Tabelle in Abb. 34 gibt einen Überblick über die Unterschiede dieser Klassifizierungssysteme.

Schon auf den ersten Blick sehen diese drei Systeme völlig unterschiedlich aus. Ein Hauptunterschied ist die klare und eindeutige Trennung von Reserven und Ressourcen im europäischen System. Beispielsweise können in Russland die Klassen A, B, C₁ und C₂ entweder Ressourcen bedeuten oder, wenn Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchgeführt wurden, als Reserven in der Buchhaltung geführt werden. Im chinesischen System ist beispielsweise der Wert durch den nachgesetzten Buchstaben „b“ zu beachten. Dieser beziffert bei den „basic reserves“ den In-Situ-Wert, aus dem dann die Reserven ableitbar sind, jedoch werden diese Werte im Template als Ressourcen geführt.¹⁷³ Schon dieser eine, exemplarisch gezeigte Unterschied macht deutlich, dass diese Klassifizierungssysteme nicht einfach kompatibel sind. Auch wenn erste Bemühungen zur Harmonisierung bereits eingeleitet wurden, wird es ein langer Weg. Ermuntern ist, dass sich ICMM als Verband der weltweit größten Bergbauunternehmen, das klare Ziel gesetzt hat, höchst mögliche öffentliche Berichterstattung in Übereinstimmung mit der „Global Reporting Initiative (GRI) 2002 Sustainability Reporting Guidelines and Mining and Metals Sector Supplement“ anzustreben.¹⁷⁴ Darüber hinaus hat ICMM Richtlinien erlassen (*10 guiding principles*), die auf die Einhaltung ethischer Grundsätze abzielen, aber auch die Ziele von Risikomanagement und Lieferung

¹⁷³ Weatherstone, Niall. International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves - Status, Outlook and Important Issues, World Mining Congress & Expo 2008, p.5.
http://www.criusco.com/isr_mineral_resources_reserves0908.pdf (08.02.2013)

¹⁷⁴ ICMM: <https://www.icmm.com/materials-stewardship-toolkit/public-reporting> (10.02.2013)

CRIRSCO (JORC/CIM/ PERC/NAEN)	Resource		Measured	Indicated			Inferred		Exploration Potential or Exploration Target
	Reserve		Proven	Probable					
Russian State Classification	Reserve		A, B and C1	B, C1 and C2			C2 and P1		P2 and P3
UNFC-2009 (Chinese and Indian Classification)	Economic Evaluation (100)	Designed Mining with loss	Recoverable Reserve (111)	Probable Recoverable Reserve (121)		Probable Recoverable Reserve (122)			
		Designed Mining without loss							
	Marginal Economic (2M00)		Basic Reserve (2M11)	Basic Reserve (2M21)		Basic Reserve (122b)			
	Sub-Economic (2S00)		Resource (2S11)	Resource (2S11)		Resource (2S22)			
	Intrinsically Economic (300)				Resource (331)		Resource (332)	Resource (333)	Resource (334)
	F	Feasibility Evaluation	Feasibility (101)	Pre-Feasibility (020)	Scoping (030)	Pre-Feasibility (020)	Scoping (030)	Scoping (030)	Scoping (030)
	G	Geological Evaluation	Measured (001)			Indicated (002)		Inferred (003)	Predicted (004)

Abb. 34: Vergleich von CRIRSCO, UNFC und anderen Ressourcen und Reserven Klassifizierungen¹⁷⁶

valider und transparenter Daten hervorheben. Auch CRIRSCO unterstützt diese Prinzipien mit dem Ziel, eine effektive Reporting Richtlinie zusammenzustellen.¹⁷⁵

3.6.2. JORC System im Vergleich

Das JORC System wird breit eingesetzt und ist bei den Stakeholdern breit akzeptiert.

- Das Klassifizierungssystem basiert auf breit akzeptierten Methoden der Ressourcen/Reservenabschätzung, erprobter Anwendung in zahlreichen Bergbauprojekten und der Verpflichtung zur Beziehung einer „Competent Person“.
- Um erhöhte geologischer Aussagesicherheit zu erhalten, werden Ressourcen in inferred, indicated und measured eingeteilt.
- Auch eine Ressource muss zumindest das Potenzial der wirtschaftlichen Gewinnung besitzen, um als solche ausgewiesen werden zu können.
- JORC Code ist verpflichtend für Bergbauunternehmen, die an den wesentlichen Börsen notieren.
- Für die Klassifizierung trägt eine Person die Verantwortung, die *Competent Person (Qualified Person)*.

¹⁷⁵ CRIRSCO: <http://www.crirSCO.com/template.asp> (10.02.2013)

¹⁷⁶ <https://www.micon-international.com/mineral-resource-reporting-differences-between-cim-jorc-and-others/> (08.05.2020)

- Die technischen Informationen, die in einer Erklärung nach NI 43-101 für Reserven und Ressourcen erforderlich sind, übertreffen die im JORC-Code enthaltenen, vor allem durch die Bestimmung, dass bestimmte geologische Parameter des Mineralvorrates in einem Bericht dargestellt, vollständig veröffentlicht und auf besondere Weise dargestellt werden müssen (vgl. Kap. 3.4).

3.6.3. Vergleich CRIRSCO und UNFC

Die CRIRSCO-Ressourcenkategorien können den entsprechenden UNFC-Kategorien zugeordnet werden, d.h. es gibt eine gemeinsame Terminologie. Die CRIRSCO-Vorlage gibt die rohstoff-spezifischen Definitionen in UNFC für alle festen Mineralien an.

Nun kann die berechtigte Frage aufgeworfen werden, welches System sinnvoller Weise angewendet werden soll. Das ist keine Frage des Wettbewerbs oder der freien Wahl zwischen dem CRIRSCO-Berichtssystem und der UN-Rahmenklassifikation. UNFC bietet einen großen Rahmen, innerhalb dessen eine konsistente und vergleichbare öffentliche Berichterstattung in einer Reihe von Maßstäben durchgeführt werden kann. Für eine Reihe von Zwecken können nationale Vorratsklassifizierungen entwickelt und verwaltet werden. Wenn die CRIRSCO-Klassifizierung leichter angewendet werden kann, sollten diese auch verwendet werden. Es kann mit einiger Zuversicht auch angenommen werden, dass diese auch dem UNFC-Standard entspricht.

Das UNFC ermöglicht eine Harmonisierung der Daten durch die Einbeziehung bestehender Klassifizierungssysteme und der Anwendung der Umsetzungstabellen. Bestehende Ressourcenbestände, die anhand eines oder zweier Kriterien klassifiziert werden, können zunächst beibehalten werden, indem die Ressourcen auf die entsprechende Achse oder Ebene des UNFC projiziert werden. Während die Ressourcen neu bewertet werden, können die fehlenden Kategorien leicht identifiziert werden, sodass das alte Inventar in ein vollständiges UNFC-Inventar migriert werden kann.¹⁷⁷

Entscheidungen über Offenlegung und Qualitätssicherung sind unabhängig von Entscheidungen, welches System angewendet wird. CRIRSCO spricht beide an. Nach UNFC-2009 müssen sich Berichtsersteller und Anwender einig sein. UNFC bietet Regierungen und NGOs eine Methode, um veröffentlichte Branchendaten (unter Verwendung der CRIRSCO-Klassifizierung) in Datenbanken, Rohstoffbestand usw. einzubeziehen. Das UNFC bietet für Unternehmungen einen Mechanismus, um zusätzlich eine standardisierte interne Klassifizierung anzuwenden, die über die öffentlich gemeldeten CRIRSCO-Kategorien hinausgehen.

¹⁷⁷ www.unece.org (21.05.2020)

CRIRSCO Template		UNFC-2009 "minimum" Categories			UNFC-2009 Class
Mineral Reserve	Proved	E1	F1	G1	Commercial Projects
	Probable			G2	
Mineral Resource	Measured	E2	F2	G1	Potentially Commercial Projects
	Indicated			G2	
	Inferred			G3	
Exploration Results		E3	F3	G4	Exploration Projects

Abb. 35: CRIRSCO Kodex auf UNFC umgesetzt¹⁷⁸

Da UNFC keine verantwortliche Person definiert, ist es angebracht, sich Gedanken zur Datenintegrität zu machen. Die Verwendung von UNFC beeinträchtigt nicht grundsätzlich die Zuverlässigkeit von Berichten. CRIRSCO enthält die Spezifikationen für UNFC-Kategorien, die der CRIRSCO-Klassifizierung zugeordnet sind. Dazu gehören strenge Kompetenzanforderungen an den Gutachter. Für UNFC-Kategorien, die nicht in CRIRSCO zugeordnet sind, müssen die Richtlinien für die Berichterstattung noch definiert werden, sollten jedoch ebenso strenge Kompetenzanforderungen und durchsetzbare berufsethische Standesregeln enthalten.

¹⁷⁸ https://www.egt.ee/sites/default/files/content-editors/konverentsid/2019-kevad/blystad_unfc-conceptapplications_16may2019_tallinn.pdf (15.05.2020)

Code	Country	CRIRSCO member	Reporting standard recognised by national regulator	Type	Competent Person required	Investment / Funding	"Undiscovered" & "Uneconomic" material	By-metals included	Useful at mine level	Useful for global and governmental communication	Anthropogenic deposits includes	Environmental and social impacts taken into account
JORC	Australia	yes	yes	Classification Code	yes	yes	not included	no	yes	no	no	no
CIM	Canada	yes	yes	Classification Code	yes	yes	not included	no	yes	no	no	no
PERC	Europe & United Kingdom	yes	yes	Classification Code	yes	yes	not included	no	yes	no	no	no
GKZ	Russia	no	yes	Classification Code	(yes)	(yes)	not included	no	yes	no	no	no
NAEN	Russia	yes	yes	Classification Code	yes	yes	not included	no	yes	no	no	no
SAMREC	South Africa	yes	yes	Classification Code	yes	yes	not included	no	yes	no	no	no
SME	USA	yes	(yes)	Classification Code	(yes)	yes	not included	no	yes	no	no	no
UNFC	global	no	no	Generic Classification Framework	no	no	included	yes	yes	yes	yes	yes
NI 43-101	Canada	n/a	yes	Reporting Code	yes	yes(!)	not included	no	yes	no	no	not directly

Abb. 36: Gegenüberstellung der Reporting Codes¹⁷⁹¹⁷⁹ Eigene Darstellung

3.6.4. Verbesserungspotentiale von Klassifizierungssystemen

Reporting Codes sind vor allem ein wichtiges Werkzeug, um Investoren für Bergbauprojekte zu bekommen. Die internationale Vergleichbarkeit hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert und alle relevanten Staaten haben sich dem CRIRSCO Standard unterworfen (Abb. 36). Dennoch verbleiben national in der Praxis Unterschiede. Die Gegenüberstellung in Abb. 36 zeigt den Grad der Einsetzbarkeit des jeweiligen Codes an. In dieser Arbeit wird insbesondere die Verfügbarkeit des Nebenmetalls Selen untersucht. Die „klassischen“ Codes zielen jedoch nur auf die Erfassung des Hauptelements ab und geben keine sinnvolle Möglichkeit, Spurenminerale mit zu erfassen. Lediglich der UNFC-Code hat dafür ein explizites System. Die **Unterthese B** dieser Arbeit, dass die im Regelfall zu Anwendung kommenden Klassifizierungssysteme, die Begleitelemente nur unzureichend berücksichtigen, muss sohin als bestätigt angesehen werden.

Primär dienen die Codes zur Beschreibung eines Projektes bzw. einer Lagerstätte. In strategischer Hinsicht wäre auch eine volkswirtschaftliche Betrachtung von Ressourcen und Reserven interessant. Diese Daten könnten für den internationalen Austausch zwischen Nationen oder auch für eine (europäische) Mineralrohstoffstrategie herangezogen werden. Dafür ist ebenfalls nur das UNFC System geeignet. Ebenso bietet für die Bewertung von sozialen und ökologischen Auswirkungen nur der UNFC-Code Mechanismen an. Für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft und Rohstoffwiederverwertung als Sekundärmaterial sind die Dokumentation von anthropogenen Lagerstätten essenziell. Auch hierfür bietet sich ausschließlich das UNFC-Verfahren an.¹⁸⁰ In dieselbe Kerbe stößt auch die langfristige Betrachtung von heute unwirtschaftlichen Vorkommen und noch nicht (ausreichend) erforschten Lagerstätten. Beispielsweise können Preissteigerungen und/oder technologische Quantensprünge schlagartig solche Vorkommen wirtschaftlich nutzbar werden lassen. Die Dokumentation von „undiscovered“ und „uneconomical“ material kann im UNFC-Code erfolgen.

Die Vorgangsweise der Bewertung von Vorratsklassen ist bei allen Klassifikationssystemen weitgehend ident. Im Prinzip folgen alle Systeme dem Prinzip, dass mit zunehmender Untersuchung (Prospektion) das Vertrauen und die Aussagekraft stärker wird. So wird aus dem allgemeinen Vorrat (Inventory) zunächst eine Ressource einer bestimmten Klasse und bei positiven Analyseergebnissen eine Reserve einer bestimmten Kategorie. Dennoch ist die Qualität und Aussagekraft im Detail unterschiedlich.

¹⁸⁰ [KRAL2018]

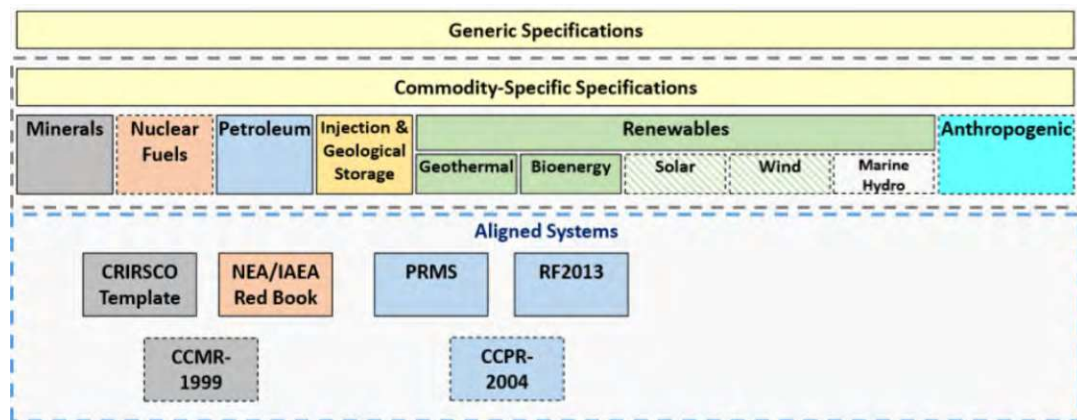


Abb. 37: UNFC ermöglicht umfassende Erfassung verschiedener mineralischer (auch anthropogener) und energetischer (auch erneuerbare) Rohstoffvorkommen; Vergleich zu anderen Reporting Codes¹⁸¹

Meist wird der Fokus der Untersuchungen auf den Hauptrohstoff gelegt. „Das nicht zu unterschätzende Rohstoffpotential seltener Metalle wird derzeit weder auf nationaler, EU-Ebene, noch global in nachvollziehbarer Weise bewertet. Dies gilt auch für das Rohstoffpotential aus unkonventionellen Ressourcen (z. B. Flugaschen).“¹⁸² Weber stellt in seiner Analyse pars pro toto für zahlreiche seltene Metalle am Beispiel Gallium (Ga) dar, dass „das hinsichtlich seines Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung als ‚kritisch‘ eingestufte Metall Ga in den Vorratserfassungen ignoriert und auch ungenutzt in Deponien von Industrieabfällen abgelagert wird.“¹⁸³

In der Analyse wird thematisiert, dass eine allgemeine Verpflichtung zur Veröffentlichung von Vorratsdaten nicht gegeben ist. Selbst wenn der mühevollste Weg einer Recherche aller verfügbaren Berichte und der Erfassung dieser Ergebnisse in einer Datenbank beschritten würde, wird das Ergebnis folglich nicht vollständig sein können. Die Folge ist, dass eine bloße Addition der jeweiligen Vorratsdatenkategorien der veröffentlichten Teilmengen die tatsächlich verfügbaren Reserven und Ressourcen mit hoher Wahrscheinlichkeit unterschätzen.¹⁸⁴ Es ist daher zu empfehlen, dass in den Kodizes der Vorratsdatenerfassung möglichst alle in der Lagerstätte verfügbaren Ressourcen und Reserven gemäß ihrer jeweiligen Klassifizierung ausgewiesen werden. Diese Transparenz verbessert die Übersicht über die Größenordnungen von mineralischen Rohstoffen und durch technischen Fortschritt oder Marktpreisveränderungen können bislang niedrig klassifizierte Rohstoffe wirtschaftlich Bedeutung und Interesse gewinnen. Darüber hinaus unterstützt eine umfassendere Datenlage die Bemühungen um Nachhaltigkeit und kann als strategischer Indikator für als kritisch eingestufte Rohstoffe herangezogen werden.

¹⁸¹ https://www.egt.ee/sites/default/files/content-editors/konverentsid/2019-kevad/blystad_unfc-conceptapplications_16may2019_tallinn.pdf (15.05.2020)

¹⁸² [WEBE2013], S.138

¹⁸³ ebd.

¹⁸⁴ [WEBE2013], S.138

Neben den Unsicherheiten in der Datenqualität des Rohstoffes selbst, sind Vorratsdatenerfassungen in den folgenden Prozessschritten nicht die Regel. „Verschiedene seltene Metalle treten nicht in eigenen Lagerstätten auf, sondern werden aus Hüttenabfällen (Anodenschlämme), Verbrennungsprodukten etc. gewonnen. Nur in wenigen Ausnahmefällen werden diese Wertstoffe auch in die Vorratsklassifikation einbezogen. Obwohl manche dieser Rohstoffe im Hinblick auf die Versorgungssicherheit als kritisch eingestuft werden, bestehen keine verlässlichen Angaben über die globale Vorratssituation, somit auch nicht über die Reichweite.“¹⁸⁵ Es ist daher zu empfehlen, dass bei Novellierungen der Kodizes dieser Mangel behoben werden sollte.

Die Gesellschaft verlangt mit Recht nach geschlossenen Rohstoffkreisläufen, einer „Circular Economy“. Um die Wiederverwendung von mineralischen Rohstoffen besser planen zu können, wäre auch die Erfassung in Verwendung befindlicher Materialien hilfreich. Zu irgendeinem Zeitpunkt ist die Nutzungsphase des Produkts oder der Anlage und damit auch der darin enthaltenen Rohstoffe zu Ende. Man spricht in diesem Zusammenhang von anthropogenen Ressourcen. Eine Vorratsklassifikation von anthropogenen Lagerstätten wird im Regelfall nicht vorgenommen und es gibt erst einige Beispielprojekte einer solchen Datenerfassung. Das UNFC-System wurde 2018 um die Erfassungsmöglichkeit von anthropogenen Ressourcen erweitert.¹⁸⁶ Bei anderen Codes ist die Erfassung von Sekundärrohstoffen (noch) nicht vorgesehen.

¹⁸⁵ ebd.

¹⁸⁶ [KRAL2018]

4. Kupfer: Eigenschaften, Vorkommen, Lagerstätten, Erzeugung

4.1. Historische Bedeutung von Kupfer

Kupfer ist wahrscheinlich das erste Metall, das umfangreich vom Menschen eingesetzt wurde. Zwar war Eisen von Meteoriten und Gold, das aus Flüssen gewaschen wurde, bereits zur gleichen Epoche in Verwendung, aber diese Metalle waren nicht in so großen Mengen verfügbar, dass sie im Alltag der Menschen signifikante Verwendung fanden. Hingegen war elementares, gediegenes Kupfer auf der Erde relativ weit verbreitet. Nachgewiesen ist seine Nutzung in Ornamenten vor zehntausend Jahren. Vor circa sechstausend Jahren war Kupfer bereits ein wesentliches Handelsgut. Frühe Werkzeuge aus Kupfer wurden durch Hämmern in die gewünschte Form gebracht, waren aber spröde. Dieser Nachteil wurde bald durch Erwärmen des Kupfers vor der Bearbeitung aus der Welt geschafft. Schon vor 5.600 Jahren war es möglich, Kupfer aus den Erzen zu schmelzen.

Der nächste wichtige Entwicklungsschritt war die Legierung von Kupfer mit anderen Elementen, um Bronze herzustellen. Heute wird Bronze aus Kupfer und Zinn legiert. Historisch war Bronze jedoch eine Mischung aus Kupfer und Arsen, wahrscheinlich, weil diese beiden Elemente oft in einer Lagerstätte gemeinsam vorkamen. Bronze revolutionierte die Waffenherstellung und war Basis innovativer Werkzeuge und hat daher eine neue Epoche, die Bronzezeit¹⁸⁷ eingeläutet. Vor etwa viertausend Jahren wurde Kupfer mit Zink zu Messing legiert, das ebenso breitgefächerte Anwendungen fand. Kupfer wurde insbesondere für Kochgeschirr, Rohre und Werkzeuge eingesetzt und nicht zuletzt wegen seiner Eigenschaften der Korrosionsbeständigkeit und antibakteriellen Wirkung. Mit Beginn des Industriezeitalters wurde Kupfer immer begehrt, insbesondere wegen seiner hervorragenden elektrischen und thermischen Leitfähigkeit.¹⁸⁸

187 Die Bronzezeit umfasst in Mitteleuropa etwa den Zeitraum von 2200 bis 800 v. Chr. als Teil des Holozäns zwischen Stein- und der jüngeren Eisenzeit.

188 Daten [KESL.2017, p.218] entnommen.

4.2. Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Kupfer

Kupfer ist ein besonderes Metall. Es kann sehr leicht geschmolzen und legiert werden. Daher war Kupfer schon früh in der Menschheitsgeschichte von Bedeutung und Legierungen wie Bronze und Messing sind bis heute in Verwendung. „Kupfer (lat. **Cuprum**) ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Cu und der Ordnungszahl 29. Es ist ein Übergangsmetall, im Periodensystem steht es in der 4. Periode und der 1. Nebengruppe (nach neuer Zählung Gruppe 11) oder Kupfergruppe. Der lateinische Name cuprum ist abgeleitet von (aes) cyprium „Erz von der griechischen Insel Zypern“, auf der im Altertum Kupfer gewonnen wurde.“¹⁸⁹

Die frühe Nutzung des Buntmetalls in der Menschheitsentwicklung liegt in den hervorragenden Eigenschaften von Kupfer begründet, weshalb auch heute und in der absehbaren Zukunft das Element nicht nur geschätzt wird, sondern unverzichtbar ist. Es ist zwar ein hartes, aber dennoch zähes und dehnbares Metall. Auch seine rötliche Farbe und der Glanz und Spiegeleffekt auf polierten Kupferoberflächen hat mit Sicherheit damals ebenso zur gesellschaftlichen Attraktivität dieses Rohstoffs beigetragen und wurde auch für Schmuck verwendet. In der Alchemie wurde Kupfer die Venus (Symbol: ♀) zugeordnet, das in der römischen Mythologie die Göttin der Liebe und des erotischen Verlangens und der Schönheit repräsentiert und in der Biologie für das weibliche Geschlecht steht.¹⁹⁰ Das Symbol selbst zeigt einen Spiegel, vielleicht ein Hinweis auf die frühe Verwendung von Kupfer.

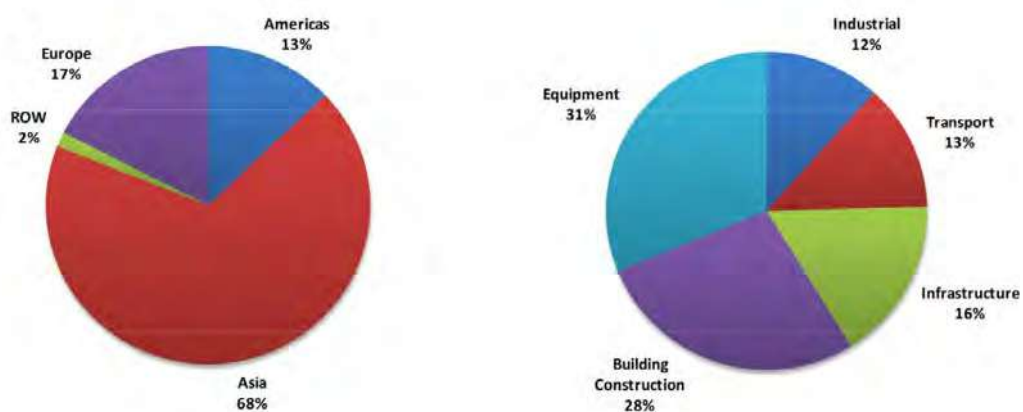


Abb. 38: Verwendung von Kupfer: links nach Regionen, rechts nach Sektor¹⁹¹

¹⁸⁹ [LANG2011], p.16.

¹⁹⁰ [LANG2011], p.39.

¹⁹¹ [ICSG2019], ICSG, The World Copper Factbook 2019, p.51.

Kupfer hat die Menschheit immer schon fasziniert, lange bevor naturwissenschaftlich die besonderen technischen Eigenschaften, wie gute elektrische und thermische Leitfähigkeit und antimikrobielle Wirkung festgestellt wurden. Heute wird Kupfer, das einen Schmelzpunkt von 1083°C besitzt, insbesondere zu Drähten, dünnen Blechen und Rohren (z.B. für Klimageräte) verarbeitet. Neben der Elektroindustrie wird Kupfer als Pestizid für Pflanzenschutz eingesetzt und zu Legierungen verarbeitet. Die häufigsten Kupferlegierungen sind Bronze mit dem Zusatzmetall Zinn, Messing für das Zink zu legiert wird und aus Kupfer, Zink und Nickel wird Neusilber¹⁹² hergestellt.

Kupfer ist als schlagzähes Metall auch bei Normaltemperatur gut formbar. Daher konnten schon früh Münzen aus Kupfer geprägt werden. Kupfer ist ein hervorragender Wärme- und Stromleiter und findet vielseitige Verwendung. Insbesondere für energieeffiziente Geräte ist daher Kupfer der Werkstoff der Wahl. Nicht ganz so bekannt ist die antibakterielle Wirkung von Kupfer. Oft werden daher beispielsweise in Krankenhäusern Türklinken mit Kupfer überzogen, um Keimübertragungen zu minimieren.¹⁹³ Diese Eigenschaft kann nach den Erfahrungen durch die COVID-19 Pandemie gesteigertes Interesse hervorrufen.

Die elektrische und elektronische Revolution hat Kupfer unverzichtbar gemacht. Ein Großteil des Kupfers wird heute in der Elektrotechnik z. B. als elektrischer Leiter für die Kabelindustrie und Elektronik eingesetzt. Das zweitwichtigste Anwendungsgebiet ist das Bauwesen, wo Kupfer für Rohre im Sanitär- und Heizungsbereich, aber auch für Fassadenverkleidung und für Dächer verwendet wird. Kupfer ist auch Bestandteil von Legierungen wie Bronze (Kupfer-Zinn) und Messing (Kupfer-Zink), die sich durch eine hohe Korrosionsbeständigkeit auszeichnen. Bedeutend ist die Verwendung von Kupfer auch im Bereich Infrastruktur und Mobilität. Letztgenannter Sektor gewinnt durch Elektromobilität weiter für Kupfer an Bedeutung. Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld dieser Legierungen ist das Münzwesen. Messing wird darüber hinaus auch im Bauwesen für innenarchitektonische Zwecke verwendet.

Es ist daher kaum verwunderlich, dass Kupfer zu den bedeutenden Metallen der Industrieproduktion zählt. Ab dem Jahr 2017 betrug weltweite Kupferförderung über 20 Mio. t mit einem Wert (abhängig vom Metallpreis an der Börse) von circa 150 Milliarden Euro jährlich. Herkömmlicherweise wird Kupfer durch ein pyrometallurgisches Verfahren gewonnen, das als „Smelting“ („Schmelzen“) bekannt ist. Dabei wird Kupfererz abgebaut, zerkleinert, gemahlen, konzentriert, geschmolzen und raffiniert. Das SX-EW-Verfahren (solvent-extraction electrowinning technology) ist ein hydrometallurgisches Verfahren, das bei Umgebungstemperaturen arbeitet und sich das Kupfer während seiner Verarbeitung entweder in einer wässrigen oder einer organischen Um-

192 [LANG2011], pp.307.

193 [LANG2011], p.36.

gebung befindet, bis es zum Metall reduziert wird. Aufgrund seiner Abhängigkeit von Schwefelsäure ist das SX-EW-Verfahren derzeit kein Ersatz, sondern eine Ergänzung zum konventionellen Schmelzen (Abb. 40).

Zwei Drittel der jährlichen Kupfererzeugung werden in China abgesetzt (Abb. 38). Wie bei anderen Basismetallen dominiert auch bei Kupfer China den Weltmarkt. Dem folgen mit 17% die Region Europa und mit 13% Amerika und machen somit zusammen nicht einmal ein Drittel der weltweiten Kupfernachfrage aus. Der Aufholprozess Chinas ist auch aus den Anwendungssektoren abzulesen. Es dominieren neben den Anlagen und Produkten (31%) vor allem der Bau-sektor (28%) und die Infrastruktur (16%). Der Industriebedarf und die Verwendung in der Mobilität sind mit 12% bzw. 13% in etwa gleich groß.

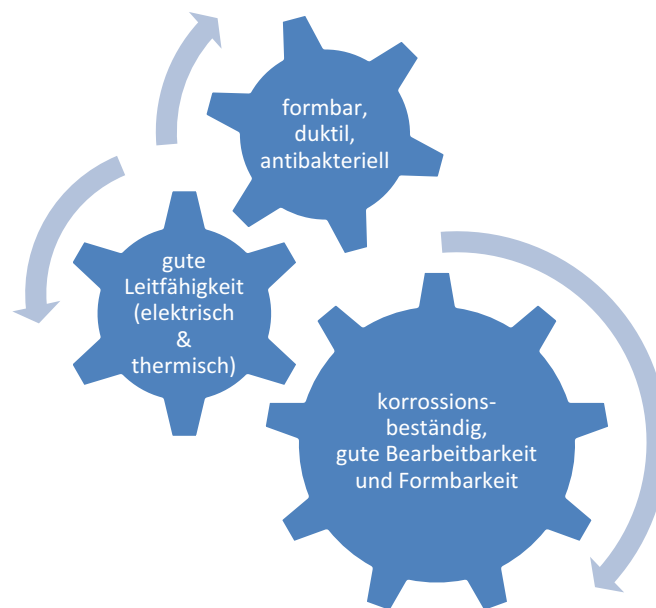


Abb. 39: Eigenschaften und Vorteile von Kupfer

World Copper Mine Production, 1900-2018

(thousand metric tonnes copper)

Source: ICSG

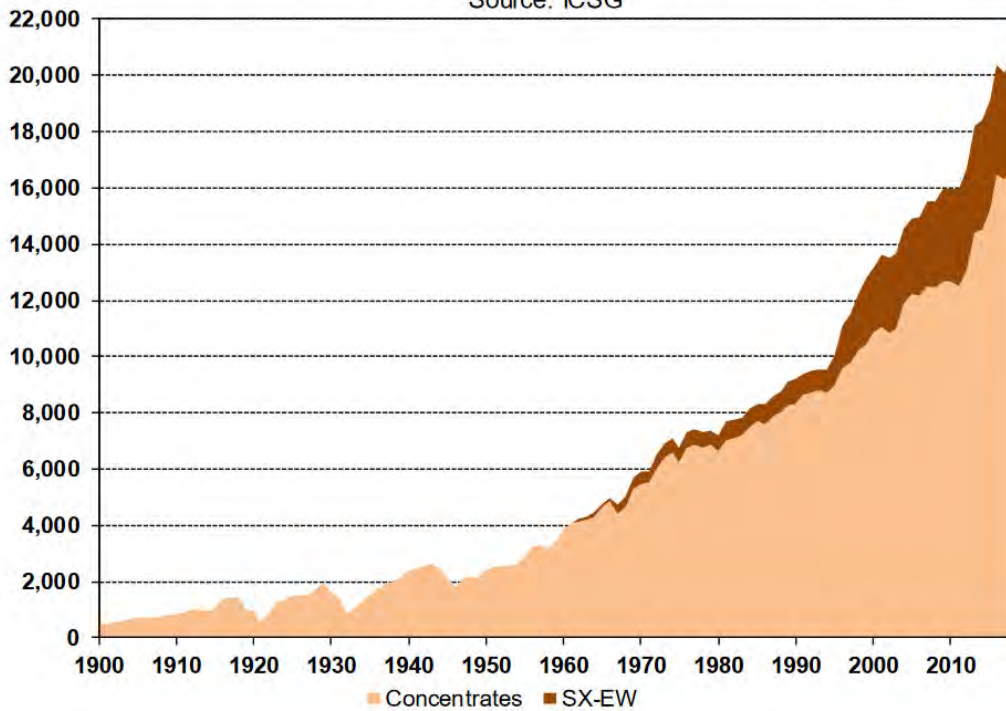


Abb. 40: Produktion aus Kupferbergbau¹⁹⁴

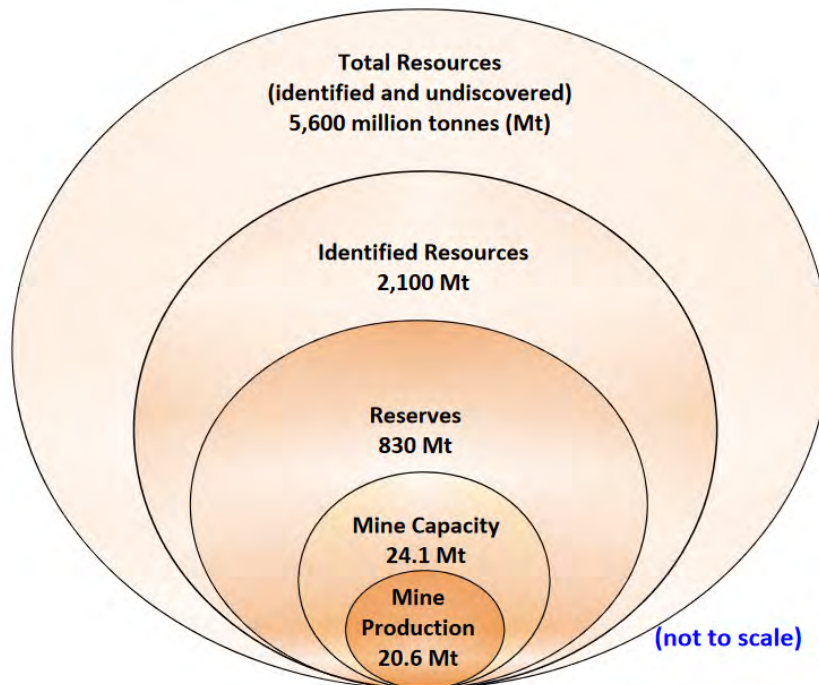


Abb. 41: Weltweite Kupfervorräte nach Kategorien und Kupferproduktion 2018¹⁹⁵

194 [ICSG2019], ICSG, The World Copper Factbook 2019, p.10.

195 [ICSG2019], ICSG, The World Copper Factbook 2019, p.6.

4.3. Kupfererzeugung

Ausgangsbasis sind sulfidische und/oder oxydische Kupfererze. Dieses Erz kann sowohl im Tage- als auch im Untertagebau gewonnen werden. Die typischen Kupferlagerstätten werden weiter unten beschrieben (Kap. 4.6, S.114). Die größten Mengen an Kupfer werden von porphyrischen Lagerstätten gewonnen und daher wird der Kupferaufbereitungsprozess (Abb. 44) anhand dieses Lagerstättentyps schematisch kurz beschrieben. Abhängig, ob das Kupfererz sulfidischen oder oxydischen Ursprung ist, verläuft der Aufbereitungsprozess unterschiedlich (Abb. 42, Abb. 49).

Das aus dem Bergbau geförderte Erz wird zur Aufbereitungsanlage gebracht und dort zerkleinert und zu feinem Material gemahlen. Das nichtoxydierte, sulfidische Erz wird in einen Flotati-

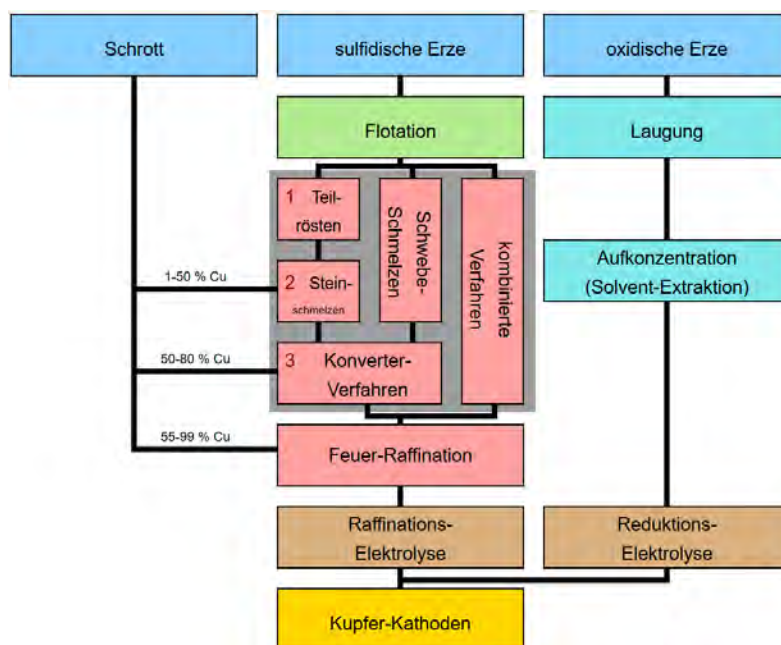


Abb. 42: Vereinfachtes Schema der Kupfererzeugung¹⁹⁶

onsprozess konzentriert. Dieser Prozess ist in Abb. 48 detaillierter dargestellt. Das sulfidische Erz haftet an den Luftbläschen der Flotationsflüssigkeit besser als das taube Nebengestein an. Das anhaftende und über die Luftbläschen aufschwimmende Kupfererz wird abgeschöpft und so vom tauben Gestein separiert. Das konzentrierte Material wird getrocknet und in ein Hüttenwerk (Smelter) gebracht. Im Schmelzofen werden die Sulfide abgetrennt und es verbleibt geschmolzenes Kupfer. Dieses Kupfer wird zu Platten gegossen und da es nach wie vor Verunreinigungen aufweist, bedarf es eines „Refining“ Prozesses.

¹⁹⁶ Darstellung aus: http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_cu_gruppe.html (15.05.2020)

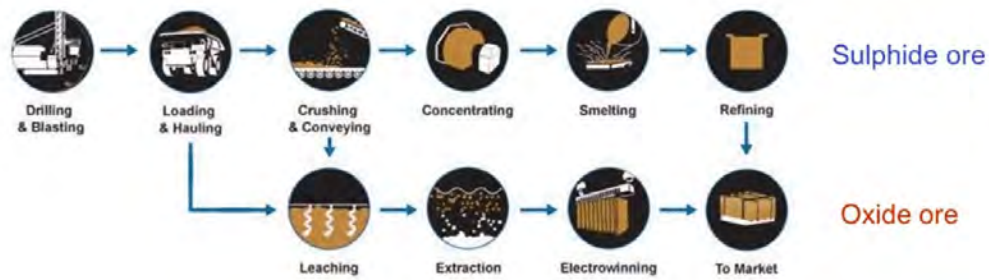


Abb. 43: Schematische Darstellung einer Aufbereitung von Kupfererz aus einer porphyrischen Lagerstätte¹⁹⁷

Das oxydische Erz wird in Schwefelsäure gelöst („Leaching“). Die resultierende blaue Kupferlösung wird vom Boden des Beckens abgezogen und in Tanks gepumpt. In diesen Behältern befinden sich Stahlplatten an denen Gleichstrom angeschlossen wird und sich das gelöste Kupfer an den Anoden elektrolytisch anlegt, die danach als Reinkupferplatten abgezogen werden können. Dieser Prozess ist auch unter dem Begriff „SX-EW“ (solvent extraction/electrowinning) bekannt. Oxydisches Erz hat den Vorteil, dass der energieintensive Hütten- und Refining-Prozess entfällt. Darüber hinaus treten keine Abgase auf und kann mit geringem Investment auch bei kleineren Produktionsmengen wirtschaftlich betrieben werden. Auch wenn das Erz nur sehr geringen Kupferanteil hat (bis 0,1%), kann das Verfahren gewinnbringend eingesetzt werden. Es erfreut sich daher wachsender Beliebtheit und wird heute – obwohl in den 1960er Jahren noch nicht eingesetzt – schon für circa ein Fünftel der Kupfererzeugung verwendet.¹⁹⁹

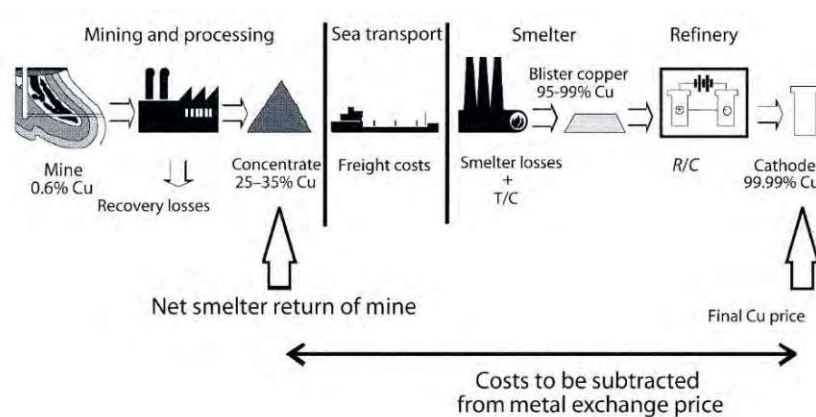


Abb. 44: Funktionsschema für den Aufbereitungsprozess von Kupfer¹⁹⁸

197 <https://www.911metallurgist.com/blog/copper-mining-extraction-process-flow-chart> (15.05.2020)

198 [WELL2008], Fig. 7.1., p.72

199 copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/ (15.5.2020)

Die Illustration in Abb. 49 zeigt den Materialfluss zu den geläufigsten Halbzeug-Fabrikaten. Recycling aus wiederverwertbaren Schrotten ist eine weitere wichtige Kupferquelle, die als sekundäre Kupferproduktion bezeichnet wird. Rund die Hälfte des europäischen Kupferbedarfs wird derzeit mit recyceltem Material gedeckt, und damit ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft geleistet.²⁰⁰

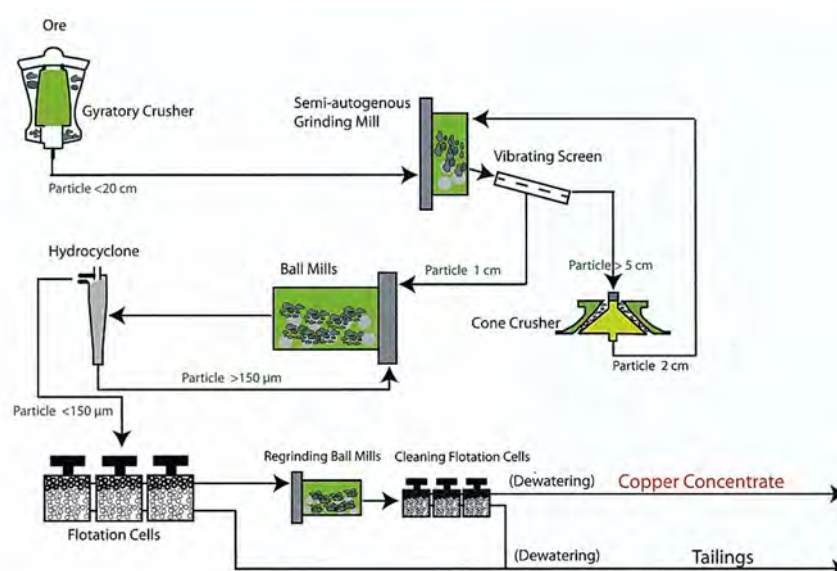


Abb. 45: Flussdiagramm für die Erzeugung von Kupferkonzentrat²⁰¹

200 copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/ (15.5.2020)

201 [LANG2011], Fig. 5.1.5., p.66

4.3.1. Grundlagen der Hütten- und Refining-Prozesse

Es gibt verschiedene Technologien für die Hüttenprozesse und Herstellung von Reinkupfer. Die grundlegenden Schritte sind jedoch sehr ähnlich. Das grundlegende Flussdiagramm ist in Abb. 45 illustriert, wie ein Konzentrat in mehreren Zwischenschritten zu Kupfer-Anoden verarbeitet wird. Durch Abscheidung von u.a. Eisen und Sulfat entsteht Konverterkupfer („copper matte“) mit einer Konzentration von mehr als 50%. Durch Oxidation entsteht Blisterkupfer („blister copper“) mit einer Reinheit von circa 98%. Der Name rührt von dem relativ hohen Sauerstoffanteil im Material, das Blasen bildet. Der Sauerstoff- und Schwefelanteil wird beim Anodenguss reduziert, meist durch Reduktion mit Erdgas. Die Gussanoden werden durch Elektrolyse in Reinkupfer verwandelt, das nur mehr wenige ppm Verunreinigungen beinhaltet, also eine Reinheit, die größer als 99,99% ist Abb. 46.

Diese Prozessschritte sind auch für die Aufbereitung von Nebenmetallen essentiell. Da die Unreinheiten (bezogen auf das Hauptmetall Kupfer) in jedem Prozessschritt reduziert werden, können auch Teile von Nebenmineralien abgeschieden werden. Langner²⁰² gibt als grobe Orientierung je nach verwendeter Technologie an, dass beispielsweise vom Selen circa 75% im Konverterkupfer (matte) verbleiben, circa 5% in die Schlacke gehen und etwa ein Fünftel bei Verdampfungs- und Verflüssigungsprozessen verloren gehen. Diese Werte sind auch eine Indikation, dass die Prozessoptimierung hauptsächlich auf das Hauptmetall ausgerichtet ist und Nebenmetalle auch technologisch oft nicht tiefer beachtet werden. Um das Rohstoffpotenzial von Nebenmetallen voll ausschöpfen zu können, ist zu empfehlen, dass die Aufbereitungsprozesse für die Abscheidung von Nebenmaterialien optimiert werden.

202 [LANG2011], p.109

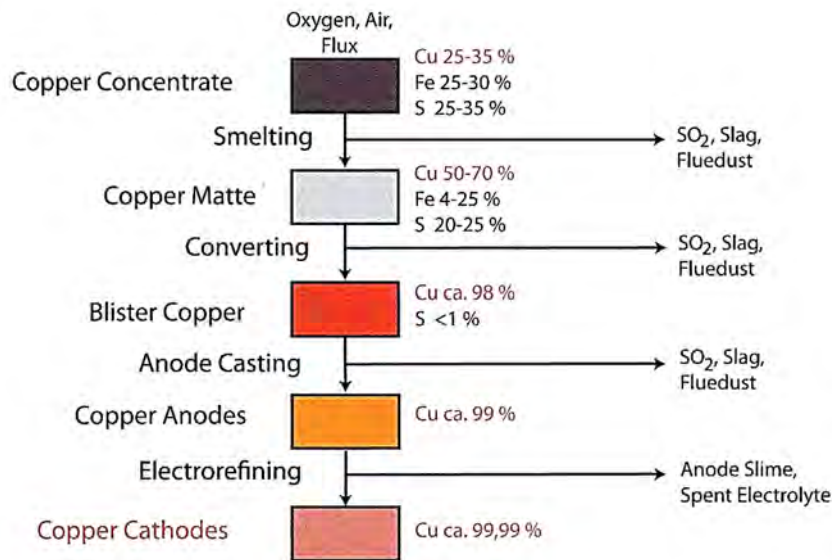


Abb. 46: Grundlegendes Flussdiagramm der Hüttenprozesse und Reinkupfererzeugung aus Kupferkonzentrat²⁰³

4.3.2. Behandlung von Anodenschlamm

Tankhausschlämme werden meist auch als „Anodenschlämme“ bezeichnet und sind das Ergebnis von Materialablagerungen in Elektrolysezellen. Diese Schlämme enthalten die Bestandteile der Kupferanoden, die während des Elektrorefinierungsprozesses unlöslich bleiben und sich schließlich am Boden der Zellen absetzen. Im Allgemeinen weisen diese Schlämme, die durch Kupferrefinierung verschiedener Erze erzeugt werden, die gleichen Werte und Verunreinigungen auf, einschließlich Gold, Silber, Metalle der Platingruppe, Kupfer, Selen, Arsen, Zinn, Blei und Tellur. Ihre Metallkonzentrationen können jedoch stark variieren, abhängig von dem Erz, aus dem die Kupferanoden gewonnen wurden. Der Rohschlamm weist meist einen hohen Kupfer- und hohen Selengehalt auf. Die Behandlung des Anodenschlammes beginnt daher mit der Abscheidung von Kupfer und danach erfolgt üblicherweise die **Deselenisierung**.

Nach dem Elektrolyseprozess und der Fertigstellung der Kupferanode beinhaltet der Anodenschlamm alle Metalle, die edler als Kupfer sind und solche Verbindungen, die im Elektrolyt nicht löslich sind. Die Menge an Anodenschlamm hängt vom Grad der Verunreinigung des Anodenkupfers ab und liegt zwischen 1,8 kg/t und 8 kg/t Anodenkupfer. Anodenschlamm beinhaltet für gewöhnlich Blei und Bleisulfate, diverse Oxide, Edelmetalle wie Silber, Gold und Platin, entweder als in elementarer Form oder als Selenid oder Tellurid, abhängig vom Verhältnis zwischen Kupfer und Selen in den Anoden.²⁰⁴ Auch Reste von Kupfer sind im Anodenschlamm abgelagert.

²⁰³ [LANG2011], Fig. 5.3.3., p.107

²⁰⁴ [LANG2011], p.155

In einem ersten Schritt wird der Anodenschlamm mit Schwefelsäure und Sauerstoffanreicherung ausgewaschen (Abb. 47). Kupfer, Tellur und Selen werden dabei gelöst, gelegentlich auch Silber. Diese Lösung wird gereinigt und weiter behandelt und getrocknet. Im Regelfall wird im Folgeschritt das Selen entfernt. Dies geschieht entweder durch Zugabe von Natronlauge, wodurch natrium- und selenhaltige Schlacke entsteht. Oder das Selen wird verdampft durch Oxydation zu Selendioxyd, das mit Wasser vom Gas ausgewaschen werden kann. Selen kann danach entweder aus der Schlacke zurückgewonnen werden oder aus der wässrigen Lösung durch Abscheidung des elementaren Sells durch Schwefeldioxyd.²⁰⁶ Nach einigen Reinigungsschritten erhält man reines Selen, das am Markt verkauft werden kann.

Die Rückgewinnung von Selen aus dem Anodenschlamm ist technologisch möglich, bedarf jedoch technischer Einrichtungen. Da sich in vielen Geschäftsberichten keine Angaben zur Selenproduktion finden, kann gemutmaßt werden, dass die Selenrückgewinnung oft unterbleibt und

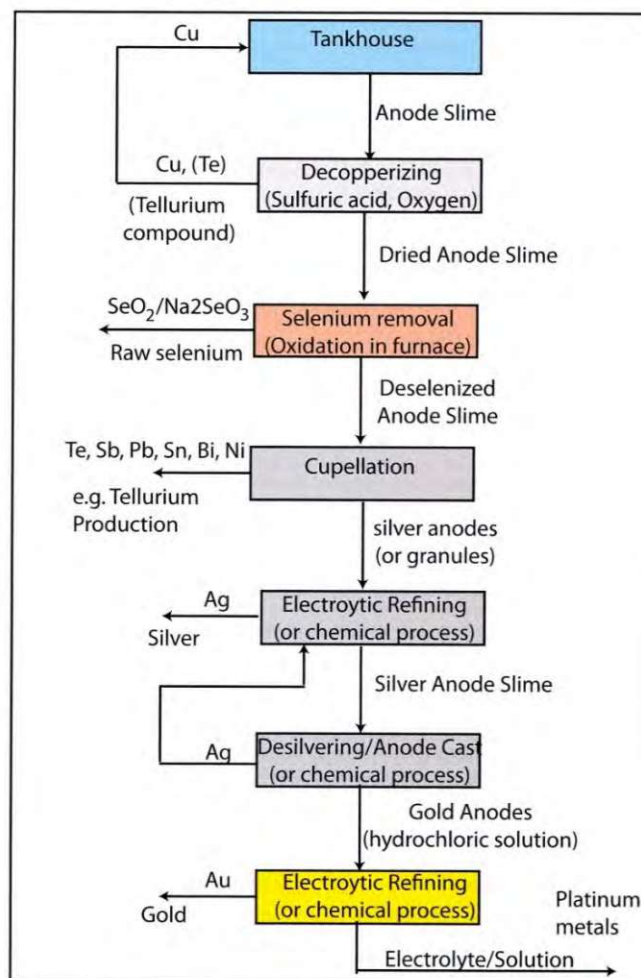


Abb. 47: Beispiel für die Rückgewinnung von Edelmetallen und Selen²⁰⁵

205 [LANG2011], Fig. 5.3.28., p.158

206 [LANG2011], p.157

der Rohstoff im Anodenschlamm ungenutzt verbleibt. Es kann aber auch der Anodenschlamm an Spezialbetriebe weiterverkauft werden. Der weltweit größte Produzent von Selen ist die Firma Retorte,²⁰⁷ ein Tochterunternehmen von Aurubis. Dieses Unternehmen kauft Rohselen von verschiedenen kupfererzeugenden Betrieben und formt dieses in hochreines Selen (und Selenverbindungen) um.

Der Wertschöpfungsprozess der Kupfererzeugung mit den ansteigenden Konzentrationen des Kupfergehalts sind in Abb. 48 und Abb. 49 dargestellt. Naturgemäß liegt der wirtschaftliche Hauptfokus in der Herstellung von hochreinem Kupfer oder handelbaren Zwischenerzeugnissen, die geläufige Marktprodukte sind. Die einzelnen Prozessschritte sind auch in Hinblick der Gewinnung der Nebenrohstoffe von großer Bedeutung. Zu empfehlen ist, dass die Analyse der (Neben-) Inhaltsstoffe besser dokumentiert wird und damit auch allfällige Rohstoffreserven erkennbar werden. Wie in der Primärerzeugung mit den damit verbunden geologischen Herausforderungen und dem Kupferanreicherungsgrad der Lagerstätte, ist auch im Aufbereitungsprozess von Innovationsfortschritten auszugehen, die die Gewinnung bzw. Extrahierung zu einem späteren Zeitpunkt wirtschaftlich sinnvoll machen können. Die Prozessrückstände werden oft über lange Zeit gelagert und könnten als „Aufbereitungslagerstätten“ oder „*process mining*“ für einen späteren Zeitpunkt zu den Rückgewinnungstechnologien technisch und ökonomisch machbar und entwickelt sind, als Rohstoffquellen genutzt werden.

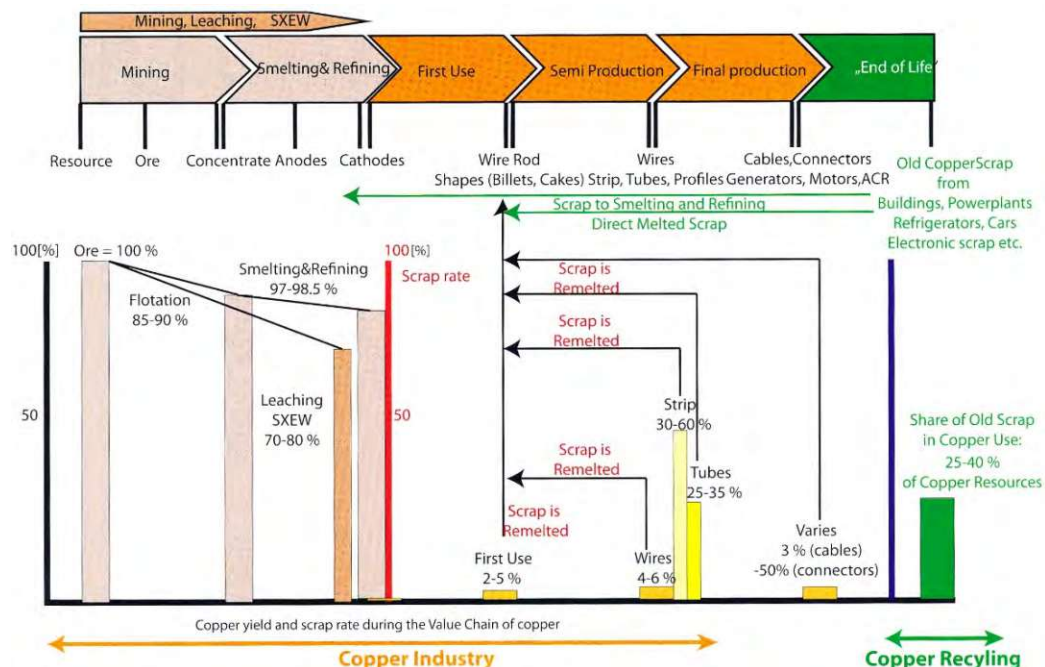


Abb. 48: Kupferanteil in der Produktion und Recycling entlang der Wertschöpfungskette²⁰⁸

207 www.retorte.de (29.05.2020)

208 [LANG2011], Fig. 10.1.2, p.329

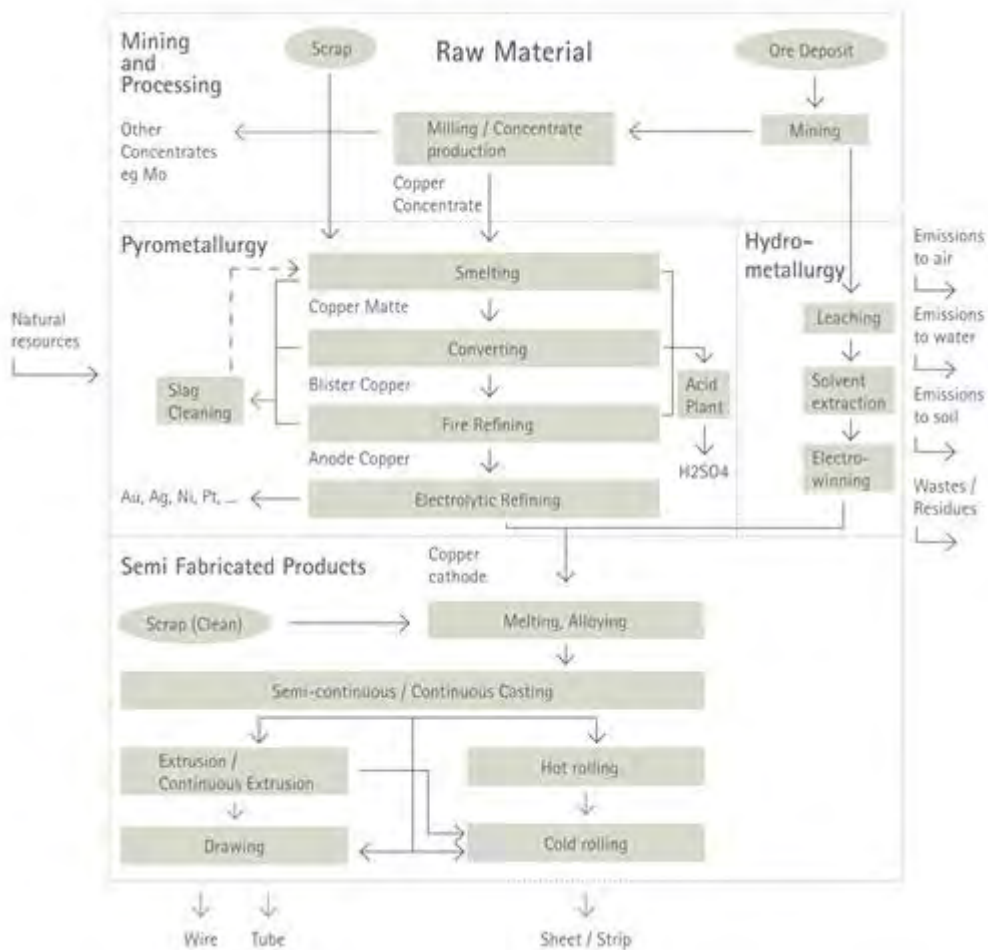


Abb. 49: Materialfluss der Kupferaufbereitung²⁰⁹

²⁰⁹ <https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/> (15.05.2020)

4.4. Kupferproduktionsmengen

Die gesamte primäre Kupfererzeugung beläuft sich auf rund 20 Millionen Tonnen pro Jahr. Die aktuell von USGS berichteten Produktionsmengen sind in Abb. 50 und Abb. 51 sowie in Tabelle 2 zusammengestellt. Die ausgewiesenen Kupferreserven belaufen sich auf 870 Millionen Tonnen (Mt). ICSG weist aktuell (Abb. 41) vergleichbare Werte aus. Die Bergbauproduktion wird von ICSG mit 20,6 Mt bei einer maximalen Produktionskapazität von 24,1 Mt.

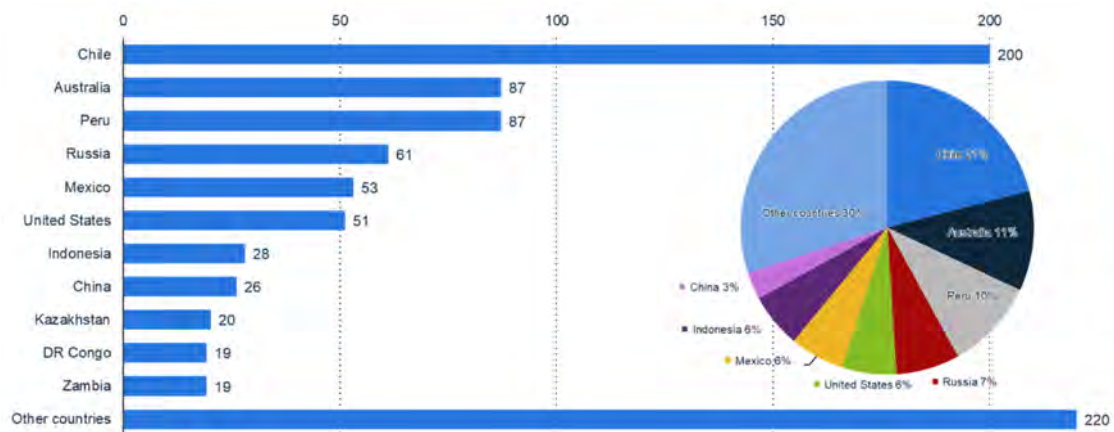


Abb. 51: Globale (weltweite) Kupferreserven des Jahres 2019 nach Ländern in Millionen metrischen Tonnen nach Verhältnissen in Prozent. (USGS)²¹¹

	Mine production		Reserves ⁷
	2018	2019 ^e	
United States	1,220	1,300	51,000
Australia	920	960	⁸ 87,000
Chile	5,830	5,600	200,000
China	1,590	1,600	26,000
Congo (Kinshasa)	1,230	1,300	19,000
Indonesia	651	340	28,000
Kazakhstan	603	700	20,000
Mexico	751	770	53,000
Peru	2,440	2,400	87,000
Russia	751	750	61,000
Zambia	854	790	19,000
Other countries	3,540	3,800	220,000
World total (rounded)	20,400	20,000	870,000

Abb. 50: Weltweite Kupferproduktion und Reserven nach Ländern bzw Regionen gegliedert (Angaben in 1.000 metric tons – Tt) (2020, USGS)²¹⁰

210 [USGSCU2020], p.53. [Superscript: 7: See Appendix C for resource and reserve definitions and information concerning data sources. | 8: For Australia, Joint Ore Reserves Committee-compliant reserves were 23 million tons. | e: Estimated]

211 Daten USGS, Grafik Statista.

Country	2014	2015	2016	2017	2018
Chile	5.761.100	5.772.100	5.552.600	5.503.500	5.831.600
Peru	1.377.642	1.700.817	2.353.859	2.445.585	2.436.951
China	1.781.000	1.706.400	1.851.000	1.706.400	1.561.100
Congo, D.R.	1.030.129	1.039.007	1.023.687	1.094.638	1.239.059
United States	1.360.000	1.380.000	1.430.000	1.260.000	1.220.000
Australia	978.534	995.881	947.555	849.121	913.336
Zambia	708.259	711.515	774.290	799.329	861.946
Russia	691.500	711.400	702.300	762.300	785.300
Mexico	515.025	594.451	793.982	742.246	696.580
Indonesia	379.787	586.914	727.959	621.979	651.132
Kazakhstan	471.700	467.500	471.500	540.700	632.550
Canada	672.729	714.647	695.508	597.194	542.932
Poland	421.285	425.870	424.276	419.300	401.300
Brazil	301.197	350.940	338.921	384.542	381.000
Iran	216.800	254.709	282.500	295.653	316.380
Mongolia	274.600	335.850	374.260	314.920	309.750
Spain	104.476	129.788	172.522	204.606	186.500
Myanmar	33.200	69.850	94.390	126.930	179.310
Laos	159.696	167.702	167.679	153.304	154.948
Bulgaria	115.540	112.600	111.870	110.290	112.850
Sweden	79.681	75.113	79.247	104.594	106.140
Papua New Guinea	75.901	45.185	80.022	105.448	96.277
Turkey	96.300	108.000	107.300	85.200	87.000
Philippines	91.922	83.835	83.649	68.156	69.933
Armenia	46.849	51.765	95.080	95.793	68.928
Saudi Arabia	11.570	12.340	27.840	43.150	59.650
Portugal	75.433	83.081	74.352	63.812	49.064
South Africa	78.697	77.360	65.257	65.532	46.900
Finland	42.810	41.805	47.488	53.144	46.755
Serbia	31.584	31.601	34.625	45.115	44.096
Ecuador	3.200	1.400	40.200	8.200	42.200
Uzbekistan	99.500	100.000	100.000	100.000	38.000
India	24.880	34.220	29.670	31.820	35.450
Morocco	22.360	26.850	31.810	35.420	34.500
Mauritania	33.079	45.001	32.818	28.791	28.137
Vietnam	21.762	24.420	22.300	21.100	22.440
Congo, Rep.			0	15.979	18.018
Argentina	97.556	61.765	81.902	33.303	17.435
Eritrea	88.900	61.600	25.300	7.900	17.300
Georgia	13.100	11.700	12.200	14.700	15.250
Korea, North	14.400	15.000	20.000	15.000	15.000
Pakistan	13.122	13.056	14.136	10.052	12.538
Tanzania	16.400	16.800	17.400	15.800	10.000
Colombia	4.118	5.463	8.493	9.356	9.918
Zimbabwe	8.261	8.218	9.101	8.839	9.077
Dominican Republic	9.262	7.324	9.725	9.618	8.588
Tajikistan	940	1.390	2.050	6.060	8.490
Romania	7.680	7.710	8.390	8.160	8.165
Kyrgyzstan	700	3.100	8.638	8.356	7.944
North Macedonia	10.241	11.102	10.429	8.966	7.718
Namibia	5.086	13.913	16.391	15.466	5.900
Bolivia	10.746	9.479	8.718	7.219	5.216
Albania	3.690	2.190	2.020	0	3.780
Azerbaidjan	784	969	1.947	2.063	1.650
Botswana	47.700	22.284	13.120	1.239	1.462
Cyprus	3.088	2.121	1.754	1.293	908
Slovakia	46	58	39	32	21
Korea, South			117	7	0
Oman	15.140	8.650	0	0	0
Total	18.560.687	19.353.809	20.514.186	20.087.220	20.474.372

Tabelle 2: Kupferproduktion aus Rohstoffen sortiert nach Produktionsländern in metrischen Tonnen aus World Mining Data 2020²¹²

212 [WMD2020], p.119.

Political stability	2014	2015	2016	2017	2018
Stable	42.810	714.647	695.508	0	0
Fair	11.414.106	10.413.341	10.818.022	11.109.147	11.482.466
Unstable	6.060.520	7.065.758	7.771.884	7.788.183	7.157.619
Extreme Unstable	1.043.251	1.160.063	1.228.772	1.189.890	1.834.287
Total	18.560.687	19.353.809	20.514.186	20.087.220	20.474.372

Tabelle 3: Kupferproduktion aus Rohstoffen nach politischer Stabilität in metrischen Tonnen aus World Mining Data 2020²¹³

Development status	2014	2015	2016	2017	2018
Developed Countries	3.861.302	3.968.674	3.993.001	3.671.546	3.587.971
Developing Countries	11.259.134	11.880.943	12.944.832	12.604.929	12.781.995
Least Developed Countries	2.069.663	2.111.475	2.135.564	2.226.692	2.490.700
Transition Countries	1.370.588	1.392.717	1.440.789	1.584.053	1.613.706
Total	18.560.687	19.353.809	20.514.186	20.087.220	20.474.372

Tabelle 4: Kupferproduktion aus Rohstoffen nach staatlichem Entwicklungsstatus in metrischen Tonnen aus World Mining Data 2020²¹⁴

Die Kupferproduktion liegt in wenigen Ländern konzentriert. Gute zwei Drittel der Weltkupferproduktion (im Jahr 2018 genau 68,68%) liegen in folgenden sieben (7) Ländern: Chile, Peru, China, D.R. Kongo, USA, Australien und Sambia (vgl. Tabelle 2). Eine gegenüber USGS exaktere und ausführlichere Aufgliederung der Kupferproduktion nach Ländern ist in den von L. Weber initiierten und jährlich vom zuständigen Bundesministerium²¹⁵ in Österreich herausgegebenen Weltbergbaudaten (World Mining Data (WMD)) angeführt. Die vergleichbaren Länderwerte weisen eine gute Übereinstimmung zwischen USGS und WMD auf. Die Publikation der WMD weist den Produktionsländern auch eine - an die Einstufungen der World Bank angelehnte - „politische Stabilität“ zu und ermittelt daraus, welche Anteile eines Rohstoffs aus politisch stabilen, ziemlich stabilen, unstabilen und sehr unstabilen Ländern weltweit bezogen werden. Aus Tabelle 3 kann entnommen werden, dass für Kupfer mehr als die Hälfte der Weltproduktion (für das Jahr 2018 55%) stabilen Ländern zuzuordnen ist und damit die Versorgungssicherheit als ausreichend gegeben betrachtet werden kann. Dennoch bleibt anzumerken, dass die entwickelten Länder zu weniger als einem Fünftel (ca 17,5%) zur Weltkupferproduktion beitragen (vgl. Tabelle 4). Die Versorgungssicherheit wird vor allem dadurch gewährleistet, dass dem OECD-Raum ziemlich genau die Hälfte der Weltkupferproduktion zugeordnet werden kann.

213 [WMD2020], p.70.

214 [WMD2020], p.69.

215 Derzeit ressourceiert die Zuständigkeit für Rohstoffe und Bergbau im österreichischen Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (www.bmlrt.gv.at).

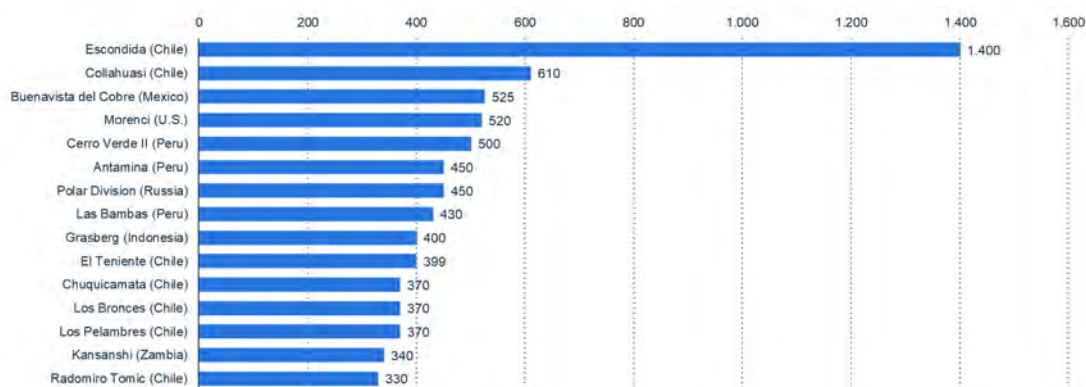


Abb. 52: Führende, international operierende kupferproduzierende Unternehmen nach Kapazitäten im Jahr 2020 (in tausend metrischen Tonnen). (ICSG)²¹⁶

Die führende Rolle Chiles und der gesamten Region Südamerika zeigt sich auch in den Produktionskapazitäten der größten Kupferproduzenten. Escondida (Chile) ist bei weitem das führende Kupferbergbauunternehmen (Abb. 52). Erst an vierter Stelle folgt ein US-Unternehmen und auf Rang sieben ein russischer Betrieb. Die Auslastung der Minenkapazitäten ist in der letzten Dekade recht konstant im Bereich von circa 83% bis 87% geblieben.²¹⁷

Die begünstigte Vorratssituation in Südamerika gibt der Region auch einen deutlichen Vorsprung in der Kupferproduktionsmenge wie aus der Zusammenstellung in Abb. 53 ersichtlich ist. Chinas Bedarf an Kupfer und dem Anteil am Verbrauch steht in keinem Verhältnis zur eigenen Kupferproduktion auf Rang drei. Die USA haben in Bezug auf die Eigenversorgung eine viel bessere Situation als Europa, das auf Importe weitestgehend angewiesen ist.

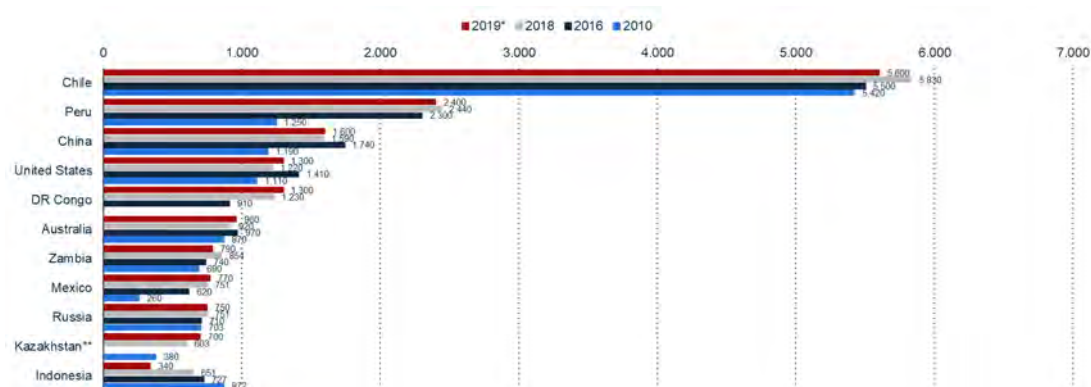


Abb. 53: Die größten Förderländer von Kupfer nach Bergbauproduktion von 2010 bis 2019 (in tausend metrischen Tonnen). (USGS, Stand 2020)²¹⁸ (*) estimated () Produktion für 2016 nicht verfügbar**

216 Daten (Quelle) ICSG, Grafik: Statista.

217 ICSG, Auswertung 2010 bis 2018 | icsg.org

218 Daten (Quelle) USGS, Mineral Commodity Summaries 2020, page 53; Grafik: Statista.

4.5. Kupfer-Reserven und -Ressourcen sowie die langfristige Verfügbarkeit von Kupfer

Reserven sind Teilmengen aus Lagerstätten, die erkundet, festgestellt und bewertet wurden und wirtschaftlich gefördert werden können (vgl. Abb. 3). Ressourcen sind viel größer und umfassen die Reserven, erkundete Lagerstätten, die potentiell bauwürdig (förderwürdig) sind sowie noch nicht erkundete Teilmengen aus Lagerstätten, die geologisch erfolgversprechend sind. Im Regelfall sind daher die Mengenangaben der Reserven in den Werten für Ressourcen *bereits enthalten* und dürfen *nicht* addiert werden. In der Praxis können jedoch abweichende Angaben, insbesondere in Geschäftsberichten, vorkommen, worauf aber in jedem Fall besonders hingewiesen werden muss.

Die Reserven werden von ICSG (International Copper Study Group) mit 830 Mt und von USGS mit 870 Mt beziffert. ICSG weist deckungsgleich mit USGS die „Identified Resources“ mit 2.100 Mt aus (Abb. 41). Die totalen Ressourcen werden von ICSG mit 5.600 Mt angegeben und die „undiscovered resources“ von USGS mit 3.000 Mt.²¹⁹

Die Differenz könnte sich daraus erklären, dass USGS nur die auf dem Festland („land-based“) befindlichen Lagerstätten bewertet, ICSG auch die Kupfervorkommen von Hochsee Manganknollen („deep-sea nodule“) hinzurechnet, die mit circa 700 Mt angenommen werden.²²⁰ In Tiefseeknollen und submarinen Massivsulfiden befinden sich enormen Kupfervorkommen. Aktuelle und zukünftige Explorationsmöglichkeiten werden zu einer Erhöhung sowohl der Reserven als auch der bekannten Ressourcen führen.²²¹

Es ist zu beobachten, dass die ausgewiesenen Kupferreserven in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich angestiegen sind. Die Reserven wurden 1995 noch mit 540 Mt bewertet; aktuell werden sie mit 830 – 870 Mt ausgewiesen. Das entspricht einer Steigerung von 57% oder deutlich über 2% per anno.

2013 hat USGS eine geologische Studie über die Kupferreserven veröffentlicht. Die Studie kam zum Schluss, dass der prognostische Kupfervorrat zu 80% in zwei Lagerstättentypen zu finden ist. Porphyrische Kupferlagerstätten mit einem durchschnittlichen Cu-Gehalt von ca. 0,4 - 1,0% tragen gemäß dieser USGS Studie zu etwa 58% zum weltweiten Kupfervorkommen bei (vgl. Abb. 55). Eine damit verwandte Anreicherung sind die Eisenoxid-Kupfer-Gold Lagerstätten (I-OCG, iron-oxid-copper-gold), die gut 10% zur weltweiten Kupferproduktion beisteuern. Etwa

219 [USGSCU2020]

220 [LANG2011], p.55-56.

221 [ICSG2019], ICSG, The World Copper Factbook 2019, p.6.

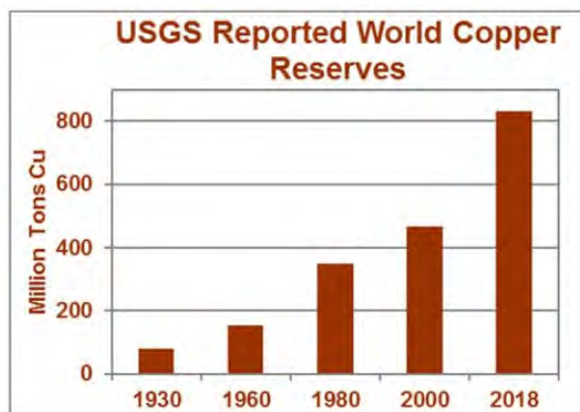


Abb. 54: Weltweite Kupferreserven (berichtet, USGS)²²³

12% der Kupfermenge wird aus sedimentgebundenen stratiformen Kupferlagerstätten (sediment hosted stratiform copper deposits, SSC oder sedhost) gewonnen.²²²

Region	Deposit type	Tract extent (km ²)	Undiscovered resources (Mt)				Identified resources (Mt)
			90	50	10	Mean	
South America	Porphyry	1,200,000	500	730	1,000	750	810
	Sediment-hosted	99,000					0.51
Central America and the Caribbean	Porphyry	540,000	78	150	280	170	42
North America	Porphyry	3,200,000	250	370	540	400	470
	Sediment-hosted	450,000	15	48	110	57	18
Northeast Asia	Porphyry	2,300,000	76	220	500	260	8.8
North Central Asia	Porphyry	3,200,000	210	360	590	440	130
	Sediment-hosted	180,000	22	49	90	53	48
South Central Asia and Indochina	Porphyry	3,800,000	280	490	770	510	63
	Sediment-hosted	29,000					4.5
Southeast Asia Archipelagos	Porphyry	850,000	180	290	430	300	130
Australia	Porphyry	580,000	1.9	14	54	21	15
Eastern Europe and Southwestern Asia	Porphyry	1,200,000	130	220	370	240	110
	Sediment-hosted	4,800	0.052	4.8	36	13	6.4
Western Europe	Porphyry	73,000					1.6
	Sediment-hosted	190,000	38	110	230	120	77
Africa and the Middle East	Sediment-hosted	200,000	81	150	260	160	160
Total copper						3,500	2,100

Abb. 55: Assessment results for identified and undiscovered copper worldwide, by region (USGS, 2013)²²⁴

222 <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Geologisches%20Portrait/Lagerst%C3%A4tten/Sedimentgebundene%20stratiforme%20Kupferlagerst%C3%A4tten%20%28SSC%29%20%28Reduzierte%20Fazies%20Red%20Bed%20Revett%29> (24.04.2020).

223 [ICSG2019], ICSG, The World Copper Factbook 2019, p.8.

224 [USGS2013], p.1 [Legende: km², square kilometers; Mt, million metric tons; “90” indicates a 90-percent chance of at least the amount shown, with other percentiles similarly defined. Columns may not add to total because of rounding. Gray shading indicates no quantitative assessment]

Oft wird gemutmaßt, ob und wann die Kupferreserven zur Neige gehen (vgl. Abschnitt 1.5, S.19ff). Faktum ist, dass seit 1950 immer von Reserven für 40 Jahre und noch deutlich größere Mengen bekannter Ressourcen (USGS-Daten), jeweils auf der Grundlage der damals aktuellen Nachfragerate berichtet wurde. Darüber hinaus tragen Recycling, Innovation und Exploration im Bergbau weiterhin zur langfristigen Verfügbarkeit von Kupfer bei. Die jährlich steigenden, von USGS berichteten Kupferreserven gemäß obiger Grafik lassen nicht befürchten, dass der Weltwirtschaft und Gesellschaft der Rohstoff Kupfer in absehbarer Zukunft ausgehen wird.

Diese Feststellung entbindet aber nicht von der Verpflichtung, die gefördert Kupfermengen im Kreislauf zu halten und wieder zu verwerten. Eine eingehende Auseinandersetzung mit Ressourceneffizienz, Nachhaltigkeit und dem anthropogenen Kupferzyklus findet sich einerseits in Abschnitt 1.5 (S.19ff) und im Kapitel 2.6 (S.37).

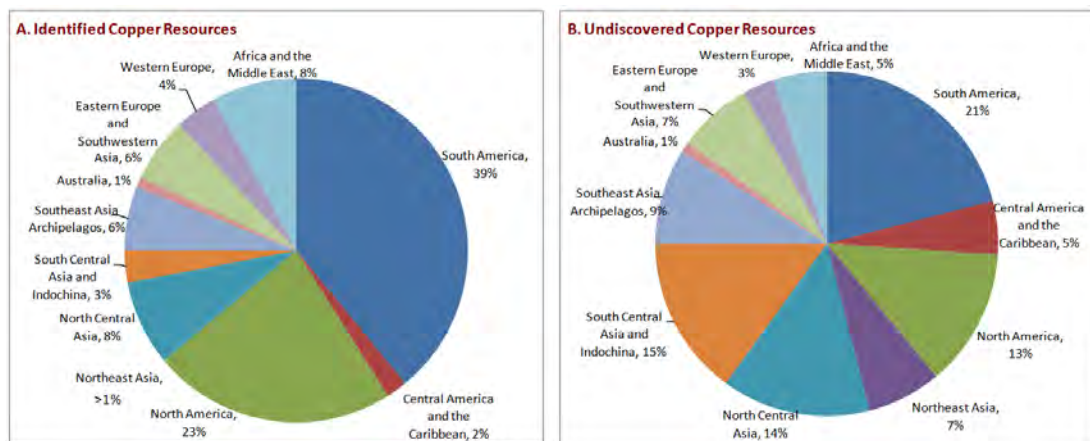


Abb. 56: Weltweite erkundete und unerkundete Kupferreserven nach Regionen 2014²²⁵

²²⁵ [ICSG2019], ICSG, The World Copper Factbook 2019, p.7.

4.6. Wirtschaftliche Bewertungen von Lagerstätten

4.6.1. Reichweite (Lebensdauer)

Die Reichweite („*Lebensdauer*“) von mineralischen Rohstoffen kann als statischer oder dynamischer Kennwert beschrieben werden. Die statische Reichweite errechnet sich aus dem Quotienten der Reserven oder Ressourcen zur Weltproduktion. Die dynamische oder semidynamische Reichweite ergibt sich aus dem Verhältnis von Reserven oder Ressourcen zur prognostizierten Weltproduktionssteigerung.

4.6.2. Zusammenhang von Reichweite und Ressourcen

Die Reichweite („*Lebensdauer*“) von mineralischen Rohstoffen kann als statischer oder dynamischer Kennwert beschrieben werden. Die statische Reichweite errechnet sich aus dem Quotienten der Reserven oder Ressourcen zur Weltproduktion. Die dynamische oder semidynamische Reichweite ergibt sich aus dem Verhältnis von Reserven oder Ressourcen zur prognostizierten Weltproduktionssteigerung.

Während der Divisor (Weltproduktion) zumeist eine greifbare Größe darstellt, ist der Dividend mit großer Unschärfe belastet, der in vielen Fällen kein belastbares Ergebnis erbringt. Die statische Reichweite ist immer nur eine Momentaufnahme in einem dynamischen Gesamtsystem. Durch den technischen Fortschritt und die preisliche Entwicklung der Rohstoffe, werden laufend Ressourcen zu Reserven erschlossen. Angaben der Reichweite sind daher lediglich als Richtzahl zu interpretieren und spiegeln keineswegs die tatsächliche Vorhaltezeit wider.

Aus dem davor dargelegten sind folgende Überlegungen abzuleiten:

- Die *statische Reichweite* die Zeitspanne in Jahren, für die bei aktuellem Verbrauch die weltweit bekannten und wirtschaftlich förderbaren Vorkommen eines nichterneuerbaren Rohstoffs noch reichen werden. Die dieser Betrachtung zugrundeliegende Frage lautet: „Wie viele Jahre reichen die heutigen Reserven bei konstanter Förderung?“
- Die *dynamische Reichweite* basiert hingegen auf einem Modell zur Verbrauchsentwicklung, im einfachsten Fall auf der Annahme einer jährlich konstanten Verbrauchszunahme. Dieser Parameter gibt Antwort auf die Frage: „Wie viele Jahre reichen die heutigen Reserven bei wachsender Förderung und wachsender Erschließung?“

4.6.3. Optimale Nutzungsdauer einer Lagerstätte

Gemäß dem Skaleneffekt erscheint es angebracht, den Output pro Zeiteinheit zu maximieren, um die Kosten pro Tonne Erz zu minimieren. Dies führt unweigerlich zu einer kürzeren Lebensdauer der Mine. Für eine Bewertung der Lagerstätte ist daher die optimale Produktionsmenge pro Zeiteinheit abzuschätzen.

Einige Bergbaubetriebe nehmen eine produktive Lebenszeit der Mine von mindestens 10 Jahren an, um die Risiken, die durch zyklische Preisschwankungen verursacht werden, auszugleichen²²⁶. Es gibt aber auch Minen mit kürzerer Lebenszeit, beispielsweise einige Goldminen. Lagerstätten mit niedriger Konzentration aber großen Reserven, wie beispielsweise porphyrische Kupferlagerstätten, erfordern bedeutende Investitionen in die Infrastruktur und sollten daher eine Betriebsdauer von mindestens 20-25 Jahren haben.

Taylor hat empirisch abgeleitete Formeln zur Ermittlung der optimalen Lebensdauer einer Lagerstätte publiziert:²²⁷

$$\text{Lebensdauer } n \text{ [in Jahren]} \approx 0,2 \sqrt[4]{\text{Gesamtreserve [Tonnen]}} \quad (1)$$

Die optimale Lebensdauer einer Lagerstätte mit 8 Millionen Tonnen Erzreserve ist daher circa 11 Jahre. Die jährliche Produktionsfördermenge von 8 Mio t über 11 Jahre ist daher circa 730.000 t/a.

Diese Formel wurde mit Realdaten kritisch getestet. Beispielsweise haben McSpadden und Schaap²²⁸ diese Näherungsgleichung für weltweite porphyrische Kupferlagerstätten untersucht und haben trotz größerer Streuungen eine gute Übereinstimmung mit der tatsächlichen optimalen Lebensdauer feststellen können. Solche Daumenregeln sind adäquate Hilfsmittel in der Aufsuchungs- und Aufschließungsphase.

4.6.4. Rohstoffpreise

Die Rohstoffpreise ergeben sich wie die Preise anderer Waren aus Angebot und Nachfrage. Dennoch sind erhebliche Unterschiede feststellbar. Bestimmte, qualitätsdefinierte Rohstoffe

²²⁶ [WELL2008], F.-W. Wellmer, M. Dalheimer, M. Wagner, Economic Evaluations in Exploration, second edition, Springer-Verlag, 2008, S.79ff.

²²⁷ Taylor, H.K., 1977, Mine valuation and feasibility studies. In: Mineral industry costs: Northwest Mining Association, Spokane, 1976, pp 1-17. In: F.-W. Wellmer, M. Dalheimer, M. Wagner, Economic Evaluations in Exploration, second edition, Springer-Verlag, 2008, S.80.

²²⁸ McSpadden G.M., Schaap W., "Technical Note – Taylor's Rule of Mine Life", Proc. Australas Inst Min Metall 289(6), pp.217-220, 1984. In: F.-W. Wellmer, M. Dalheimer, M. Wagner, Economic Evaluations in Exploration, second edition, Springer-Verlag, 2008, S.81.

werden an Warenbörsen²²⁹ (LME²³⁰, NYMEX²³¹, SHFE²³²) gehandelt. Insbesondere für Metalle (z.B. Kupfer (Cu), Aluminium (Al), Blei (Pb), Nickel (Ni), Zink (Zn)) werden mehrmals täglich Preisnotierungen festgesetzt. Auch Termingeschäfte²³³ sind für diese Rohstoffe möglich und weit verbreitet. Der Preis von Energierohstoffen und Industriemineralien wird hingegen nach Qualität und Kundenwünschen zwischen Anbieter und Käufer frei vereinbart (z.B. Erdgas, Magnesit, Talk etc.). Solche Spot-Markt-Preise sind häufig unvorhersehbaren Schwankungen unterworfen.

Die meisten Rohstoffpreise (commodity price) können aus speziellen Publikationen entnommen werden. Für Metalle empfiehlt sich als Standardreferenz das zweimal pro Woche in London erscheinende „*Metal Bulletin*“.²³⁴ Das „*Engineering and Mining Journal*“²³⁵ veröffentlicht monatlich Preiserhebungen für metallische und nichtmetallische Rohstoffe. Im Magazin „*Industrial Minerals*“²³⁶ werden die Preise für Industriemineralien aufbereitet. Darüber hinaus sind Commodity-Preise auf unzähligen Websites verfügbar.

Zur ökonomischen Beurteilung einer Lagerstätte ist nicht die kurzfristige Preisbildung relevant, sondern ein angemessener Durchschnittspreis. Dieser lässt sich jedoch nur mit großen Unsicherheiten prognostizieren, auch Inflationseffekte über eine Zeitspanne vieler Jahre sind zu berücksichtigen. Darüber hinaus spielt auch die Wahl der Währung, in welcher der Rohstoff gehandelt wird, eine große Rolle. Will man das Wechselkursrisiko nicht tragen, so sind die Spesen für die Währungsabsicherung zu den Herstellkosten zu kalkulieren.

4.6.4.1. Preiskalkulation für Nichteisenmetalle

Im Regelfall produzieren Minen Rohstoffkonzentrate. Nur in seltenen Fällen ist das Erz der Lagerstätte so hoch konzentriert, dass es direkt (ohne besondere Aufbereitung) verkauft werden kann. Kursnotierungen sind nur für Metalle, das heißt für das verkaufbare Endprodukt, verfügbar, aber nicht für Zwischenprodukte. Wellmer et al.²³⁷ führt aus, dass für die Bewertung einer Lagerstätte für Nichteisenmetalle, wie zum Beispiel Cu, Al, Pb, Zn oder Ni, auch die Aufbereitungskosten mit berücksichtigt werden müssen.

229 Eine Warenbörse (commodities exchange) – auch Produktenbörse genannt – ist eine Börse, an der fungible Sachgüter, wie in spezifischen Qualitäten gliederbare Rohstoffe, landwirtschaftliche Erzeugnisse oder Nahrungsmittel gehandelt werden. Dabei handelt es sich üblicherweise um Agrar- und Industrierohstoffe, Mineralien sowie andere Naturprodukte, nicht aber um industrielle Erzeugnisse.

230 London Metal Exchange (LME), <http://www.lme.com>

231 New York Mercantile Exchange (NYMEX), <http://www.cmegroup.com/company/nymex.html>

232 Shanghai Futures Exchange (SHFE), <http://www.shfe.com.cn/Ehome/index.html>

233 Termingeschäft: Börsengeschäft, das zum Tageskurs abgeschlossen wird, dessen Erfüllung jedoch zu einem vereinbarten späteren Termin erfolgt.

234 <http://www.metalbulletin.com> (31.10.2011)

235 <http://www.e-mj.com> (31.10.2011)

236 <http://www.mineralnet.co.uk> (31.10.2011)

237 [WELL2008], pp.72.

Eine Lagerstätte, die beispielsweise 100 Millionen Tonnen Kupfer in einer Konzentration von einem Prozent beinhaltet, ist bei einem angenommenen Preis von 0,90 \$/lb knappe \$2 Milliarden wert, wie es durch eine einfache Multiplikation den Anschein haben könnte.²³⁸ Dieser Berechnung liegt eine falsche Annahme zugrunde, da der angenommene Preis für Reinkupfer, aber nicht für das Konzentrat Gültigkeit hat. Wie in Kapitel 0 (S.99) näher ausgeführt (vgl. dort Abb. 44), sind vom Preis des Reinkupfers alle Kosten der jeweiligen Aufbereitungsstufe abzuziehen, um einen rentablen Hüttenbetrieb zu ermöglichen. Ebenso müssen die Kosten für Kapital, Lizenzen und Steuern verdient werden und darüber hinaus der Unternehmerlohn (Gewinn).

4.6.4.2. Rohstoffpreis als Indikator für Knappheit

Ein verlässlicher und allgemein akzeptierter Messindikator für eine knappe Ressource ist der Marktpreis. Eine Verknappung in der Differenz von Angebot und Nachfrage führt zu steigenden Preisen, Überschussmengen haben deflationäre Wirkung. Steigende Preise attraktiveren zu verstärkter Exploration auch in bisher nicht als förderwürdig betrachteten Lagerstätten und motivieren zu Innovationen und Effizienzsteigerungen. Diese Maßnahmen führen in aller Regel zur Minderung oder Eliminierung der Verknappung und zu sinkenden Preisen.

Ist eine reale, geologische Verknappung gegeben, würden unweigerlich die Preise rasch ansteigen und den Rohstoff wirtschaftlich unattraktiv machen. Die Folge wären Substitutionsversuche. Historische Analysen zeigen, dass im Durchschnitt, also Glättung der teilweisen großen Preisvolatilitäten, der inflationsbereinigte Realpreis der meisten mineralischen Rohstoffe in den letzten Jahrzehnten nahezu konstant blieb, wie die Grafik am Beispiel Kupfer zeigt.

Der Marktpreis wird nicht von allen wissenschaftlichen Quellen als richtiger bzw. brauchbarer Indikator anerkannt. Gordon et al.²³⁹ führen aus, dass die Bergbaubetriebe es geschafft hätten, den stetig abnehmenden Kupferinhalt (copper grade) durch technologische Verbesserungen und trotz der nötigen größeren Erzbewegungen und des höheren Energieeinsatzes den Kupferpreis real konstant niedrig zu halten. Es wird daraus der Schluss gezogen, dass das marktwirtschaftliche System nicht Umweltkosten und sozialen Kosten ausreichend berücksichtigt und diese Kosten den Steuerzahlern aufgebürdet oder unter den Tisch fallen würden.

²³⁸ ebd.

²³⁹ [GORD2007], p.27

4.6.5. Markteintrittsbarrieren als Determinante der Lagerstättenkapazität

Bei der Bestimmung der optimalen Lagerstättenkapazität nach obenstehenden Regeln muss für eine betriebswirtschaftliche Betrachtungsweise auch die Marktsituation berücksichtigt werden. Für normale Rohstoffe wie Eisen, Wolfram, Blei oder Kupfer kann immer davon ausgegangen werden, dass es einen Abnehmermarkt gibt, wenngleich die Marktpreise oft großen Schwankungen unterliegen können. Je besser die relativen Kostenpositionen der betrachteten Lagerstätte ist, desto wettbewerbsfähiger ist das Projekt. Hingegen gibt es für High-Tech-Rohstoffe nur einen eingeschränkten Markt, der auf wenige Abnehmer beschränkt ist. Für preisgünstigere mineralische Rohstoffe, wie z. B. Schotter, Kies, Baumaterialien, ist aufgrund des engen Aktionskreises der regionale Markt relevant.

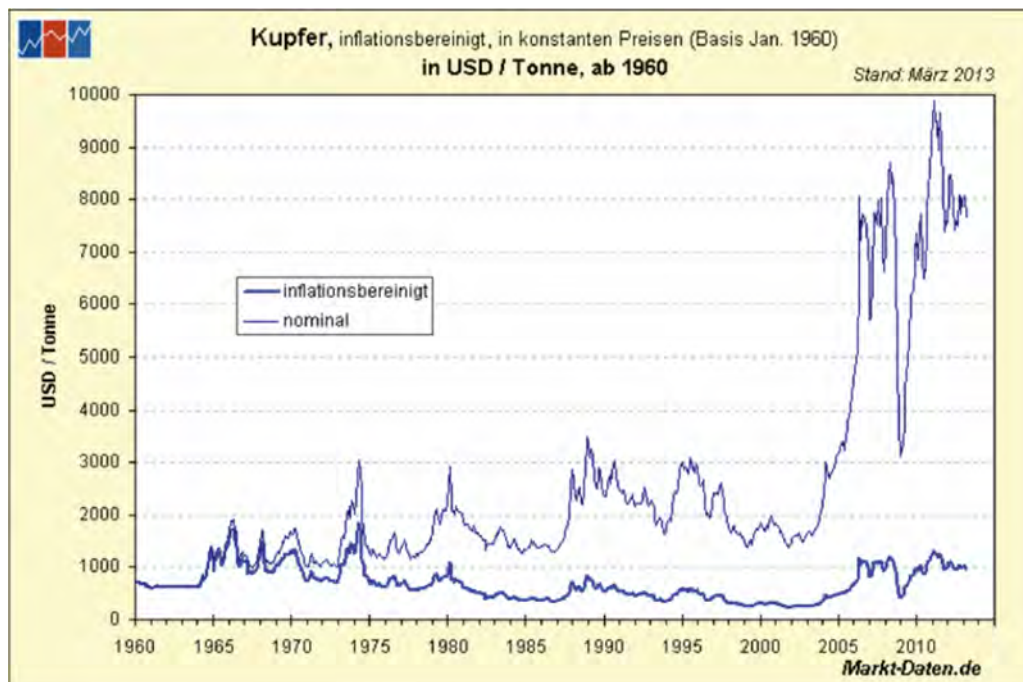


Abb. 57: Kupferpreis nominell und inflationbereinigt²⁴⁰

240 aus [STIF2013], p.398

Für bestimmte mineralische Rohstoffe reicht es daher für die betriebswirtschaftliche Betrachtung nicht aus, einen globalen Markt anzunehmen. Oft ist aus technologischen Gründen (z.B. Aufbereitung) oder wegen des geringen relativen Wertes des Rohstoffs (z.B. Baurohstoffe) ein eingeschränkter Marktbereich zu betrachten. Lütkehaus²⁴¹ hat empirisch festgestellt, dass nach Anwendung der sogenannten „*Modifying Factors*“²⁴² (z.B. Abbau, Metallurgie, betriebswirtschaftliche, soziale und umwelttechnische Parameter, Marketing, rechtliche oder behördliche Situationen; vgl. Kap. 3.1.6, S.56) mit Daumenregeln für die unterschiedlichen mineralischen Rohstoffe von der erforderlichen Lebensdauer der Ressource auf die Reserven geschlossen werden kann. Er gibt für Zement eine benötigte Ressourcenbasis von 80 Millionen t für eine Mindestlebensdauer von 50 Jahren an. Für Kies und Schotter hingegen sieht er eine erforderliche Rohstoffressource von 10 Millionen t für eine Lebensdauer von 25 Jahren. Diese Abschätzungen berücksichtigen die notwendigen Investments in die Lagerstätte und die Aufbereitung.

In der Aufsuchungsphase wird mit Erzpotezialen oder möglichen Ressourcen (indicated resources) gearbeitet, um die optimale Lagerstättenkapazität zu überprüfen. Als Basis für die Investitionsentscheidung wird eine Machbarkeitsstudie (*feasibility study*) herangezogen, die sich auf gesicherte oder wahrscheinliche Reserven (proven or probable reserves) abstützt. Im Regelfall werden hierfür die Definition des Australasien Joint Ore Reserve Committee (JORC Code) oder des Canadian CIM Definition Standards herangezogen. Die Machbarkeit wird positiv bewertet werden können, wenn die Reserven ausreichen, um die Investitionen – vermehrt um einen Sicherheitsaufschlag – zurückverdient werden können.

Als Messgröße dient dafür das Verhältnis V_R zwischen der Gesamtlebenszeit der Reserven und der notwendigen Rückzahlungszeit der Investitionen (inklusive Zinsen). Für Investitionsentscheidungen sind strenge, bankfähige Bewertungen der Reserven, der Investitionen sowie das zur Verfügung stehende Eigen- und Fremdkapital essenziell. Banken akzeptieren erfahrungsgemäß bei der Finanzierung von Bergwerksbetrieben nicht zu lange Rückzahlungszeiten, im Regelfall nicht länger als 10 Jahre und die gesicherten und wahrscheinlichen Reserven müssen gleichzeitig genügend Absicherung bieten. Unter Einrechnung adäquater Sicherheitsspannen wird $V_R > 2$ sein müssen, um eine bewertete Lagerstätte aufschließen zu können.²⁴³

241 Lütkehaus, M., Rohstofferkundung und Rohstoffsicherung im Bereich Zement/Kalk, Paper XXI, „Aktuelle Exploration in der Bundesrepublik Deutschland“, Techn. Uni Berlin, 1991, In: F.-W. Wellmer, M. Dalheimer, M. Wagner, Economic Evaluations in Exploration, second edition, Springer-Verlag, 2008, S.84.

242 Im Allgemeinen erfordert die Umrechnung von Ressourcen in Reserven die Anwendung einer Vielzahl von Modifying Factors. Diese Modifying Factors spielen bei den Klassifikation von mineralischen Rohstoffen eine große Rolle (z.B. beim JORC-Code, SAMCode, etc.) (vgl. Kap. 3.1.4)

243 [WELL.2008], F.-W. Wellmer, M. Dalheimer, M. Wagner, Economic Evaluations in Exploration, second edition, Springer-Verlag, 2008, S.85.

4.7. Kupferlagerstätten

4.7.1. Geologie von Kupfervorkommen

Lagerstätten mineralischer Rohstoffe (mineralische Lagerstätte, mineral ore deposit) sind definiert als geologische Körper, die eine oder mehrere Elemente oder Mineralien in ausreichender Menge im Vergleich zur durchschnittlichen Verfügbarkeit in der Erdkruste haben und wirtschaftlichen Wert besitzen.²⁴⁵ Diese Definition ist insbesondere für metallische Lagerstätten üblich. Das Material, das in einer Lagerstätte von wirtschaftlichem Interesse ist, wird Erzmineral genannt, das nicht verwertbare beibrechende Material²⁴⁶ als Gangart (gangue) bezeichnet.²⁴⁷ Der Erzkörper ist der Teil einer Lagerstätte, das zu bestimmten Bedingungen, wie Marktpreis, Abbaukosten und verfügbare Technologie abgebaut werden kann.

Mineralische Lagerstätten haben sich im Laufe der Erdgeschichte durch komplexe geologische Prozesse gebildet. Die Verteilung der Anreicherungen von Rohstoffen in der Erdkruste ist weder geographisch gleichverteilt noch zeitlich kontinuierlich verlaufen. Alle gängigen erzbildende Elemente sind in magmatogenen, sedimentogenen oder metamorphogenen Gesteinen lediglich in

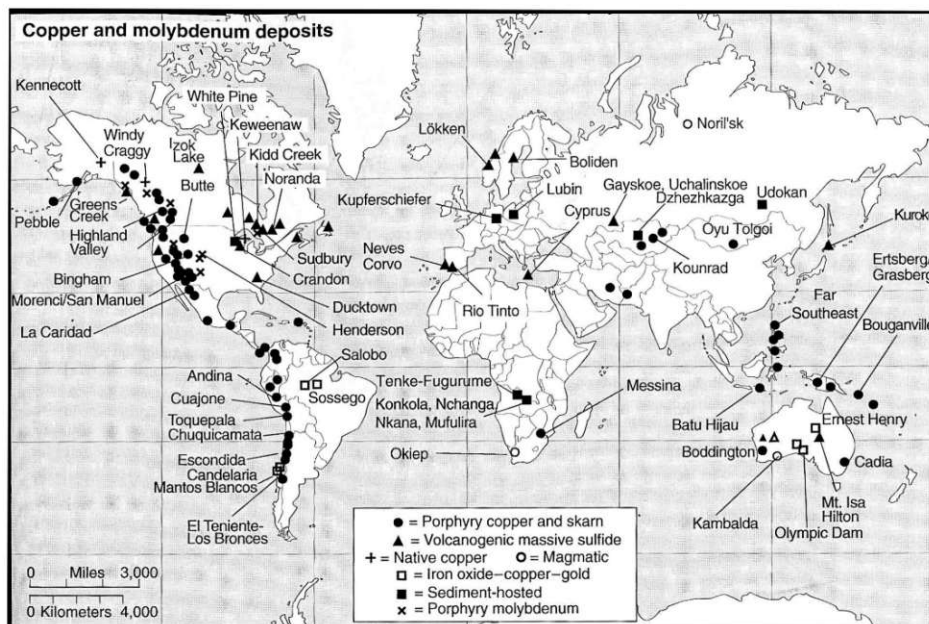


Abb. 58: Karte der größeren Kupfer und Molybdän Lagerstätten. Nicht in allen gezeigten Lagerstätten erfolgt Kupferabbau.²⁴⁴

244 aus: [KESL2017], Fig. 9.10, p.219.

245 [MISR2000], p.1

246 Bergmännischer Ausdruck: Beibrechendes Mineral fällt mit an beim Abbau des Minerals, das eigentlich Ziel der Gewinnung ist.

247 In der bergmännischen Fachsprache wird das nicht verwertbare taube Nebengestein, in dem die Lagerstätte liegt, als *Taubmaterial* bezeichnet, hingegen das in der Aufbereitung anfallende nicht verwertbare Material als "*Berge*".

geringen Konzentrationen (ppm) angereichert. Durch natürliche Prozesse kann es zu einer derartigen Anreicherung kommen, dass von einer Lagerstätte gesprochen werden kann.²⁴⁸ Dazu sind oft Anreicherungsfaktoren bis zu 10.000 erforderlich. Der für eine Lagerstätte (mineral deposit) erforderliche Anreicherungsfaktor (concentration factor) ist in Kapitel 2.2 (S.27) beschrieben.

Die äußeren 10 km der Erdkruste enthalten circa 33 g Kupfer pro Tonne Gestein.²⁴⁹ Der Clarke-Wert für Kupfer beträgt 0,005%. Noch vor einigen Jahren war für eine wirtschaftliche Bauwürdigkeit ein Anreicherungsfaktor von 80 Voraussetzung (vgl. Tabelle 1, S.28), um den nötigen durchschnittlichen Mindestgehalt (Cut-off) von 0,4% Kupfer zu erhalten. Dieser Cut-off-Wert wurde zwischenzeitlich durch Preis- und Effizienzsteigerungen auf (derzeit) 0,2% halbiert. Es ist daher nur mehr ein Anreicherungsfaktor von mindestens 40 ($0,005\% \times 40 = 0,02\%$) für eine bauwürdige Lagerstätte nötig.

Mit Kupfer sind in den Erzlagerstätten meist auch andere Elemente angereichert, sogenannte Bleit- oder Nebenelemente. Besonders begehrt aufgrund des Preises und auch der relativ einfachen technischen Abtrennung sind Silber und Gold, die die Kupferlagerstätte aufwerten bzw. „vergüten“. Andere Nebenelemente sind nicht so erwünscht, darunter fallen Arsen, Antimon, Wismut, Quecksilber, Fluor, Chlor und zu einem gewissen Anteil Blei, Zink, Nickel, Selen, Tellur.²⁵⁰ Der Fokus liegt in der Folge auf dem Nebenelement Selen. Die wichtigsten Kupfererzminerale sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

²⁴⁸ [MISR2000], p.5

²⁴⁹ <https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/processes/> (15.05.2020)

²⁵⁰ [WEBE2010]

Tabelle 5: Wichtige Kupfererzminerale²⁵¹

Kupfererz	Verbindung	Cu-Gehalt	Wirtschaftliche Bedeutung
gediegen Kupfer	Cu	100,0%	-
Kupferglanz	Cu ₂ S	79,8%	++
Bornit	Cu ₃ FeS ₃	69,0%	++
Chalkopyrit (Kupferkies)	CuFeS ₂	34,5%	++
Enargit	Cu ₃ AsS ₄	48,6%	+
Covellin	CuS	66,5%	++
Azurit	2CuCO ₃ * Cu(OH) ₂	55,0%	-
Malachit	CuCO ₃ * Cu(OH) ₂	72,0%	+
Cuprit (Rotkupfererz)	Cu ₂ O	88,8%	+
Tenorit (Schwarzkupferkies)	CuO	79,8%	-
Fahlerze		22-53%	-

Es gibt eine Reihe von Klassifizierungen von Lagerstätten, jedoch besteht keine allgemein anerkannte Einteilung von Lagerstätten. Die Definition einer allgemein anwendbaren Einteilung von mineralischen Lagerstätten erscheint auch wenig zielführend, da viele unterschiedliche Kriterien angewendet werden können.²⁵² Sinnvoll ist eine Gliederung im Hinblick auf deren Genese (magmatogen, sedimentogen, metamorphogen). Diese Begriffe beschreiben die grundlegenden Prozesse, die in der Erdkruste aktiv sind. Da auch Erze Gesteine sind, können sie häufig mit jeder Gesteinsart in Verbindung gebracht werden. Daher ist diese Eigenschaft (magmatisch (igneous), sedimentär (sedimentary) oder metamorphogen²⁵³ (metamorphic)) eine gute Grundlage für die Klassifizierung, da sie die Prozesse widerspiegelt, die an der Erzbildung beteiligt sind.²⁵⁴ In Abb.

²⁵¹ [WEBE2010]

²⁵² [REVVU2018], p.58

²⁵³ Es ist ausdrücklich die deutsche Bezeichnung *metamorphogen* anzuwenden. Dieser Ausdruck bezeichnet eine durch Metamorphose entstandene Lagerstätte, an der beim Umwandlungsprozess wesentlich die beiden Wirkfaktoren Druck und Temperatur *unmittelbar* beteiligt waren.

Metamorph bezeichnet lediglich, dass ein Gesteins- oder Erzkörper metamorph, also durch Druck und Temperatur überprägt wurde, was praktisch bei allen Lagerstätten der Fall ist. In diesem Fall haben diese beiden Wirkfaktoren Druck und Temperatur aber keinen Einfluss auf die Lagerstättenentstehung.

²⁵⁴ Beispiel: Mitterberger Kupfererzgang liegt in schwach metamorph überprägten Gesteinen. Die Metamorphose hat während der Gebirgsbildungen aber sowohl Nebengestein als auch Erzkörper überprägt, aber keinen Einfluss auf die Genese der Lagerstätte ausgeübt.

Ein Skarn ist aber durch die Reaktion heißhydrothormaler Lösungen, die im Kontakt eines Tiefengesteins zu Karbonatgesteinen ihre Metalle abgegeben haben, entstanden. D. h., hier ist durch Kontaktmetamorphose, also durch Metamorphose (metamorphogen) eine Lagerstätte entstanden.

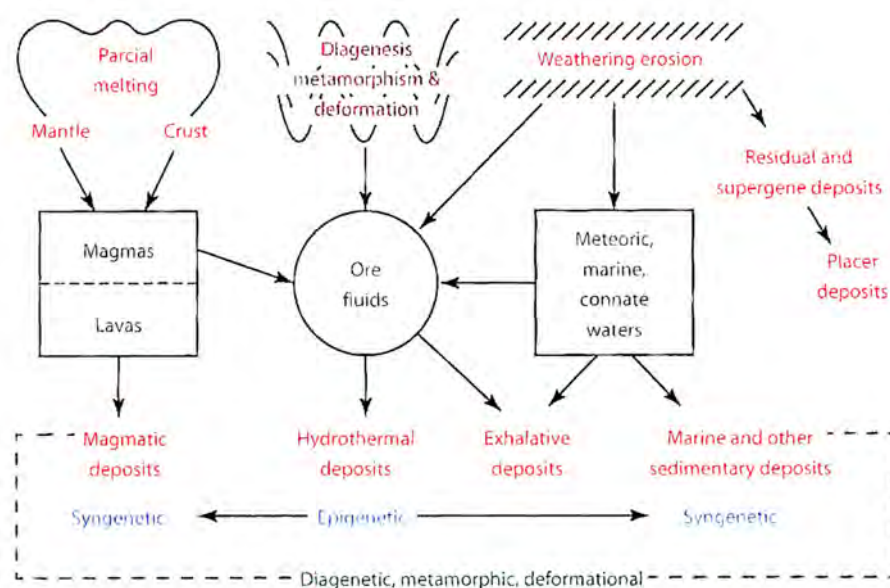


Abb. 59: Klassifikation von Erzlagerstätten nach ihrer Genese²⁵⁶

59 ist die Systematik der Lagerstätten nach ihrer Genese, die die Hauptprozesse von Erzbildungs- und Veränderungsprozessen zeigt, illustriert.²⁵⁵

Nach aktuellem Kenntnisstand, der „sich im Lauf von 250 Jahren geowissenschaftlicher Forschung entwickelt hat, kommen für die Gesteinsbildung folgende magmatische, metamorphe und sedimentäre Prozesse in Frage“²⁵⁷ (Abb. 60).

- **Magmatische Prozesse** beinhalten die Erstarrung von Magmen, d.h. von Silikat-Schmelzen, seltener auch von Sulfid-, Oxid- oder Karbonat-Schmelzen, die von sehr hohen Temperaturen abgekühlt werden, wobei es zur temperaturabhängigen („differenzierten“) Kristallisation von Mineralien kommt. Die Erdkruste besteht zu über 60 Vol.-% aus magmatischen Gesteinen.

255 [REVVU2018], p.59; [REVVU2018], p.61; [EVAN1992]; [EVAN2013]; Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

256 [REVVU2018], Fig. 2.7, p.59.

257 [OKRU2014], S.61f.

- Der **sedimentäre Kreislauf** umfasst die Verwitterung existierender Gesteine, die mechanische Abtragung, den Transport der Verwitterungsprodukte in fester oder gelöster Form, die Ablagerung, die Ausfällung der gelösten Ionen oder die Ausflockung sowie die Kristallisation des gelösten Materials durch geochemische Prozesse. Es entstehen Sedimente und Sedimentgesteine. Letztere gehen durch sekundäre Verfestigung (Diagenese) aus lockeren Sedimenten hervor, wobei durch die Auflast der darüber abgelagerten jüngeren Sedimentmassen erhöhte Belastungsdrücke und Temperaturen erzeugt werden. Zwischen Diagenese und Gesteinsmetamorphose (s. u.) bestehen gleitende Übergänge. Sedimente und Sedimentgesteine bilden nur eine relativ dünne Haut über den Basalten der ozeanischen Erdkruste oder dem kristallinen Grundgebirge aus Magmatiten und Metamorphiten, das die kontinentale Erdkruste aufbaut. Oft fehlen sedimentäre Gesteine ganz und ihr Anteil beträgt daher weniger als 10 Vol.-%.
- Bei der Gesteinsmetamorphose (**metamorphe Prozesse**) kommt es zur Rekristallisation und Reaktion von Mineralien in festen Gesteinen bei hohen bis sehr hohen Temperaturen und Drücken, meist ohne Anwesenheit einer Schmelze. Dabei bilden

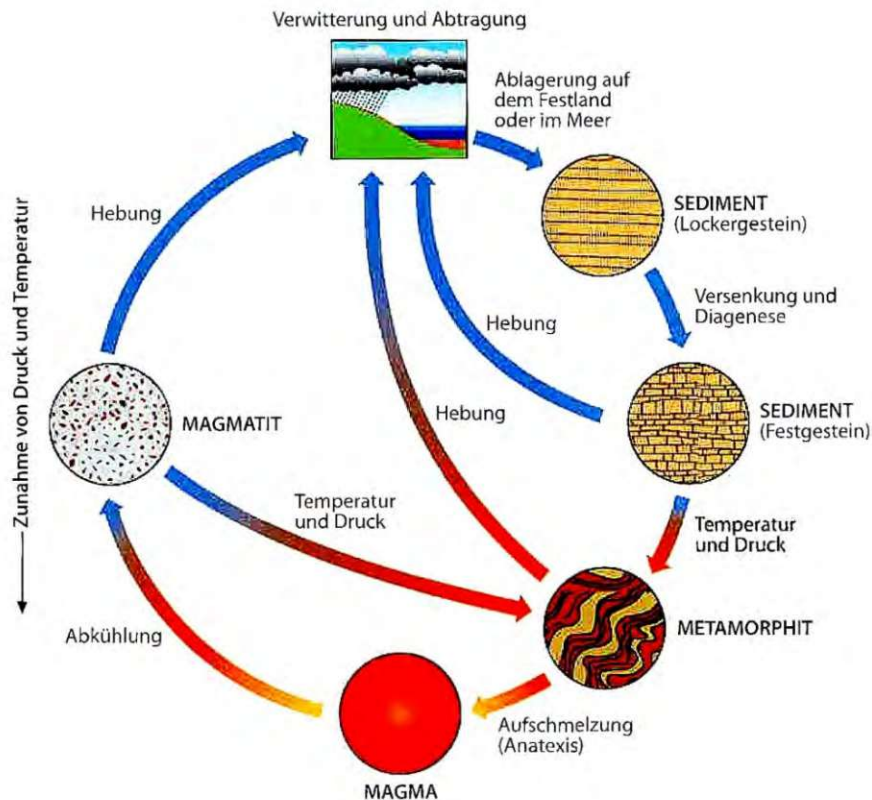


Abb. 60: Kreislauf der Gesteine²⁵⁸

258 [OKRU2014], Abb. 3.10, S.62.

sich aus älteren magmatischen oder Sedimentgesteinen metamorphe Gesteine (Metamorphite). Metamorphite sind zu etwa einem Viertel am Bau der Erdkruste beteiligt.²⁵⁹

4.7.2. Struktur einer Kupferlagerstätte

Viele Kupferlagerstätten weisen mehrere Zonen auf, in denen Kupfer in Sulfidmineralien angereichert ist. Nahe der Oberfläche finden sich meist oxydische Mineralien. In einer Übergangszone wurde das oxydische Material gelöst und in die Tiefe verlagert und reagierte dort mit sekundärem sulfidischem Gestein mit hohem Kupfergehalt. Sekundäre Mineralien sind meist nahe der Oberfläche zu finden und können folglich im Tagebau (open pit) abgebaut werden. In den tieferen Schichten befinden sich die primären sulfidischen Gesteine (gelb). Manchmal können diese Erze auch im Tagebau abgebaut werden, ansonsten müssen diese Erze im Untertagebergbau gefördert werden.

Jeder Lagerstättentyp ist jedoch unterschiedlich zoniert.

Gangförmige Lagerstätten zeigen eine Oxidationszone, die gegen die Tiefe rasch in eine Primärzone übergeht. Aufgrund der mit der Tiefe exponentiell zunehmenden Menge an Taubmaterial ist beispielsweise eine tagbaumäßige Gewinnung nicht wirtschaftlich.

Porphyrische Lagerstätten zeigen eine andere Zonierung: Oft befindet sich im Lagerstättentiefsten ein „Molybdänkern“, der in die eigentliche Kupfererzlagerstätte überleitet und der zwiebelschalenartig von schwermetallhaltigen und edelmetallhaltigen weiteren „Schalen“ umgeben wird. Die Verwitterung überprägt insbesondere die äußeren Zonen. Diese Lagerstätten werden kaum untertägig abgebaut, weil die Metallgehalte dafür zu gering sind.

Orthomagmatische Lagerstätten liegen im Regelfall sehr tief, weshalb diese nicht tagbaumäßig gewonnen werden. Diese Lagerstättentypen haben zumeist auch keine Oxidationszone entwickelt.

²⁵⁹ aus: [OKRU2014], S.61f.

4.7.3. Systematik der Kupferlagerstätten

Basierend auf dieser, oben erläuterten, Grundeinteilung werden in dieser Arbeit nachfolgend folgende für die Kupfergewinnung bedeutende Lagerstättenarten nachfolgender Struktur näher erläutert.

1) Magmatogene Lagerstätten

- a. Orthomagmatische (liquidmagmatische) Lagerstätten [Ortho]
(Kap. 4.7.4.1; S.127)
- b. Hydrothermale Lagerstätten
 - i. Porphyrische Vererzungen („Porphyry-type deposits“, kurz „Porphyries“) [Por] (Kap. 4.7.4.2.1; S.131)
 - ii. IOCG - Iron Oxidized Copper Gold deposits [IOCG]
(Kap. 4.7.4.2.2; S.134)
 - iii. Gang-kluftförmige Vererzungen (Gänge, Klüfte)
(„vein type deposits“) [Vein] (Kap. 4.7.4.2.3; S.135)
 - iv. Skarne („Skarn type deposits“) [Skarn] (Kap. 4.7.4.2.4; S.138)
 - v. Karbonatite („Karbonatite-type deposits“) (Kap. 4.7.4.2.5; S.139)

2) Sedimentogene Lagerstätten

- i. VMS „Volcanogenic massive deposits“ inkl. Massive Sulfide (MS)
(hydrothermal sedimentär) [VMS] (Kap. 4.7.5.1.1; S. 142)
- ii. SEDEX - Sedimentary exhalative deposits [SEDEX] (Kap. 0; S.144)
- iii. Sediment hosted deposits („afrikanischer“ Typ) [sedhost]
(Kap. 4.7.5.2; S.145)
- iv. Seabed („deep-sea nodule“) (Kap. 4.7.5.3; S.149)

3) Metamorphogene Lagerstätten

- i. Skarne (Skarn) (siehe auch hydrothermale Lagerstätten)
(Kap. 4.7.6.1; S.151)

4) Diagenetische Lagerstätten

- i. Sediment hosted deposits (Kupferschiefertyp)

Die Kurzbezeichnungen in eckigen Klammern und blauer Schrift indizieren die in der Folge verwendeten Termini für die Datenerfassung und Auswertung in den nachfolgenden Kapiteln.

4.7.4. Magmatogene Lagerstätten

Im weitesten Sinne überspannen Erzanreicherungsprozesse im Zusammenhang mit der Entwicklung von Magmen, die in der Erdkruste eingelagert sind, ein Kontinuum. Die beiden Endelemente dieses Kontinuums sind (a) **orthomagmatische** Prozesse und (b) (magmatische) **hydrothermale** Prozesse. Bei orthomagmatischen Prozessen ist die Konzentration der Mineralisierung das direkte Ergebnis der differenzierten Kristallisation von Gesteinsschmelzen. Die (magmatischen) hydrothermalen Prozesse ermöglichen die Konzentration von Erzmineralien aus magmatischen hydrothermalen Flüssigkeiten, die auskristallisieren.²⁶⁰

4.7.4.1. Orthomagmatische (liquidmagmatische) Lagerstätten

An der Bildung orthomagmatischer Lagerstätten ist in erster Linie der Magmatismus ausschlaggebend. Orthomagmatische (liquidmagmatische) Kupfererzlagerstätten bildeten sich durch die Unmischbarkeit von silikatischen und sulfidischen Schmelzen. Im Zuge der Abkühlung der Gesteinsschmelze trennen sich beide Schmelzen. Durch die Unmischbarkeit der sulfidischen (zumeist schwereren Schmelze) sinkt diese bei entsprechend geeigneten Viskositätsverhältnissen an die Basis des Schmelzenkörpers und reichert sich dort schlierenartig zu Lagerstätten an (z.B. Sudbury). Bei ungeeigneten Viskositätsverhältnissen können aber die Sulfidkomponenten nicht absinken und bleiben fein dispers in der Silikatschmelze verteilt, wodurch es zu keiner Lagerstättenbildung kommt.

Orthomagmatische Kupfervorkommen, die etwa 5% der weltweiten Kupferproduktion liefern, bestehen aus nicht mischbaren Metallsulfidmagmen, die sich von mafischen²⁶¹ und ultramafischen²⁶² Silikatmagmen trennen. Kupfer wird in diesen Lagerstätten fast immer mit Nickel und geringen Mengen an Elementen der Platingruppe in Verbindung gebracht, insbesondere im Bushveld Komplex (Rep. Südafrika), in Kambalda (Australien), Sudbury (Ontario/Kanada) oder Noril'sk (Russland).²⁶³

260 [REVVU2018], p.62.

261 Mafische Minerale oder Mafite sind Minerale, die in hohem Maße magnesium- und eisenhaltig sind. Entsprechend ist der Wortstamm *maf-* zusammengesetzt aus *ma* für Magnesium und *f* für Ferrum. Mafische Minerale kommen vorwiegend in magmatischen Gesteinen und deren metamorphen Äquivalenten vor.

262 Ein ultramafisches Gestein, Ultramafitit oder auch holomelanokrates Gestein ist ein magmatisches Gestein, das zu 90 Volumenprozent oder mehr aus mafischen Mineralen besteht.

263 [KESL2017], p.220.

Die bedeutendste liquidmagmatische Kupfer-Nickel-Lagerstätten befinden sich bei **Sudbury**, Ontario, Kanada (Abb. 62). Sie ist das bislang größte bekannte Nickelvorkommen magmatischer Entstehung und ist an den schichtigen Intrusivkörper gebunden, der auch Kupfererze enthält. Der Sudbury Komplex ist durch immense Energieeinwirkung entstanden ist, die durch einen Asteroideneinschlag verursacht wurde.²⁶⁵ Ein Asteroid hat eine tiefe „Wunde“ in die Erdkruste beim Sudbury-Komplex geschlagen, sodass wie bei einem Bluterguss Gesteinsschmelzen aus dem Erdmantel bzw untere Erdkruste oberflächennah hochdringen konnten und in der Folge rasch abkühlten.

Die nordsibirische **Noril'sk-Talnakh-Region** (Abb. 62) weist die größten Reserven an Kupfer-nickelerzen Russlands auf.²⁶⁶ Die orthomagmatischen (liquidmagmatischen) Vererzungen von Noril'sk, Bushveld u.a. wurden von keinem Asteroideneinschlag verursacht. Bei diesen Lagerstätten handelt es sich um einen ultrabasischen Intrusionskörper, der langsam abkühlte und sich im Zuge der Abkühlung differenzierte. Dennoch ist allen Fällen dieses orthomagmatischen Typs gemein, dass die Unmischbarkeit einer silikatischen und einer sulfidischen Schmelze Grund für die Trennung war. Die schwereren Mineralkomponenten konnten durch gravitatives Absinken an der Basis des Schmelzenkomplexes zu einer Lagerstätte angereichert werden.

„Als Nebengesteine treten früh- bis mittelpaläozoische Karbonatgesteine und Argillite auf, die überlagert werden von kohleführenden karbonatischen Schichten, Permgesteinen und triassischen

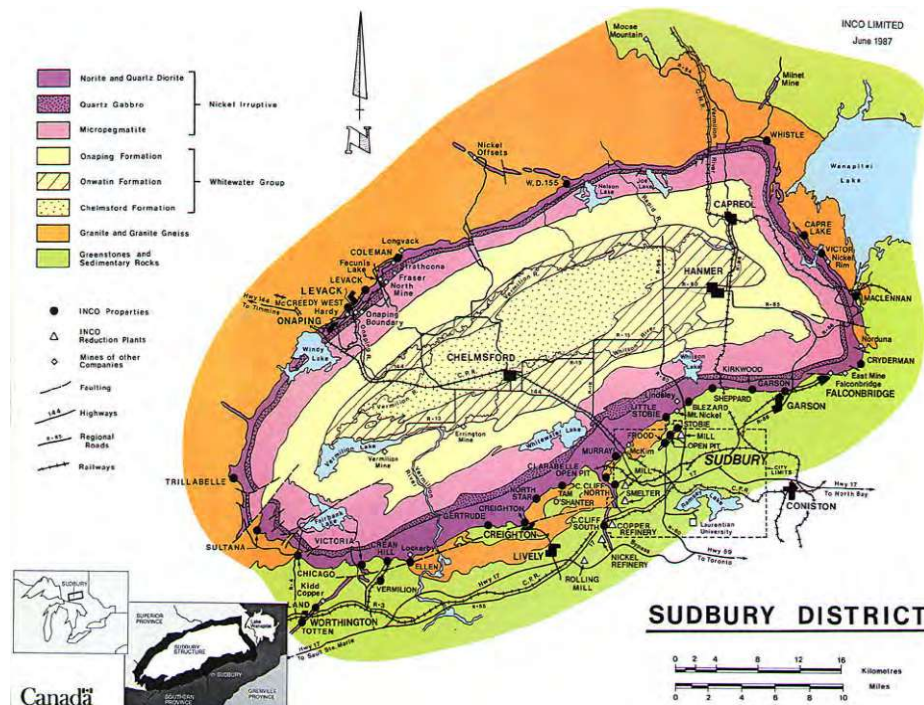


Abb. 61: Kupfer-Nickel-Lagerstätte bei Sudbury, Ontario, Kanada.²⁶⁴

264 aus: L. Weber, Vorlesungsunterlagen, Angewandte- und Umweltgeologie II, 2010.

265 [EVAN1992], S.140; [EVAN2013], p.139.

266 [EVAN2013], p.153.

basischen Vulkaniten. Die assoziierten Gabbrointrusionen bilden flachliegende Gänge, unregelmäßige Massen und trogförmige Intrusionen in Abhängigkeit von ihrer jeweiligen Lage in den schwach gefalteten Sedimenten, welche die vulkanische Abfolge unterlagern²⁶⁷. Die Lagerstätte Noril'sk I hat eine Mächtigkeit von 30-350m, die sich 12km nach Norden erstreckt. Das Cu/Ni-Verhältnis der Erze ist – wie in Sudbury – hoch.²⁶⁸

Die meisten Kupfersulfid-Mineralien sind an der Erdoberfläche nicht stabil und lösen sich während der Verwitterung auf. Wenn die Verwitterung auf hydrothermale oder magmatische Kupferablagerungen einwirkt, die an der Oberfläche freigelegt sind, können zwei Arten von Ablagerungen gebildet werden.²⁷⁰ Wenn das gelöste Kupfer als Kupferoxid und Kupferkarbonat ausfällt, entstehen sekundäre Kupferablagerungen. Wenn es nach unten in das darunterliegende unbewitterte Gestein sickert und neue Sulfidmineralien sich abscheiden, bilden sich supergene²⁷¹ Kupferablagerungen. Beide Verfahren haben zum Gehalt einiger Kupfervorkommen beigetragen und an einigen Stellen separate Erzkörper gebildet, beispielsweise in der Lagerstätte Exotica in der Nähe von Chuquicamata, Chile.²⁷²

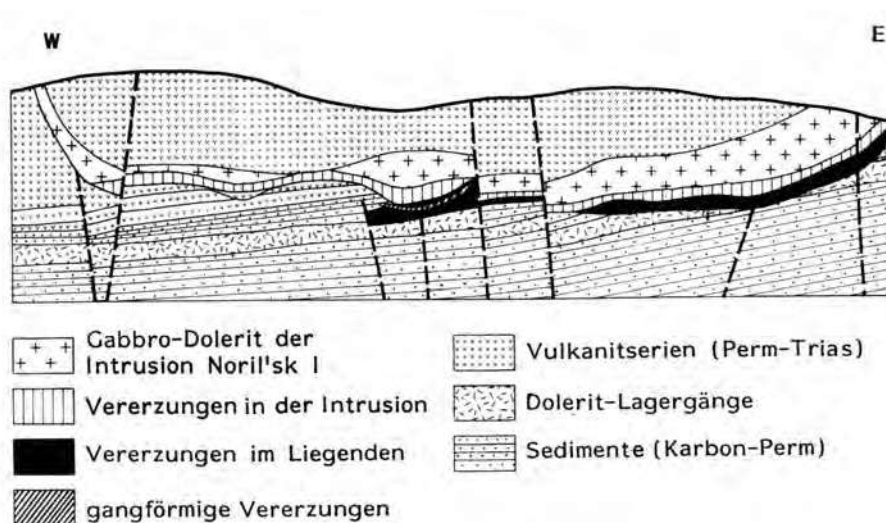


Abb. 62: Schematisches Profil durch die Lagerstätte Noril'sk I (Russland)
(Nach GLASKOWSKY et al 1977 aus F.J. SAWKINS 1990).²⁶⁹

²⁶⁷ [EVAN1992], S.155.

²⁶⁸ [EVAN1992], S.156.

²⁶⁹ aus: L. Weber, Vorlesungsunterlagen, Angewandte- und Umweltgeologie II, 2010.

²⁷⁰ [KESL2017], p.221.

²⁷¹ Supergene Anreicherung (supergene deposit, engl.) bezeichnet eine Lagerstätte, die sich an der Erdoberfläche oder oberflächennah bildet, zum Beispiel als Verwitterungslagerstätte. Der Gegenbegriff ist hypogene und bezeichnet eine Anreicherung, die sich im Erdinnern gebildet hat.

²⁷² [KESL2017], p.221.

4.7.4.2. Hydrothermale Lagerstätten

Hydrothermale Lagerstätten entstehen durch Mineralabscheidung aus vulkanischen Dämpfen oder heißen wässrigen Lösungen (Hydrothermen), in denen Schwermetalle oder seltene chemische Elemente transportiert werden. Die vulkanischen Dämpfe und hydrothermalen Lösungen

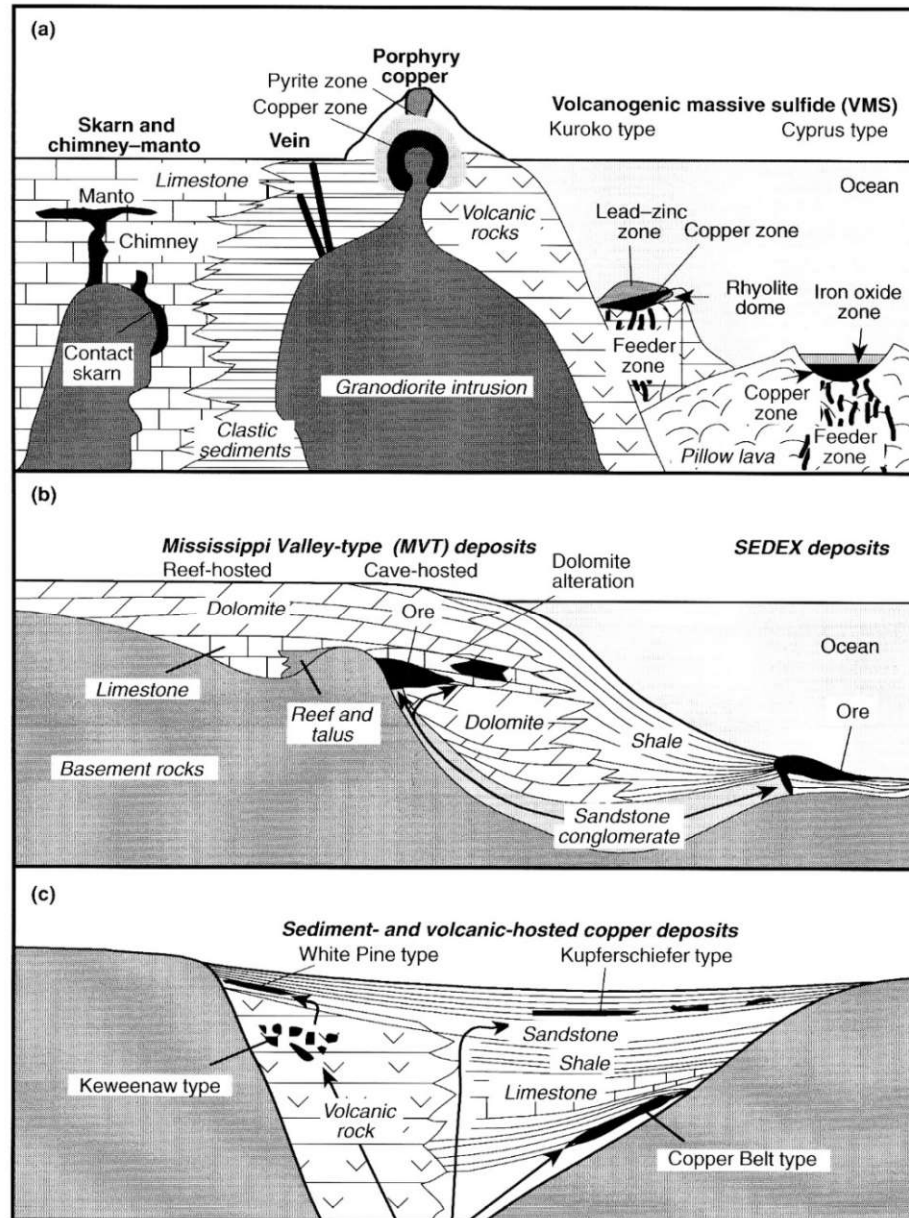


Abb. 63: Geologische Charakteristik wichtiger Kupferlagerstätten. (a) Lagerstätten in vulkanisch-intrusiver Umgebung; (b) Lagerstätten in basinalen Umgebungen (topographisch tiefsten Stellen) mit kleinen Vulkangesteinen; (c) Ablagerungen in basinalen Umgebungen mit lokal wichtigen Vulkangesteinen.²⁷³

273 aus: [KESL2017], Fig. 9.11, p.220.

durchdringen und infiltrieren ihr Nebengestein, wobei es im Zuge der Abkühlung und/oder Druckentlastung zur Ausfällung von Erzmineralien und/oder nutzbaren Nichterzen kommt.²⁷⁴

„Bei der Bildung der sedimentär-exhalativen Blei-Zink-Lagerstätten (SEDEX), der Blei-Zink-Verdrängungslagerstätten vom Mississippi-Valley-Typ, der Karbonat-gebundenen Uranerz-Lagerstätten sind ebenfalls Hydrothermen stark beteiligt, die allerdings relativ niedrig temperiert waren.“²⁷⁵ Durch die Wirkung hydrothormaler Fluide entsteht eine große und vielfältige Gruppe von Erzvorkommen durch verschiedene Prozesse.

Hydrothermale Lagerstätten können sich bilden, wenn

- (a) feste Phasen durch Abkühlvorgänge des Magmas auskristallisieren, oder
- (b) Mineralien, die aus den angereicherten Restflüssigkeiten durch Kristallisation beim Abkühlen des Magmas gebildet werden.²⁷⁶

4.7.4.2.1. Porphyrische Vererzungen

Porphyrische Anreicherungen sind meist relativ erzarm, bilden jedoch im Regelfall sehr große Lagerstätten, die hauptsächlich für den Abbau von Kupfer, Molybdän und Zinn genutzt werden. Mit rund 60% der Weltproduktion ist wirtschaftlich und mengenmäßig die hydrothermale porphyrische Kupferlagerstätte (porphyry (porphyritic) copper deposit) der bedeutendste Lagerstätten-typ. Die größten Kupfererzlagerstätten befinden sich an den zusammenlaufenden tektonischen Rändern (Abb. 58) in den USA, Kanada, im westlichen Pazifik und insbesondere in Chile, wo sich ungewöhnlich viele riesige und für diesen Typ rohstoffreiche (high-grade) Lagerstätten wie El Teniente und Chuquicamata befinden, die die Basis für das staatliche Kupferunternehmen Codelco bilden.

Porphyrische Lagerstätten bilden sich durch *plattentektonische Vorgänge*.²⁷⁷ Durch den Subduktionsvorgang wird die unter die kontinentale Platte unterschobene ozeanische Platte aufgeschmolzen. Da die Schmelze zumeist leichter als das umgebende Nebengestein ist, können diese Schmelzen als Batholithe entlang von Schwächezonen wie ein Heißluftballon hochdringen („ballooning“).

274 [OKRU2014], S.64-65.

275 [OKRU2014], S.65.

276 Die orthomagmatischen Lagerstättenbildung wurde bereits oben behandelt. Ergänzung zur vollständigen Übersicht: Orthomagmatischen Vererzungen entstehen entweder (c) durch die Erstarrung von unmischbaren Silikat-Schmelzen oder (d) wo Magma mit Fremdstoffen, die es beim Durchgang durch die Erdkruste aufgenommen hat, auskristallisieren. (vgl. [REVU2018], p.62.)

277 Der Begriff „*Porphyry*“ bezieht sich auf die Tatsache, dass das intrusive Gestein große Kristalle enthält, die von kleineren umgeben sind und eine Textur, die darauf hindeutet, dass seine Kristallisation unterbrochen wurde, möglicherweise durch Ableitung des magmatischen Wassers. (vgl. [KESL2017], p.219.)

Gesteinsschmelzen²⁷⁸ generieren konvektive Strömungen von Wässern (Fluide). Köhlen diese Fluide entlang ihrer Aufwärtsströmung ab, entstehen Dampfdrucke. Sobald der Dampfdruck den lithostatischen Druck übersteigt, führt dies zum „hydraulic fracturing“. Dabei kommt es zu gewaltigen Explosionen im subvulkanischen Stockwerk, was zum Aufreißen von Klüften führt. Folge dessen sinkt der Dampfdruck abrupt ab, wodurch aus den wässrigen, metallhaltigen Lösungen durch die gleichzeitige Abkühlung Metallverbindungen in Abhängigkeit von deren Bildungstemperaturen entstehen (=Vererzungsprozess).

Bei noch hohen Bildungstemperaturen entstehen vorerst Mo-Vererzungen, bei sinkender Temperatur die kupferbetonten Vererzungen. Bei weiterer Abkühlung entstehen sodann im Randbereich die niedrigsttemperierten Vererzungen (Pb, Zn, Au etc). Auf diese Weise entsteht auch der für derartige Vererzungen typische Zonarbau („Zonierung“).

Die Metallgehalte dieser Vererzungen sind äußerst niedrig, wogegen die Dimension derartiger Lagerstätten gewaltige Größen erreichen kann.

Mit zunehmender Entfernung von der Subduktionszone und zunehmender Tiefe nimmt auch die Temperatur dieser Schmelzen zu, wodurch sich subduktionszonenfernere Lagerstätten durch Mineralphasen mit höherer Bildungstemperatur manifestieren.

Die in den Hydrothermen enthaltenen Metalle reichern sich durch Lösen der Metalle aus den Nebengesteinen, die von den Wässern durchdrungen werden, an.

Im Kontaktbereich von Batholithen zu Karbonatgesteinen entstehen aus den zirkulierenden und mit dem Karbonatgestein reagierenden Lösungen die **Skarnlagerstätten** („Kontaktmetamorphose / Kontaktmetasomatose). Aus diesem Grunde können die Skarnvererzungen sowohl den hydrothermalen (magmatogenen) Vererzungen, wie auch den metamorphogenen Vererzungen zugeordnet werden.

Die typische zeitliche Häufung der Lagerstättenbildung im jüngeren Mesozoikum bzw. im Paläogen / Neogen ist eine direkte Abbildung des tektonischen Geschehens (Plattentektonik).

Die Chuquicamata Kupfermine in Chile wird heute von der Firma Codelco betrieben und ist mit einer Ausdehnung von 5x3 km und einer Tiefe von circa 1 km einer der weltgrößten Tagbaubetriebe (open-pit). Die Geschichte der Kupferförderung geht ein Jahrhundert bis 1915 zurück und heute werden bei einem Kupfergehalt von bis zu 1,5% fast 3 Mrd. Tonnen Kupfererz gefördert. Neben Kupfer werden auch zahlreiche Nebenmetalle aufbereitet. Die wohl bekannteste porphyrische Kupfermine ist Bingham in den USA und befindet sich wie die Chuquicamata Mine

²⁷⁸ Genauer: „aufsteigende Batholithe“: Ein Batholith (altgriechisch bathos, deutsch ‚Tiefe‘ und lithos, deutsch ‚Stein‘) ist ein weiträumiger und komplex aufgebauter magmatischer Tiefengesteinskörper mit einer Ausstrichbreite an der Oberfläche von mehr als 100 km², der sich nach unten hin verbreitert. Batholithe sind unregelmäßig geformte Intrusivkörper (Plutone), welche das Gestein, in das sie eindringen, verdrängen, mineralogisch thermisch verändern (Kontaktmetamorphose) und teilweise auch aufschmelzen. Batholithe entstehen nicht durch eine einzige magmatische Intrusion, sondern sind in der Regel aus vielen sukzessiven plutonischen Intrusionen aufgebaut.

im Kordillierenorogen.²⁷⁹ Der Kupfergehalt ist jedoch mit circa 0,3% deutlich niedriger, jedoch mit einer Erzförderung von rund 3 Mrd Tonnen fällt auch dieser Betrieb in die Kategorie der Großbergbaue.

Die Bingham Canyon Mine ist eine der größten porphyrischen Kupferlagerstätten der Welt südwestlich von Salt Lake City, Utah. Der Tagebau ist eine der größten menschengemachten Gruben der Welt und gehört der Rio Tinto Group, einem internationalen Bergbaukonzern mit Hauptquartier in London. Der Tagebau wird seit 1906 betrieben, umfasst 770 Hektar und ist 970 m tief und 4 km breit.

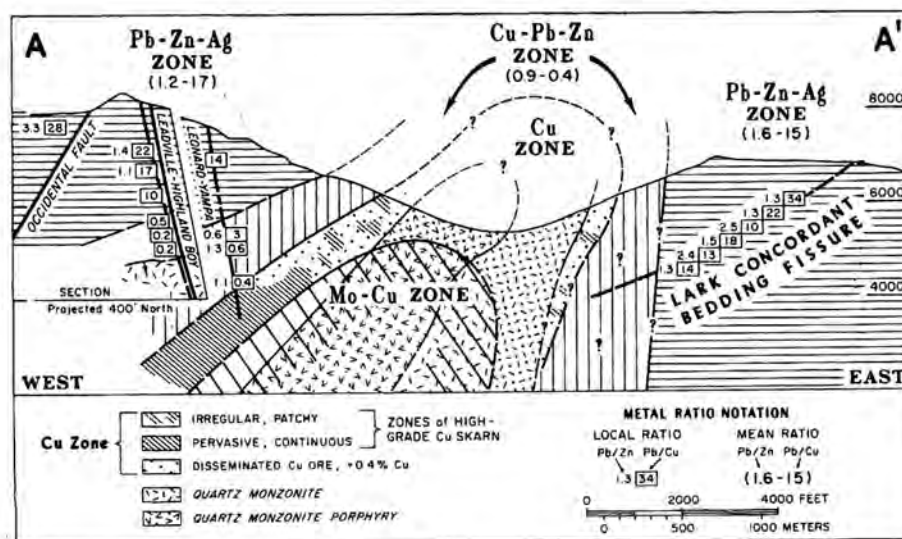


Abb. 64: Schematisches Profil durch die Lagerstätte Bingham / Utah nach Atkinson & Einaudi 1978²⁸⁰

²⁷⁹ zwischen Nord- und Südamerika

²⁸⁰ aus Weber, Leopold: Vorlesungsunterlagen Angewandte- und Umweltgeologie II, Universität Wien, 2011



Abb. 65: Lagerstätte Bingham / Utah (USA)²⁸¹ (Foto: L. Weber)

4.7.4.2.2. Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätte (IOCG)

Eine mit dem porphyrischen Lagerstättentyp verwandte Art ist die heute als Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätte eigenständig geführter Lagerstättenart, die besser unter IOCG bekannt ist. Diese „Iron Oxide-Copper-Gold“ (IOCG) Lagerstätte kann als eine in brecciösen Gesteinen auftretende polymetallische Minerallagerstätte definiert werden, bei der die Mineralisierung räumlich und zeitlich mit Granit- und mit Eisenoxidverwitterung verbunden ist.²⁸² Es handelt sich dabei um einen Übergangstyp vom porphyrischen zu stark eisenhaltigen hydrothermalen Vererzungen. Kaum eine IOCG Lagerstätte weist die gleichen Regelmäßigkeiten auf wie z.B. porphyrische Vererzungen, weswegen dieser Lagerstättentyp auch noch sehr schwer zu beschreiben bzw. zu definieren ist. IOCG-Ablagerungen bilden sich aus hochsalinaren Lösungen, die magmatischen Ursprungs zu sein scheinen, die jedoch arm an Schwefel sind, der die porphyrischen Kupferablagerungen charakterisieren.²⁸³

IOCG-Lagerstätten liefern nur etwa 5% der weltweiten Kupferproduktion, die größtenteils aus der riesigen Lagerstätte Olympic Dam in Südaustralien stammt (Abb. 58). „Olympic Dam und das etwas kleinere Ernest Henry (Queensland) gehören zum neu etablierten Typus der Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten (IOCG = Iron Oxide-Copper-Gold deposits), die in unterschiedlichen geotektonischen Positionen auftreten und deren Genese bis jetzt noch nicht voll verstanden

²⁸¹ aus Weber, Leopold: Vorlesungsunterlagen Angewandte- und Umweltgeologie II, Universität Wien, 2011

²⁸² [REVVU2018], p.103.

²⁸³ [KESL2017], p.218.

ist.²⁸⁴ Olympic Dam ist derzeit das größte untertägige Bergwerk Australiens. Die Lagerstätte stellt derzeit die jeweils viertgrößte bekannte Ressource für Kupfer und Gold sowie die drittgrößte bekannte Ressource für Uran dar.²⁸⁵ Der Eigentümer ist seit 2005 die BHP Group.

Gemeinsames Kennzeichen dieses Lagerstättentypus ist eine großräumige Zertrümmerung (Brecciation) und Verdrängung und Veränderung des Nebengesteins (metasomatische Alteration). Ein Zusammenhang mit magmatischer Aktivität ist nicht in allen Fällen erkennbar. „Für die Eisenoxid-führende Cu-Au-Lagerstätte Aitik in Nordschweden, die derzeit größte im Abbau befindliche Kupfermine Europas, sowie für andere nordschwedische Cu-Au-Lagerstätten wird ebenfalls eine Zugehörigkeit zum IOCG-Typ vermutet.“²⁸⁶

4.7.4.2.3. Gang-kluftförmige Vererzungen (Vein deposits)

Gänge (engl.: veins) sind geologische Körper, die das Nebengestein diskordant²⁸⁸ durchschlagen (Abb. 66). Die Gangfüllung ist somit jünger als das Nebengestein. Typische Gänge zeigen gele-

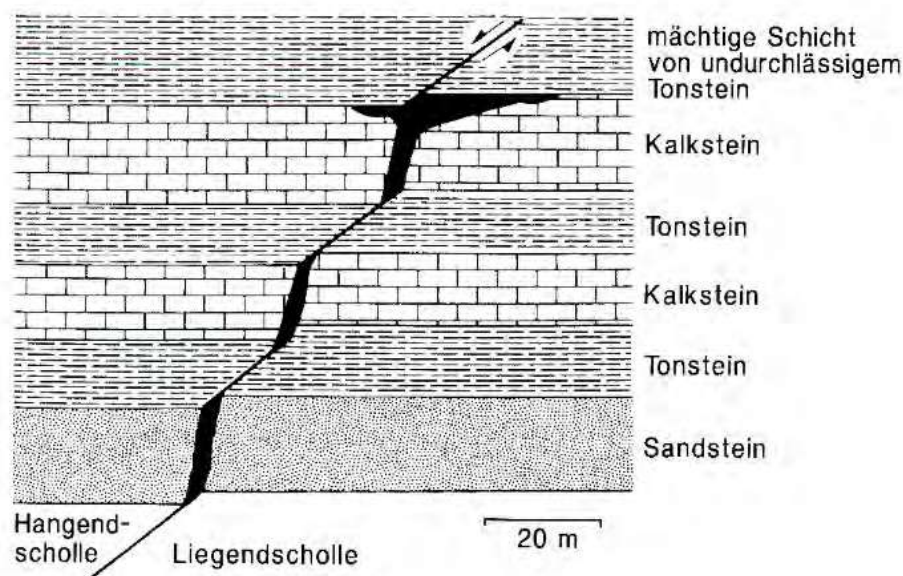


Abb. 66: Erzgang mit an- und abschwellender Struktur, die sich unterhalb einer mächtigen Schicht von undurchlässigem Tonstein in die Horizontale biegt.²⁸⁷

284 [OKRU2014], S.365.

285 http://www.pir.sa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0016/10906/mj28_copper.pdf (28.08.2020).

286 [OKRU2014], S.365.

287 [EVAN1992], Abb. 2.2, S.13. (die schwarze aufsteigende Linie symbolisiert den diskordant durchschlagenden Gang.)

288 Diskordanz: in einem Winkel („schräg“) zur horizontalen Schicht angeordnet.
Konkordanz: in Richtung der Schichtung.

gentlich einen symmetrischen Aufbau, wobei die ältesten Mineralbildungen am Kontakt zum Nebengestein, die jüngsten Mineralbildungen im zentralen Bereich des Ganges auftreten. Bei schichtkonkordanter Lagerung spricht man auch von Lagergängen.²⁸⁹

Bei klufförmigen Vererzungen fehlt der symmetrische Aufbau. Derartige Vererzungen bilden das Trennflächengefüge ab und sind altersmäßig zumindest gleich als oder jünger als dieses.

Die Minerale der Gänge wurden aus hydrothermalen Lösungen abgeschieden und die „Gangfüllung“ besteht entweder aus einem einzigen Mineral, oder – was weitaus häufiger ist – aus miteinander verwachsenen Erz- und Gangartmineralien.²⁹⁰ „Zu den Gangarten zählen im Wesentlichen Quarz, Calcit, Dolomit und andere Karbonate sowie Fluorit und Baryt, die wichtige Industrieminerale darstellen und meist aus erzfreien Hydrothermalgängen gewonnen werden.“²⁹¹ Somit können Gangartminerale „mineralogisch betrachtet, die Hauptkomponenten eines Ganges ausmachen, wie dies z.B. bei den goldführenden Quarzgängen der Fall ist.“²⁹²

Ein charakteristisches Merkmal dieses Lagerstättentypus ist auch eine vertikale Zonierung. Als eine vertikale Zonierung wird eine unterschiedliche qualitative Erzführung gegen die Tiefe ver-



Abb. 67: Klufförmige Vererzungen, Fahlerzvererzung, Schwaz (Foto: L. Weber)²⁹³

standen. Diese wird in erster Linie auf die unterschiedlichen Bildungstemperaturen der einzelnen Erzphasen zurückgeführt. Beispielsweise wurde die Dolcoath Mine als Kupferbergbau eröffnet

289 [EVAN1992], S.11.

290 [EVAN1992], S.14.

291 [OKRU2014], S.354.

292 [EVAN1992], S.216.

293 aus Weber, Leopold: Vorlesungsunterlagen Angewandte- und Umweltgeologie II, Universität Wien, 2011

und entwickelte sich im Laufe der Zeit zu einem Zinnbergbau.²⁹⁴ „Dolcoath war der reichste einzelne Zinnang, der jemals abgebaut wurde. Insgesamt lieferte dieser Gang 80.000 t Zinn und 350.000 t Kupfer.“²⁹⁵

Die Mehrzahl der Gänge wurde von aufsteigenden hydrothermalen Lösungen gebildet. Die Ausscheidung erfolgte bei völlig unterschiedlichen Bedingungen, einerseits bei hohen, fast magmatischen Temperaturen und Drücken sowie oberflächennah bei tieferen Temperaturen und Druckbedingungen.²⁹⁶ Daraus ist erkennbar, dass sich die Gänge auf vielfältige Arten bilden konnten, und daher diese Lagerstättentypus nicht einfach in eine Systematik bringen lässt.

Historisch gesehen, hat daher in den letzten Jahrzehnten die Bedeutung dieses Lagerstättentypus abgenommen. Erstens wurde erkannt, dass zahlreiche, vormals den Ganglagerstätten zugeordnete Erzkörper anderen Vererzungstypen zuzuordnen sind. Wirtschaftlich bedeutender ist jedoch, dass früher Kupferlagerstätten erst ab einem Kupfergrad von 3% abgebaut wurden, der meist nur in hydrothermal angereicherten Gängen zu finden war. Insbesondere steil stehende Ganglagerstätten sind nur schwer mechanisierbar, was sich auf überdurchschnittlich hohe Gewinnungskosten niederschlägt. Wie in dieser Arbeit an mehreren Stellen gezeigt wird, wird Kupfer heute hauptsächlich mit großtechnischen Methoden gewonnen und daher sind auch Lagerstätten mit einem geringeren Anreicherungsgrad wirtschaftlich abbaubar.

„Butte in Montana (USA) gehört zu den berühmtesten Ganglagerstätten der Erde. In der Zeit von 1880 bis 1964 lieferte dieser Erzdistrikt 300 Mio. t Erz mit 7,3 Mio. t Cu, 2,2 Mio. t Zn, 1,7 Mio. t Mn, 0,3 Mio. t Pb, 20.000 t Ag und 78 t Au sowie bedeutende Mengen an Wismut, Cadmium, Selen, Tellur und Schwefelsäure. Wegen der enormen Mineralproduktion in einem so kleinen Gebiet (kaum mehr als 6 km x 3 km) mit mehr als 20 Gruben wurde Butte sehr treffend als reichster Hügel der Erde bezeichnet. [...] Hauptabbauweise war bis 1950 der Firstenstoßbau mit Versatz, der dann vom Blockbruchbau abgelöst wurde. 1955 begann dann der obertägige Abbau mit fein dispers verteilten Vererzungen. Die Reserven sind immer noch riesig und umfassen etwa 10 Mio. t reiche Kupfer- und Silbererze und etwa 500 Mio. t geringhaltige Kupfererze.“²⁹⁷ Die Lagerstätte Butte entstand durch zwei Mineralisierungsstadien. Die Vorphase setzte in den tieferen Teilen der mineralisierten Zone an und entstand vor 63 Mio. Jahren bei einer Temperatur von 600-700°C. Die Hauptmineralisationsphase erfolgte durch hydrothermale Lösungen und zonierte verschiedener Formen von Gangsystemen mit einer zentralen Kupfermineralisationszone. Diesem Prozess erfolgte bei geringeren Temperaturen zwischen 200-350°C und löste das in der Vorphase feinverteilte Kupfer. Die anschließende Kupferabscheidung führte

294 [EVAN1992], S.216.

295 ebd.

296 [EVAN1992], S.216.

297 [EVAN1992], S.221.

schließlich zur Bildung der reichen Erzgänge. Dieser Teil der Lagerstättenbildung des Butte-Erzreviers wurde mit 58 Mio. Jahren ein deutlich jüngeres Alter zugeordnet.²⁹⁸

Mesothermale Gänge mit Chalkopyrit sind in Mitteleuropa weit verbreitet und wurden früher an vielen Stellen abgebaut, sind aber heute nicht mehr bauwürdig. Auch die Kupfer-Erzgänge von Mitterberg (Salzburg, Österreich) sind diesem Lagerstättentypus zuzuordnen.²⁹⁹

4.7.4.2.4. Hydrothermal Verdrängungslagerstätten („Skarn type deposits“)

Dieser Lagerstättentyp entsteht zwar aus Hydrothermallösungen, wird jedoch bei den metamorphen Lagerstätten näher beschrieben und hier nur kurz angerissen. „Hydrothermale Verdrängungslagerstätten entstehen in leicht reaktionsfähigen Gesteinen, insbesondere in Kalksteinen und Dolomiten oder ihren metamorphen Äquivalenten, den Marmoren. Dabei erfolgt ein metasomatischer³⁰⁰ Stoffaustausch zwischen dem Karbonatgestein mit hydrothermalen Lösungen, wobei Calcit oder Dolomit durch Erzminerale [...] ausgetauscht werden.“³⁰¹

Insbesondere **Skarnerze** entstehen fast immer im Kontaktbereich zwischen magmatischen Intrusionen und karbonatischem Nebengestein (Kalkstein oder Dolomit). „Bei diesem Spezialfall kommt der Kontaktmetasomatose kommt es häufig zu erheblichen metasomatischen Stoffwanderungen, wobei dem Karbonatgestein insbesondere Si, Al, Fe und Mg sowie Neben- und Spurenelemente zugeführt werden.“³⁰²

Im Regelfall entstehen Lagerstätten dieses Typus´ wegen ihres leicht reaktionsfähigen Materials durch Gesteinsmetamorphose. Daher werden **Skarn-Lagerstätten** den **metamorphogenen Lagerstätten zugeordnet** und sind im Kapitel 4.7.6.1 (Seite 151) beschrieben.

298 [EVAN1992], S.222-224.

299 [OKRU2014], S.356.

300 = durch Verdrängung. (Bei der Metasomatose (griech. meta ‚mit-, nach-, um-‘; und sóma ‚Körper‘) oder Verdrängung wird das Material eines Gesteins oder bestimmter Gesteinskomponenten aufgelöst und durch anderes Material ersetzt.)

301 [OKRU2014], S.351.

302 [OKRU2014], S.351.

4.7.4.2.5. Karbonatite („Carbonatite type deposits“)

„Karbonatite sind im Prinzip „magmatische karbonatische Gesteine“, d.h. plutonische oder vulkanische Gesteine aus dem Oberen Erdmantel, welche mehr als 50% Karbonate enthalten. Diese Gesteinskomplexe hängen mit der Entwicklung und Zusammensetzung des Oberen Mantels zusammen, wenngleich sie vergleichsweise selten und nicht sehr voluminös sind. Im Allgemeinen liegt der Anteil von Karbonatmineralien bei 70 bis 90 %, die vor allem als Calcium und CO₂ in der Summenformel vertreten sind. Hauptmineralien sind gewöhnlich Calcit, Dolomit, Ankerit sowie Siderit.“³⁰³

Karbonatite sind meist intrusive subvulkanische oder flache plutonische (oft ringförmige) Komplexe; und sind vornehmlich mit Alkaligesteinen vergesellschaftet. „Die intrusiven Karbonatite wurden in der Erdkruste durch relativ langsam abkühlendes Magma gebildet; die extrusiven bildeten sich durch relativ schnell abkühlende Lava. Karbonatite sind - meist exklusiv - mit plattentektonischen Prozessen, wie z.B. der Kontinentaldrift, assoziiert. Die Mehrheit aller Karbonatite sind proterozoisch oder phanerozoisch zumeist am Ende des Präkambriums und zu Beginn des Paläozoikums entstanden. Es hat den Anschein, dass während der gesamten Erdgeschichte, vom Archaikum bis heute, die karbonatischen magmatischen Aktivitäten ständig zugenommen haben.“³⁰⁴

„Karbonatite stellen eine der am wenigsten verbreiteten Gesteinsarten dar. Sie kommen meist streng lokal begrenzt in nur wenige Quadratkilometer großen Arealen vor. Ihr Vorkommen ist vornehmlich mit Hot-Spot-Vulkanismus und den zugehörigen kontinentalen Riftsystemen verbunden. Daher ist Afrika, mit seinem Ostafrikanischen Grabenbruch, der Kontinent mit der höchsten Konzentration an Karbonatitkomplexen.“³⁰⁵

303 Mineralienatlas: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Geologisches%20Portrait/Lagerst%C3%A4tten/Carbonatite-%20und%20Phoscorite> (29.08.2020).

304 ebd.

305 ebd.

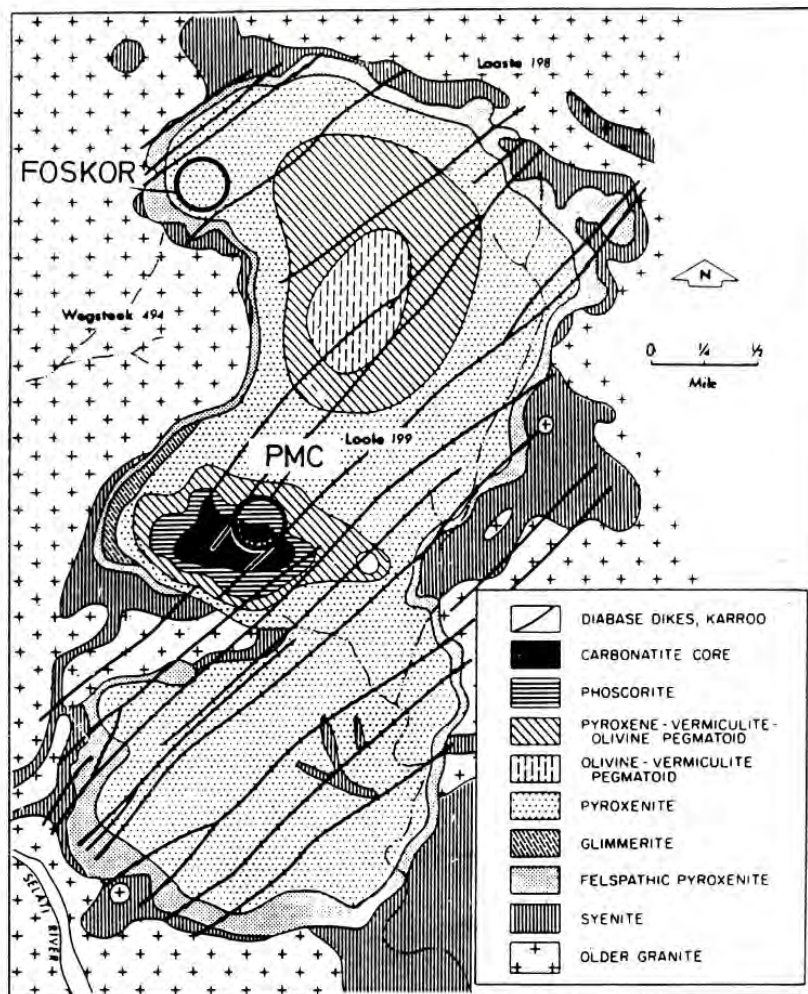


Abb. 68: Karbonatitlagerstätte Palabora (RSA)³⁰⁶

Für die Kupfergewinnung ist lediglich der Karbonatitkomplex von Palabora (Südafrika) von wirtschaftlicher Bedeutung.³⁰⁷ Dieser proterozoische Magmatitkomplex, der im Archaikum des nordöstlichen Transvaals liegt, ist das Resultat einer alkalintrusiven Tätigkeit (Abb. 68).³⁰⁸

Da für diesen Lagerstättentypus keine belastbaren Werte an Selenkonzentrationen vorliegen, und Palabora die einzige Kupferlagerstätte dieser Art ist, wurden Karbonatitlagerstätten nicht in die weitere Analyse der Selenwerte von Kupferlagerstätten mit einbezogen.

306 aus: Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

307 [EVAN1992], S.112.

308 ebd.

4.7.5. Sedimentogene / sedimentgebundene Lagerstätten

4.7.5.1. Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Lagerstätten und SEDEX

VMS Lagerstätten bilden sich am Meeresboden durch Ausfällungen der Metalle aus Hydrothermallösungen (z.B. Black Smoker). Obwohl die Vererzungen hydrothermal entstanden sind, werden sie zu den **sedimentogenen Vererzungen gezählt**.

VMS Lagerstätten zeigen dabei noch einen direkten Zusammenhang mit submarinem Vulkanismus, der bei den SEDEX-Lagerstätten aber nicht direkt feststellbar ist. Ansonsten ist die Genese dieser beiden Lagerstättentypen aber weitgehend gleich:

Es dringen metallhaltige Lösungen aus der Tiefe aus dem Meeresboden. Durch den abrupten Druck- und Temperaturabfall der metallhaltigen Lösungen an der Austrittsstelle am Meeresboden fallen die gelösten Metalle entsprechend der unterschiedlichen Bildungstemperaturen der Metallverbindungen aus (siehe Abb. 70). Die Temperatur der Hydrothermen beträgt mehrere hundert Grad Celsius, die Temperatur des Meerwassers jedoch lediglich circa 5°C. Der Druck der ausströmenden Hydrothermen ist jedenfalls höher als der Druck der Meerwassersäule,³⁰⁹ da ansonsten diese nicht ausdringen könnten und würden in den Zufuhrspalten zurückgedrängt bleiben.

Zuerst bilden sich die kupferreichen Minerale (z.B. Kupferkies / Chalcopyrit), wobei sich diese Mineralphasen konsequenterweise um die Austrittsstellen der Hydrothermen („Vents“) bilden (Abb. 70). Mit zunehmender Entfernung um derartige Austrittsstellen nimmt auch die Temperatur dieser Lösungen ab, woraus sich dann eben jene Mineralphasen mit der geringeren Bildungstemperatur bilden (Pb, Zn, etc.). Auf diese Weise entsteht eine vertikale und horizontale Elementverteilung (siehe Abb. 63).

Zur Bildung derartiger Lagerstätten ist ein stark strukturierter Meeresboden (Mulden) erforderlich, in welchem sich die metallhaltigen (schwereren) Lösungen absetzen können. Sind keine derartigen Mulden vorhanden, würden sich die Lösungen durch die Meeresströmung verteilen und es kommt zu keiner Lagerstättenbildung, vielmehr zu einer diskreten Verteilung der Metalle im Sediment (erhöhter Background).

Auch SEDEX Lagerstätten zeigen eine Nahebeziehung zu Magmatismus. Dieser ist aber im Untergrund und bewirkt lediglich die Zirkulation von Lösungen, da sich am Meeresboden kein Vulkanismus manifestiert. Beide Lagerstättentypen VMS und SEDEX sind folglich sedimentäre Bildungen und daher nur den sedimentogenen Lagerstätten zugeordnet.

³⁰⁹ 10m (Meer)wassersäule \approx 1 bar; 1000m = 1km \approx 100 bar.

4.7.5.1.1. Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Lagerstätten

In etwa 10% der weltweiten Kupferproduktion stammen aus vulkanogenen Massivsulfidvorkommen (VMS), die aus hydrothermalen Systemen gebildet wurden. Daher werden diese Lagerstätten auch als **Volcanic Massive Sulfide (VMS)**, Submarine Exhalative Massive Sulfide oder Volcanic-hosted Exhalative Sulfide bezeichnet.³¹⁰ Sie bestehen aus massiven Linsen aus Eisen-, Kupfer-, Zink- und Bleisulfiden, die dort abgelagert wurden, wo sehr heiße Lösungen aus dem Meeresboden entweichen. Die massiven Erzlinen werden üblicherweise von einem System von Klüften unterlegt, die die Zufuhrzone bildeten, durch die Lösungen den Meeresboden erreichten.

In der Regel ist dieser Lagerstättentypus klein oder mittelgroß und hat einen mittel- bis hochgradigen Kupfergehalt. Heute wird diese hydrothermale Art der Anreicherung auch Polymetallic Massive Sulfide Deposit bezeichnet, da sich neben Kupfer meist auch Zink (Zn), Blei (Pb) und Edelmetalle wie Silber (Au) und Gold (Ag) sowie Nebenmetalle wie Cadmium (Cd), Selen (Se), Wismut (Bi) befinden.³¹¹ Dieser Lagerstättentypus gilt als allgemein gut erforscht und konnte aufgrund des relativ einfachen Aufbaus schon vor 2000 Jahren die Kupferversorgung für die Bewaffnung der Römischen Legionen aus Lagerstätten in Zypern und Spanien sicher stellen. Die alte Rio Tinto Mine im Südwesten Spaniens ist eine der am längsten bekannten Lagerstätten, deren Anfänge vor die römische Epoche zurückgeht und Grundstein und bis heute Namensgeber eines der größten Bergbauunternehmungen (Rio Tinto) ist.³¹²

Drei Haupttypen alter VMS-Lagerstätten werden nach Gebieten benannt, in denen sie erstmals erkannt wurden. Lagerstätten vom Typ Zypern haben ihren Namen vom Metall Kupfer, das selbst nach der Insel benannt wurde. Diese Ablagerungen sind assoziiert mit basischen Vulkaniten und bildeten sich in der Ozeankruste an unterschiedlichen tektonischen Rändern. Es handelt sich im Wesentlichen um kupferhaltige Pyrit-Vererzungen.³¹³ Die TAG-Kupfer-Zink-Lagerstätte bei 26°N entlang des mittellatlantischen Kamms ist eine aktiv bildende Lagerstätte dieses Typs.

„Lagerstätten des Besshi-Typs liegen innerhalb von Abfolgen mafischer Vulkanite in strukturell komplizierten Gebieten, die durch mächtige Grauwackenabfolgen charakterisiert sind.“³¹⁴ Sie sind an die frühen Phasen der Inselbogenentwicklung³¹⁵ gebunden. Benannt ist diese Anreicherung nach der größten japanischen Pyrit-Kupferkies-Lagerstätte im Besshi-Distrikt (Japan), die

310 [REVVU2018], p.99.

311 [REVVU2018], p.99.

312 ebd.

313 [EVAN1992], S.65.

314 [EVAN1992], S.65.

315 Ein Inselbogen ist eine geotektonische Struktur der oberen Erdkruste, die geographisch in Form einer bogenförmigen Inselkette zum Ausdruck kommt. Er entsteht infolge der Plattentektonik dort, wo eine ozeanische Platte in einem bestimmten Winkel unter eine andere Lithosphärenplatte abtaucht (Subduktion), und zwar stets auf der nicht-abtauchenden Platte (Oberplatte). Die bogenartige Ausbildung der Struktur ist eine Konsequenz aus der Kugelgestalt der Erde. Inselbögen sind in der Regel Regionen mit hoher seismischer und magmatischer Aktivität.

vorwiegend Kupfer-Zink-Erze (Cu-Zn-Erze) führt. Die Altersstellung reicht von frühproterozoisch bis paläozoisch.

Lagerstätten vom Kuroko-Typ, die nach einem Gebiet im Norden Japans benannt sind, bilden sich an tektonischen Rändern, an denen Inselbögen durch Risszonen geschnitten wurden. „Die während späterer Stadien der Inselbogenentwicklung geförderten felsischen Vulkanite besitzen eine vielfältige Metall-Assoziation. Es handelt sich hierbei um Cu-Zn-Pb-Erze, die oft auch Gold und Silber führen und mit großen Mengen an Baryt, Quarz und Gips assoziiert sein können“³¹⁶ Lagerstätten ähnlich dem Kuroko-Typ sind auch in präkambrischen Gesteinen verbreitet und umfassen die riesige Lagerstätte Kidd Creek in Ontario³¹⁷ (Abb. 60).

Die Form der VMS-Ablagerungen wird teilweise durch die relativen Dichten der Lösungen und des umgebenden Meerwassers gesteuert. Da die hydrothermalen Lösungen grundsätzlich dichter (schwerer) als Meerwasser sind, sammelt sie sich in Vertiefungen und bildet stratiforme Ablagerungen (Abb. 69).

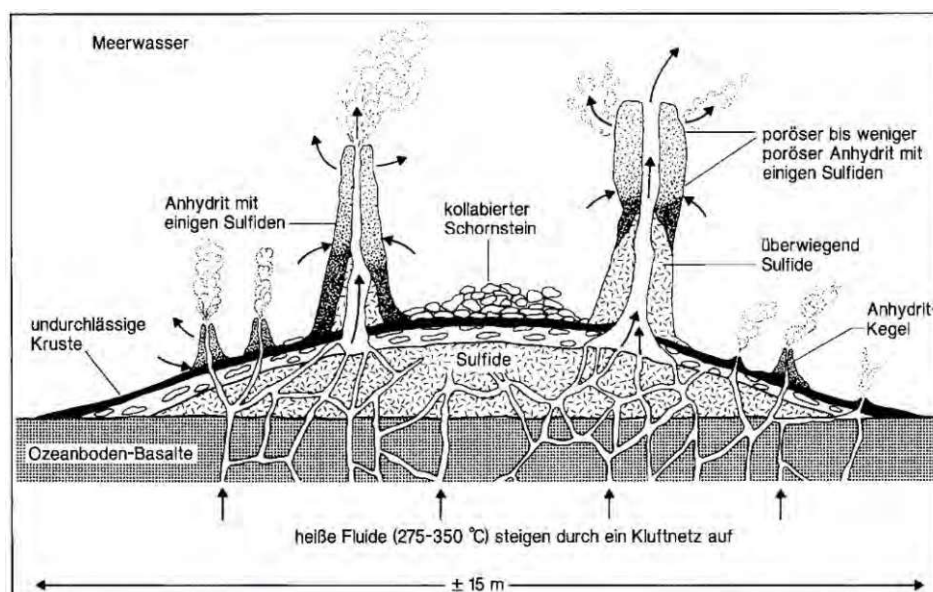


Abb. 69: Erzschorsteine und Erzhängel auf dem Ozeanboden (nach Barnes 1988, aus Evans 1992, aus [OKRU2014]).³¹⁸

316 [EVAN1992], S.65.

317 [KESL2017], p.219.

318 aus: [OKRU2014], Abb. 13.13, S.362.

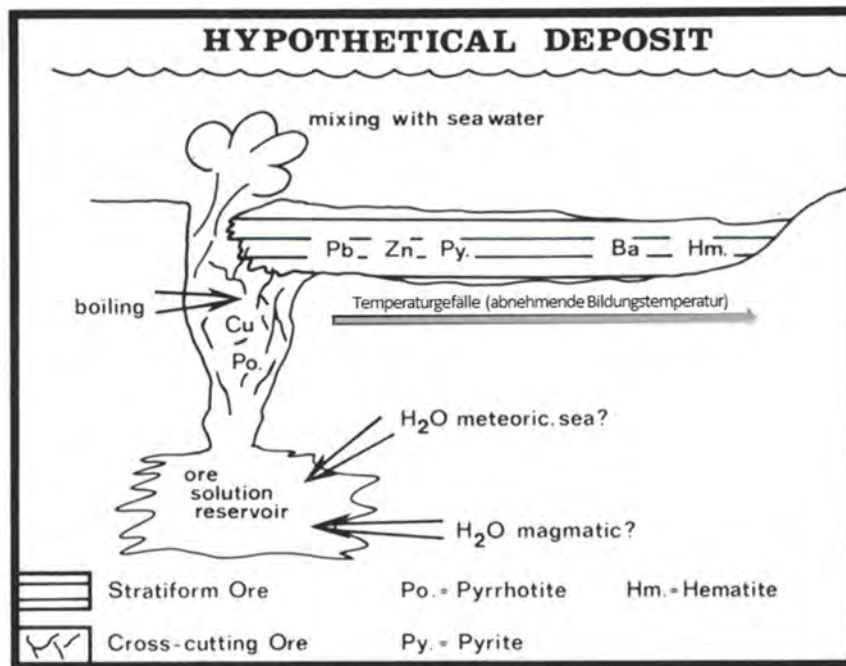


Abb. 70: Hypothetische SEDEX Lagerstätte³¹⁹

4.7.5.1.2. Sedimentary Exhalative (SEDEX) Lagerstätten

Der Begriff SEDEX, der von „sedimentary exhalative“ abgeleitet ist, basiert auf der Interpretation, dass die fein laminierten oder eingebetteten Sulfiderze chemische Sedimente darstellen, die aus hydrothermalen Fluiden ausgefällt wurden, die am Meeresboden ausströmten.³²⁰ Viele SEDEX Lagerstätten sind circa 2 Mrd. Jahre bis 300 Mio. Jahre alt und stammen aus dem Proterozoikum und Paläozoikum.³²¹

Massive Sulfide (MS) Lagerstätten oder SEDEX-Lagerstätten sind eng verwandt mit dem Typus der VMS-Lagerstätten. MS bzw. SEDEX zeigen jedoch keinen direkten Zusammenhang mit submarinem Vulkanismus, der bei VMS-Lagerstätten gegeben ist. Jedoch ist für die Zirkulation derartiger Lösungen ein auf einem tiefer liegender Magmatismus zurückzuführender Wärmestrom erforderlich. Ansonsten ist die Genese dieser beiden Lagerstättentypen aber weitgehend gleich, wie bereits oben ausgeführt (Abb. 70), sind aber an Sedimente gebunden.

„Die weltweit verbreiteten, stratiformen³²² SEDEX-Lagerstätten sind Rohstoffquellen von großer wirtschaftlicher Bedeutung; wie VMS-Lagerstätten können sie sehr große Dimensionen

319: aus: Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

320 [REVU2018], p.102.

321 ebd.

322: Stratiform (= schichtige), ist eine spezielle Art von stratabound und beschreibt das Auftreten eines erzhaltigen Gesteines oder von Erzkörpern parallel zu einer sedimentären oder magmatischen Schichtung oder eines metamorphen Schieferungsgefüges.

annehmen. Es handelt sich um schichtgebundene³²³ Erzanreicherungen, die am Boden von lokalen Meeresbecken abgesetzt wurden, z.B. in Laugentümpeln (brine pools). Wie fossile Erzschorne und Stockwerk-Vererzungen beweisen, geht die Metallanreicherung auf eine langdauernde hydrothermale Aktivität zurück, die besonders in kontinentnahen oder intrakratonischen Riftzonen erfolgte und von aktiver Sedimentation begleitet war. Die Metalle wurden also aus relativ dicken Krustenteilen mobilisiert. [...] Im Gegensatz zu den VMS-Lagerstätten ist ein direkter Zusammenhang mit Vulkanismus nur selten erkennbar, z.B. in Mt. Isa (Queensland, Australien). Rezente Beispiele sind der Golf von Kalifornien, wo noch heute Sulfide und Baryt ausgefällt werden, sowie die Erzanreicherungen des Atlantis-II-Tiefs im Roten Meer. Neben Zn (ca. 5-19%) und Pb (ca. 0,5-11%) enthalten SEDEX-Lagerstätten bis zu 1% Cu, bis zu 175 g/t Ag sowie etwas Au.³²⁴

Deutschland verfügt über eine Reihe wichtiger SEDEX-Lagerstätten: Der Rammelsberg bei Golsar im Harz und Meggen im Sauerland (Rheinisches Schiefergebirge). In beiden ist Zn und Cu angereichert, jedoch wurde der Bergbau Rammelsberg, der um das Jahr 900 startete und im Jahr 1988 eingestellt und zum UNESCO Weltkulturerbe erklärt und die Schließung von Meggen folgte 1992.³²⁵ Wirtschaftliche Bedeutung haben die irischen SEDEX-Lagerstätten Navan, Silvermines und Tynagh.

4.7.5.2. Sediment hosted deposits („afrikanischer Typ“)

Beckenzentrale hydrothermale Systeme bildeten zwei verschiedene Arten von Lagerstättentypen, die 20% der Weltproduktion von Kupfer ausmachen. Im sedimentären Kreislauf kommt es häufig zur Bildung von syngenetischen³²⁶ oder epigenetischen³²⁷ Lagerstätten.³²⁸

Die Kupferlagerstätten im **zentralen Afrika** durch Abtragung und Lösung älterer, primärer Lagerstätten und sedimentäre (sekundäre) Anreicherung in der Roan Serie entstanden (Abb. 71). In beiden Fällen handelt es sich sowohl um stratiforme (=schichtkonkordante) als auch

323: Der Begriff „stratiform“ kann in verschiedenen Maßstäben angewendet werden, beginnend mit der parallelen Anordnung von einzelnen Erzmineralphasen innerhalb eines Erzkörpers bis zur schicht- bzw. schieferungsgebundenen Anordnung ganzer Erzhorizonte. Klassische Beispiele sind die stratiformen Chromitvorkommen innerhalb großer geschichteter, magmatischer Komplexe (Bushveld-Komplex, Stillwater Complex etc.) oder die massiven Blei-Zink-Vererzungen des Rammelsberges (Harz) und von Mt. Isa (Queensland, Australien). (Lexikon der Geowissenschaften, <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/stratiform/15832> (10.06.2020)).

324 [OKRU2014], S.365-366.

325 [OKRU2014], S.366.

326 Syngenetisch ist ein Begriff der Allgemeinen Geologie und bezeichnet Bildungen, die gleichzeitig mit den umgebenden Gesteinen entstanden sind. Beispiele sind viele Typen von Lagerstätten. Der Gegenbegriff lautet: epigenetisch.

327 Epigenese (Adjektiv epigenetisch) ist ein Begriff der Allgemeinen Geologie und Geomorphologie und beschreibt die Entstehung von Merkmalen, die fast gleichzeitig, aber zeitlich nach den Strukturen entstanden sind, zu denen sie gehören. Sie sind also jünger als ihre Umgebung, aber bezogen auf den Vergleichsmaßstab fast gleich alt. Der Gegenbegriff lautet syngenetisch. (*epi* = „nach“, „hinterher“)

328 [OKRU2014], S.65.

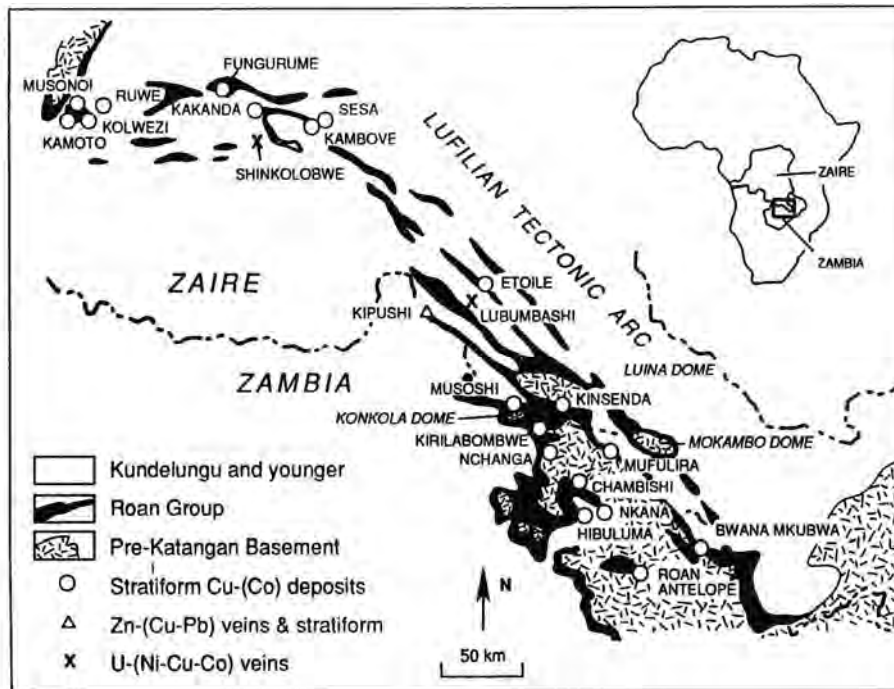


Abb. 71: Zentralafrikanischer Kupfergürtel³²⁹

stratabound-(schichtgebundene) Lagerstätten, zumal diese Vererzungen an ein definierbares Schichtglied gebunden sind (Abb. 72).³²⁹

„Tonsteine, Pelite, Argillite und Tonschiefer sind die wichtigsten Nebengesteine von Konkordanten, oft bemerkenswert kontinuierlichen und ausgedehnten Erzkörpern.

Die mit Abstand wichtigste Anreicherung dieser Lagerstätten ist der Kupfergürtel (**copper belt**), der sich über mehrere hundert Kilometer von der Demokratischen Republik Kongo (DRC) bis nach Sambia erstreckt (diese Lagerstätten sind auch die wichtigsten globalen Kobaltquellen, die für die (Auto-)Batterieherstellung essenziell sind). Obwohl frühe Theorien darauf hinwiesen, dass sich diese Ablagerungen als chemische Sedimente bildeten, ist jetzt bekannt, dass sie sich später bildeten, als metallhaltige Lösungen nach oben in die Sedimente floss, um den Pyrit zu ersetzen und Kupfersulfide abzuscheiden³³¹ (Abb. 63c).

³²⁹ Schichtgebundene (stratabound) Lagerstätten sind eine Vererzung, die innerhalb einer bestimmten Gesteinseinheit auftritt und an diese gebunden ist, doch keine unmittelbare texturale oder strukturelle Korrelation mit dem Wirtsgestein zeigen. Stratiform (Schichtkonkordanz) ist eine spezielle Art von stratabound und beschreibt das Auftreten eines Erzkörpers parallel zu einer sedimentären oder magmatischen Schichtung. Schichtige Erze sind nicht nur schichtgebunden, sondern weisen darüber hinaus auch eine texturale Korrelation (eine "Konkordanz") zum Gefüge des Wirtsgesteins auf. (Quelle: Mineralienatlas: https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Geologisches%20Portrait/Lagerst%C3%A4tten/Klassifizierung%20von%20Lagerst%C3%A4tten#Schichtgebundene_24stratabound.24_und_schichtige_24stratiform.24_Lagerst.24.24tten)

³³⁰ aus: Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

³³¹ [KESL2017], p.219.

Ein weiterer wichtiger Lagerstättenbezirk ist das paläoproterozoische Kodaro-Udokan-Becken in Sibirien.³³²

Die Bildung von Lagerstätten nahe der Erdoberfläche kann durch Oberflächenprozesse bei niedriger Temperatur erfolgen, wenn Sedimente und Sedimentgestein punktuell unter günstigen Bedingungen direkt umgewandelt oder angereichert werden. Es gibt zwei Arten von sedimentären Prozessen:³³⁴ die Ablagerung und die Verwitterung. Diese Ablagerungen entstehen aufgrund des unterschiedlichen physikalischen und chemischen Verhaltens der Mineralien, die das ursprüngliche Gestein bilden, wobei entweder hydraulische (Wasser) oder äolische (Wind) physikalische Prozesse beteiligt sind. In Bezug auf chemische und/oder biochemische Ausfällungen sind Metalle und andere wertvolle Mineralien in Oberflächengewässern löslich. Sie fallen dort aus, wo sie in der Lösung ihre Sättigung erreichen oder wo sich die Zusammensetzung oder die physikalischen Bedingungen im Wasser verschieben. Beispiele für letztere sind Sedimente, die mit Eisen oder Mangan angereichert sind und aus umgestürzten Bäumen stammen. Bakterien können die Auflösung von Gesteinen und Mineralien, die Metalle enthalten, verbessern, den Metalltransport unterstützen, die Porosität und Permeabilität³³⁵ von Gesteinen beeinflussen und die Ausfällung

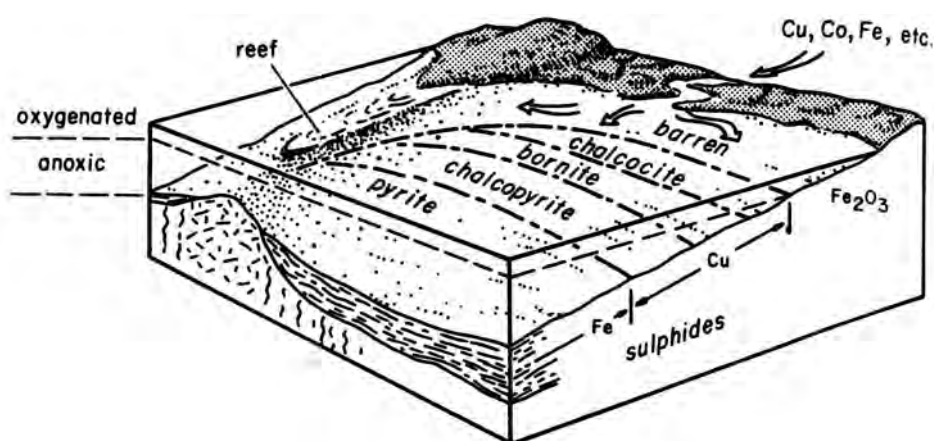


Abb. 72: Elementzonierung innerhalb des kongolesischen Cu-Co Gürtels nach Fleischer, et al. (1976) aus F.J. Sawkins (1990)³³³

von biogenem Schwefel, Sulfiden und Carbonaten verursacht. Insbesondere Eisen-reduzierende Bakterien und Sulfat-reduzierende Bakterien können eine wichtige Rolle bei der Erzentstehung bei niedrigen Temperaturen spielen. Organische Verbindungen, die durch bakteriellen Abbau einer komplexeren organischen Substanz hergestellt werden, könnten den Metallgehalt verbessern.³³⁶

332 [OKRU2014], S.398.

333 aus: Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

334 [REVVU2018], p.64.

335 Durchlässigkeit von Böden und Fels für Flüssigkeiten oder Gase.

336 übersetzt und zusammengefasst aus: [REVVU2018], p.64-65.



Abb. 73: Diese Karte zeigt die Verteilung der Kupferanreicherungen in sediment-hosted und porphyrischen Lagerstätten der Erde (USGS)³³⁷

Verwitterung kann auch zu einer Konzentration witterungsbeständiger Mineralien des Muttergesteins oder relativ unlöslicher Elemente führen, die zu stabilen Mineralien geformt werden.³³⁸ In dieser Hinsicht ist die Verwitterung ein sehr wichtiger Erzbildungsprozess, der zu einer chemischen Veränderung und Umverteilung von Komponenten in Oberflächengesteinen führt. Die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften von Mineralien an der Erdoberfläche und in der Grenzschicht zwischen Oberfläche und Kruste kann es zu Aufwertungen von Rückständen oder Bildung chemischer Lösungen oder zu Ausfällungsmechanismen kommen, um das betroffene Metall bzw. Mineral zu konzentrieren. Unter diesen Bedingungen wird die Erzbildung durch die Zirkulation von weitgehend meteorisch³³⁹ gewonnenem Wasser an der Erdoberfläche angetrieben, obwohl ähnliche Prozesse auch am Meeresboden stattfinden können.³⁴⁰

³³⁷ aus: Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

³³⁸ [MISR2000], pp.539

³³⁹ meteorisches Wasser gelangte durch Niederschlag auf die Erdoberfläche. Es ist das Umsatzwasser und Teil eines Grundwasserkörpers, das jährlich oder innerhalb weniger Jahre in den Umsatz des Wasserkreislaufes einbezogen ist. (Lexikon der Geowissenschaften, www.spektrum.de/lexikon/geo-wissenschaften (10.06.2020)).

³⁴⁰ Credit: USGS, Public domain | <https://www.usgs.gov/media/images/global-copper-map-0> (03.10.2020)

4.7.5.3. Seabed deposits („deep-sea nodule“)

Im gesamten Verlauf der Erdgeschichte sind durch chemische Reaktion zwischen älteren Gesteinen und äußeren Kräften wie der Atmosphäre und den Meeren metallhaltige Schlämme oder Knollen entstanden und abgelagert worden. Diese Prozesse dauern bis heute an: „Am Boden der Tiefsee (ca. 3 bis 5 km tief), vor allem im Pazifik, bilden Metalloxide auf dunklen Schlamm- oder Tonschichten dunkle polymetallische Knollen oder schalige Aggregate. Manganknollen kommen auch auf dem Festland in Sedimenten vor. Manganknollen sind klumpige (knollige) polymetallische Aggregate, die bis zu 27% aus dem Metall Mangan bestehen. Sie sind in Tiefen zwischen 4000 und 6000 Metern auf dem Meeresboden zu finden. Andere Elemente wie Kupfer, Cobalt, Zink und Nickel sind mit 0,2–1 % enthalten, der Eisenanteil liegt bei 15 %.“³⁴²

„Manganknollen sind meist kugelig-nierig bis hin zu kartoffelförmig. Ihr Inneres ist i.d.R. pulverig und weich. Die durchschnittliche Größe beträgt ca. 5 cm Durchmesser (mit Abweichungen). Größere Knollen erreichen Durchmesser bis zu 20 cm. [siehe Abb. 74, Anm.] Auf einem Quadratmeter Meeresboden können bis ca. bis zu 60 kg Manganknollen liegen. Manganknollen bilden



Abb. 74: Manganknollen (Ni 1,3 - 1,4%; Cu 1,1 - 1,2%; Co 0,2 - 0,3%)³⁴¹

keine Kristalle aus. Stattdessen haben sie Schichten, den Häuten einer Zwiebel ähnlich, die einen aus verschiedenen Materialien bestehenden Kern (z.B. ein Sandkorn oder einen Fischzahn) umgeben. Sie bilden sich um kleine feste Kerne als dünne chemische Ausfällungen, die sowohl aus

³⁴¹ aus: Vorlesung Prof. L. Weber, „Angewandte- und Umweltgeologie II“, 2010.

³⁴² Mineralienatlas: <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Manganknollen> (29.08.2020).

dem weichen Sediment wie auch dem Meerwasser gespeist werden. Streng genommen handelt es sich um Ausfällungsprodukte, welche sich konzentrisch um einen Ausgangskern gelagert haben.“³⁴³

Manganknollen entstehen durch einen extrem langsamen Wachstumsprozess (ca. 5 mm pro einer Million Jahre). „Etwa 15 % des Mangans stammen aus den Kalkschalen ehemaliger Kleinstlebewesen, die sich an der Calcit-Kompensationstiefe auflösten. Dieser Anteil wird als hydrogenetischer Anteil bezeichnet. Der Großteil des Mangans entstammt aber dem Sediment.“³⁴⁴

Die weltweiten Erzvorkommen in Manganknollen werden auf ca. 10 Mrd. Tonnen geschätzt. Die reichsten Manganknollen-Lagerstätten befinden sich im südöstlichen Pazifik (Peru-Becken) und im Indischen Ozean. Diese großen Reservemengen können den weltweiten Bedarf an Cu, Mn, Ni und Co bis in das nächste Jahrhundert decken. Die dafür erforderlichen Technologien sind noch in Entwicklung und derzeit nicht wirtschaftlich umsetzbar. Daher wird derzeit kein Kupfer aus diesem Lagerstättentypus abgebaut. Da auch keine belastbaren Selenkonzentrationswerte von Seabed-Lagerstätten bekannt sind, wurde auf eine weitere Analyse dieser Lagerstättenart in dieser Arbeit verzichtet.

343 ebd.

344 ebd.

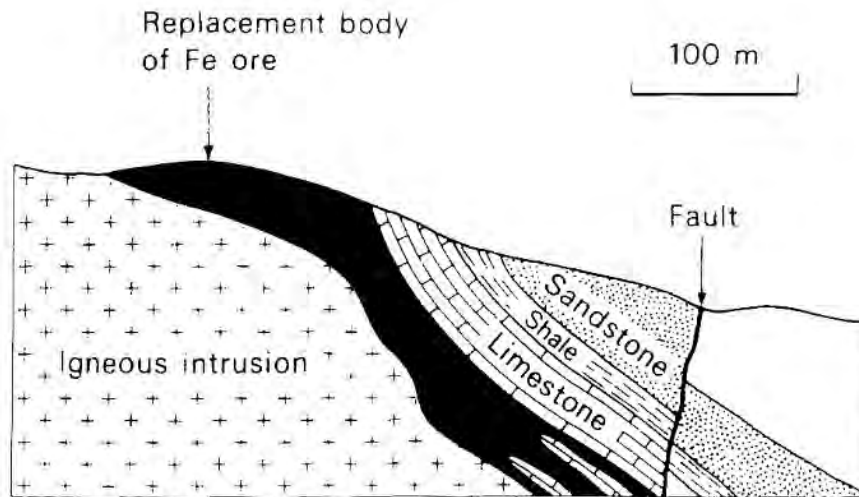


Abb. 75: Skarnlagerstätte bei Iron Springs, Utah (USA).³⁴⁵

4.7.6. Metamorphogene Lagerstätten

4.7.6.1. Skarne (Skarn)

Metamorphogen bedeutet, dass die Metamorphose lagerstättenkonstruktiv wirkte, d.h., dass es ohne Metamorphose zu keiner Lagerstättenbildung gekommen wäre. Im Fall von Skarnen kommt es durch Kontaktmetamorphose zu Reaktionen zwischen dem aufsteigenden Magmenkörper (Batholith) und einem Karbonatkörper. Dadurch entsteht eine Fluidfront (Hydrothermen), die mit dem Karbonat durch Metasomatose reagieren. Somit ist auch die Kontaktmetamorphose konstitutiv für die Lagerstättenbildung; ohne Kontaktmetamorphose wäre die Lagerstätte nicht entstanden.

Metamorph bedeutet lediglich, dass eine Lagerstätte nachträglich durch Druck und Temperatur überprägt wurde. Auch ohne Metamorphose wäre die Lagerstätte bereits vorhanden gewesen. Die meisten europäischen ostalpinen Lagerstätten sind daher metamorph, ohne dass die Metamorphose lagerstättenkonstruktiv gewesen wäre. Vielmehr wird durch Metamorphosen, die auch mit intensiver tektonischer Durchbewegung zusammenfallen, die Lagerstätte eher fragmentiert und zerstört als gebildet.

„Prinzipiell kann jede der angeführten Lagerstättentypen auch in metamorph überprägter Form vorkommen, wobei eine Um- und Neukristallisation des ursprünglichen Mineralbestandes oder sogar eine sekundäre Anreicherung der Metallgehalte stattfinden kann.“³⁴⁶ „Daneben gibt es auch Fälle, bei denen es während der Gesteinsmetamorphose primär, also syngenetisch zur Metallanreicherung kommt. Hierzu gehören in erster Linie die **Skarnerz**-Lagerstätten, die sich im Kontaktbereich zwischen magmatischen Intrusionen und ihrem karbonatischen Nebengestein

³⁴⁵ [EVAN2013], Fig. 2.11, p.32.

³⁴⁶ [OKRU2014], S.66.

bilden. Dabei finden nicht nur eine Temperaturerhöhung und damit eine kontaktmetamorphe Überprägung der Karbonatgesteine statt. Vielmehr werden gleichzeitig, also syngenetisch auch erzbringende Hydrothermen zugeführt, aus denen sich Magnetit, Hämatit, das W-Erz Scheelit³⁴⁷ sowie unter anderem Eisen (Fe) und Kupfer (Cu) ausscheiden, die den ursprünglichen Mineralbestand der Karbonate verdrängen.³⁴⁸

Insbesondere **Skarnerze** entstehen fast immer im Kontaktbereich zwischen magmatischen Intrusionen und karbonatischem Nebengestein (Kalkstein oder Dolomit). „Bei diesem Spezialfall der Kontaktmetasomatose kommt es häufig zu erheblichen metasomatischen Stoffwanderungen, wobei dem Karbonatgestein insbesondere Si, Al, Fe und Mg sowie Neben- und Spurenelemente zugeführt werden.“³⁴⁹ Die dabei entstehenden Korngrößen sind oft erheblich. „Die bei diesem Prozess entstehenden harten und zähen Kalksilikat-Felsen werden nach einem alten schwedischen Bergmannsausdruck als *Skarn* bezeichnet. Aus ihrem Mineralbestand und ihren Flüssigkeits-Einschlüssen lassen sich für die erzbringenden Fluide meist hohe Bildungstemperaturen von 650-500°C sowie hohe Salinitäten von >50 Gew.-% NaCl-Äquivalent ableiten. Erst im Lauf der Zeit werden die Fluide kühler (<400°C) und weniger salzreich (<20 Gew.-% NaCl-Äquivalent).“³⁵⁰

Wie oben erläutert, entstehen viele Erzlagerstätten durch Verdrängung eines bereits vorhandenen Gesteins, insbesondere von karbonatreichen Sedimentgesteinen durch magmatische Intrusion bei meist hohen Temperaturen. „Die damit vorknüpften Lagerstättenbildungen werden deshalb als *kontaktmetamorph* oder *pyrometasomatisch*³⁵¹ bezeichnet, bzw. wird heutzutage meistens der Begriff *Skarn* verwendet.“³⁵² Naturgemäß sind diese Verdrängungslagerstätten sehr unregelmäßig begrenzt (Abb. 75) und die Erzverteilung ist oft sehr volatil und Vererzungen können plötzlich enden. Die wichtigsten Rohstoffe, die aus Skarnen gewonnen werden können, sind Eisen, Kupfer, Wolfram, Zink, Blei, Molybdän, Zinn sowie Uran und Graphit.³⁵³

347 ebd.

348 ebd.

349 [OKRU2014], S.351.

350 ebd.

351 *metasomatisch*, [von griech. meta = um und somatosis = Verkörperung], Bezeichnung für metamorphe Prozesse, bei denen chemische Komponenten zu- oder abgeführt werden (Metasomatose), im Gegensatz zur isochemen *Metamorphose*, bei der die pauschale chemische Zusammensetzung unverändert bleibt. (Lexikon der Geowissenschaften, <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/metatomatisch/10332> (11.06.2020))

Der Begriff *pyrometasomatische Lagerstätten* bezeichnet den Ursprung der Lagerstätten, die bei hohen Temperaturen („*pyro-*“) und unter Zu- und Abfuhr (=Verdrängung) von Material („*-metasomatisch*“) gebildet werden. ([EVAN2013], S.60.). (Somatisch bedeutet ursprünglich „das, was sich auf den Körper bezieht; körperlich“ und wird in der Geologie für das Material (Materialkörper) verwendet.)

352 [EVAN2013], S.18.

353 ebd.

Kupferskarne sind die am weitesten verbreiteten Typen von Skarn-Lagerstätten. Sie treten meist in Verbindung mit porphyrischen Kupferlagerstätten im Bereich aktiver Kontinentalränder auf und bilden sich in geringer Tiefe. Sie bilden dabei, entsprechende karbonatische Ausgangsgesteine vorausgesetzt, ein Halo um den eigentlichen porphyrischen Lagerstättenkörper. Daher haben porphyrische Kupfer-Lagerstätten meist auch Bestände von Skarn-Vererzungen (Abb. 76). Die größte Ansammlung solcher Kupfer-Skarn-Lagerstätten kommt in der Laramid-Porphyr-Kupferprovinz im Südwesten der USA vor. Die Skarnvorkommen sind in der Regel groß (50 bis 500 Millionen Tonnen Kupfererz im Tagebau mit 0,5 bis 5 Millionen Tonnen Cu in Skarn- und Calciumsilikat-Hornfels), was auf die Beteiligung langlebiger hydrothermalen Systeme hinweist.³⁵⁵

Die Skarnbildung in der Kupferlagerstätte im Copper Canyon, Nevada (USA) erfolgte durch Verdrängung von kalkigem Tonschiefer und hinterließ eine Vererzung in einer Länge von

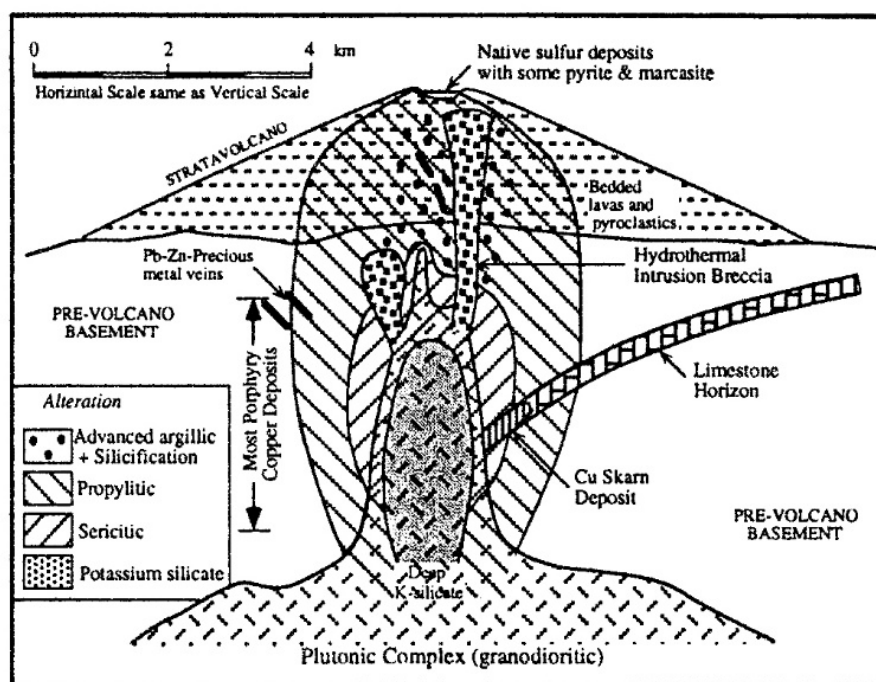


Abb. 76: Vereinfachter Querschnitt einer typischen porphyrischen Kupfer-Lagerstätte mit einer integrierten Skarn-Kupferlagerstätte.³⁵⁴

180 m.³⁵⁶ Häufig gibt es zwischen Skarnen und einer Intrusion einen vollständig abgestuften Kontaktbereich. Dies ist in der Kupferlagerstätte Memé (Nord-Haiti) der Fall, die einen Kupfergehalt von 2,5% aufweist.³⁵⁷

354 [MISR2000], Fig. 9.3, p.423.

355 [MISR2000], p.422.

356 [EVAN2013], S.164.

357 [EVAN2013], S.165.

4.7.7. Diagenetische Lagerstätten („polnischer Kupferschiefer“)

Sediment hosted deposits (**Kupferschiefer**typ)) wurden bereits im Kapitel 4.7.5.2 (Sediment hosted deposits („afrikanischer Typ“) beschrieben. Da zum Kupferschiefer typus keine belastbaren Selenkonzentrationswerte verfügbar sind, wurde dieser Typus den sedimentgebundenen Lagerstättentypus (sedhost) zugeschlagen.

Am bekanntesten sind schieferhaltige Sulfidvorkommen wie der Kupferschiefer, der auf einer Fläche von 20.000 km² von Nordengland bis Polen liegt und in Deutschland und Polen über ein Gebiet von 140 km² abgebaut wurde („*polnischer Kupferschiefer*“).

Die Genese des polnischen Kupferschiefers ist zwar an Sedimentgestein gebunden, jedoch entstand die Anreicherung des Kupfers nicht durch Sedimentation. Vielmehr wird durch zirkulierende Lösungen und bestimmte Fällungsmechanismen die Anreicherung im Sedimentgestein (aber erst nach der Sedimentbildung) erzwungen. Diese Vererzungen müssen nicht zwingend aus Hydrothermallösungen entstanden sein, viel eher aus kühlen salinaren Lösungen. Daher sind diese Lagerstätten auch nicht den hydrothermalen Lagerstättentypen zuzuordnen.

4.7.8. Zusammenfassung

In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die wesentlichen Eigenschaften der Kupferlagerstätten zusammengestellt.

Gene- se- typus	Sub- typus	Lager- stättentyp	Ab- kürzung	Bil- dungs- energie	Wirk- kräfte	Bildungsprozess	Beispiel	Bedeutung an weltwei- ter Cu-Pro- duktion	Kupfer- gehalt	Ausdeh- nung	Se- Ana- lyse
Magmatogene Lagerstätten											
		Orthomagmatische (liquidmagmatische) L.	[Ortho]	Mag- ma- tismus	Temper- atur	Durch Unmischbarkeit Trennung silikatischen und sulfidischen Schmelzen; Anreicherung der Erze durch gravitative Prozesse	Sudbury (Kanada), Noril'sk (Russland)	ca. 5%			ja
Hydrothermale Lagerstätten											
		Porphy- rische L.	[Por]	Plat- tentek- tonik	Druck, Temper- atur	Auswirkungen plattentektonischer Vorgänge - Aufschmelzen in der Subduktionszone; Batholithe bilden aufsteigende Strömungen; "hydraulic fracturing" führt zum Vererzungsprozess mit typischen Zonenaufbau.	El Ten- iente, Chuquica- mata (Chile); Bing- ham/Uta h (USA)	ca. 60%	gering	sehr groß	ja
		IOCG	[IOCG]	Mag- ma- tismus	Temper- atur	Übergangstyp vom porphyri- schen zu stark eisenhaltigen hydro- thermalen Vererzungen, die sich aus hochsalinaren, aber schwefelarmen Lösungen bilden. Die Vererzung ist durch eine großräumige Breccierung (Bre- zie oder Breccia vom ital. breccia: Schotter) von Erz und Nebenge- stein sowie Nebengesteinsaltera- tionen charakterisiert.	Olympic Dam (Australien)	ca. 5%	mittel	groß	ja
		gang- klufför- mige L.	[Vein]	Mag- ma- tismus	Druck, Term- peratur	Anreicherungen von Erzminera- len aus hydrothermalen Lösun- gen in Trennflächensystemen (charakteristisches Merkmal: Zo- nierung)	Butte / Montana (USA)	gering	hoch	gering (Gän-ge)	ja
		Skarne	[Skarn]	Mag- ma- tismus	Temper- atur, Druck	Lagerstättenbildung im Kontak- bereich von Magmatiten und Karbonaten durch hydrothermale Prozesse (Kontaktmetamorpho- se, Kontaktmetasomatose)	Memé (Nord- Haiti)	unbedeu- tend	2,50%	klein	ja
		Karbon- atite	---	Mag- ma- tismus		Bildung von magmatogenen Kar- bonatgesteinskörpern im Bereich tiefgreifender tektonischer Struk- turen	Palabora (RSA)	unbedeu- tend	moder- at	gering	nein
Sedimentogene Lagerstätten											
		VMS (MS)	[VMS]	subma- riner Vulkan- ismus, Black Smoker	Druck, Temper- atur	Am Meeresboden dringen met- tallhaltige Lösungen aus der Tiefe (z.B. Black Smoker). Durch den abrupten Druck- und Tempera- turabfall fallen die gelösten Met- alle entsprechend der unter- schiedlichen Bildungstemperatu- ren der Metallverbindungen aus	Zypern- Typ, Besshi- Typ	ca. 10%	mittel - hoch	klein bis mittel	ja
		SEDEX	[SEDEX]	Black Smoker	Druck, Tempe- ratur	Am Meeresboden dringen met- tallhaltige Lösungen aus der Tiefe (z.B. Black Smoker). Durch den abrupten Druck- und Tempera- turabfall fallen die gelösten Met- alle entsprechend der unter- schiedlichen Bildungstemperatu- ren der Metallverbindungen aus	Rammels- berg (D); Navan (Irland)	moderat	<1%	groß	ja
		Sediment hosted dep.	[sedhost]	Mag- ma- tismus	Ablager- ungen durch Wasser	synsedimentäre Anreicherung von Kupfererzen in sedimentären Gesteinsabfolgen	zen- tralafri- kanischer Kupfer- gürtel	ca. 20%	mittel	sehr groß	ja
		Seabed	---	Mag- ma- tismus	Sedi- men- tierung	Anreicherung von metallhaltigen Schlämmen und Knollen am Meeresboden	Peru- Becken	kein Abbau	mittel - hoch	sehr groß	nein
Metamorphogene Lagerstätten											
		Skarne	[Skarn]	Mag- ma- tismus	Tempe- ratur, Druck	Lagerstättenbildung im Kontak- bereich von Magmatiten und Karbonaten durch hydrothermale Prozesse (Kontaktmetamorpho- se, Kontaktmetasomatose)		unbedeu- tend	moder- at	klein	(ja) s.o.

Tabelle 6: Gegenüberstellung wesentlicher Eigenschaften von Kupferlagerstätten

4.8. Datenbasis für Kupferressourcen nach Lagerstättentypen

4.8.1. Datenbasis der Kupferressourcen und -reserven

Um die Selenmengen in Gewichtseinheiten errechnen zu können, ist es nötig, die Kupferressourcen je Lagerstättentyp zu kennen. L. Weber hat in seinen wissenschaftlichen Analysen die Kupferreserven und -Ressourcen aus aktuellen Geschäftsberichten (meist aus dem Jahr 2019) erhoben, sodass die Daten grundsätzlich dem Jahr 2018 zugeordnet werden können. Weber hat sowohl die Ressourcen aktiver Bergbaubetriebe erfasst als auch jene von Prospektions- und Explorationsprojekten auf Kupfererze, weshalb auch Prognosen möglich sind. Die Daten wurden nach Alter der Lagerstätte und Lagerstättentyp gruppiert. Für die weiteren Analysen in dieser Arbeit sind die folgenden Tabellen die Ausgangsbasis für die Kupferressourcen und insbesondere die kumulierte Zusammenstellung der Zahlen in Tabelle 10. Die Werte geben die Kupferreserven und Ressourcen je Lagerstättentyp an und sind (wenn nicht anders angegeben) in (metrischen) Tonnen (t) ausgewiesen.

Die Reserven und Ressourcen wurden nach den Angaben in den Geschäftsberichten bzw. publizierten Unterlagen von Weber gemäß der Definition von USGS übernommen. Reserven beinhalten daher die Kategorien „probable“ und „proven“. Die Ressourcen bestehen aus den Zuordnungen „measured“ und „identified“. Ressourcen die Kategorie „inferred“ sind explizit nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurden bei den eigenen Erhebungen nur solche Ressourcenangaben berücksichtigt, die zumindest JORC-kompatibel sind. Dies hat zur Konsequenz, dass die ausgewiesenen Kupfer-Ressourcen niedriger als die Angaben von USGS oder ICSG sind. Die Ressourcenwerte beinhalten gemäß der USGS-Definition bereits die Reserven; daher ist eine Addition von Reserven und Ressourcen unzulässig.

Die Spalten „ Σ Reserves“ und „ Σ Ressourcen“ geben in Tonnen die Menge an Erz gemäß den Code-Kategorien an. Es handelt sich somit um das Hauwerk, aus dem das Kupfer im Aufbereitungsprozess separiert werden muss. Die Kupferanteile („copper rate“) je Lagerstättenart geben die Spalten „ \emptyset Cu%Reserves“ und „ \emptyset Cu%Resources“ in Prozent (%) an. Der durchschnittliche Kupfergehalt wurde als **gewichteter Mittelwertwert je Lagerstätte** ermittelt, getrennt nach Ressourcen und Reserven. Die Multiplikation der Hauwerksreserven und -ressourcen mit dem angegebenen durchschnittlichen Kupfergehalt in Tabelle 10 führt daher zu den Kupfer-Reserven und Kupferressourcen des jeweiligen Lagerstättentypus.

Aus der Erzmeng und dem Kupfergehalt der jeweiligen Lagerstätte kann durch Multiplikation die Kupfermengen dieser Lagerstätte berechnet werden. Die Aussummierung der Kupfermengen gegliedert nach Lagerstättentypus sind in den Spalten „ Σ Cu_Reserves“ und „ Σ Cu_Ressourcen“ in

Tonnen (t) angeführt. Die Berechnung erfolge je erfasster Kupferlagerstätte, d.h. je Datensatz bereits in der Datenbank. Da der Kupfergehalt als gewichteter Mittwertwert errechnet wurde, sind die Werte für das Hauwerk, der Kupfergehalt und die Kupfermenge durch Multiplikation verknüpft.

In der fünften und letzten Spalte ist der Anteil des Lagerstättentyps an den totalen Kupferressourcen und –reserven ausgeworfen. Es entspricht den Erfahrungen und auch den bereits oben dargelegten Erkenntnissen, dass **porphyrische Lagerstätten** mit gut zwei Drittel der Gesamtvorkommen die Hauptquelle für die Kupfererzeugung bilden. Mit deutlichem Abstand folgen die „**Sediment hosted deposits**“ und **Skarn-Lagerstätten**. Gemeinsam decken diese drei Kupfer-Vorratskategorien fast neunzig Prozent des gesamten Kupfervorkommens ab.

Bei den Sediment hosted deposits ist zwischen dem für Europa sehr bedeutenden **polnischen Kupferschiefertyp** und übrigen sedhost Vorkommen, oft als „afrikanischer Typ“ bezeichnet, zu unterscheiden. Von den in Tabelle 7 ausgewiesenen 48 Mio. Tonnen Kupfer-Reserven der aktiven Lagerstätten, entfallen auf den polnischen Kupferschiefer knapp 20% oder 9,6 Mio. Tonnen. Auf Basis der Kupfer-Ressourcen ist der europäische Anteil mit 16,4% etwas geringer und beträgt circa 19 Mio. Tonnen von den in Summe 116 Mio. Tonnen dieses Lagerstättentypus.

Rechnet man die Reserven der **IOCG** und **orthomagmatische (liquidmagmatische) Lagerstätten** zu den oben angeführten drei Kupferlagerstättentypen hinzu, sind bereits über 97% des Kupfervorkommens erfasst. Es kann daher für die Beurteilung der wirtschaftlichen Bedeutung angenommen werden, dass die restlichen Lagerstättentypologien keine entscheidende Rolle spielen. Insbesondere die Lagerstättentypen MS (MSx), Karbonatite und Seabed tragen nur sehr unwesentlich zu den Kupferressourcen bei. Da eine direkte Korrelation zwischen Kupfer und Nebenmetalle vorliegt, ist diese Erkenntnis auch auf die weitere Analyse der Selen-Ressourcen und -Reserven anwendbar.

Für eine gesicherte Datenlage, die auch Perspektiven für die zukünftige Kupferförderung zulässt, sind eben den aktiven Bergbauen auch noch zu erschließende Projekte relevant. Die Datenerfassung der Kupfervorkommen erfolgte mit der Zuordnung des aktuellen Status´ des Bergbaus. Dieser kann sich im wirtschaftlichen Betrieb, also „activ“ befinden oder bereits geschlossen („closed“) sein. Wird das Vorkommen als Bergbaubetrieb erschlossen, so wird es als Projekt („proj“) gekennzeichnet. Vorübergehend geschlossene Betriebe wurden mit den Attributen „care“ oder „maintainance“ versehen. In wenigen Einzelfällen war der Betriebszustand nicht verlässlich zu ermitteln und auch diese Vorkommen wurden speziell gekennzeichnet. Die folgenden Auswertungen erfolgen daher auf dokumentierten Projekt- bzw. Betriebsangaben.

Für die als aktiv gekennzeichneten Bergbaubetriebe ergeben sich die nachstehend in der Tabelle zusammen gestellten Vorratsdaten.

Tabelle 7: Weltweite Reserven und Ressourcen von im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfergehalt / Σ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits active	Σ Reserves	\emptyset Cu%Rsv.	Σ Cu_Reserves	Cu_Rev.%	Σ Ressourcen	\emptyset Cu%Res.	Σ Cu_Resources	Cu_Res.
Porphyries	69.309.759.000	0,495	343.345.000	72,23	147.484.121.000	0,462	680.997.000	71,20
Sediment hosted	5.741.007.000	0,842	48.348.000	10,17	10.180.818.000	1,140	116.085.000	12,14
<i>Europ./Polish type</i>	<i>710.677.000</i>		<i>5.985.000</i>	<i>1,26</i>	<i>1.260.280.000</i>		<i>14.370.000</i>	<i>1,50</i>
<i>Afric.type/other</i>	<i>5.030.330.000</i>		<i>42.363.000</i>	<i>8,91</i>	<i>8.920.538.000</i>		<i>101.715.000</i>	<i>10,64</i>
Skarns	4.356.947.000	0,787	34.281.000	7,21	7.179.940.000	0,659	47.299.000	4,95
IOCG	3.139.068.000	0,747	23.434.000	4,93	11.501.609.000	0,533	61.355.000	6,41
Orthomagmatic	1.576.736.000	0,961	15.151.000	3,19	3.572.443.000	0,806	28.791.000	3,01
VMS	576.538.000	0,876	5.048.000	1,06	961.548.000	0,860	8.266.000	0,86
Veins	443.924.000	0,696	3.091.000	0,65	1.583.697.000	0,564	8.930.000	0,93
Disseminated	114.153.000	0,709	810.000	0,17	213.053.000	0,574	1.224.000	0,13
Massive sulphides	53.523.000	1,549	829.000	0,17	127.630.000	1,333	1.702.000	0,18
Carbonatites	0	—	0	0,00	35.460.000	0,540	191.000	0,02
Seabed	0	—	0	0,00	0	—	0	0,00
UNKNOWN	171.065.000	0,579	990.000	0,21	245.122.000	0,658	1.612.000	0,17
Total	85.482.720.000	0,556	475.327.000	100,00	183.085.441.000	0,522	956.452.000	100,00

Die Relation von Kupfer-Ressourcen zu Kupfer-Reserven ist für porphyrische Lagerstätten circa 2:1 und bei den sedimentären circa 2,4:1. Unter allen aktiven Kupfergruben ist das Verhältnis fast exakt 2:1 (Tabelle 7). Zieht man die oben genannten, global verfügbaren Zahlen heran (vgl. u.a. Kap. 4.4, S.107), errechnet sich das Verhältnis von Kupfer-Ressourcen zu Kupfer-Reserven zu 2,4:1.³⁵⁸ Da die Prospektion von Kupfer immer wirtschaftlichen Gesetzmäßigkeiten folgt und immer ein gewisses Maß an Vorräten „vorhergeschoben“ wird, kann von einer Fortschreibung einer Relation von 2,0 bis 2,4 zu 1 zwischen Kupfer-Ressourcen (identified) und Kupferreserven ausgegangen werden. Im Mittel kann das Verhältnis mit 2,2:1 angenommen werden. Dieses Verhältnis von Kupfer-Ressourcen zu Kupfer-Reserven wird später für die Abschätzung der Selen-Ressourcen nützlich sein.

³⁵⁸ Berechnet nach den Werten, die von USGS publiziert wurden (vgl. Kap. 0, S.109). Die Kupfer-Ressourcen werden von USGS mit \approx 2.100 Mto (identified resources) angegeben und die Kupfer-Reserven mit \approx 870 Mto. L. Weber weist 2.529 Mto an Ressourcen aus; diese Zahl beinhaltet auch die inferred Ressourcen. Nach L. Weber betragen die Kupfer-Reserven 570 Mto. Zur Abschätzung des Verhältnis Ressourcen zu Reserven werden die USGS Zahlen herangezogen, da diese den im Regelfall veröffentlichten Daten der Bergbaubetriebe näherkommen. Als „inferred“ klassifizierte Ressourcen werden für Investitionen als (noch) zu unsicher erkundet gesehen.

Die in der folgenden Tabelle angeführten Werte basieren auf bekannten und erfassten Projekten, die zur Kupferproduktion in Zukunft beitragen könn(t)en.

Tabelle 8: Weltweite Reserven und Ressourcen von in Planung befindlichen Kupferlagerstätten (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk | \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfergehalt | Σ Cu: Kupfermenge | Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits Projects	Σ Reserves	\emptyset Cu%Reserves	Σ Cu_Reserves	Cu_Reserves%	Σ Resources	\emptyset Cu%Resources	Σ Cu_Resources	Cu_Resoures%
Porphyries	14.162.165.000	0,388	54.890.000	65,15	62.782.508.000	0,399	250.455.000	60,35
Sediment hosted	952.897.000	1,544	14.717.000	17,47	5.834.037.000	1,657	96.695.000	23,30
Skarns	619.900.000	1,119	6.938.000	8,23	1.747.884.000	0,719	12.568.000	3,03
IOCG	939.617.000	0,556	5.221.000	6,20	2.940.710.000	0,719	21.134.000	5,09
Orthomagmatic	395.374.000	0,276	1.091.000	1,29	2.219.804.000	0,460	10.201.000	2,46
VMS	157.686.000	0,812	1.280.000	1,52	2.017.789.000	0,441	8.901.000	2,14
Veins	21.485.000	0,515	111.000	0,13	297.810.000	0,391	1.165.000	0,28
Disseminated	0	---	0	0,00	183.284.000	0,101	186.000	0,04
Massive sulphides	3.300.000	0,200	7.000	0,01	592.086.000	0,280	1.660.000	0,40
Carbonatites	0	---	0	---	0	---	0	---
Seabed	0	---	0	0,00	910.030.000	1,307	11.891.000	2,87
UNKNOWN	0	---	0	0,00	58.344.000	0,313	182.000	0,04
Total	17.252.424.000	0,488	84.255.000	100,00	79.584.286.000	0,522	415.038.000	100,00

Interessant ist, dass die Gegenüberstellung der Kupferressourcen von den in Betrieb befindlichen Bergbaubetrieben zu den Lagerstättenprojekten das Verhältnis 2:1 zeigen. Es kann daher aus geologischer Sicht davon ausgegangen werden, dass der Rohstoff Kupfer noch für Generationen verfügbar ist.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass nicht jedes Projekt tatsächlich zu einem wirtschaftlichen Bergbau umgesetzt werden kann. Rio Tinto hat in einer Studie festgestellt, dass lediglich ein Projekt von 100 erfolgreich umgesetzt werden kann. Leopold Weber berichtet von eigenen Studien, dass nur jedes 60. Projekt zum Erfolg führt. Konkret sind zwischen 2007 und 2019 nur fünf neue Kupferbergbauprojekte in den wirtschaftlichen Explorationsbetrieb übergegangen. Im selben Zeitraum wurden 211 NI 43 101 Reports) für Kupferprojekte im frühen Entwicklungszustand („early stage“) und 179 im „advanced stage“ veröffentlicht. Nur etwas mehr als jeder Zehnte Bericht, das waren genau 50 der in Summe 440 NI 43 101 Reports für Kupferbergbaue in diesem Zeitraum, haben sich mit in Betrieb befindlichen Betrieben beschäftigt (vgl. auch Abb. 83 im folgenden Kapitel). Für die Abschätzung der künftigen Verfügbarkeit von Selen müssen daher in erster Linie die aktiven Kupferbergbaue herangezogen werden.

Sehr konkret hingegen ist die Inbetriebnahme eines großen Kupferbergbaubetriebes im Jahr 2021 mit angeschlossener Aufbereitung in der Demokratischen Republik Kongo (DRC). Wie oben ausgeführt, verfügen die Kupfergürtel der Demokratischen Republik Kongo und Sambias zusammen über die zweitgrößten globalen Kupferreserven und entsprechen in etwa ein Drittel der chilenischen Reserven. Das Besondere dieser Lagerstätten ist die hohe Anreicherung, die teilweise Werte über 5% Kupferinhalt erreicht. Die Kamoa-Lagerstätte mit einer Ausdehnung über 400 km² wurde 2008 entdeckt und ist eine von zwei sehr großen oberflächennahen, flachliegen-



Abb. 77: Ongoing construction of Kakula's copper processing plant. (Image courtesy of Ivanhoe Mines.)³⁶⁰

den, stratiformen (schichtförmigen) Kupferlagerstätten, die in einer 400 km² großen Bergbaulizenz entdeckt wurden. Die andere große Lagerstätte ist Kakula, die schneller als geplant zu kommerziellen Produktion gebracht wird.³⁵⁹

Die kanadische Unternehmung „Ivanhoe Mines“ entwickelt die letzten Schritte im Kamoakakula-Gebiet. Die Ressourcen in Kakula werden mit knapp über 600 Millionen Tonnen und in Kamoakakula mit knapp über 700 Millionen Tonnen in den Geschäftsberichten angegeben. Der Kupfergehalt bei den erkundeten Reserven liegt demnach bei beachtlichen 5,48%. Nach Unternehmensangaben sollen in den ersten fünf Betriebsjahren zunächst 3,8 Millionen Tonnen Erz pro Jahr mit dieser Qualität gefördert werden.³⁶¹ In Summe werden die Erzressourcen auf 1,4 Milliarden Tonnen geschätzt, mit durchschnittlich 2,7% Kupfergehalt und einem Cut-off bei 1%.³⁶² Mit diesen Erzmengen und dem gegebenen Baufortschritt scheinen die Ambitionen des Unternehmens, diesen Lagerstättenkomplex zum weltweit zweitgrößten Kupferbergbau auszubauen, nicht unrealistisch. Die Entwicklung des Kamoakakula Kupferbergbaus wird von Ivanhoe Mines (39,6%) in strategischer Partnerschaft mit dem chinesischen Bergbaukonzern Zijin Mining Group (39,6%), Crystal River Global Limited (0,8%) und der Regierung der DRC (20%) finanziert. Im Januar 2020 eröffnete China Nonferrous Metal Mining (CNMC) die erste große Kupferschmelze in der DRC. Der Smelter Lualaba ist nur 45 km vom Kupfer-Joint Venture Kamoakakula im südlichen Kupfergürtel des Landes entfernt. China hat hohes strategisches Interesse an Nichteisenmetallen und ist daher stark finanziell am afrikanischen Kontinent engagiert. Der zunehmende

³⁵⁹ <https://www.mining.com/ivanhoe-expects-first-copper-at-kakula-in-less-than-a-year/> (25.10.2020)

³⁶⁰ <https://www.mining.com/ivanhoe-expects-first-copper-at-kakula-in-less-than-a-year/> (25.10.2020)

³⁶¹ Mining.com am 2.9.2020: „Ivanhoe expects first copper at Kakula in less than a year“ |

<https://www.mining.com/ivanhoe-expects-first-copper-at-kakula-in-less-than-a-year/> (25.10.2020).

³⁶² <https://www.ivanhoemines.com/news/2020/ivanhoe-mines-issues-2019-full-year-results-and-review-of-mine-construction-progress-and-exploration-activities/> (25.10.2020)

Rückzug aus kalorischen Energieträgern durch die Pariser Klimaziele, wurde mit der Covid-19 Pandemie weiter beschleunigt. Das Rückgrat einer nachhaltigen Energieversorgung ist elektrische Energie, die von Solarkraftwerken und Windkraft erzeugt wird. Zeitgleich wird im Mobilitätssektor zunehmend auf Elektrofahrzeuge umgerüstet. Dieser Trend hat einen enormen, kurz- und mittelfristigen Mehrbedarf vor allem an Kupfer zur Folge. Wie oben bereits gezeigt wurde, ist Kupfer keineswegs geologisch knapp, jedoch können die verfügbaren Förder- und Aufbereitungskapazitäten kurzfristig einen Versorgungsengpass auslösen. Es zeigt sich, dass China sehr strategisch und mit Voraussicht seine Energie und Rohstoffpolitik betreibt. Mit der Ausdehnung der Kupferproduktion werden auch die Nebenelemente, darunter Selen ebenfalls gefördert und somit grundsätzlich (d.h. wenn dieses Nebenmetall auch aufbereitet wird) verfügbar.

In Wartung und daher derzeit nicht produzierend befinden sich die nachfolgend in Tabelle 9 angeführten (wenigen) Betriebsstätten.

Tabelle 9: Weltweite Reserven und Ressourcen von sich in Wartung befindlichen Kupferlagerstätten (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfergehalt / Σ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits care	Σ Reserves	\emptyset Cu%Reserves	Σ Cu_Reserves	Cu_Reserves%	Σ Ressourcen	\emptyset Cu%Resources	Σ Cu_Resources	Cu_Resoures%
Porphyries	448.113.000	0,131	589.000	5,94	4.277.296.000	0,266	11.393.000	39,00
Sediment hosted	465.439.000	1,918	8.928.000	89,98	647.852.000	2,569	16.646.000	56,98
Skarns	10.042.000	0,040	4.000	0,04	10.042.000	0,040	4.000	0,01
Orthomagmatic	5.400.000	0,500	27.000	0,27	131.200.000	0,269	353.000	1,21
VMS	17.812.000	1,884	336.000	3,39	21.012.000	1,795	377.000	1,29
Disseminated	2.500.000	1,522	38.000	0,38	35.200.000	1,251	440.000	1,51
Total	949.306.000	1,045	9.922.000	100,00	5.122.602.000	0,570	29.213.000	100,00

In folgender Tabelle 10 sind die kumulierten Werte aus den aktiven Abbaubetrieben, den Lagerstättenprojekten und den entwickelten, aber derzeit nicht produzierenden Bergbauen zusammengestellt.

Tabelle 10: Weltweite Reserven und Ressourcen (kumuliert) von Kupferlagerstätten (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfergehalt / Σ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t)) Kupfer-Ressourcen und -Reserven nach Lagerstättentypus

Cu Deposits	Σ Reserves	\emptyset Cu%Reserves	Σ Cu_Reserves	Cu_Rsv. [%]	Σ Ressourcen	\emptyset Cu%Resour.s	Σ Cu_Resources	Cu_Res. [%]
Porphyries	83.920.037.000	0,475	398.824.000	70,03	214.543.926.000	0,439	942.845.000	67,31
Sediment hosted	7.159.343.000	1,006	71.994.000	12,64	16.662.707.000	1,377	229.426.000	16,38
<i>Europ./Polish type</i>	886.252.000		8.912.000	1,57	2.062.670.000		28.400.000	2,03
<i>Afric.type/other</i>	6.273.091.000		63.082.000	11,07	14.600.037.000		201.026.000	14,35
Skarns	4.986.889.000	0,827	41.223.000	7,24	8.937.866.000	0,670	59.871.000	4,27
IOCG	4.078.686.000	0,703	28.655.000	5,03	14.442.318.000	0,571	82.488.000	5,89
Orthomagmatic	1.977.510.000	0,823	16.269.000	2,86	5.923.447.000	0,664	39.346.000	2,81
VMS	752.036.000	0,886	6.664.000	1,17	3.000.349.000	0,585	17.544.000	1,25
Veins	465.409.000	0,688	3.201.000	0,56	1.881.507.000	0,537	10.095.000	0,72
Disseminated	116.653.000	0,727	848.000	0,15	431.537.000	0,429	1.850.000	0,13
Massive sulphide	56.823.000	1,470	836.000	0,15	719.716.000	0,467	3.362.000	0,24
Carbonatites	0	---	0	0,00	35.460.000	0,540	191.000	0,01
Seabed	0	---	0	0,00	910.030.000	1,307	11.891.000	0,85
UNKNOWN	171.065.000	0,579	990.000	0,17	303.466.000	0,591	1.795.000	0,13
Total	103.684.451.00	0,549	569.504.000	100,0	267.792.329.000	0,523	1.400.704.000	100,0

Von besonderer Relevanz für die weiteren Analysen dieser Arbeit sind die Kupferressourcen (Spalte: Σ Ressourcen). Aus produzierenden Betrieben ist der Anteil 183 Mrd. Tonnen, aus Projekten können 80 Mrd. t erwartet werden und ein Anteil von 5 Mrd. t ist derzeit nicht in Betrieb. Es kann daher von Ressourcen in der Größenordnung von circa 270 Mrd. Tonnen (genaue Summe: 268) ausgegangen werden.

Die aus der Datenbank der einzelnen Kupferbergbaue ableitbare Kupfermenge ergibt sich zu 1.400 Millionen Tonnen (Spalte: Σ Cu_Ressourcen). Wie weiter oben ausgeführt, schätzt ICSG die Kupferressourcen mit circa 2.100 Millionen Tonnen ab (siehe Kap. 4.4, S. 107 sowie Abb. 41). ICSG geht somit von einer fünfzigprozentigen größeren Ressourcenbasis aus. Offenbar bezieht sich diese Angabe nicht nur auf bekannte Bergbaubetriebe und Lagerstätten, sondern beinhaltet auch eine geologische Hochrechnung. Es ist aber nicht davon auszugehen, dass sich an der Verteilung des Ressourcenaufkommens nach Lagerstättentypen Verwerfungen ergeben oder solche anzunehmen wären.³⁶³

Aus der Datenbasis von L. Weber, die den Berechnungen zugrunde liegt, wurden die Ressourcen (measured, indicated und inferred) von 2.529 Mio. t - gemessen am Kupferinhalt - berechnet. USGS weist den vergleichbaren Wert mit 2.100 Mio. t aus (vgl. Abb. 41, S. 107). Die als proven und probable klassifizierten Reserven können aus der Datenbank mit 570 Mio. t errechnet werden. Der vergleichbare USGS Wert wurde mit 790 Mio. t publiziert. Eine sehr gute Übereinstimmung findet sich bei der Bergbauproduktion. USGS ermittelte die Mine Production mit 20 Mio. t; in den „World Mining Data“ (2020) wird die Kupferproduktion mit 20.474.372 t ausgewiesen.

³⁶³ Wie oben ausgeführt, wird für die Verhältnisabschätzung auf die USGS Daten zurückgegriffen, siehe auch Fußnote in Kap. 4.8.1, S.160f.

Folgende Tabelle 11 illustriert die Verteilung der verfügbaren Kupfervorräte in Prozent aus den in den jeweiligen geologischen Epochen gebildeten Lagerstätten (Die Auswertung wurde aus den aktiven, d.h. in Betrieb befindlichen Bergbaubetrieben gebildet).

Tabelle 11: Weltweite Reserven und Ressourcen von im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten aufgeschlüsselt nach Bildungsepochen (Δ Reserves und Δ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfergehalt / Δ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t) / (*) genauere zeitliche Zuordnung nicht möglich)

Cu Deposits	geolog. System	younger than [mio yrs]	Re-serves%	\emptyset Cu%Rsv	Cu%Rs v	Ressources %	\emptyset Cu%Res	Cu%Res
CenN	Neogen	5	11,368	0,681	13,915	10,705	0,604	12,368
CenP	Paläogen	35	67,469	0,504	61,163	59,926	0,471	54,030
MesC	Kreide	100	2,696	0,412	1,998	8,808	0,383	6,458
MesJ	Jura	150	0,756	0,363	0,494	0,796	0,295	0,450
MesX	Mesozoikum*	200	0,353	0,360	0,228	0,565	0,350	0,378
MesT	Trias	235	1,168	0,281	0,590	1,808	0,451	1,562
PalP	Perm	260	1,766	1,444	4,583	1,775	1,311	4,453
PalCarb	Karbon	320	1,941	0,391	1,363	1,349	0,356	0,919
PalD	Devon	380	1,137	0,445	0,909	0,948	0,569	1,032
PalO	Ordovizium	450	0,820	0,454	0,670	0,907	0,463	0,803
PalX	Paläozoikum*	450	0,000	---	0,000	0,161	0,322	0,099
PalCam	Kambrium	500	0,010	0,530	0,010	0,022	2,082	0,087
NProt	Neoproterozoikum	1000	3,526	1,025	6,498	3,160	1,459	8,827
MProt	Mesoproterozoikum	1600	0,192	1,386	0,480	0,258	1,095	0,542
PProt	Paläoproterozoikum	2500	4,670	0,551	4,629	7,294	0,446	6,223
Arch	Archaikum	4000	1,913	0,650	2,236	1,329	0,592	1,506
nn	Keine Zuordnung	n/a	0,215	0,600	0,232	0,189	0,730	0,264
Total			100,0	0,585	100,0	100,0	0,709	100,0

In der Folge verwendeten Abkürzungen stehen „Res“ stehen für Ressourcen (Resources) und „Rsv“ für Reserven (Reserves). Die Erläuterung der geologischen Zeitskala mit Bezug auf Kupferlagerstätten werden im Abschnitt 6.15.3 (S.245) gegeben.

4.8.2. Diskussion der Datenbasis der Kupferressourcen und -reserven

Wie im vorherigen Kapitel 4.8.1 ausgeführt, hat L. Weber hat in seinen wissenschaftlichen Analysen die Kupfer-Reserven und -Ressourcen aus aktuellen Geschäftsberichten über längere Zeit bis zum Jahr 2019 erhoben. Die Bergbaustätten wurden nach verschiedenen Kriterien gegliedert. Somit ist es möglich, die Ressourcen- und Reserven-Angaben des Hauwerks, des Kupfergehaltes und der daraus resultierenden Kupfermenge zu analysieren. Des Weiteren wurde das Kalenderjahr der Ermittlung (bzw. Publikation) sowie das Alter und der Typus der Lagerstätte erfasst. Schließlich ist die Zuordnung zum Nationalstaat (Land), Kontinent (bzw. Region) und des aktuellen Betriebsstatus (produzierend, geplant, vorübergehend stillgelegt) vorgenommen worden. Sowohl die langjährige Erfassung als auch die Beobachtung der Lagerstättenprojekte erlauben eine Prognose über die verfügbaren Kupfererz-Reserven und -Ressourcen.

Die Datenbasis ist sehr exakt und gemäß den Definitionen von JORC erhoben worden. Es wurden nur Daten berücksichtigt, die zumindest dem JORC-Standard entsprechen. Die Mengenangaben sind (wenn nicht anders angegeben) in metrischen Tonnen (t) ausgewiesen. Es wurden die Ressourcen der unsicheren Kategorie „inferred“ getrennt erhoben, sodass diese für spezielle Auswertungen mitberücksichtigt werden können. In den folgenden Berechnungen wurden aber nur die wirtschaftlich bewerteten Ressourcen der Kategorien „measured“ und „identified“ herangezogen. Die angeführten Ressourcen beinhalten nach geläufiger Definition bereits die Mengen an Reserven, sodass beide Angaben „nebeneinander“ stehen und nicht addiert werden dürfen.

Nachstehende Abb. 78 zeigt eine Gegenüberstellung des durchschnittlichen Kupfergehaltes je Lagerstättentypus. Die naheliegende Vermutung, dass der Kupfergehalt abnimmt, wird für die heute wirtschaftlich bedeutenden Lagerstättentypologien dem Grunde nach bestätigt. Bei näherer Betrachtung fällt jedoch auf, dass die in Betrieb befindlichen porphyrischen Rohstoffläger konstanten Kupfergehalt aufweisen. Für zukünftige Projekte zeigt sich eine Reduktion um circa 13%. Bei den „Sediment hosted deposits“ wird sogar mit steigendem Kupfergehalt zukünftiger Betriebe gerechnet. Jedoch muss für diese Daten berücksichtigt werden, dass nur eine Teilmenge der projektierten Bergbauprojekte in den wirtschaftlichen Betrieb übernommen wird und daher dieser Wert nicht zu optimistisch interpretiert werden darf. Der zu erwartende Trend zeigt sich am besten beim VMS- bzw. MS-Typus mit einem Rückgang des durchschnittlichen Kupfergehaltes um gut die Hälfte. Offenbar sind reichhaltigere IOCG-Lagerstätten exploriert worden, die zwar nicht an den Kupfergehalt früherer Minen anschließen können, jedoch scheinen die Projekte um gut ein Drittel mehr Kupfergehalt aufzuweisen als durchschnittlich aktuell in Betrieb befindliche.

Type of deposit	2013 (WEBER 2015)	2018 Weighted average	
		active operations	projects
Porphyries	0,46 %	0,46 %	0,40 %
Skarns	0,78 %	0,72 %	0,72 %
Orthomagmatic	0,85 %	0,81 %	0,46 %
disseminated	0,76 %	0,57 %	0,10 %
Sediment-hosted (African type)	1,62 %	1,08 %	1,66 %
Sediment- hosted (European type)		1,59 %	1,66 %
IOCG	0,94 %	0,53 %	0,72 %
Carbonatites	0,54 %	0,54 %	--
(V)MS	0,90 %	0,86 %	0,44 %
MS	1,00 %	1,35 %	0,28 %
Veins	0,47 %	0,56 %	0,39 %
Seabed	--	--	1,31 %

Abb. 78: Development of Cu grades by type of deposits (cut-off date 18.09.20)³⁶⁴

Type of deposit	2018 active operations	Type of deposit	2018 projects
Porphyries	1 378 Mio t	Porphyries	581 Mio t
IOCG	575 Mio t	Seabed	455 Mio t
Sed. hosted (Europen Kupferschiefer)	398 Mio t	Skarns	194 Mio t
Sed. hosted (Zambian Type)	256 Mio t	IOCG	163 Mio t
Skarns	218 Mio t	Orthomagmatic	148 Mio t
Orthomagmatic	188 Mio t	Sed. Hosted (European Kupferschiefer)	138 Mio t
Veins	75 Mio t	Sed. Hosted (Zambian type)	129 Mio t
disseminated	53 Mio t	MS	74 Mio t
Carbonatites	35 Mio t	disseminated	61 Mio t
VMS	29 Mio t	VMS	44 Mio t
MS	9 Mio t	Veins	16 Mio t
Seabed	--	Carbonatites	--

Decreasing importance ↓

Abb. 79: Average size (Resources) by type of deposits (ROM) (cut-off date 18.09.20)³⁶⁵

Für die Beurteilung der wirtschaftlichen Betriebsführung ist die Größe einer Lagerstätte ein neben dem Kupfergehalt in wesentliches Kriterium. Es liegt bereits in der Genese der porphyrischen Lagerstätten begründet, dass dieser Typus eine räumlich besonders große Ausdehnung hat. Porphyrische Kupferminen gehören zu den größten der Welt. In Abb. 79 zeigt übersichtlich, dass ein Betrieb dieser Lagerstättenart im Schnitt drei- bis viermal so groß ist, wie solche der Typen

364 Quelle: [WEBER2020]. Die Werte für 2013 entstammen [WEBER2015]: Leopold Weber, Interpretation von Reserven und Ressourcenangaben aus wirtschaftsgeologischer Sicht, ISSN 0005-8912, Volume 160, Number 2, 160:71-78, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte Austria, 2015.

365 Quelle: [WEBER2020].

IOCG und „Sediment hosted deposits“. Im Regelfall ist der Kupfergehalt einer porphyrischen Lagerstätte jedoch wesentlich geringer (circa die Hälfte oder noch weniger) als bei Skarn- oder sedimentären Lagerstätten (vgl. Abb. 78). Daher ergibt die Betrachtung des reinen Kupferinhaltes (also nicht des kupferführenden Hauwerks) wie die Reihenfolge der Lagerstättentypologien in Abb. 80 verdeutlicht. Aus dieser Darstellung wird die wirtschaftliche Bedeutung des europäischen Kupferschiefers deutlich herausgestellt. Das polnische Kupferbergbauunternehmen KGHM hält trotz der riesigen Vorräte in Lateinamerika die sechste Position am Weltmarkt, gefolgt von Rio Tinto. Porphyrische Lagerstätten reihen sich bei diesem Kennwert in die Reihe mit IOCG und sedimentären Lagerstättentypen ein.

Auch wenn heute noch keine wirtschaftliche Nutzung von Seabed-Lagerstätten bekannt ist, haben sie ein großes Potenzial. Mit einer durchschnittlichen Größe von 455 Mio. t und einem Kupfergehalt von fast 6 Mio. t belegt dieser Lagerstättentypus einen führenden Platz der sich in Erschließung befindlichen Kupferlagerstätten.

Type of deposit	2018 active operations	Type of deposit	2018 projects
Sed. hosted (European Kupferschiefer)	6,348 Mio t	Seabed	5,945 Mio t
Porphyries	3,255 Mio t	Sed. hosted (European Kupferschiefer)	2,600 Mio t
IOCG	3,224 Mio t	Porphyries	2,319 Mio t
Sed. hosted (Zambian type)	2,854 Mio t	Sed. hosted (Zambian type)	2,138 Mio t
Skarns	1,576 Mio t	Skarns	1,396 Mio t
Orthomagmatic	1,515 Mio t	IOCG	1,117 Mio t
veins	0,425 Mio t	Orthomagmatic	0,680 Mio t
disseminated	0,305 Mio t	Veins	0,613 Mio t
VMS	0,250 Mio t	MS	0,207 Mio t
Carbonatites	0,191 Mio t	VMS	0,196 Mio t
MS	0,130 Mio t	disseminated	0,06 Mio t
Seabed	--	Carbonatites	--

Abb. 80: Average Size (Cu -content) by type of deposits (cut-off date 18.09.20)³⁶⁶

366 Quelle: [WEBER2020].

Political stability	2013 (WEBER 2015)	2018 (WEBER 2020)	
		active	projects
stable	0,1 %	0,08 %	0,03 %
fair	60,2 %	63,93 %	61,55 %
unstable	29,0 %	33,12 %	34,53 %
Extreme unstable	10,7 %	2,87 %	2,75 %

Abb. 81: Development of Cu resources by political stability (cut-off date 18.09.20)³⁶⁷

Continent	2013 (WEBER 2015)	2018 (WEBER 2020)	
		active	projects
Asia	16,53 %	10,76 %	11,46 %
Africa	10,98 %	3,75 %	4,00 %
Oceania	10,99 %	7,67 %	7,95 %
Latin America	45,48 %	41,41 %	37,60 %
North-America	11,86 %	29,29 %	34,00 %
Europe	4,14 %	7,11 %	3,84 %

Abb. 82: Development of Cu resources by continents (cut-off date 18.09.20)³⁶⁸

Für die heutige und zukünftige resiliente Versorgung mit dem industriell bedeutsamen Metall Kupfer ist die Stabilität der Herkunftsregion ein wesentliches Beurteilungskriterium. Weiter unten im Kapitel 9.4 (S.271) und Abb. 164 ist das Kriterium der politischen Stabilität nach Beurteilung der Weltbank beschrieben. Zählt man die moderat stabilen Länder zu den wenigen als stabil ausgewiesenen, so können knapp über 60% der Kupfermengen der als gesichert geltenden Versorgung zugeordnet werden. Gegenüber 2008 konnten der Nachschub aus als extrem unstabilen kategorisierten Ländern deutlich reduziert werden (siehe Abb. 81). Sowohl für die aktuelle Versorgung als auch für die in Zukunft möglicher Weise in Betrieb gehenden Lagerstätten muss von einem hohen Versorgungsrisiko für ein gutes Drittel (circa 36%) des Kupferweltbedarfs ausgegangen werden. Wenngleich gegenüber 2013 der Wert sogar knapp 40% betrug, ist es weiterhin mit Preisvolatilitäten aufgrund von möglichen geopolitischen Risiken zu rechnen.

367 Quelle: [WEBER2020].

368 Quelle: [WEBER2020].

In Abb. 82 ist die Verfügbarkeit der Kupfer-Ressourcen nach Regionen bzw. Kontinenten dargestellt. Überraschend ist, dass Asien 2018 deutlich weniger als 2013 beizutragen scheint. Es muss jedoch an dieser Stelle davon ausgegangen werden, dass die verfügbare Datenqualität insbesondere aus China diesen Ausreißer erklärt. Die aus den chinesischen Lagerstätten ausgebrachte Kupfermenge hat sich zwischen 2013 und 2018 kaum verändert und betrug nach USGS 2013 1,6 Mio. t und 2018 1,59 Mio. t.³⁷⁰ Die Verschiebung der Anteile von Süd- nach Nordamerika ist vorwiegend auf gesteigerte Prospektion zurückzuführen. In ähnlicher Weise waren die Bemühungen der europäischen Betriebe nach Rückwärtsintegration durch stark steigende Kupferpreise, zunehmende geopolitische Unsicherheiten und Handelsbarrieren motiviert, werden aber aufgrund der wirtschaftlich verfügbaren Lagerstätten nicht von langer Dauer sein können. Interessant ist

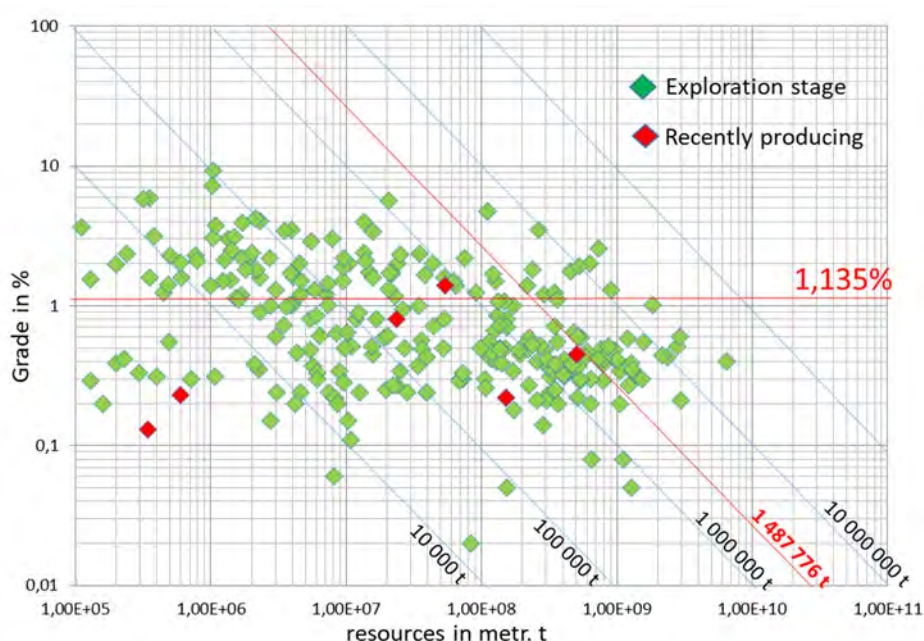


Abb. 83: Copper exploration projects (2018/2019) size vs grade (cut-off date 06.09.20)³⁶⁹

die Entwicklung zukünftiger Kupferexplorationsprojekte dahingehend, dass sich 1,14% in internationalen Hoheitsgewässern befinden.³⁷¹

Neben geopolitischen Bewertungen ist die Qualität zukünftiger Kupferbergbaue entscheidend. In Abb. 83 sind alle bekannten Kupferbergbauprojekte nach ihrer Größe und dem Kupfergehalt eingetragen. Die zuletzt operativ gegangenen Kupferbergbaue waren bislang als Kupferprojekte im „advanced stage“ eingeordnet und sind sowohl von ihrer Größe als auch vom Kupfergehalt unter dem Durchschnitt der bislang produzierenden Bergbaubetrieben. Oben (S.159) wurde bereits ausgeführt, dass von den im Zeitraum 2007 bis 2019 publizierten 440 Stück NI 43 101 Reports

³⁶⁹ Quelle: [WEBER2020].

³⁷⁰ [USGSCU2020], p.52.

³⁷¹ Das erklärt, warum die Summe der Projekte in Abb. 82 kleiner als 100% ist – die Differenz sind Projekte in internationalen Hoheitsgewässern (international sea).

nur circa 40% Projekten im „advanced stage“ gewidmet sind und die weitaus größere Menge Untersuchungen im „early stage“. Diese Daten legen nahe, dass die Mehrzahl zukünftiger Kupferbergbaue kleiner und mit niedrigeren Kupfergehalt sein werden.

Zu diesem Schluss verleitet auch die Analyse der Kupferbergbaue nach Lagerstättentyp. In Abb. 84 sind die durchschnittliche Größe der Lagerstätte und der gewichtete Kupfergehalt je Lagerstättentyp illustriert, wobei alle aktive Bergbaubetriebe als auch Lagerstättenprojekte berücksichtigt sind. Erwartungsgemäß sind porphyrische Lagerstätten groß in der Ausdehnung bei durchschnittlich moderaten Kupfergehalt. Skarne und Seabed Lagerstätten gehören zu den größten und reichen Vorräten. Bemerkenswert sind die Größe und Qualität des europäischen Kupferschiefers. Lagerstätten geringeren Ausmaßes sind die „massive sulphide“ und gang-klufftörmige Vererzungen.

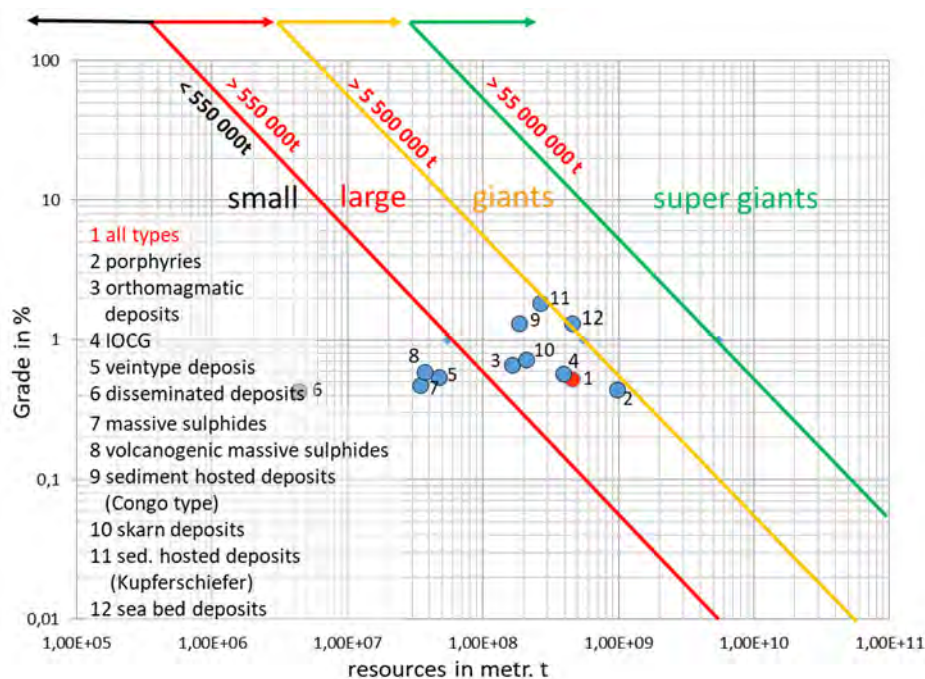


Abb. 84: Average Size of all Cu deposits (active and projects) - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁷²

³⁷² Quelle: [WEBER2020].

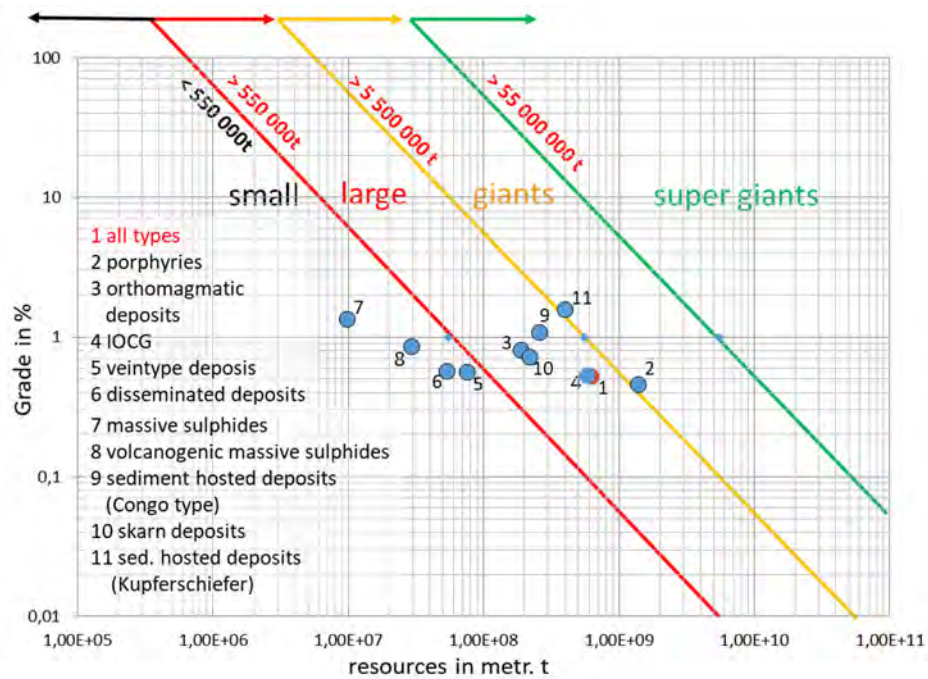


Abb. 85: Average Size of all producing Cu deposits (active) - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁷³

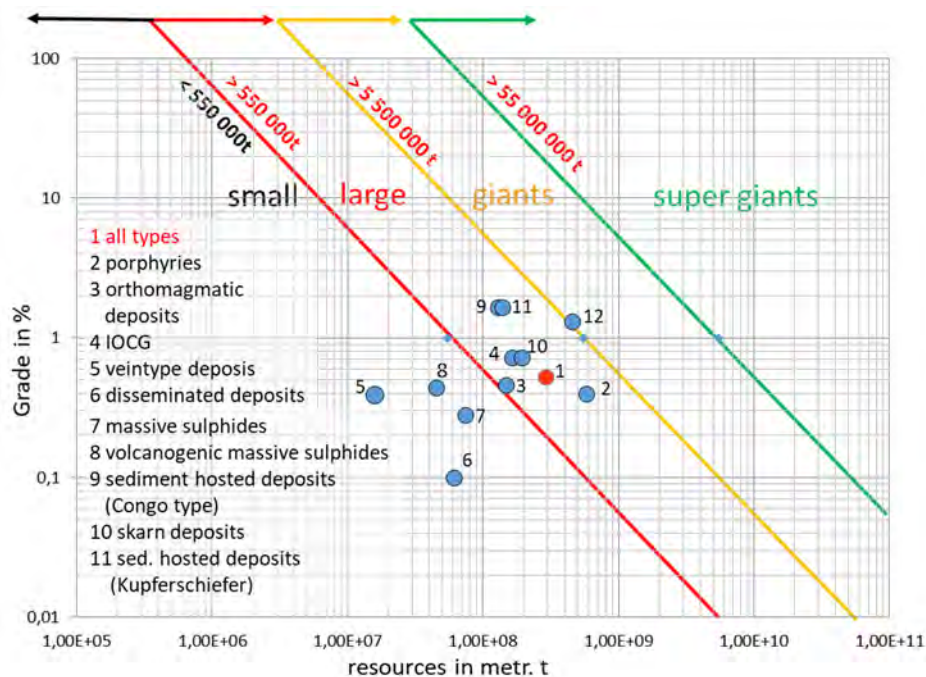


Abb. 86: Average Size of all Cu projects - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁷⁴

Ein ähnliches Bild zeigt die Analyse der Teilmenge der aktiven Bergbaubetriebe (Abb. 85). Der Gesamtdurchschnitt rutscht im Kupfergehalt etwas ab, jedoch sind die derzeit produzierenden

373 Quelle: [WEBER2020].

374 Quelle: [WEBER2020].

Betriebe mengenmäßig ressourcenreicher. Von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung ist der Typus der porphyrischen Lagerstätten, der diesem Bild sowohl in der Abnahme der Qualität als auch Ausdehnung folgt.

Die Betrachtung der Kupferprojekte (Abb. 86) lässt einen Blick in die Zukunft der Kupferproduktion werfen. Ganz augenscheinlich sind die in Qualität (Kupfergehalt) und Ressourcenmenge herausstechenden Seabed-Lagerstätten, deren Nutzung jedoch erst technologisch erschlossen werden muss. Praktisch alle anderen Lagerstättentypologien schrumpfen zumindest in der durchschnittlichen Größe, meist mit geringerem durchschnittlichen Kupfergehalt. Die Qualität der Lagerstätten des europäischen Kupferschiefers kann gehalten werden, während der afrikanische Typus der sediment hosted deposits in der Qualität zukünftiger Projekte besser zu werden scheint. Die durchschnittliche Größe nimmt jedoch auch bei dieser Vorratsart ab.

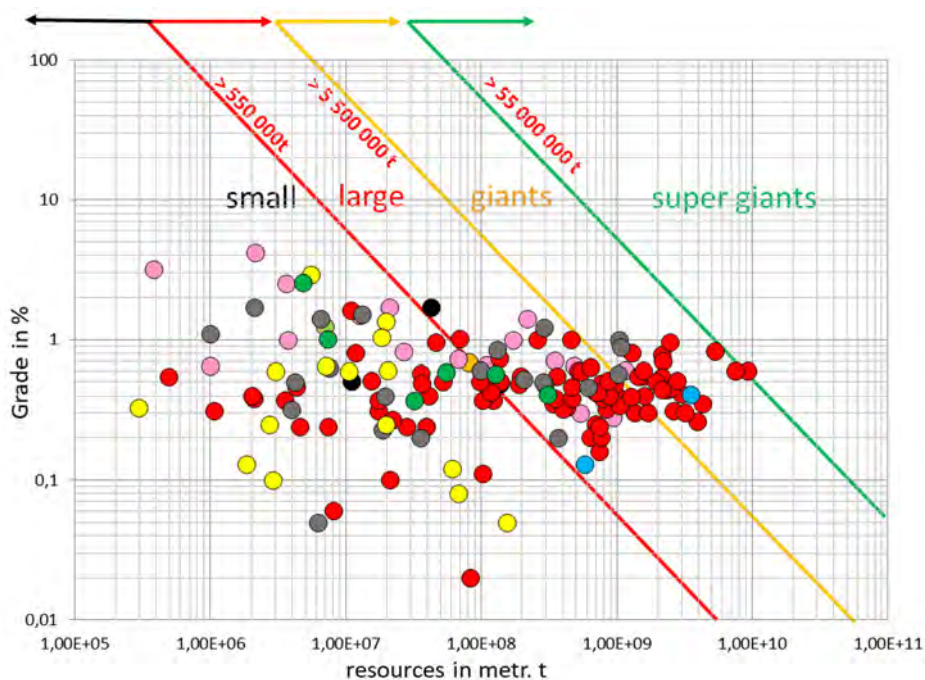


Abb. 87: Latin America (active mines and projects) - actual size vs (weighted) grade, 39,70% of global resources (Cu-content) (Farblegende: Abb. 88) (Stand 06.09.20)³⁷⁵



Abb. 88: Farblegende für Abb. 87 bis Abb. 91

³⁷⁵ Quelle: [WEBER2020].

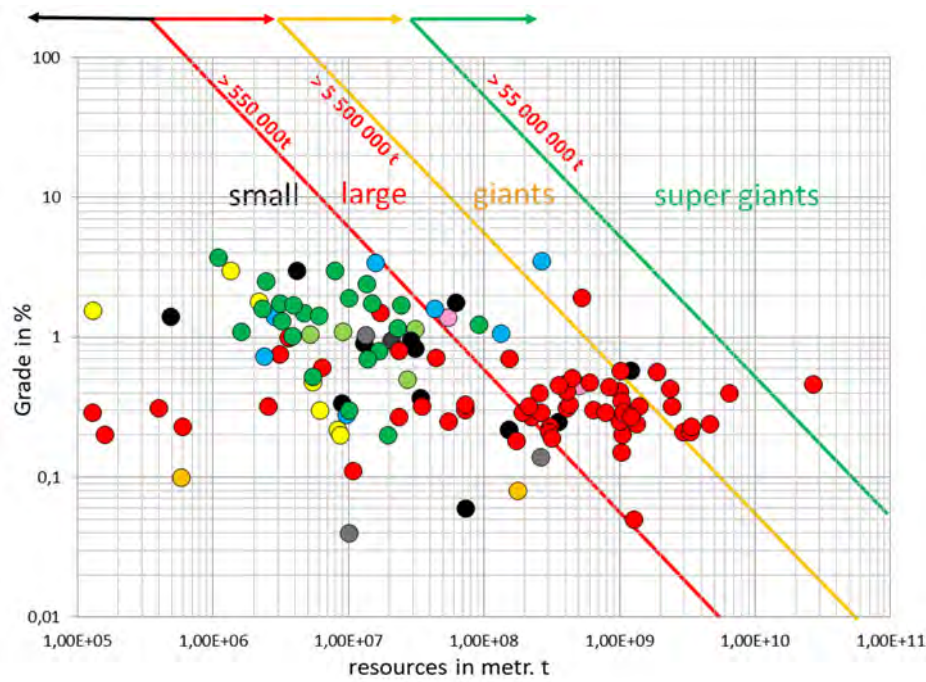


Abb. 89: North America (active mines and projects) - actual size vs (weighted) grade, 22,82% of global resources (Cu-content) (Farblegende: Abb. 88) (Stand 06.09.20)³⁷⁶

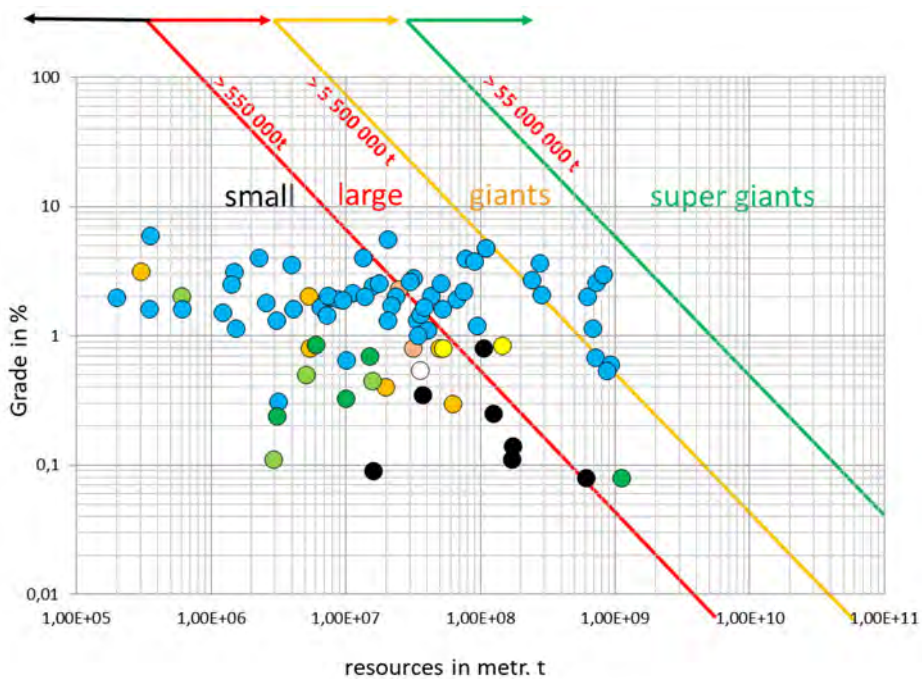


Abb. 90: Africa (active mines and projects) - actual size vs (weighted) grade, 10,11% of global resources (Cu-content) (Farblegende: Abb. 88) (Stand 06.09.20)³⁷⁷

376 Quelle: [WEBER2020].

377 Quelle: [WEBER2020].

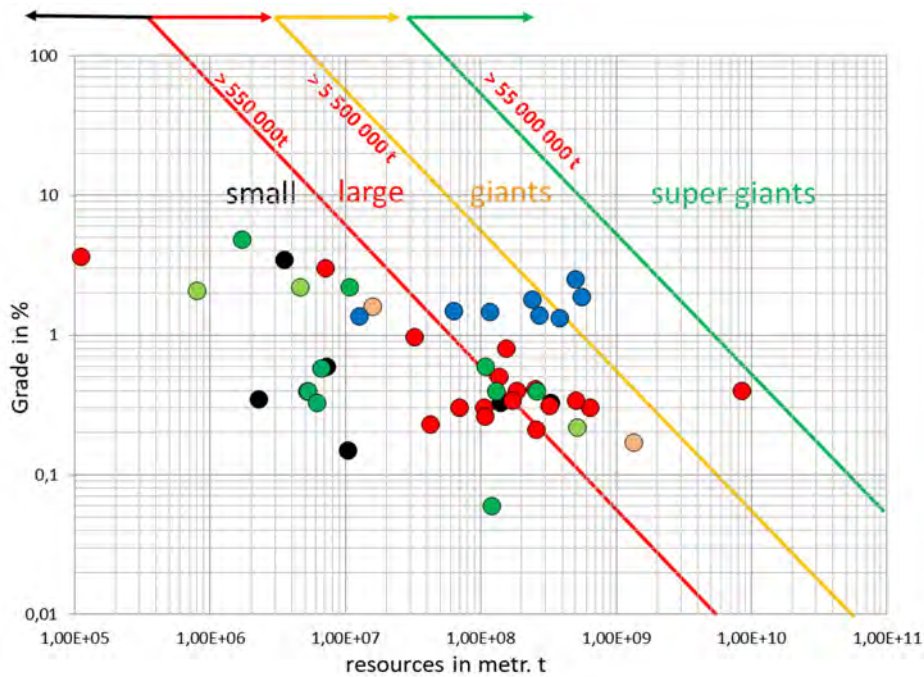


Abb. 91: Europe (active mines and projects) - actual size vs (weighted) grade, 6,54% of global resources (Cu-content) (Farblegende: Abb. 88) (Stand 06.09.20)³⁷⁸

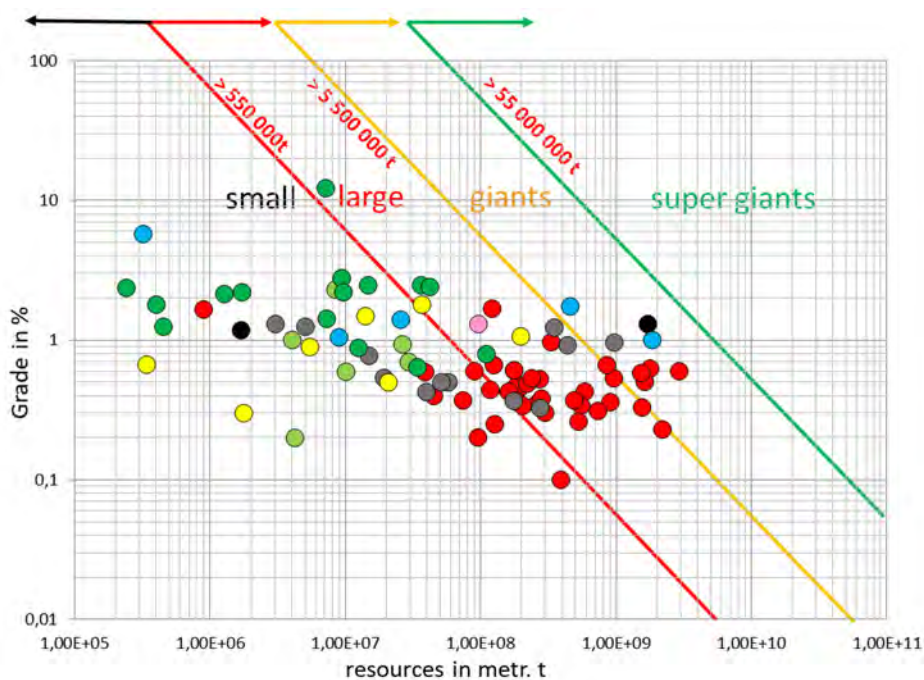


Abb. 92: Asia (active mines and projects) - actual size vs (weighted) grade, 12,93% of global resources (Cu-content) (Farblegende: Abb. 88) (Stand 06.09.20)³⁷⁹

378 Quelle: [WEBER2020].

379 Quelle: [WEBER2020].

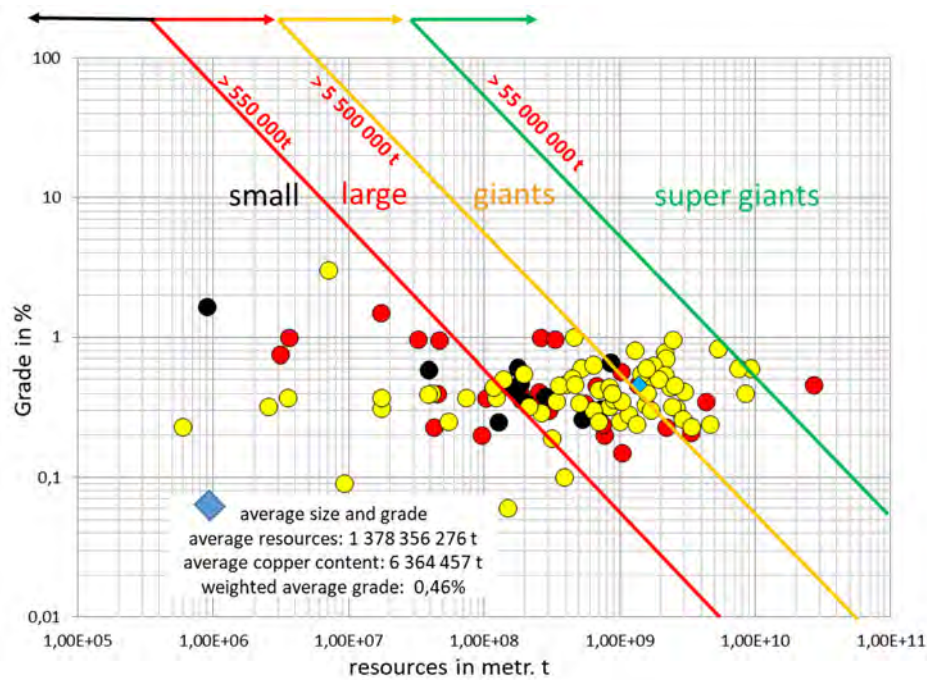


Abb. 93: Porphyry Cu-deposits (active mines) by political stability of prod. countries - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁸⁰ | total world share = 80,1% by ore and 67,3% by Cu-content | green = stable = 0,0% | yellow = fair = 67,6% | red = unstable = 28,7% | black = extreme unstable = 3,7% (by Cu-content)

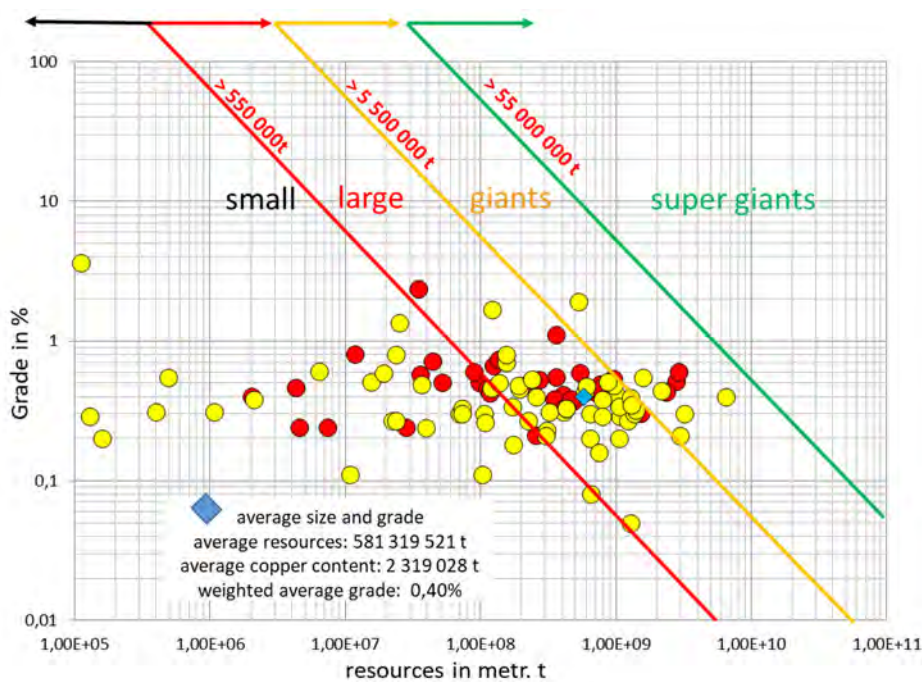


Abb. 94: Porphyry Cu-deposits (projects) by political stability of prod. countries - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁸¹ | total world share = 80,1% by ore and 67,3% by Cu-content | green = stable = 0,0% | yellow = fair = 62,0% | red = unstable = 38,0% | black = extreme unstable = 0,0% (by Cu-content)

380 Quelle: [WEBER2020].

381 Quelle: [WEBER2020].

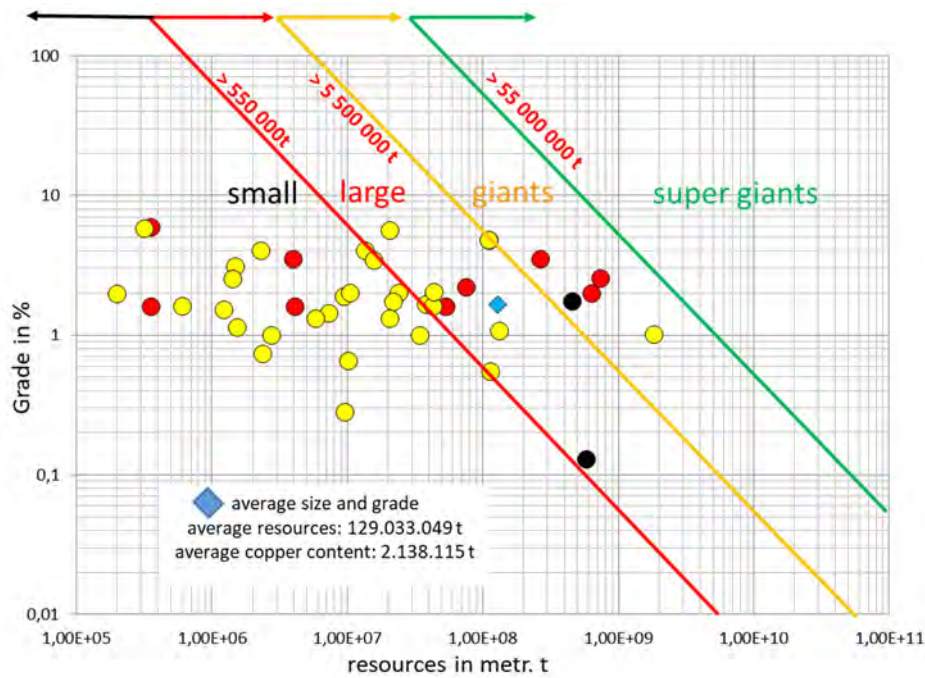


Abb. 95: Sediment hosted Cu-deposits (projects) by political stability of prod. countries - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁸² | total world share = 5,4% by ore and 13,6% by Cu-content | green = stable = 0,0% | yellow = fair = 53,8% | red = unstable = 46,2% | black = extreme unstable = 0,0% (by Cu-content)

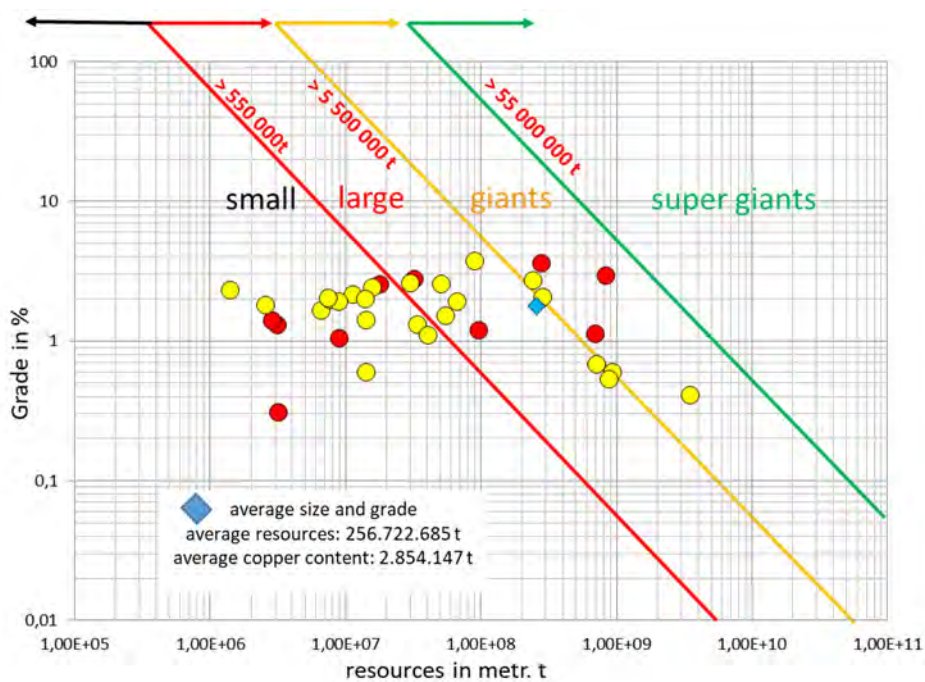


Abb. 96: Sediment hosted Cu-deposits (active mines) by political stability of prod. countries - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁸³ | total world share = 5,4% by ore and 13,6% by Cu-content | green = stable = 0,0% | yellow = fair = 53,8% | red = unstable = 46,2% | black = extreme unstable = 0,0% (by Cu-content)

382 Quelle: [WEBER2020].

383 Quelle: [WEBER2020].

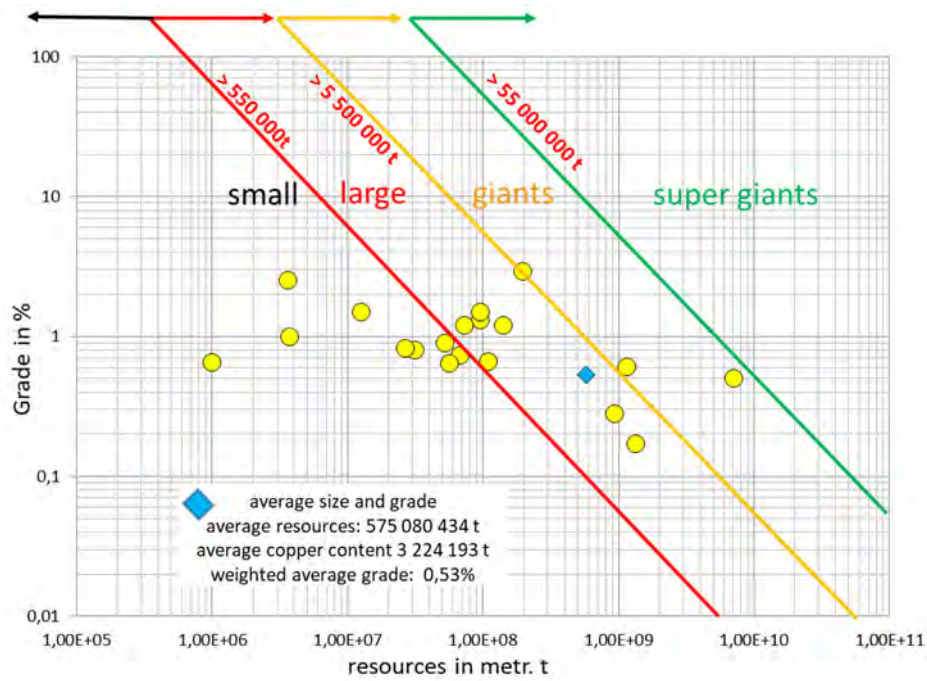


Abb. 97: IOCG Cu-deposits (active mines) by political stability of prod. countries - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁸⁴ | total world share = 5,4% by ore and 5,9% by Cu-content | green = stable = 0,0% | yellow = fair = 48,8% | red = unstable = 51,1% | black = extreme unstable = 0,0% (by Cu-content)

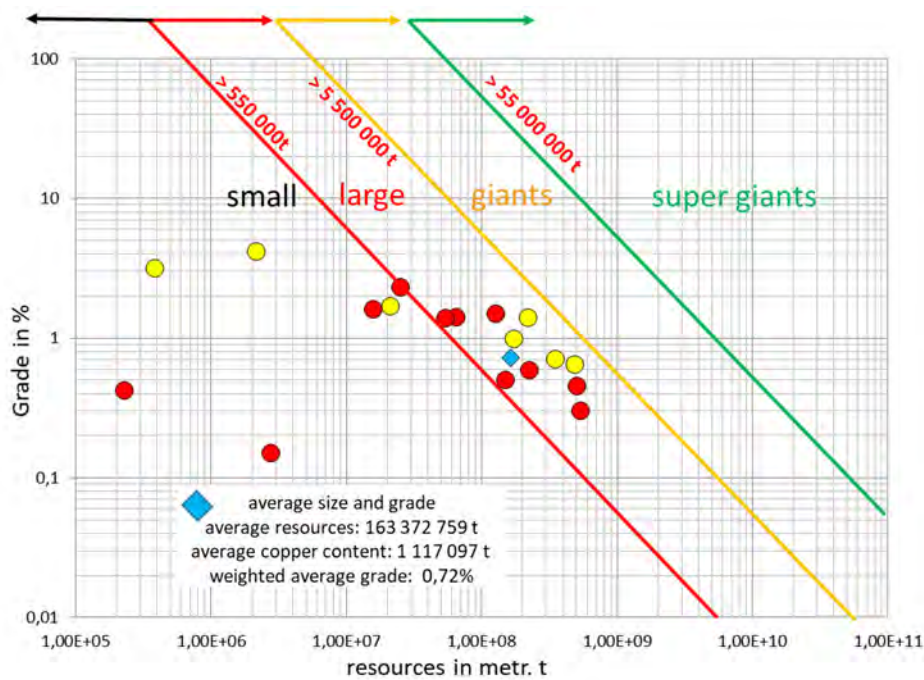


Abb. 98: IOCG Cu-deposits (projects) by political stability of prod. countries - actual size vs (weighted) grade (cut-off date 06.09.20)³⁸⁵ | total world share = 5,4% by ore and 5,9% by Cu-content | green = stable = 0,0% | yellow = fair = 48,8% | red = unstable = 51,1% | black = extreme unstable = 0,0% (by Cu-content)

384 Quelle: [WEBER2020].

385 Quelle: [WEBER2020].

Die Abb. 87 bis Abb. 91 zeigen Qualität und Größe der Lagerstätten des jeweiligen Typus für einige Regionen der Erde. Generell muss mit einem Kupfergehalt (teilweise deutlich) unter 1% in allen Ländern gerechnet werden. Die Regionen Lateinamerika (Abb. 87) und Nordamerika (Abb. 89) werden dominiert von porphyrischen Lagerstätten mit großer Ressourcenmenge (in Tonnen). Der amerikanische Kontinent hält dieser Auswertung zufolge 62,5% der Weltkupferressourcen. Nur geringfügig schlechter in der Qualität und Ausmaß zeigen sich die asiatischen Vorkommen.

Geologisch ein komplett anderes Bild zeigt die Illustration der afrikanischen Kupferlagerstätten (Abb. 90). Afrika verfügt über keine für die Kupferproduktion so typischen porphyrischen Lagerstätten. Stattdessen dominieren die afrikanischen sediment hosted Lagerstättentypologien („Congo type“). Die meisten Vorkommen haben jedoch eine Kupferanreicherung deutlich über 1%, sind jedoch um eine Größenordnung (Faktor 10) kleiner bezogen auf die Ressourcenmenge. Damit sind die afrikanischen Kupferlagerstätten um das Drei- bis Fünffache ergiebiger als der typische porphyrische Lagerstättentypus und kann folglich wirtschaftlich gut erschlossen werden. Von der globalen Bedeutung liegen Afrika und Asien gleichauf mit circa 10% und knapp 13% der Weltkupferressourcen. Die Anreicherungen in Asien (Abb. 92) zeigen ein ähnliches Bild wie für Amerika.

Europa hängt mit einem Anteil von 6,5% der weltweiten Kupfervorräte deutlich hinterher. Nicht nur die Anzahl der Lagerstätten, auch die Qualität und Ressourcenmenge sind kleiner als in den anderen Wirtschaftsregionen (Abb. 91). Auffallend ist einmal mehr, dass der polnische Kupferschiefer sowohl durch seine Anreicherung als auch Größe eine wichtige Säule der europäischen Kupferversorgung darstellt.

Die zukünftige Versorgungssicherheit insbesondere für die Transformation Europas zu einer „green economy“ ist nicht nur von der (bescheidenen) Verfügbarkeit europäischer Lagerstätten abhängig, sondern von der verlässlichen und resilienten Versorgung aus den kupferreichen Ländern bzw. Regionen. Ein Gradmesser hierfür ist die bereits oben erläuterte politische Stabilität nach dem Index der Weltbank.

In Abb. 93 sind alle bekannten porphyrischen Lagerstätten nach politischer Stabilität, Kupfergehalt und Ressourcenmenge eingetragen. Auf den ersten Blick ist die Kupferversorgung durch größere Lagerstätten in nicht instabilen Ländern gewährleistet (gelbe Punkte). Bei tiefergehender Betrachtung können jedoch die Versorgungsmengen, die aus instabilen Ländern stammen, den Nachschub und das Preisgefüge am Weltmarkt empfindlich stören (rote und schwarze Punkte). Wie bereits oben ausgeführt, zeichnen porphyrische Lagerstätten für zwei Drittel der Kupfermetallversorgung verantwortlich und daher ist dieser Lagerstättentypus der wirtschaftlich wichtigste. Die Analyse der derzeit in Entwicklung befindlichen Kupferbergbauprojekte zeigt, dass sich die Resilienz der Versorgung nicht bessern wird (Abb. 94). Der Anteil an Kupferressourcen, die aus politisch instabilen Ländern bezogen werden, erhöht sich um zehn Prozentpunkte von derzeit 28,7% auf circa 38%. Die Tatsache, dass kein Projekt als „extrem unstable“ eingestuft wird, hat

weniger mit abgesicherter Versorgungssicherheit zu tun als mit der Tatsache, dass in solchen Ländern keine Investitionen erfolgen und daher diese geologischen Vorräte zumindest derzeit ungenutzt bleiben.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Analyse der beiden mit Abstand weiteren wirtschaftlich wichtigeren Lagerstättentypologien, den sedimentären Lagerstätten 13,6% und den IOCG mit 5,9% Kupferanteil. Die aktiv kupferproduzierenden sediment hosted deposits weisen eine deutliche bessere Qualität hinsichtlich des Kupfergehalt als die porphyrischen Lagerstätten auf (Abb. 96). Die Kupferprojekte verlagern sich praktisch komplett (9 von 10 Projekte) bei kaum verschlechtertem Kupfergehalt, aber geringerer Bergbaugröße in politisch instabile Länder (Abb. 95). Auch die Entwicklung der IOCG Lagerstätten kann diesem Trend nicht entgegenstehen, sodass Lagerstättenprojekte mit kleinerem Ressourcenmengen vielfach nur in politisch instabilen Ländern mit wirtschaftlich interessanten Kupfergehalt zu finden sind (Abb. 97 und Abb. 98).

Die Betrachtung der Kupferlagerstätten nach deren Entstehungsperiode bestätigt die bisherigen Erwartungen. Im Paläogen entstanden 40,5% der globalen Kupferressourcen und diese sind vor allem in ausgedehnten porphyrischen Lagerstätten mit hohem Kupferinhalt eingelagert (Abb. 99 (rot = Prophyries)). Im Neogen entstanden 18,9% der Kupferressourcen und auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild (Abb. 100). Die Kupferlagerstätten dieser Periode sind ebenfalls vom Typus der großen porphyrischen Anreicherungen mit hohem Kupfergrad bestimmt. Der zweite relevante Lagerstättentypus in diesen beiden Perioden sind die orthomagmatischen Lagerstätten (graue Punkte in den Diagrammen).

Die präsentierten Analysen lassen den zusammenfassend den Schluss und Empfehlung zu, dass **für die wirtschaftliche Nutzung die Explorationsarbeiten vor allem auf porphyrischen Lagerstätten in politisch stabilen Regionen, die sich im Paläogen gebildet haben, konzentriert werden** soll. Im nächsten Kapitel wird auch die Kupferproduktion näher eingegangen.

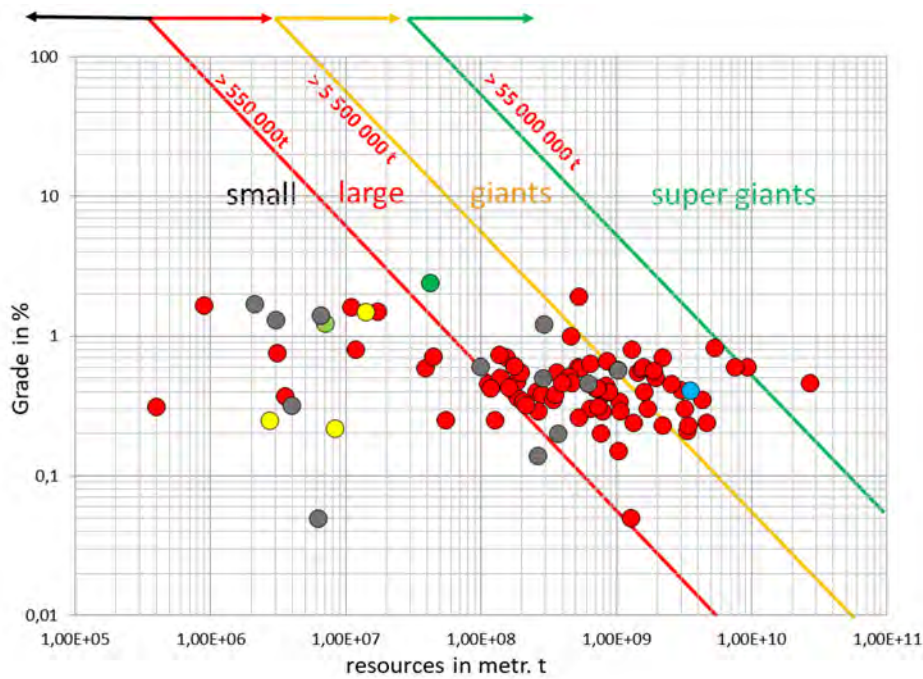


Abb. 99: Cu deposits in Paleogene environments (active mines and projects) actual size vs grade³⁸⁶

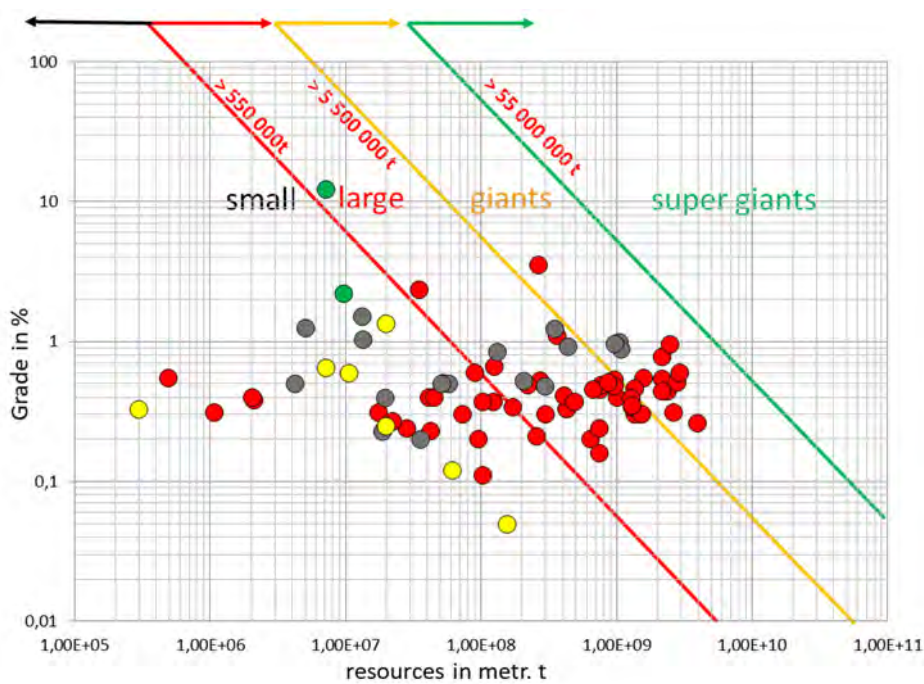


Abb. 100: Cu deposits in Neogene environments (active mines and projects) actual size vs grade³⁸⁷

386 Quelle: [WEBER2020].

387 Quelle: [WEBER2020].

5. Selen: Eigenschaften, Vorkommen, Erzeugung und Verwendung

5.1. Historische Bedeutung von Selen

Selen wurde im Jahre 1817 als chemisches Element vom Schweden Jöns Jakob Berzelius im Bleikammerschlamm einer Schwefelsäurefabrik entdeckt und galt als toxische Substanz. Der Name Selen geht auf die griechische Mondgöttin Selene zurück. Die biologische Bedeutung von Selen wurde erst erkannt, als es als toxisches Prinzip identifiziert wurde, das Lahmheit und Tod bei Nutztieren, beispielsweise Kavalleriepferden, verursacht. 1935 wurde die beim Menschen auftretende *Keshan-Krankheit* (Erkrankung des Herzmuskels aufgrund Selenmangels) erstmals beschrieben und das häufige Zusammenfallen mit den Muskelerkrankungen bei Tieren auffällig wurde. Klaus Schwarz und Calvin M. Foltz fanden 1957 heraus, dass Selen ein essenzielles Spurenelement ist.³⁸⁸ Sie hatten seine Schutzfunktion vor einer bestimmten Art von Lebererkrankung (Lebernekrose) aufgezeigt. Die ersten selenhaltigen Proteine wurden 1973 in Einzellern entdeckt und 1990 gelang der Nachweis, dass die Funktion der Schilddrüsenhormone von Selen abhängt.³⁸⁹ (weiterführende Informationen im Kapitel 5.8 (S.195ff.))

Technologische Untersuchungen zeigten bald, dass Selenelektronen von bemerkenswerter Anfälligkeit für Anregung durch Licht sind, was zur Erzeugung eines elektrischen Stroms führt. Dieser Eigenschaft verdankt Selen die Verwendung in Fotozellen, Belichtungsmessern, Gleichrichtern und xerografischen Kopiergeräten. Es wird auch verwendet, um den grünlichen Farbton von Glas aufgrund von Eisenverunreinigungen zu entfärben oder im Überschuss die rubinrote Farbe zu erzeugen, die in Warnsignalen und Rücklichtern von Kraftfahrzeugen zu sehen ist. (weiterführende Informationen in Kapitel 5.3(S.182ff.))

5.2. Eigenschaften von Selen

Selen ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Se und der Ordnungszahl 34. Im Periodensystem steht Selen in der 4. Periode sowie der 6. Hauptgruppe, bzw. der 16. IUPAC-Gruppe, zählt also zu den Chalkogenen (Erzbildner). Selen ist ein Halbmetall, jedoch verhalten sich chemisch die Chalkogene überwiegend wie Nichtmetalle. Das Element ist bei Zimmertemperatur von fester Konsistenz, ist aber relativ weich (Mohshärte 2) und hat ein grau glänzendes Aussehen sowie relativ geringe Schmelztemperatur von 490°K ($\approx 216^\circ\text{C}$) und Siedetemperatur von 958,1°K ($\approx 685^\circ\text{C}$). Selen steht dem Schwefel chemisch sehr nahe und wird auch in der Natur

³⁸⁸ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK216725/> (06.02.2021).

³⁸⁹ J. E. Oldfield, A brief history of selenium research: From alkali disease to prostate cancer (from poison to prevention), Oregon State University, Corvallis, 2002 | https://www.asas.org/docs/default-source/midwest/mw2020/publications/oldfieldhist.pdf?sfvrsn=b5eefff0_0 (06.02.2021).

in Begleitung des Schwefels gefunden, eine Tatsache, die auf die Lagerstättengene Auswirkungen hat.

Selen kommt wie Schwefel in mehreren **Modifikationen** vor:³⁹⁰

- Rotes Selen besteht zu etwa 30% aus Se_8 -Ringen und zu 70% aus Se_{8+n} , welches sich oberhalb 80°C in das graue Halbleitermetall umwandelt. Elementares rotes Selen ist ein Isolator.
- Schwarzes amorphes Selen, das sich über 60°C in das schwarze, glasartige Selen umwandelt. Bei Erwärmung über 80°C wandelt sich das Element die graue, halbmetallische Modifikation um.
- Graues „metallisches“ Selen ist die stabilste Modifikation und verhält sich wie ein Halbmetall. Diese Selenmodifikation zeigt starke Halbleitereigenschaften nicht nur in idealen Monokristallen, sondern auch in polykristallinen Strukturen.

„Das graue, metallische Selen zeigt einen ausgeprägten Photoeffekt. Durch Belichtung ändert es seine elektrische Leitfähigkeit. Während es im Dunkeln ein schlechter Leiter für elektrischen Strom ist, nimmt seine Leitfähigkeit bei Belichtung um den Faktor Tausend zu. Aufgrund dieses Effekts eignet sich das Metall zur Herstellung von lichtempfindlichen elektronischen Bauteilen wie Photodioden oder Phototransistoren. Das chemische Verhalten von Selen ist dem Schwefel ähnlich, allerdings ist Selen schwerer oxidierbar. Aufgrund dieser chemischen Ähnlichkeit wird bei manchen biologischen Prozessen nicht zwischen Selen und Schwefel unterschieden.

Selen ist nach Sauerstoff und Schwefel das dritthäufigste Chalkogen. Das Element ist auf der Erde recht selten und mit lediglich 0,05 ppm am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Damit besitzt es eine Häufigkeit in derselben Größenordnung wie Silber und Indium. In kleinen Mengen kommt Selen metallisch (gediegen) vor. Bekannte Selen-Mineralien sind Clausthalit und Naumannit, die üblicherweise mit Schwefelmineralien vergesellschaftet sind. Selenide finden sich spurenweise in verschiedenen natürlichen Sulfiden wie Pyrit, Zinkblende und Kupferkies.“³⁹¹

390 [FRAU2009], S.316.

391 [FRAU2009], S.316-317.

5.3. Selenverwendung

Das industriell eingesetzte Selen wird als Nebenprodukt der elektrolytischen Weiterverarbeitung von Kupfer gewonnen, wo es sich im Anodenschlamm ansammelt. Der Verbrauch von Selen nimmt stetig durch neue Einsatzzwecke zu. Insbesondere fand Selen Anwendung in Gummimischungen, Stahllegierungen und Selengleichrichtern. Seit 1970 wurde Selen in Gleichrichtern weitgehend durch Silizium ersetzt. Damals war aber die Verwendung von Selen als Fotoleiter in Normalpapierkopierern die führende Anwendung. In den 1980er Jahren war dieser Selenverbrauch zwar noch signifikant, aber bereits im Abnehmen begriffen, da immer mehr Kopierer mit organischen Fotoleitern hergestellt wurden. Im Jahr 1996 zeigten fortlaufende Forschungen eine posi-

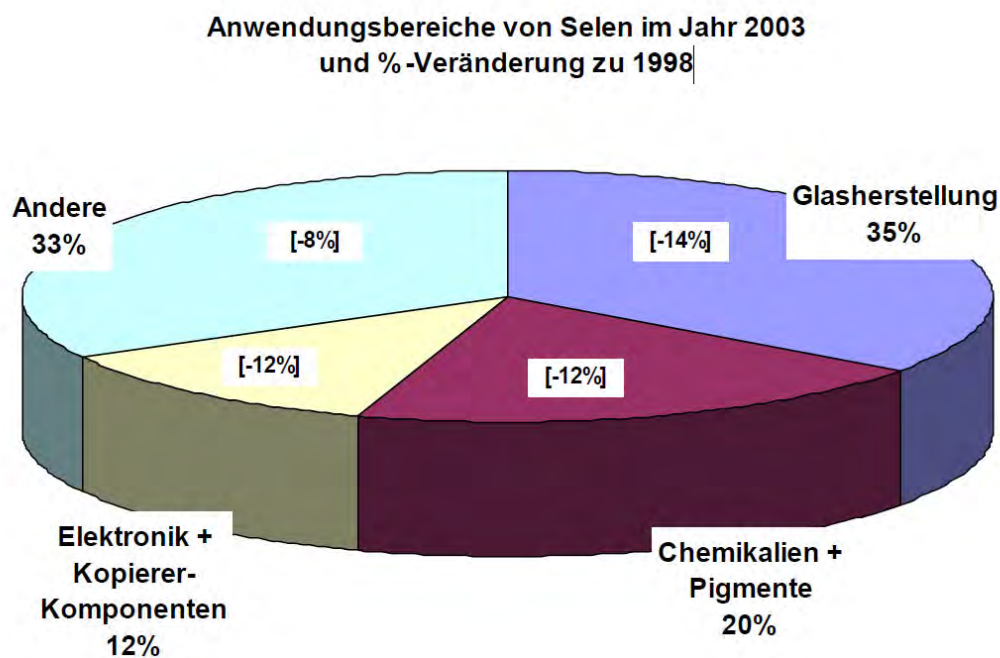


Abb. 101: Anwendungsbereiche von Selen im Jahr 2003 und prozentuelle Veränderungen zu 1998³⁹²

tive Korrelation zwischen Selenergänzung und Krebsprävention beim Menschen, jedoch ist diese Erkenntnis für die Mengenentwicklung durch die sehr geringe (medizinische) Dosierung nicht marktrelevant.³⁹³ In den späten 90er Jahren wurde die Verwendung von Selen (normalerweise mit Wismut) als Zusatz zu Sanitärarmessung zur Erfüllung der bleifreien Umweltstandards wichtig.³⁹⁴

Die Abb. 101 stellt die wichtigsten Anwendungsfelder von Selen für das Jahr 2003 im Überblick dar. Die Angaben basieren auf der Fraunhoferstudie mit einem Selenverbrauch in Höhe von 424 t im Jahre 2003 und 488 t im Jahre 1998, weshalb sich in allen Bereichen eine Reduktion zeigt.

³⁹² aus: [FRAU2009], S.320.

³⁹³ Die medizinischen Anwendungen von Selen in der Medizin sind in Kapitel 5.9.3 (S.231) näher ausgeführt.

³⁹⁴ USGS, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/selenium-and-tellurium-statistics-and-information> (25.04.2020).

Die Grafik veranschaulicht die Vielfältigkeit des Seleneinsatzes, der für verschiedene Lebensformen essenziell ist. Selenverbindungen werden als Nahrungsergänzung und als Diätpräparat ebenso angeboten und zu Futter- und Düngemittelzusätzen verarbeitet. In der Glasindustrie wird es zum Entfärben grüner Gläser sowie zur Herstellung rotgefärbter Gläser eingesetzt. Ferner wird Selen in architektonischem Flachglas zur Reduktion der Transmission der solaren Wärmestrahlung genutzt. Traditionell wurde Selen in Belichtungstrommeln für Fotokopierer und Laser-Drucker sowie als Toner für Schwarz-Weiß-Fotografien zur Kontrasterhöhung und zur Haltbarkeitserhöhung sowie zur leichten Färbung der dunklen Bildbestandteile eingesetzt. Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld ist die Verwendung von Selen in der elektrolytischen Manganherstellung zur Erhöhung der Prozessausbeuten.³⁹⁵

Weitere Anwendungen von Selen sind:³⁹⁶

- Chemikalien und Pigmente: in Katalysatoren zur Erzeugung selektiver Oxidation, als Bestandteil von Sprengkapseln und Nervenkampfgasen; Latexzusatz zur Erhöhung der Abrasionsbeständigkeit; zur Herstellung roter Farbpigmente für Kunststoffe, keramische Produkte und Spezialgläser auf der Basis von Cadmiumselenid.
- Elektronikkomponenten: Verwendung in Selen-Gleichrichter und Selen-Zellen, heute allerdings weitgehend durch Silizium (Halbleiter) abgelöst; in analogen Belichtungsmessern für die Fotografie; Halbleiterherstellung; mit Kupfer und Indium Bestandteil der photoaktiven Schicht von CIS-Solarzellen.
- Metallurgisch: Legierungszusatz zur Verbesserung der mechanischen Bearbeitbarkeit für Automatenstähle und Kupfer-Legierungen; zur Brünierung / Passivierung von Aluminium, Messing o. ä. (Selendioxid); metallurgisches Additiv zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit von Kupfer-, Blei- und Stahl-Legierungen.
- Sonstiges: Anti-Schuppen-Haarshampoos und Vorbeugung / Therapie von Pityriasis versicolor, einer durch einen Hefepilz verursachten Hauterkrankung; unterstützend in der HIV-Therapie.

Bis 2010 berichtete USGS über die globalen Verbrauchsdaten von Selen, seither nicht mehr. Daher können die Anwendung nur historisch abgeschätzt werden oder aus anderen Studien (z.B. der hier zitierten Fraunhofer-Studie (2009)) entnommen werden. Im folgenden Kapitel 2.7 (S.42) wird der anthropogene Selenzyklus näher ausgeführt und der Seleneinsatz in den letzten Jahrzehnten näher betrachtet. Die hauptsächliche metallurgische Endanwendung für Selen im Jahr 2016 war die Herstellung von elektrolytischem Mangan in China, wo Schwefeldioxid durch Se-

³⁹⁵ [FRAU2009], S.320.

³⁹⁶ zitiert aus: [FRAU2009], S.321.

lendioxid (SeO₂) ersetzt wurde, um die für den Betrieb von Elektrolysezellen erforderliche Leistung zu verringern. 2016 stieg die weltweite Manganproduktion um 8% auf 1,27 Millionen Tonnen (Mt), wobei China der Hauptproduzent blieb.³⁹⁷

China ist auch Hauptnachfrager von Selen. Das Land nutzt das Element hauptsächlich als Düngemittel und als Bestandteil der Glasherstellung sowie Selendioxid anstelle von Schwefeldioxid in der Mangan-Raffination. Es wird davon ausgegangen, dass der Selenverbrauch Chinas weiter ansteigen wird, da die Mangannachfrage Chinas weiterwächst. Die Zukunftstechnologie, die für die zukünftige Anwendung von Selen identifiziert wurde, ist die Aufbringung von Selen in Dünnschicht-Solarzellen worden (siehe nachfolgendes Kap. 5.7, S.194).

5.4. Selenproduktion

Industriell gewinnt man Selen als Nebenprodukt bei der elektrolytischen Kupfer- und Nickelherstellung aus dem Anodenschlamm durch Abrösten. Die Reduktion zum elementaren Selen erfolgt durch Schwefeldioxid:³⁹⁸ $\text{H}_2\text{SeO}_3 + 2\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Se} + 2\text{H}_2\text{SO}_4$

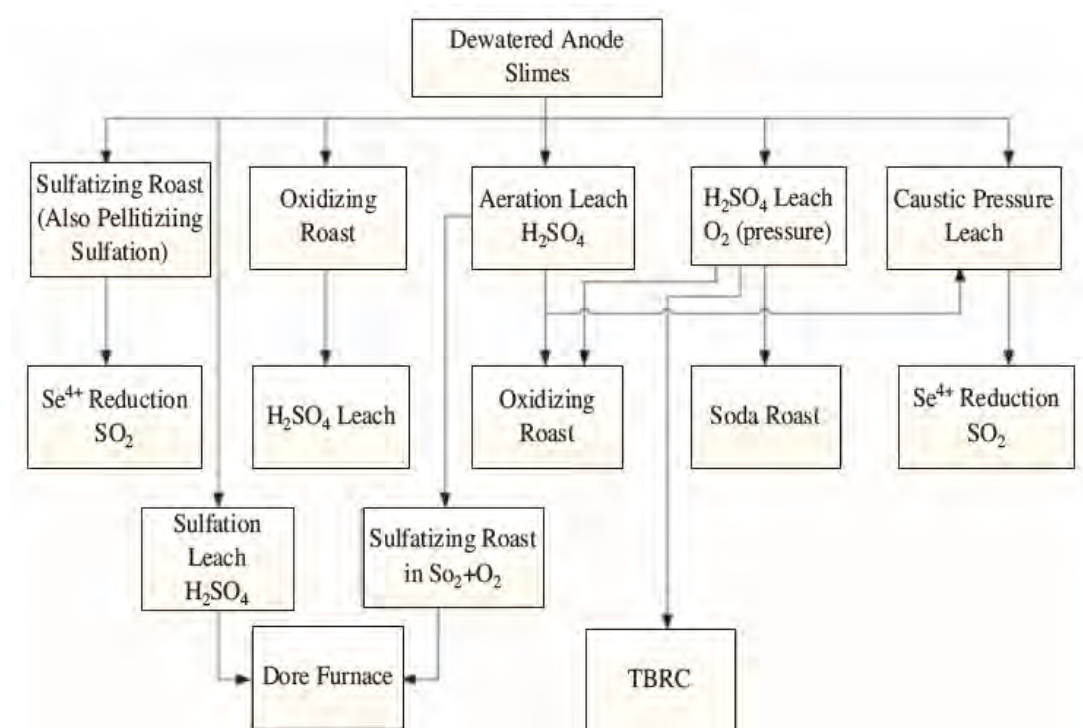


Abb. 102: Flussdiagramm verschiedener Methoden zur Behandlung des Kupferanodenschlammes³⁹⁹

397 [USGS2016], USGS, 2018, Minerals Yearbook 2016, Selenium and Tellurium, advanced release, p.65.1.

398 E. Riedel, Christoph Janiak: Anorganische Chemie. 8. Auflage. de Gruyter, 2011, ISBN 3-11-022566-2, S.458.

399 aus [WANG2016], p.598.

Die größte Selenquelle sind die Anodenschlämme, die beim elektrolytischen Raffinieren von Kupfer gebildet werden. Die Produktion beginnt normalerweise durch Oxidation, um Selendioxid bei einer geeigneten Temperatur zu erzeugen. Das Selendioxid wird dann in Wasser gelöst und die Lösung unter Bildung von Selensäure angesäuert (Oxidationsschritt). Selensäure wird mit Schwefeldioxid besprüht (Reduktionsschritt), um elementares Selen zu erzeugen. Verschiedene Ansätze zur Behandlung von Anodenschlämmen sind in Abb. 102 dargestellt.⁴⁰⁰

Beim Weg des sulfatierenden Röstens wird mit Schwefelsäure als Oxidationsmittel unter Luftzufuhr die Umwandlung von Selen oder Seleniden in ihre vierwertigen Oxide durchgeführt. Selen wird als Selendioxid verflüchtigt und gelangt in den Gaswäscher. Das Waschen der Abgase führt zu einer vollständigen Rückgewinnung des Selen aus dem Gasstrom. Dieses Verfahren ist in Abb. 103 dargestellt und reduziert die Selensäure zu elementarem Selen, jedoch mit dem Nachteil eines hohen Verbrauchs an Schwefelsäure aufwändiger Ausrüstung für den Prozess.⁴⁰¹ Die aus der Aufbereitung von Selen resultierenden Produktionsmengen sind in Abb. 104 und Abb. 105 zusammengestellt.

USGS berichtet, dass drei primäre elektrolytische Kupferraffinerien 2016 in den USA selen- und tellurhaltige Zwischenprodukte herstellten. Der größte Teil des enthaltenen Selen und Tel-

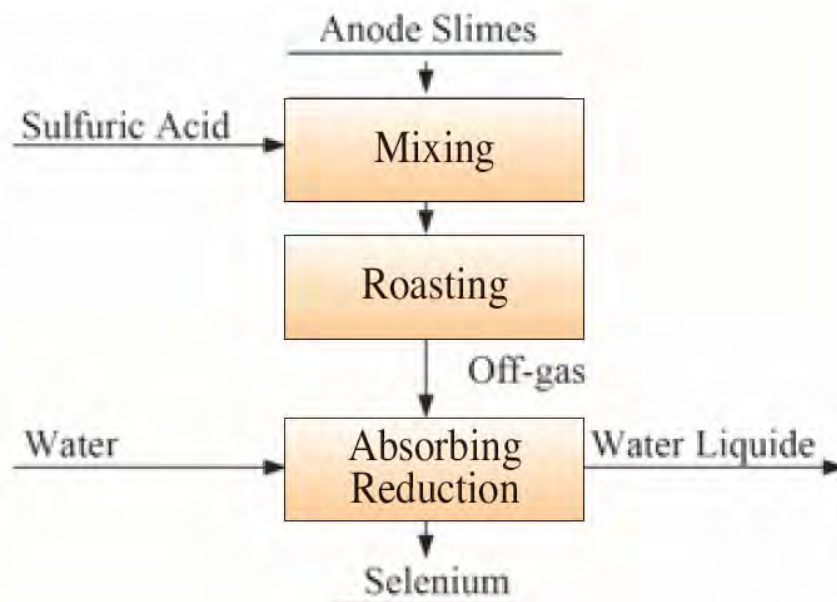


Abb. 103: Flussdiagramm für Behandlung des Kupferanodenschlammes durch sulfatierendes Rösten (Teiltrösten, sulphation roasting)⁴⁰²

400 [WANG2016], p.598.

401 [WANG2016], p.598.

402 aus: [WANG2016], p.598.

lurs der Anodenschlämme in den USA stammte aus Kupfererzen, die in Arizona und Utah abgebaut wurden.⁴⁰³ Die wichtigsten Unternehmen, die am stark fragmentierten **Weltmarkt** für Selen Bedeutung haben sind:

Hindalco Industries, Mitsubishi Materials, Corporation, Sumitomo Chemical, Umicore, Maruti Chemicals, LG Chemical, JX Nippon Mining & Metals, Nikko AM, Norilsk Nickel, UGMK, Kyshtymskiy copper plant, Jinchuan Group, Yunnan Copper, Changsha Zheyuan, Chemical, Hunan Jufa Technology, Guangzhou Fineton Nonferrous, Changsha Halin Chemical.⁴⁰⁴ Darüber hinaus haben die metallherstellenden Unternehmen Relevanz: Vital Materials, Southern Copper Corp, Retorte GmbH, Sumitomo Metal Mining, II-VI Incorporated, Shinko Chemical, LS-Nikko Copper, Uralelectromed, KGHM Corporate, Nippon Rare Metal, 5N Plus.⁴⁰⁵ Diese Auflistung ist nicht erschöpfend – auch für Unternehmungen wie z.B. American Elements, Able Target Limited, Salvi Chemical Industries Ltd., Aurubis AG, Behn Meyer Group finden sich ein Konnex zu Selen – und ist ein weiterer Indikator für die stark wettbewerbsorientierte Marktsituation.

Die Analysen gehen nach moderaten Jahren von einem robusten bis answingenden Selenmarkt in den kommenden Jahren aus, da die Selenanwendungen in zahlreichen Branchen zunehmen und zudem auch der Bedarf für Medizin und Landwirtschaft steigend ist. Ähnlich der Wachstumsrate von knapp 2% im Jahr 2020 wird auch das durchschnittliche Wachstum (CAGR) für die folgenden Jahre eingeschätzt. Die treibende Wachstumskraft mit einem Anteil von knapp 60% geht weiterhin von China aus,⁴⁰⁶ für die anderen Teile der Welt wird moderates Wachstum prognostiziert. Die starke Bedeutung des Asien-Pazifischen Raumes kann auch aus dem Sitz der oben genannten Unternehmungen qualitativ geschlossen werden. Insbesondere der Bedarf für metallurgischen Aktivitäten für den weiteren Infrastrukturausbau in Asien wird stark bleiben. Die chinesische Selenherstellung kann den landeseigenen Bedarf nicht decken und daher ist China trotz Ausweitung der Erzeugung weiterhin Nettoimporteur von Selen.⁴⁰⁷

Mittel- und langfristige Auswirkungen durch die COVID-19 Pandemie sind derzeit noch nicht abschätzbar. Es ist anzunehmen, dass die allgemeine Marktschwäche auch auf den Selenbedarf durchschlägt und daher muss abweichend von den bisherigen Analysen in den nächsten Jahren aufgrund der COVID-19-Pandemie mit einer Verlangsamung der Entwicklung gerechnet werden, wobei sich regional Unterschiede wahrscheinlich sind.⁴⁰⁸

403 [USGS2016], USGS, 2018, Minerals Yearbook 2016, Selenium and Tellurium, advanced release, p.65.1.

404 <https://soundonsoundfest.com/2020/03/13/global-selenium-market-consumption-growth-by-2026/> (16.01.2021)

405 <https://www.benzinga.com/content/15764789/worldwide-selenium-metal-market-global-countries-data-cagr-status-2020-2025-market-competition-by-pr> (16.01.2021)

406 <https://www.technavio.com/report/selenium-market-industry-analysis> (16.01.2021)

407 [USGS2020], p.65.3.

408 <https://www.alliedmarketresearch.com/selenium-market-A07292> (16.01.2021)

5.5. Selen-Reserven und -Ressourcen

1973 schätzte die USGS die weltweit identifizierten Selenressourcen auf fast 13 Millionen Tonnen, basierend auf dem Selengehalt der identifizierten Ressourcen von Kohle, Kupfer, Blei und Pyrit. Schätzungen aus Kupferressourcen wurden unter Verwendung eines Verhältnisses von 0,325 kg gewonnenem Selen pro Tonne produziertem Kupfer vorgenommen.⁴⁰⁹ Selen aus Bleierzen wurde basierend auf einem Durchschnitt von 10 ppm Selen in Bleiglanz und der Schätzung der identifizierten Bleiressourcen geschätzt. Schätzungen für Selen in Pyrit wurden unter der Annahme von 10 ppm Selen in Pyrit und Schätzungen der Schwefelressourcen in Pyrit vorgenommen. Die Selenressourcen in Kohle wurden anhand von Schätzungen für die Kohlenressourcen und einem Durchschnitt von 1,5 ppm Selen in Kohle geschätzt. Die geschätzten Selenressourcen in Kohlen sind zwar zwei Größenordnungen größer als die in den Kupferressourcen, jedoch können diese nicht einfach daraus gewonnen werden. Seit 2016 ist die Rückgewinnung von Selen aus Kohle technisch machbar, aber nicht wirtschaftlich.⁴¹⁰

Der Vollständigkeit wegen sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine **primäre native Selenlagerstätte** namens Yutangba⁴¹¹ bekannt ist, aus der Selen direkt gewonnen werden kann. Diese in der Provinz Hubei (China) gelegenen Lagerstätte hat jedoch keine wirtschaftliche Bedeutung, weshalb sie nicht weiter in dieser Arbeit betrachtet wird.⁴¹²

Im Gegensatz dazu basieren moderne Schätzungen der Selenreserven laut USGS (2017) nur auf Kupferreserven und enthalten keine Selenbestände, die in anderen Kupferressourcen oder in Blei-, Pyrit- und Kohlevorkommen enthalten ist. Der Anteil der Kupferreserven, der durch hydrometallurgische oder das SX/EW-Verfahren (Solvent Extraction-Electrowinning (SX-EW)) zurückgewonnen werden kann, wird von der Gesamtmenge abgezogen, da aus diesen Prozessen kein Selen zurückgewonnen werden kann. Die Schätzungen werden, wie bereits erwähnt, unter Verwendung eines Rückgewinnungsfaktors von 0,215 kg Selen pro Tonne primär zurückgewinnbarem elektrolytischem Kupfer (215 ppm) abgeleitet. In Kanada, wo der Selengehalt von Kupfererz höher ist, wird ein Faktor von 0,64 kg Selen pro Tonne Kupfer (640 ppm) eingesetzt. Das weltweite Selenangebot hat in den letzten Jahren aufgrund der gestiegenen Kupferproduktion stetig zugenommen.⁴¹³

409 Diese recht pauschale Se-Abschätzung erfolgte ohne Differenzierung nach Lagerstättentypus auf die Menge produzierten Kupfers. In Fortschreiten des Kupferaufbereitungsprozesses wird es naturgemäß immer schwieriger die Herkunft des Erzes zu bestimmen, da oft Kupferkonzentrate weltweit verschifft und zur Reinkupfererzeugung verwendet werden.

410 Abschnitt aus dem Englischen sinngemäß übernommen aus: USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q18

411 [FENG2004]

412 [ZHU2003], Zhu, Jianming et al., Occurrence of native selenium in Yutangba and its environmental implications, 2003.

413 ebd., USGS (2017)

Obwohl Selen in erster Linie aus der Weiterverarbeitung von Kupfererzen porphyrischer Lagerstätten anfällt, kommt Selen auch in anderen Lagerstättentypen des Kupfers vor. USGS meint, dass die höchsten Selenkonzentrationen wahrscheinlich in gang-kluft-förmige Vererzungen (Veins) auftreten, jedoch ist die Gesamtgewichtsmenge dieser Ablagerungen im Vergleich zu Porphyr-Kupferlagerstätten gering ist.⁴¹⁴ Während zweite Aussage bestätigt werden kann, ist nach Erkenntnissen aus dieser Arbeit die erste Aussage, wonach gang-kluft-förmige Vererzungen (Veins) einen höheren Selengehalt aufweisen würden, nicht zu verifizieren. Wie später ausgeführt, ist die Selenkonzentration im Gegenteil nur ein Drittel so hoch. Die höchsten Selenwerte treten in Sediment hosted deposits und VMS Lagerstätten auf, jedoch ist auch deren Gesamtmenge im Vergleich zu den Porphyries gering.

Die enge Verbindung von Selen mit Schwefel ist der Grund dafür, dass Kupfererze eine Ressource für Selen sind. Ein Ansatz zur Identifizierung neuer Selenressourcen wäre die Untersuchung dieser Selen-Schwefel-Beziehung in anderen Gesteinsarten. Mit organischem Kohlenstoff angereicherte Gesteine weisen wahrscheinlich hohe Selenkonzentrationen auf, wobei Selen Schwefel in diagenetischen Sulfidmineralien ersetzt hat.⁴¹⁵ Diese Ressourcen können Kohle (wo die Selenrückgewinnung technisch machbar, aber derzeit nicht wirtschaftlich ist), marine Phosphatvorkommen oder Ölschiefer sein.

USGS schätzt die Selenreserven wie in folgenden Tabellen (Abb. 104 und Abb. 112) angeführt. Die ausgewiesenen Selenreserven sind als jene Menge an Selen definiert, die zum Zeitpunkt der Schätzung wirtschaftlich gewonnen werden konnte. Die Selenreserven, einschließlich der in China, basieren auf dem Selengehalt der identifizierten Kupfervorkommen und enthalten keine Bleierze und Kohle. Andere Länder mit Reserven könnten Australien, Indien, Kasachstan, das Vereinigte Königreich und Simbabwe sein. Die Daten wurden auf nicht mehr als zwei signifikante Stellen gerundet und wurden das letzte Mal im Jahr 2014 aktualisiert.

414 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q21

415 ebd.

Bemerkenswert ist, dass, obwohl USGS selbst angibt, die Ressourcendaten nicht zu aktualisieren, regelmäßig Berichte über Selenreserven publiziert werden. Im letzten Bericht, der 2020 erschien (Abb. 104) ist bemerkenswert, dass die ausgewiesenen Selen-Reserven geschrumpft sind. Diese Reduktion ist jedoch praktisch ausschließlich darauf zurückzuführen, dass Chile aus der Tabelle gestrichen wurde. Im Land mit der weltweit größten Kupferproduktionsmenge gibt es nach dieser Darstellung offenbar kein Selen, das als Reserve klassifiziert werden kann. Diese Beobachtung, wie mit Vorratsdaten Statistiken beeinflusst werden (können), weist auf den dringenden Verbesserungsbedarf in der Transparenz und Vollständigkeit der Erhebungen hin.

	Refinery production ⁵		Reserves ⁶
	2018	2019 ^e	
United States	W	W	10,000
Belgium	200	200	—
Canada	61	60	6,000
China	930	930	26,000
Finland	100	100	—
Germany	300	300	—
Japan	768	770	—
Peru	45	45	13,000
Poland	76	70	3,000
Russia	150	150	20,000
Sweden	90	50	—
Turkey	50	50	—
Other countries ⁷	44	40	21,000
World total (rounded)	72,810	72,800	99,000

Abb. 104: Geschätzte weltweite Selenreserven (2019, USGS)⁴¹⁶ (Mengenangaben in metric tons)

416 [USGSSE2020a], p.147

Anmerkungen: “(5) Insofar as possible, data relate to refinery output only; thus, countries that produced selenium contained in blister copper, copper concentrates, copper ores, and (or) refinery residues, but did not recover refined selenium from these materials indigenously, were excluded to avoid double counting. (6) see Appendix C for resource and reserve definitions and information concerning data sources (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf> (p.195)). (7) excludes U.S. production. Australia, Iran, Kazakhstan, Mexico, the Philippines, and Uzbekistan are known to produce refined selenium, but output was not reported, and information was inadequate to make reliable production estimates. (e) estimated. E Net exporter. W Withheld to avoid disclosing company proprietary data. — = Zero.”

Country or locality ²	2013	2014	2015	2016	2017
Belgium ^e	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000
Canada ^{e,3}	138,000	142,000	156,000	175,000 ^r	49,000
China ^e	510,000	625,000	810,000	920,000	930,000
Finland	72,459	93,682	93,051 ^r	104,420 ^r	105,000 ^e
Germany ^e	250,000 ^r	250,000 ^r	250,000 ^r	300,000 ^r	300,000
India ^{e,4}	17,000	17,000	17,000	17,000	17,000
Japan	741,300	782,451	772,768	752,173 ^r	729,132
Peru ^e	42,000	40,000	40,000	45,000	45,000
Poland	80,200	89,800 ^r	87,000 ^r	87,000	88,000 ^e
Russia	114,160	130,810	135,000	150,000 ^r	150,000 ^e
Serbia	15,727 ^r	17,255 ^r	14,950 ^r	14,500 ^e	15,000 ^e
South Africa ⁵	15,000 ^e	12,000	13,000	15,000	15,000 ^e
Sweden ^e	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
Turkey	59,426 ^r	52,658 ^r	50,000 ^r	--	50,000 ^e
United States	W	W	W	W	W
Total	2,280,000 ^r	2,470,000 ^r	2,660,000 ^r	2,800,000 ^r	2,710,000

Abb. 105: Weltproduktion von Selen, aufgeschlüsselt nach Land oder Region, Mengenangaben in Kilogramm (2020, USGS)⁴¹⁷

Die ausgewiesene Produktionsmenge von Selen ist in den Jahren mit guter Weltkonjunktur etwas gestiegen, hat sich aber zuletzt stabilisiert (Abb. 105, Abb. 107). Anzumerken ist, dass in den ausgewiesenen Ländern, die Selen produzieren, nicht notwendiger Weise das Selen bergbaulich gefördert wird. Es gibt einen regen Handel mit Kupferkonzentraten, die oftmals signifikante Selen-Konzentrationen beinhalten können.

Die historische Selenerzeugung ab 1900 ist in Abb. 106 illustriert. Die erste Produktionsmengenspitze wurde in den 1990er Jahren erreicht. Die Menge hat sich dann auf einem niedrigeren Niveau für ein Jahrzehnt stabilisiert, ehe der Bedarf wieder aus den oben angeführten Gründen angestiegen ist.

417 [USGSSE2020], p.65.7

(Anmerkungen: “(e) Estimated. (r) Revised. (W) Withheld to avoid disclosing company proprietary data. -- = Zero.

(1) Table includes data available through July 31, 2018. All data are reported unless otherwise noted. Totals, U.S. data, and estimated data are rounded to three significant digits; may not add to totals shown.

(2) In addition to the countries and (or) localities listed, Australia, Iran, Kazakhstan, Mexico, the Philippines, and Uzbekistan may have produced refined selenium, but available information was inadequate to make reliable estimates of output. Australia is known to produce selenium in intermediate metallurgical products and has facilities to produce elemental selenium. In addition to having facilities for processing imported anode slimes for the recovery of selenium and precious metals, the United States has facilities for processing selenium scrap. (3)

Excludes selenium intermediates exported for refining.

(4) Production is based on fiscal year, with a starting date of April 1 of the year shown.

(5) Selenium contained within anode slimes”).

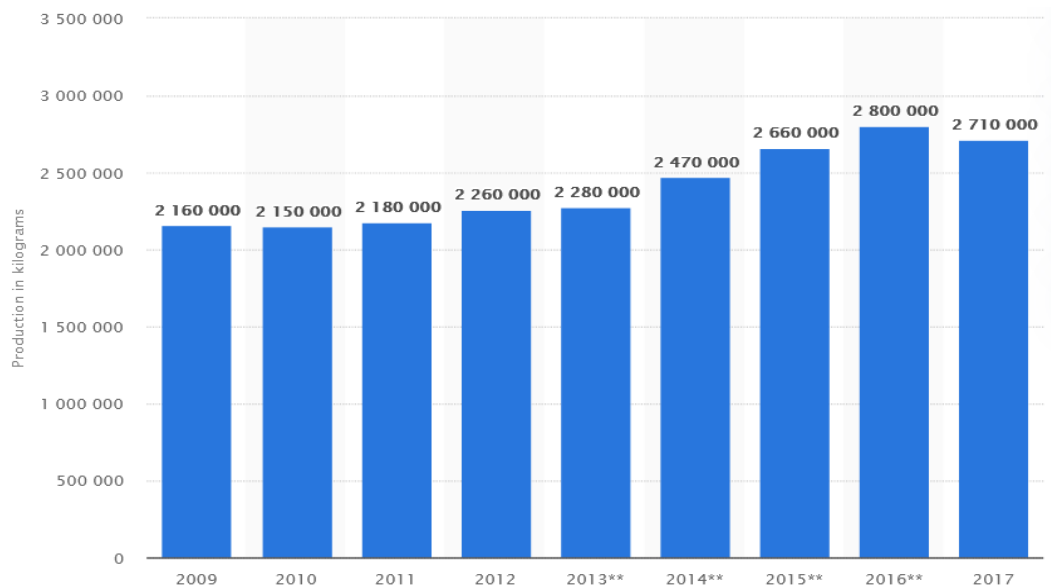


Abb. 107: Weltproduktion von Selen von 2009 bis 2017, Mengenangaben in Kilogramm (USGS)⁴¹⁹

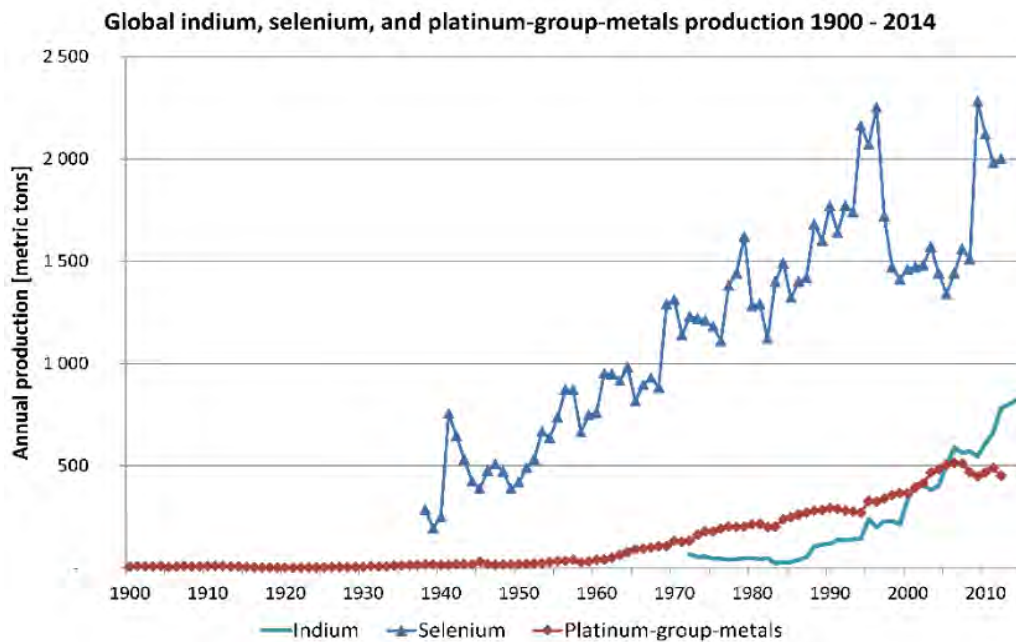


Abb. 106: Weltproduktion von Selen (blau) von 1900 bis 2014. Diese Daten enthalten nicht die Produktion in den USA⁴¹⁸

418 [GRAN2015], p.11828.

419 Statista 2021 nach Daten von USGS | <https://www.statista.com/statistics/600410/refinery-production-worldwide-of-selenium/> (17.01.2021)

* Kilograms of contained selenium

** Revised

Totals and estimated data have been rounded to no more than three significant digits. Insofar as possible, data relate to refinery output only; thus, countries that produced selenium contained in copper ores, copper concentrates, blister copper, and (or) refinery residues but did not recover refined selenium from these materials indigenously were excluded to avoid double counting. Includes data available through June 14, 2019.

5.6. Selenpreis

Der Selenpreis hat im Jahr 2004 plötzlich stark angezogen. Dieser Preissprung folgte in klassischer Weiser einer erhöhten Nachfrage, die nicht bedient werden konnte (Abb. 108). Der Preisschub wurde ausgelöst durch eine starke Nachfrage aus China in der zweiten Hälfte des Jahres 2003, welche die Bestände der Raffinerien geleert hat. Der Bedarf an Selen resultiert insbesondere aus der gestiegenen weltweiten Nachfrage nach Konstruktionsglas und elektronischen Produkten sowie zum Teil auch durch neue Anwendungen wie PV-Zellen.⁴²¹ Da diese hohe Nachfrage anhielt und auch nicht durch kurzfristige Angebote vom Spotmarkt bedient werden konnten, gingen Käufer zunehmend dazu über, langfristige Lieferverträge mit Raffinerien zu schließen.

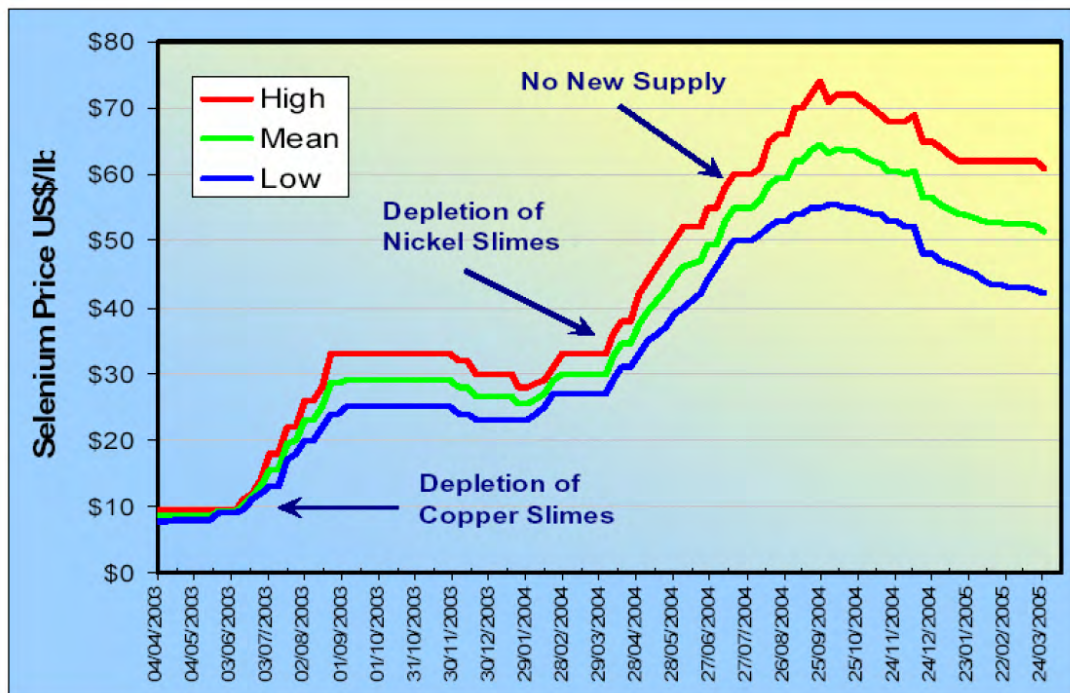


Abb. 108: Entwicklung des Selenpreises in den Jahren 2003 bis 2005⁴²⁰

420 aus: [FRAU2009], S.319.

421 [FRAU2009], S.319.

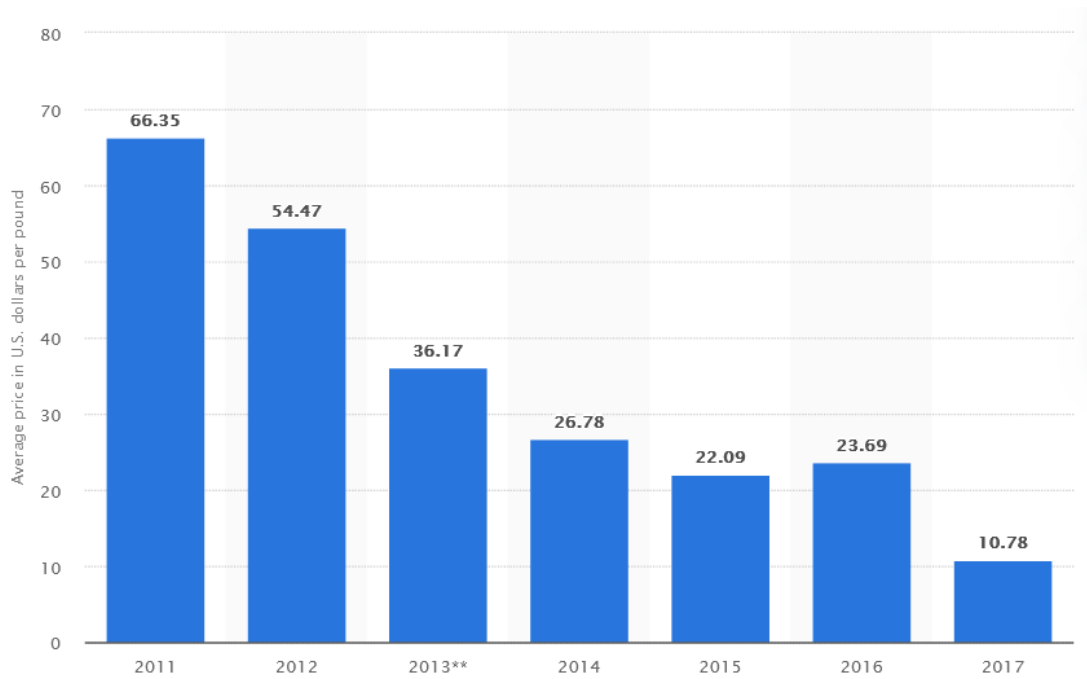


Abb. 109: Entwicklung des Selenpreises in den Jahren 2011 bis 2017⁴²²

Zwischenzeitlich hat sich die Preisentwicklung wieder beruhigt, da der Markt reagiert hat und die Produktionsmenge von Selen an die Nachfrage herangeführt hat (Abb. 109).

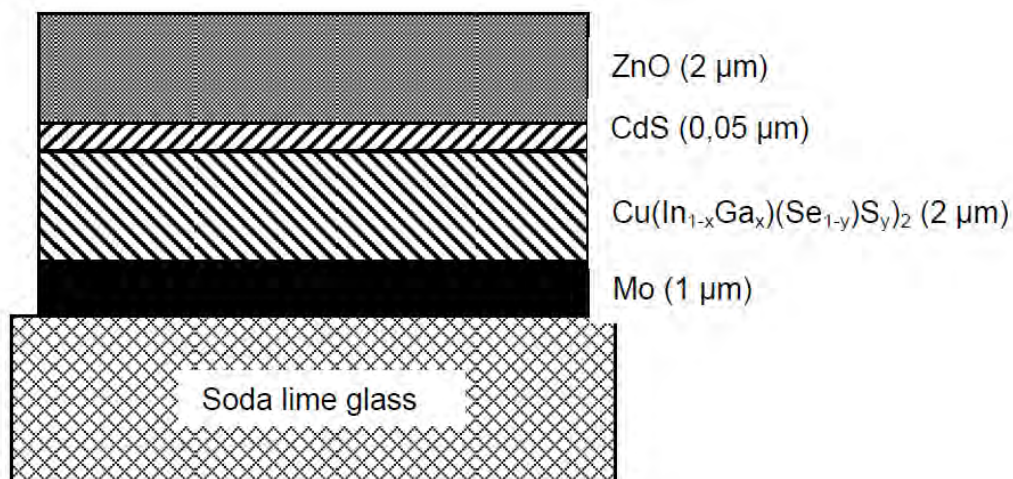


Abb. 110: Aufbau einer CIS-Solarzelle⁴²³

422 aus: [FRAU2009], S.319.

423 aus: [FRAU2009], S.142.

5.7. Zukünftiger Selenbedarf

Die durch CIS-Dünnschicht-Photovoltaik (PV)-Module nachgefragte Selenmenge wird bis 2030 ein zusätzlicher wichtiger Selen-Abnehmermarkt. Die Nutzung von Selen in der Glasherstellung wird in Zukunft auf demselben Niveau bestehen bleiben, während die Nutzung in Kopierern durch technische Entwicklungen auslaufen wird.

„Eine zukünftig zunehmende Anwendung wird in der Nutzung von Selen als Substitut von Blei zur Herstellung von leichter bearbeitbaren Metalllegierungen angenommen.“⁴²⁴ Blei wird durch weiter verschärfte Umweltregulierungen (insb. Chemikalienverordnung⁴²⁵) in EU-Europa immer stärker als Zulegerungsmetall verdrängt werden und somit Selen Platz machen.

„Die Nutzung von Selen in der Düngungskette Pflanze-Tier-Nahrung sowie als Nahrungsergänzungsmittel wird zunehmen. In Gleich- und Wechselrichtern in Hochspannungsanwendungen ist Selen bereits weitgehend durch hoch-reines Silizium substituiert worden. Dasselbe wird für die Zukunft auch für Gleich- und Wechselrichtern im Bereich von Niedrig- und Mittelspannung angenommen. Das freiwerdende Selen in konventionellen Anwendungen steht Zukunftstechnologien wie der Dünnschicht-PV zur Verfügung.“⁴²⁶

Der Bedarf von Selen für Dünnschicht-PV wird sich um den Faktor 165 bis 2030 gegenüber 2007 vergrößern und damit über 10% der Weltproduktion von Selen einnehmen.⁴²⁸ Bis 2040 wird

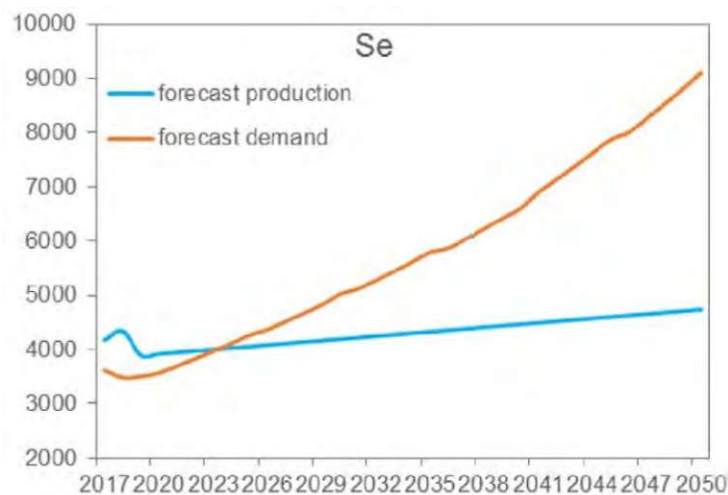


Abb. 11f: Prognose der Selenproduktion und Selenachfrage in Tonnen von 2017 bis 2050⁴²⁷

424 [FRAU2009], S.322.

425 bspw. Delegierte Richtlinie (EU) 2018/739 der Kommission vom 1. März 2018 zur Änderung — zwecks Anpassung an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt — des Anhangs III der Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich einer Ausnahme für Blei als Legierungselement in Stahl.

426 [FRAU2009], S.322.

427 aus: [ZHOU2020], p.6.

428 ebd.

eine weiter Steigerung um den Faktor 249 und bis 2050 um den Faktor 336 prognostiziert.⁴²⁹ Abb. 110 zeigt den schematischen Aufbau einer CIS-PV-Zelle. Es handelt sich dabei um photovoltaische Dünnschichtzellen auf Basis von Chalkopyrit Verbindungshalbleitern, die Selen beinhalten. Im Labormaßstab sind für CIS-Zellen Wirkungsgrade von ca. 15 % durchaus üblich, im kommerziellen Einsatz werden Werte von 11 % bis 13 % erreicht. Der spezifische Bedarf an Selen für die CIS-Zelle wird mit 29g/kWp angegeben.⁴³⁰

Selen wird insbesondere durch Investitionen in erneuerbare Energieerzeugung als Rohstoff mit Kritikalität eingestuft, da es grundsätzlich rar ist und andererseits den Nebenelementen weniger Aufmerksamkeit gewidmet wird. Die Nachfrage wird insbesondere von China getrieben werden und Untersuchungen zeigen, dass bereits 2024 Produktion und Selenbedarf nicht mehr im Gleichgewicht stehen werden.⁴³¹ Während im Zeitraum von 2017 bis 2050 die Produktion praktisch stagniert, steigt der Bedarf in diesem Zeitraum um das Zweieinhalbfache (Abb. 111).

5.8. Selengehalte in Erzlagerstätten

Selen fällt nahezu ausschließlich als Nebenprodukt bei der Weiterverarbeitung von Kupfererzen an. Lediglich in China ist ein eigenständiges (natives) Selenvorkommen bekannt (Yutangba⁴³²), welches offensichtlich an Cherts⁴³³ gebunden und sedimentär entstanden ist.⁴³⁴ Der größte Teil des industriellen Selenbedarfs wird als Nebenprodukt bei der elektrolytischen Kupferherstellung aus dem Anodenschlamm durch Abrösten gewonnen. Es besteht weder ein wirtschaftlicher Anreiz noch die Notwendigkeit, eigenständige Selen- Lagerstätten zu erforschen und zu definieren bzw. Selen isoliert zu explorieren. In der ehemaligen Sowjetunion überwog die strategische Bedeutung von Selen die wirtschaftliche Überlegung, so dass zahlreiche Untersuchungen zu Selen in Erzvorkommen durchgeführt wurden (Sindeeva 1964)⁴³⁵.

Bei der frühesten geochemischen Untersuchung von Selen wurde zunächst postuliert, dass der **Selengehalt** in Sulfiden einen direkten positiv-korrelierenden **Zusammenhang mit der (Bildungs-)Temperatur** hat. Das wurde jedoch später falsifiziert und über den Zusammenhang wird nach wie vor disputiert, wie in Kapitel 7.2 (S.248) näher ausgeführt ist.

429 [FRAU2009], S.145.

430 [FRAU2009], S.148.

431 [ZHOU2020], p.5.

432 [FENG2004]

433 Der englische Fachbegriff Chert steht für die gesamte Gruppe der sedimentär und diagenetisch entstandenen Kieselgesteine, und hat sich in der deutschsprachigen geologischen Literatur fachsprachlich etabliert. Die deutsche Übersetzung ‚Hornstein‘ ist nicht eindeutig.

434 [ZHU2003], Zhu, Jianming et al., Occurrence of native selenium in Yutangba and its environmental implications, 2003.

435 Sindeeva, N. D. (1964), Mineralogy and types of deposits of selenium and tellurium. New York, Wiley-Interscience.

Selenhaltige Sulfidablagerungen stellen die größte bekannte Selenkonzentration in der Erdkruste dar. Die angegebene durchschnittliche Selenkonzentration in magmatischen Sulfiden beträgt 0,02 Prozent (200ppm)⁴³⁷. In intrusiven Gesteinen ersetzt Selen Schwefel in Sulfidmineralien aufgrund ihrer ähnlichen Ionenradien. Es wurden Versuche unternommen, die Schätzung von Selen in Sulfiderzmineralien zu standardisieren. Der am häufigsten genannte Wert für den durchschnittlichen Selengehalt in magmatischen und damit verbundenen hydrothermalen Sulfiden ist eben 200ppm. Andererseits zitiert USGS (2017) für Porphyr-Kupfererz mit 0,5 % Kupferinhalt den Selengehalt mit 2,5 ppm oder ein Kupfer-Selen-Verhältnis von 2.000:1.⁴³⁸ Der US-Geological Survey und das frühere US Bureau of Mines haben ihre Schätzungen zur Selenproduktion lange Zeit auf Kupferproduktionszahlen mit einem Faktor von 0,0215 Prozent (215 ppm) gestützt. Da Kupfererz aus Kanada einen höheren Selengehalt aufweist, wird jedoch ein Faktor von 0,064 Prozent (640 ppm) verwendet, um das aus seinen Erzen gewonnene Selen abzuschätzen.⁴³⁹

Mehr als 80 Prozent der weltweiten Selenproduktion fallen als Nebenprodukt der Kupferraffination an. Es wird aus Anodenschlämmen gewonnen, die bei der elektrolytischen Herstellung von Kupfer entstehen. Das Blister-Kupfer (d.h. das teilweise raffinierte Kupfer, das beim Schmelzen gebildet wird), das als Anode in einer Elektrolysezelle dient, enthält durchschnittlich 0,05

Country	Reserves (metric tons)
United States	10.000
Canada	6.000
Chile	25.000
China	26.000
Peru	13.000
Poland	3.000
Russia	20.000
Other countries	21.000
World total	120.000

Abb. 112: Geschätzte weltweite Selenreserven (2014, USGS)⁴³⁶

436 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q21, table Q6.

(Anmerkung: “Reserves are defined as the amount of selenium that could be economically extracted at the time the estimate was made. Selenium reserves, including those in China, are based upon the selenium content of identified copper deposits and do not include lead ores and coal. Other countries with reserves may include Australia, India, Kazakhstan, the United Kingdom, and Zimbabwe.”)

437 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

438 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

439 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

Prozent Selen (entspricht 500 ppm und 0,5 kg Selen pro Tonne Kupfer).⁴⁴⁰ Durch Rückgewinnung können jedoch nur zwischen 200 ppm und 380 ppm (0,2 bis 0,38 kg Selen pro Tonne Kupfer) Selen separiert werden. Andere Methoden zur Raffination von Kupfer, wie das In-situ-Auslaugen, gewinnen kein Selen zurück. Daher hängt die weltweite Produktion von Selen von der Methode der Kupferraffination ab. Da die Selenproduktion hauptsächlich ein Nebenprodukt der Kupfererzeugung ist, sind Länder mit Selen-Ressourcen bzw. -Reserven solche mit Kupfer-Ressourcen und (oder) -Reserven, darunter Kanada, Chile, China, Kongo (Kinshasa), Mexiko, Peru, die Philippinen, Russland, die Vereinigten Staaten und Sambia.⁴⁴¹ Geringfügige Mengen an Selen werden auch aus Blei, Nickel und Zinkerzen gewonnen.

440 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q14

441 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q14

5.9. Umwelterwägungen, Nachhaltigkeit und Gesundheit

5.9.1. Selenquellen

Selen ist sowohl ein notwendiger Nährstoff als auch eine potenzielle Gefahr für die Ökosysteme der Erde und kommt sowohl auf natürliche Weise als auch aufgrund menschlicher Aktivitäten in der Umwelt vor. Durch den Abbau, die Verarbeitung, Verwendung und Entsorgung von Selen kann möglicherweise Selen an die Umwelt abgegeben werden und von biologischen Organismen aufgenommen werden. Umweltaspekte sind ein wesentlicher Bestandteil von Entscheidungen bezüglich der Gewinnung und Verwendung von Selen.⁴⁴²

5.9.1.1. Natürliche Quellen

Selen ist ein natürlich vorkommendes Element in der Erdkruste. Typischerweise wird Selen geochemisch mit Sedimentgesteinen assoziiert, insbesondere mit Eisenoxidformationen und organisch reichen Meeresschiefern. Vulkane sind die Hauptquelle für Selen in der oberen Erdkruste und Erdatmosphäre. Schätzungen zufolge wurden circa ein Kilogramm Selen pro Quadratmeter aufgrund vulkanischer Emissionen im Laufe der geologischen Zeit auf der Erdoberfläche abgelagert. Auch heute noch können aktive Vulkane je Eruptionen „mehrere zehn Kilogramm Selen“⁴⁴³ freisetzen.

Zu den natürlichen Freisetzungen von Selen gehören neben vulkanischer Aktivität, Lauffeuer, Verwitterung selenreicher Böden und Gesteine sowie die Freisetzung durch Pflanzen und Gewässer. Die globalen natürlichen Selenemissionen in die Atmosphäre liegen zwischen 660 und 19.000 Tonnen pro Jahr.⁴⁴⁴ Das auf der Erdoberfläche abgelagerte Selen zirkuliert zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre. Natürliche biologische Emissionen, die Selen zwischen Biosphäre und Atmosphäre zirkulieren lassen, machen etwa die Hälfte bis zwei Drittel des atmosphärischen Selens aus.⁴⁴⁵

Eine Untersuchung an der einzig bekannten, primären nativen Selenlagerstätte Yutangba in China hat Selen-Vergiftungserscheinungen in der Stadt Enshi, Provinz Hubei (China) offengelegt.⁴⁴⁶ Die starke Selen-Konzentration wird auf natürliche Prozesse zurückgeführt. In der Studie

442 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q21

443 ebd.

444 Government of Canada | <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/evaluating-existing-substances/screening-assessment-selenium.html#toc5> (12.09.2020)

445 ebd.

446 [ZHU2003], Zhu, Jianming et al., Occurrence of native selenium in Yutangba and its environmental implications, 2003.

wurden Beweise für die natürliche Verbreitung der krankheitserregenden Selen-Konzentration angeführt.

Die globale Selenverteilung wird hauptsächlich durch natürliche Quellen und Transportprozesse bestimmt und ist sehr ungleichmäßig. Anthropogene Faktoren können jedoch auch einen signifikanten Einfluss auf die Selenkonzentration haben.

5.9.1.2. Anthropogene Selenemissionen

Der Median der anthropogenen Selenemissionen in die Atmosphäre wird auf 6.300 Tonnen pro Jahr und der Median der natürlichen Selenemissionen in die Atmosphäre auf 9.300 Tonnen pro Jahr geschätzt. Ungefähr 40% des Selenflusses in der Atmosphäre sind anthropogenen Ursprungs, ein im Vergleich zu natürlichen Quellen nicht vernachlässigbarer Anteil.⁴⁴⁷

Anthropogene Selenemissionen in die Atmosphäre stammen hauptsächlich aus der Verbrennung von Kohle und Öl (50% bzw. 10%) und der Metallherstellung von Kupfer, Zink und Blei (20%, 4% bzw. 4%).⁴⁴⁸ Es ist seit einiger Zeit bekannt, dass die Verbrennung von Kohle eine Hauptquelle für Selen in der Umwelt darstellt, da Kohle die 5- bis 300-fache Menge an Selen im Vergleich zu anderen Mineralien enthalten kann. Filteranlagen bei Kohlekraftwerken können das flüchtige Selen nur sehr begrenzt zurückhalten, weshalb Selen in die Atmosphäre entweichen kann. In der bei der Verfeuerung von Kohle entstehende Flugasche, kann Selen 10- bis 25-mal konzentrierter - als im Ursprungsrohstoff vorhanden - vorkommen. Zusätzlich zur energetischen Nutzung von Kohle stammen anthropogene Selenemissionen aus Verbrennungsprozessen in der Keramik- und Glasindustrie.⁴⁴⁹

Eine wichtige natürliche Quelle für Selen in Oberflächen- und Grundwasser ist die Verwitterung von marinen Sedimenten. Ein bedeutender Teil des Grundgesteins im Westen der Vereinigten Staaten besteht aus marinen Sedimenten (insbesondere aus der Kreidezeit, jedoch mit einem Bereich von permischem bis paläogenen Alter). Diese Schiefer sind bekannt für ihren hohen Selengehalt, der sich aus den Vulkanausbrüchen ergibt, die während der Kreidezeit besonders zahlreich waren.⁴⁵⁰

5.9.2. Umweltverhalten von Selen

Die Art der chemischen Selen-Verbindung bestimmt das Verhalten in der Umwelt. Selen ist ein Metalloid, das unter speziellen Bedingungen löslich ist. Wie ausgeführt, sind die Hauptquellen von

447 ebd.

448 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q22

449 ebd.

450 ebd.

Selen in der Umwelt Emissionen aus Vulkanen, biogene Prozesse, kohlebasierte Stromerzeugung und Verwitterung von marinen Sedimenten. Die Mobilisierung von Selen aus diesen Quellen in Gewässer erfolgt unter oxidierenden, leicht alkalischen Witterungsbedingungen und erzeugt lösliches Selenat und Selenit.⁴⁵¹ Sobald sich Selen in wässriges Selenat und Selenit umgewandelt hat, ist es leicht mobil und kann von Organismen leicht aufgenommen werden.

Kohlevorkommen und damit verbundenes Abraumgestein sind häufige geologische Quellen für Umweltselen. Beispielsweise führt USGS aus, dass in der Appalachen-Region die Kohlebergbauunternehmen den Abraum in Bäche und Täler verlagert haben, um Zugang zu darunterliegenden Kohleflözen zu erhalten. Nach Angaben der US Environmental Protection Agency (EPA) wurden zwischen 1985 bis 2001 in den Bundesstaaten Kentucky, Tennessee, Virginia, und West Virginia schätzungsweise 1.165 Stromkilometer oder 1,2 Prozent der Flüsse mit Talfüllung bedeckt. Es wurde beobachtet, dass die Selenkonzentration in diesen betroffenen Appalachen-Flüssen, die Selenkonzentrationen um den Faktor 10 bis 100 deutlich erhöht waren. Solche Beispiele lassen die Umweltsensibilität erahnen, warum auch andere Bergbauunternehmungen möglichst großen „Abstand“ zu Selen halten und daher, wenn möglich, diesen Rohstoff nicht fördern oder ausweisen. Bedauerlich ist, dass dadurch auch die Datengrundlage und damit eine vertiefte Analyse des Rohstoffs Selen, seine Verfügbarkeit sowie technischen und ökologischen Auswirkungen darunter leiden.

5.9.3. Selenanwendung in der Medizin

Selen findet auch Anwendung in der Medizin. Beispielsweise spielt Nahrungsselen eine wichtige Rolle für die Gesundheit des Menschen. Selen steuert den Schilddrüsenhormonstoffwechsel, stärkt die antioxidativen Abwehrmechanismen und die Immunität. Unzureichende Selenversorgung des Körpers verursacht Wachstumsverzögerungen, beeinträchtigt den Knochenstoffwechsel und führen zu Anomalien der Schilddrüsenfunktion.⁴⁵² Menschen mit unzureichender Selenaufnahme leben in geografischen Gebieten mit niedrigem Selengehalt in den Böden. Ein Beispiel ist ein Nordost-Südwest-Gürtel in China und ein Gebiet im Südosten Sibiriens, in dem die Bevölkerung ein hohes Risiko hat, an Keshan (Erkrankung des Herzmuskels) oder der Kashin-Beck-Krankheit (eine chronisch degenerative Arthrose) zu erkranken. Beide Krankheiten werden durch **Selenmangel** verursacht.

Ein Ergebnis der modernen Forschung im Zusammenhang von Selen und der menschlichen Gesundheit ist ein besseres Verständnis der Rolle von Selen im Immunsystem. Es wurde festge-

451 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q26

452 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q29

stellt, dass die Herzschwäche der Keshan-Krankheit nicht nur auf einen Selenmangel zurückzuführen ist, sondern auch auf eine Infektion mit dem Coxsackie-Virus. Dieser ist anfangs nicht ansteckend (virulent), wird jedoch bei Personen mit Selenmangel virulent. Dieser Prozess ist nicht nur auf den Coxsackie-Virus beschränkt. Es wurde festgestellt, dass die frühen präklinischen Stadien der Infektion mit dem Humane Immundefizienz-Virus (HIV) durch eine signifikante Abnahme der Selenkonzentrationen im Blutplasma gekennzeichnet sind und dass das Ausmaß dieser Abnahme mit den Entwicklungsraten des erworbenen Immunschwächesyndroms (AIDS) zusammenhängt (Weltgesundheitsorganisation und Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen, 2004⁴⁵³ in: USGS (2017)⁴⁵⁴).

Selen ist essenziell für den menschlichen Organismus. Es hat eine wichtige Rolle als Antioxidans, Regulator der Schilddrüsenfunktion und viele andere Organe als Bestandteil von Strukturproteinen. Selen kann als erforderlicher Nahrungsnährstoff angesehen werden, aber es herrscht noch Unsicherheit bezüglich der richtigen Dosierung. Eine Überdosierung kann für die menschliche Gesundheit zu einer echten Bedrohung werden. Wenn schwere Krankheiten direkt mit Selen-Insuffizienz zusammenhängen, kann ein Selenüberschuss zu schweren Krankheiten führen.⁴⁵⁶

5.9.4. Selen in Lebensmitteln

Pflanzliche Lebensmittel sind in den meisten Ländern die Hauptnahrungsquellen für Selen, gefolgt von Fleisch und Meeresfrüchten. In allen Fällen wird der Selengehalt von Lebensmitteln aus Böden und Futtermitteln für Nutztiere gewonnen. Die Nahrungsaufnahme von Selen variiert aufgrund der Unterschiede in den lokalen Böden und Nahrungsmitteln etwas. In den entwickelten

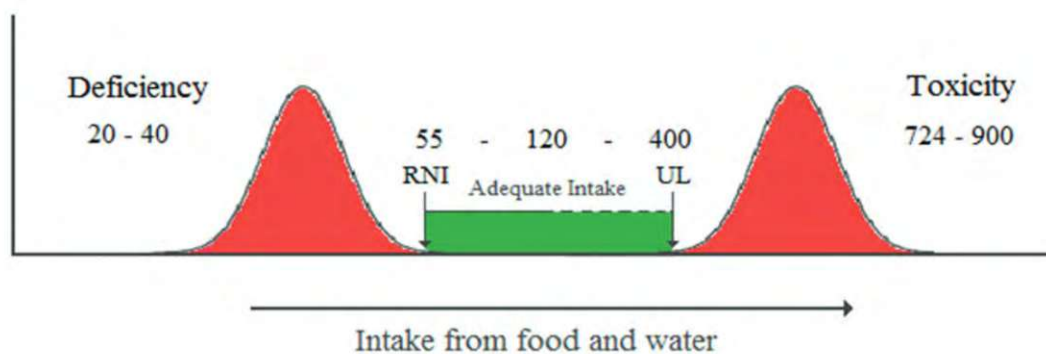


Abb. 113: Verteilung und Anforderungen zur Verhinderung von Se-Mangel und Toxizität (die Werte sind in $\mu\text{g Se pro Tag}$ angegeben. (RNI = empfohlene Nährstoffaufnahme, UL = Obergrenze)⁴⁵⁵

453 World Health Organization and Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2004, Selenium, chap. 10 of Vitamin and mineral requirements in human nutrition, 2d ed.: Geneva, Switzerland, World Health Organization, accessed March 8, 2016. | <http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/9241546123/en/>

454 [USGS2017]: Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q29.

455 aus: [PRED2015], Fig. 3, p.918.

456 [PRED2015], p.920.

Ländern sind die Menschen meist ausreichend mit Selen versorgt. Die durchschnittliche tägliche Selenaufnahme durch Nahrung bei Amerikanern über 2 Jahren beträgt 108,5 Mikrogramm.⁴⁵⁷

Selen ist ein komplexes Element, da es sowohl essenziell als auch toxisch ist. In einem engen Bereich unterstützt die Aufnahme die Gesundheit des Menschen. Organische und anorganische Formen von Selen haben ähnliche toxische Wirkungen. Wenn die Aufnahme von Selen durch Nahrung zu hoch ist, wird als häufigste Krankheit Selenose diagnostiziert. Die klinischen Symptome sind: Anomalien des Nervensystems, Fragilität und Verlust von Haaren und Nägeln, Übelkeit, fleckige Zähne, Nesselausschlag, Durchfall.⁴⁵⁸ Selen in hoher Konzentration kann tödlich sein. Die Obergrenze in Bezug auf die toxische Wirkung variiert mit der geografischen Region und den Bevölkerungsmerkmalen. Die empfohlene tägliche Aufnahme, die tolerierbare obere Nährstoffaufnahme, die unzureichende und toxische Aufnahme von Selen sind in Abb. 113 dargestellt.

5.9.5. Auswirkungen auf die Publizität von Selen-Ressourcen

Obwohl Selen ein lebensnotwendiger Rohstoff ist, wird oftmals seine Existenz nicht publik gemacht. Nach über einen längeren Zeitraum intensiver Beschäftigung des Autors mit der Recherche von Selenvorkommen und Selenkonzentrationen kann festgehalten werden, dass die unter bestimmten Bedingungen umweltgefährdende Wirkung von Selen starke mediale Präsenz hat und vor allem in Internetforen ein oft diskutiertes Thema ist. Zugleich finden sich in Geschäftsberichten meist (bis auf wenige Ausnahmen) kein Wort, das auf Selen hinweist.

Die Ausrichtung eines Unternehmens auf nachhaltige Geschäftsprozesse und die Implementierung verbindlicher CSR Richtlinien sind heute nicht nur für eine gute Unternehmens-PR nötig, sondern oft auch Grundlage für Zugang zu Finanzierungsinstrumenten und haben direkte Auswirkungen auf die Nachfrage der Rohstoffe. Da Endkonsumenten immer bewusster die Herkunft von Produktmaterialien und –bestandteilen hinterfragen, ist die transparente Offenlegung von Lieferketten in immer stärkeren Maßen für die Unternehmungen unabdingbar.⁴⁵⁹ Es daher nachvollziehbar, dass jedes Risiko mit Umweltfragen konfrontiert zu werden, proaktiv umgangen wird. Der oben beschriebene Nutzen von Selen für den menschlichen Organismus wiegt nicht die Gefahr von nachteiliger Publizität nicht auf, ebenso wenig wie die industrielle Bedeutung dieses Rohstoffs.

457 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q29.

458 [PRED2015], p.918.

459 Deutschland diskutiert aktuell über einen Gesetzesentwurf eines „Lieferkettengesetzes“, das auf Basis des französischen Sorgfaltspflichtgesetzes als weltweit weitreichendstem Gesetz zur Regelung unternehmerischer Sorgfaltspflichten 2017 eingeführt wurde, aufbaut. (www.bundestag.de (7.3.2021)).

6. Auswertung der Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten

Eine besondere Herausforderung dieser Arbeit bestand darin, ausreichend repräsentative Selenkonzentrations-Werte für jeden relevanten Kupferlagerstättentypus zu recherchieren. Im Kapitel 1.5 (S. 14) ist beschrieben, mit welcher Struktur und Informationen die Datenbank der Selenkonzentrationen für Kupferlagerstätten aufgebaut wurde. Die Datensätze wurden in einer relationalen Datenbank erfasst und methodisch ausgewertet.

In einem weiteren Schritt wurden die Daten auf Plausibilität und Repräsentativität geprüft. Dabei fiel auf, dass einige Se-Konzentrationen, die aus Messungen stammen, ungewöhnlich hoch (>10.000 ppm) waren. Es ist davon auszugehen, dass entweder ein Messfehler bei dieser Stichprobe vorlag oder eine nicht repräsentative Probe entnommen wurde. Ein Weglassen dieser Datensätze hätte eine unzulässige und willkürliche Beeinflussung der Stichprobe zur Folge. Ein Beibehalten hätte den Mittelwert durch diese Extremwerte so stark beeinflusst, dass der mit den statistischen Methoden berechnete Mittelwert keine sachliche Aussage mehr zulassen bzw. in die Irre geführt hätte. Nach unten (also bei geringen Se-Konzentrationswerten) konnten keine Ausreißer festgestellt werden bzw. wären diese nicht signifikant. Das Problem stellte sich somit nur mit zu hohen Se-Konzentrationswerten.

Zur Behebung dieses Stichprobenfehlers bietet sich die statistische Methode der Trimmung dieser Ausreißer an. Es wurden maximal 5% der Extremwerte auf den höchsten gemessenen, realistischen Wert gesetzt. Diese Ausreißer wurden in der Datenbank manuell auf den jeweiligen (meist zweithöchsten) Wert der Stichprobe, die einer Lagerstätte zuzuordnen ist, getrimmt. In wenigen Fällen mussten mehr als ein Datensatz pro Lagerstättentyp getrimmt werden, jedoch wurde niemals mehr als 5% der Stichprobenmenge getrimmt. Die restlichen Werte blieben unverändert. In der Literatur wird diese Prozedur auch „Winsorisierung“⁴⁶⁰ genannt.

Durch die folgenden angewendeten statistischen Methoden ist gesichert, dass durch diesen Eingriff die Aussagekraft der Ergebnisse qualitativ besser und jedenfalls das Ergebnis der verfügbaren Selen-Rohstoffmengen nicht „überschätzt“ wird. Mit anderen Worten ausgedrückt, wurde hier mit „kaufmännischer“ (bzw. statistischer) Vorsicht das verfügbare Datenmaterial behandelt.

460 Die meisten Literaturstellen verwenden „trimmen“ als Überbegriff. Einzelne Quellen erwähnen den Unterschied zwischen Trimmen (Trimming) und Winsorisieren (Winsorizing): http://wlm.userweb.mwn.de/Ilmes/ilm_t21.htm (07.03.2020)

6.1. Selenkonzentration in Kupferlagerstätten

6.1.1. Histogramm und statistische Verteilung

Die Selenkonzentration aller analysierten Kupferlagerstätten weist eine große Bandbreite an Werten auf. Folgendes normiertes Histogramm gibt einen Überblick der Verteilung der Selenkonzentration (Abb. 114). Auf der Abszisse ist die Selenkonzentration in jeweils gleichbreiten Säulen von 20ppm⁴⁶¹ Breite. Die Normierung auf 100% (oder 1) wurde für die Fläche des Säulendiagramms vorgenommen. Die Höhe der Säulen folgt der Normierung unter Berücksichtigung der Säulenbreite. Die Summe aller Produkte jeder Säule aus Höhe und Breite ergibt folglich 100%. Diese Form der Darstellung ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit und rasche optische Analyse. Die Höhen aller 51 Säulen aufsummiert ergibt den Wert 0,05. Da in dieser Darstellung für alle Säulen dieselbe Breite von 20 gewählt wurde, ergibt die Multiplikation der kumulierten Säulenhöhen mit der Säulenbreite exakt 1 oder 100%. Um zu einer anderen, auch üblichen Darstellung zu kommen, ist zur Normierung aller Höhen der Histogramm-Säulen auf 100%, lediglich der jeweilige Ordinatenwert mit dem Faktor 20 zu multiplizieren.

Diese Normierungsweise wurde für die folgende Häufigkeitsdarstellung gewählt. In diesem Histogramm wurden die Selenkonzentrationen in ppm zu praktisch zweckmäßigeren Gruppierungen zusammengefasst. Die Säulenbreite ist nicht proportional zur Kategoriengröße. Daher ist nicht die Fläche des Histogramms, sondern die Säulengrößen auf 100% normiert aufgetragen. Aus dieser Darstellung wird offenbar sich, dass es eine Häufung der Selenkonzentrationen zwischen 10 und 50 ppm gibt, die etwa 40% aller Messwerte ausmachen. Eine weitere auffällige Häufung ist bei Selenwerten zwischen 100 und 200 ppm gegeben. Diese Erkenntnis weist darauf hin, dass die einzelnen untersuchten Kupferlagerstätten signifikant unterschiedliche Selenkonzentrationen im Schnitt aufweisen. Diese Tatsache wird in den Analysen der einzelnen Lagerstättentypen diskutiert.

Die grafische Darstellung der Selenkonzentrationen lässt bereits vermuten, dass die Selenkonzentration nicht normalverteilt ist. Die Erfahrung mit natürlichen Prozessen lässt annehmen, dass gemutmaßt werden kann, dass die Selenkonzentrationen logarithmische normalverteilt sein könnten. Dieser Zusammenhang soll nun näher untersucht werden. Dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik⁴⁶² folgend, ist eine ausreichend große Stichprobe normalverteilt. Dies sagt freilich nichts über die Verteilung der der Stichprobe zugrunde liegenden Grundgesamtheit aus.

⁴⁶¹ ppm: parts per million.
⁴⁶² [HEDD2018], p.276ff.

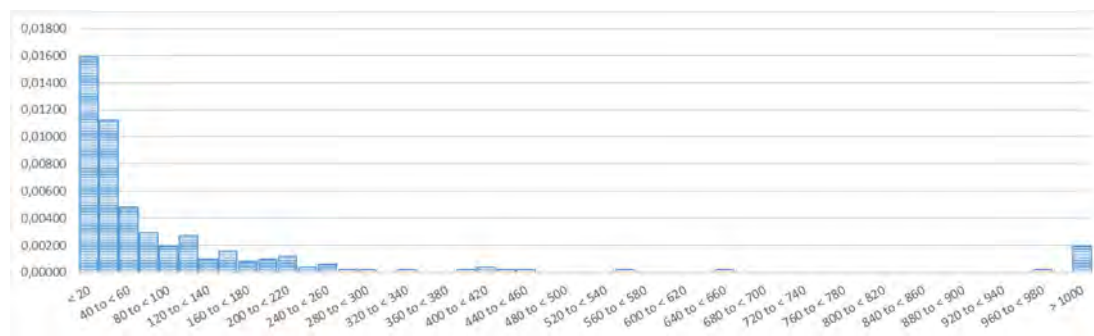


Abb. 114: Selenkonzentration in ppm von Kupferlagerstätten (linear)⁴⁶³

Durch einen Verteilungstest lässt sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit prüfen, welche Verteilung der Grundgesamtheit vorliegt. Man betrachtet daher ein statistisches Merkmal X , dessen Wahrscheinlichkeiten in der Grundgesamtheit unbekannt sind. Es wird, wie oben angeführt angenommen, dass eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit erwartet wird. Damit kann die Nullhypothese H_0 wie folgt formuliert werden: Das Merkmal X besitzt die Wahrscheinlichkeitsverteilung $F_0(x)$, wobei $F_0(x)$ eine logarithmische Normalverteilung ist.

„Die logarithmische Normalverteilung (kurz: Log-Normalverteilung) ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Variable, die nur positive Werte annehmen kann. Sie beschreibt die Verteilung einer Zufallsvariable, wenn die mit dem Logarithmus transformierte Zufallsvariable normalverteilt ist. Sie bewährt sich als Modell für viele Messgrößen in Naturwissenschaften, Medizin und Technik, beispielsweise für Energien, Konzentrationen, Längen und Mengenangaben. In Analogie zu einer normalverteilten Zufallsvariable, die nach dem zentralen Grenzwertsatz als Summe vieler verschiedener Zufallsvariablen aufgefasst werden kann, entsteht eine

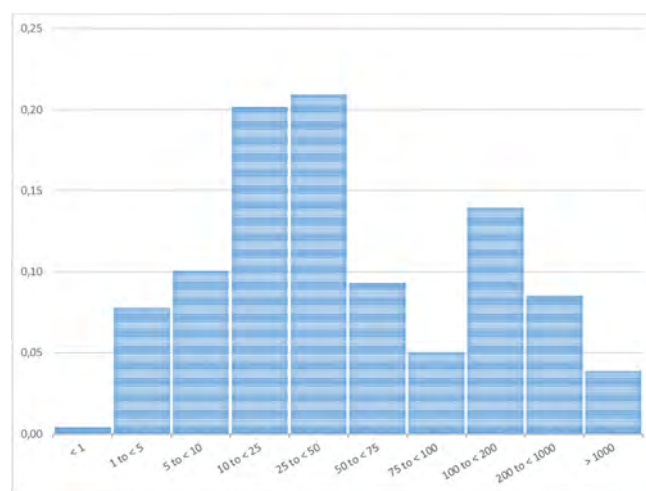


Abb. 115: Selenkonzentration in ppm von Kupferlagerstätten (gruppiert)⁴⁶⁴

463 eigene Auswertung. (Anmerkung: Der in der Abszisse in dieser in folgenden Abbildungen angeführte Ausdruck „to“ ist mit „bis“ zu übersetzen und zeigt die Bandbreite der jeweiligen Histogramm-Säule an.)

464 eigene Auswertung.

logarithmisch normalverteilte Zufallsvariable durch das Produkt vieler positiver Zufallsvariablen. Somit ist die Log-Normalverteilung die einfachste Verteilungsart für multiplikative Zufallsprozesse. Da multiplikative Gesetze in den Naturwissenschaften, der Ökonomie und der Technik eine größere Rolle spielen als additive, ist die Log-Normalverteilung in vielen Anwendungen diejenige, die der Theorie am besten entspricht -- der zweite Grund, weshalb sie vielfach anstelle der gewöhnlichen, additiven Normalverteilung verwendet werden sollte.⁴⁶⁵

Die in der Literatur dafür empfohlene statistische Methode ist der Chiquadrat-Anpassungstest.⁴⁶⁶ Die Nullhypothese H_0 , die es statistisch zu testen gilt, prüft, ob das Merkmal X eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $F_0(x)$ besitzt, wobei $F_0(x)$ eine logarithmische Normalverteilung ist. Es wird ein Konfidenzintervall von 95% für alle weiteren Prüfungen dieser Arbeit festgelegt (Ausnahmen werden transparent angeführt).

Die Vorgehensweise zur Durchführung des Chiquadrat-Anpassungstests erfordert etwas Aufwand, da die unabhängigen Beobachtungen des Merkmals in verschiedene Kategorien aufgeteilt werden müssen. Für den Test wurden $m = 11$ Kategorien von $j = (-1 \text{ bis } 9)$ festgelegt. In der ersten Kategorie (-1 bis 0) fallen Selenkonzentrationen unter 1 ppm, in die folgende Kategorie (0 bis 1) kleiner als 2,7 ppm, in die nächste (1 bis 2) kleiner als 7,3 ppm und weiter je Kategorie bis (gerundet) 20, 55, 150, 400, 1000, 3000, 8000 ppm und in der elften Kategorie Werte, die über 8000 ppm liegen. Die Kategorien wurden in Analogie zur logarithmischen Normalverteilung nach einer Exponentialfunktion (e^x) gewählt.

Auf jeden Se-Wert in der Datenbank wurde der natürliche Logarithmus $[\ln(x)]$ als Operator angewendet und der jeweiligen Kategorie zugeordnet und schließlich die Anzahl der Datensätze je Kategorie ermittelt. Die Anzahl der Beobachtungen in der jeweiligen Kategorie j ist die beobachtete Häufigkeit N_j .

Als Zwischenergebnis wird der arithmetische Mittelwert der logarithmierten Selenwerte gebildet. Für die in dieser Arbeit analysierten Daten errechnet sich der arithmetische Mittelwert zu 3,63 [$Mean\{\ln(\text{Se-Konzentration})\} = 3,63$]. Der Median derselben Datenbasis wurde mit 3,53 bestimmt [$Median\{\ln(\text{Se-Konzentration})\} = 3,53$]. Die Standardabweichung σ beträgt für die logarithmierten Werte $\sigma_{\ln} = 1,54$ und rückgerechnet $\sigma = 387,60$ ppm.

Zurückgerechnet nach der Gleichung

$$E(X) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

ergibt den Erwartungswert 123,96 ppm für den arithmetischen Mittelwert und den Erwartungswert 112,03 ppm für den Median. Diese geringe Abweichung von unter 10% von Median und

465 [HEDD2018], S.282ff.

466 [HEDD2018], p.479ff.

antithetischen Mittelwert beweist die Robustheit der getrimmten Datengrundlage. Sowohl die statistische Schiefe (0,29) als auch die statistische Kurtosis (0,51) zeigen mit einem Standardfehler von 0,1 eine erwartete symmetrische Verteilung.

Im nächsten Schritt wird abgeschätzt, wie viele Beobachtungen im Mittel in einer Kategorie liegen müssten, wenn die Grundgesamtheit X tatsächlich die hypothetische Verteilung besäße. Dazu berechnet man zunächst die Wahrscheinlichkeit p_{0j} , dass eine Ausprägung von X in die Kategorie j fällt. Die unter H_0 zu erwartende absolute Häufigkeit ist

$$n_{0j} = p_{0j} \cdot n$$

wobei n der Anzahl der unabhängigen Beobachtungen entspricht.

Die Prüfgröße für den Test der Nullhypothese H_0 wird berechnet als mittlere Abweichung des Erwartungswertes der idealen logarithmischen Normalverteilung mit den in den Kategorien zugeordneten logarithmierten Werten der Stichprobe nach der Formel:

$$\chi^2 = \sum_{j=-1}^{m-1} \frac{(N_j - n_{0j})^2}{n_{0j}}$$

In nachstehender Tabelle sind die Berechnungen aufgeführt. Um mit normierten Werten vergleichbar arbeiten zu können, werden die Klassen mit einer z-Transformation in der Spalte z standardisiert. Dabei wird der arithmetische Mittelwert vom Betrachtungswert abgezogen und danach der Quotient aus dieser Differenz mit der Standardabweichung gebildet.

Da die statistischen Größen bereits logarithmiert wurden, kann die Wahrscheinlichkeit φ aus der normierten Normalwahrscheinlichkeitsverteilung berechnet werden. In der Tabelle sind die kumulierten Wahrscheinlichkeiten angeführt und folglich ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert in eine der 11 Klassen fällt, bei der obersten Klasse 100%. In der nebenstehenden Spalte wird die Wahrscheinlichkeit P der jeweiligen Klasse ausgewiesen.

Gemäß oben angeführter Gleichung können die Einzelwerte χ_j^2 in jeweiligen Klassen berechnet werden. Die Summe ergibt $\chi^2 = 8,842$.

Klassen	Gruppen	z	φ_{NV}	P	χ_j^2
-1	lnA	-2,355	0,009	0,009	0,808
0	lnB	-1,707	0,044	0,035	0,000
1	lnC	-1,058	0,145	0,101	0,590
2	lnD	-0,409	0,341	0,196	0,858
3	lnE	0,239	0,595	0,253	1,418
4	lnF	0,888	0,813	0,218	0,191
5	lnG	1,536	0,938	0,125	0,161
6	lnH	2,185	0,986	0,048	0,440
7	lnJ	2,833	0,998	0,012	0,239

8	InK	3,482	0,999	0,002	4,078
9	InL	4,131	1,000	0,000	0,060
Summe			1,000	1,000	8,842

Die grafische Gegenüberstellung der normierten Häufigkeiten der Messwerte (orange) in der Verteilungsfunktion zur theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung (blau) einer logarithmischen Normalverteilung lässt bereits eine gute Übereinstimmung vermuten (Abb. 116).

Um die Hypothesenprüfung statistisch vollständig abzuschließen, muss der χ^2 Wert errechnet werden. Bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ (95% Konfidenzintervall) wird H_0 abgelehnt, wenn $X^2 > \chi^2_{(1-\alpha; m-1)}$ gilt, also wenn der aus der Stichprobe erhaltene Wert der Prüfgröße größer als das $(1-\alpha)$ -Quantil der χ^2 -Verteilung mit $(m-1)$ Freiheitsgraden ist.

Dazu ist die Festlegung der Freiheitsgrade dieser Prüfung nötig. Der Idealfall, dass bei der Verteilungshypothese die Parameter der Verteilung bekannt sind, kann hier nicht zur Anwendung kommen. Daher müssen die Freiheitsgrade aus der Stichprobe geschätzt werden. Bei der Chi-Quadrat-Verteilung geht pro geschätzte Parameter ein Freiheitsgrad verloren.⁴⁶⁸ In der statisti-

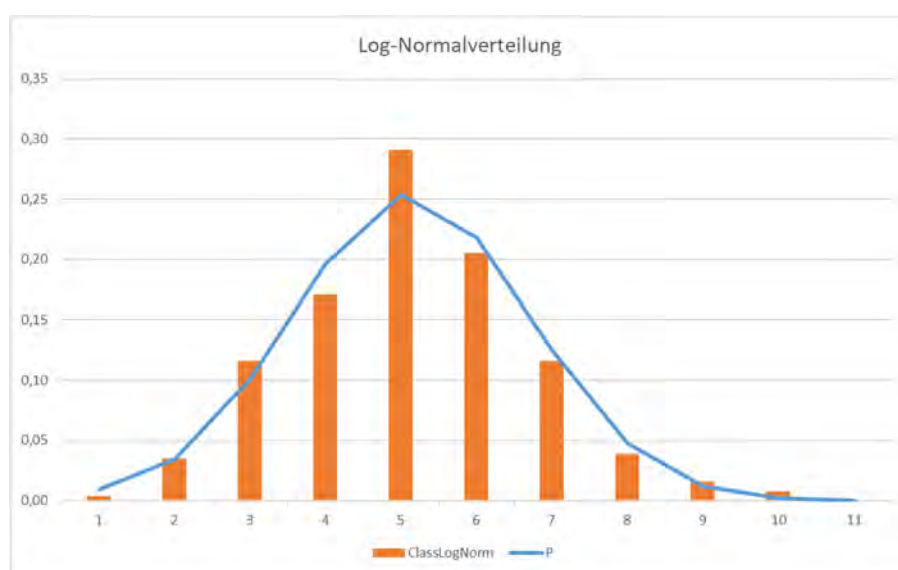


Abb. 116: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁶⁷

schen Analyse wurden bereits mit dem Mittelwert und der Varianz (Standardabweichung) zwei Parameter geschätzt. Die Anzahl der Freiheitsgrade m ergibt sich sohin aus den 11 Klassen und den beiden bereits geschätzten Parametern zu $m = 11 - 2 = 9$.

Die χ^2 -Quantile können aus Tabellen oder Funktionen⁴⁶⁹ einer Tabellenkalkulations-Software bestimmt werden. Der Wert $\chi^2_{(1-\alpha; m-1)}$ wird für die Parameter $\alpha = 0,05$ (5%) und

⁴⁶⁷ eigene Auswertung.

⁴⁶⁸ [HEDD2018], p.479ff

⁴⁶⁹ Für diese Berechnung hat der Autor in Microsoft Excel die Funktion [=CHIQU.INV.RE(100%- α ; $m - 1$)] angewendet.

$(m - 1) = 9 - 1 = 8$ errechnet zu $\chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$. Da $X^2 = 8,84 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann die Nullhypothese H_0 mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% nicht abgelehnt werden. Somit ist mit der angeführten Wahrscheinlichkeit bewiesen, dass eine logarithmische Normalverteilung der folgenden Berechnungen zugrunde gelegt werden kann.

Der Vollständigkeit halber wurden für alle Stichprobenumfänge je Lagerstättentyp auch auf Normalverteilung der Grundgesamtheit geprüft und somit $H_{0(a)}$ formuliert: Das Merkmal X_a besitzt die Wahrscheinlichkeitsverteilung $F_{0(a)}(x)$, wobei $F_{0(a)}(x)$ eine Normalverteilung ist. Erwartungsgemäß musste diese Hypothese selbst dann verworfen werden, wenn das Konfidenzintervall sehr großzügig auf unter 70% gesetzt wurde. Es kann daher für die weitere praktische Analyse davon ausgegangen werden, dass die Grundgesamtheit jedenfalls nicht normalverteilt ist, und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit unterstellt werden kann.

6.1.2. Quantile-Quantile Plot (QQ-Plot)

Zur weiteren Absicherung der im vorherigen Kapitel vorgenommenen statistischen Testungen wurde ein optisches Prüfverfahren durchgeführt. Das Quantil-Quantil-Diagramm, kurz QQ-Diagramm (englisch quantile-quantile plot, kurz QQ-Plot), bietet die graphische Möglichkeit zur Entscheidung, ob zwei Messwertreihen aus Grundgesamtheiten mit der gleichen Verteilung stammen.⁴⁷⁰ Dazu werden die Quantile der ersten Messreihe gegen die Quantile der zweiten Reihe im Koordinatensystem aufgezeichnet. Zusätzlich wird dann die Winkelhalbierende (45°-Linie) eingezeichnet. „Für den Fall, dass beide Messwertreihen aus Grundgesamtheiten mit gleicher Verteilung stammen, sollten die Punkte angenähert entlang dieser Referenzlinie liegen. Je ausgeprägter die Abweichung von der Referenzlinie ist, desto stärker ist auch die Evidenz für den Schluss, dass die beiden Messwertreihen nicht die gleiche Verteilung aufweisen.“⁴⁷¹

Diese Technik hat den großen Vorteil, dass einerseits die Anzahl der Beobachtungen in den zu vergleichenden Reihen nicht gleich sein muss. Andererseits besteht der Vorzug auch darin, dass verschiedene Aspekte der Verteilung, „insbesondere Verschiebungen in der Lage und Steilheit, Unterschiede in der Symmetrie und das Vorliegen von Ausreißern oder Extremwerten“,⁴⁷² in einem Bild beurteilt werden können.

Die formale Definition⁴⁷³ des QQ-Plots lautet, dass zu jeder der n Beobachtungen x_i ein empirischer Unterschreitungsanteil $\hat{p}_i = F_{\text{empirisch}}(x_i)$ bestimmt wird. Mit Hilfe der inversen Verteilungsfunktion (oder Quantilfunktion) der theoretischen Verteilung wird das Quantil

470 [HEDD2018], p.475f.

471 [HEDD2018], p.475.

472 [HEDD2018], p.476.

473 [HEDD2018], p.476.

$y_i = G_{\text{theoretisch}}(p_i)$ bestimmt, wobei mit G die inverse Funktion von F bezeichnet ist ($G = F^{-1}$). Geplottet wird x_i versus y_i .

Die Berechnung des Unterschreitungsanteils p_i erfolgt mit Hilfe des Rangs $R(x_i)$ der Beobachtung x_i . Für die Bestimmung des Unterschreitungsanteils p_i sind in der Literatur verschiedene Möglichkeiten angeführt. Die gebräuchlichste Berechnungsart ist die Rankit-Methode⁴⁷⁴ mit der p_i wie folgt berechnet wird.

$$p_i = \frac{R(x_i) - 1/2}{n}$$

Zur Berechnung des QQ-Diagramms ist es vorerst nötig, die Werte der Stichprobe aufsteigend zu sortieren und ihnen einen Rang $R(x_i)$ beginnend mit $i = 1$ bis n zuzuweisen, wobei mit n wieder die Größe der Stichprobe und mit x der Messwert bezeichnet wird. Daraus kann nach obenstehender Gleichung einfach der Unterschreitungsanteils p_i je Messwert bestimmt werden. Jedem Unterschreitungsanteils p_i kann die Wahrscheinlichkeit gemäß der Standardnormalverteilung durch Anwendung der inversen Normalverteilungsfunktion zugeordnet werden.

Um die gemessenen Selenwerte vergleichen zu können, ist ebenfalls eine Normierung nötig. Dazu wird auf die aufsteigend sortierten Messwerte einzeln die z -Transformation angewendet. Die Selenmesswerte liegen in den gemessenen Größen x_i [in ppm] in der Datenbank vor. Zusätzlich werden diese Selenwerte auch logarithmiert und als y_i in der Rechen-Datenbank hinterlegt. Auf jeden Selenmesswert ist sohin der natürliche Logarithmus als Operator nach $y_i = \ln(x_i)$ angewendet worden. Beide Selenwertereihen sind zur besseren Vergleichbarkeit mittels z -Transformation unter Anwendung der bereits oben berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen für $i = 1$ bis n zu normieren.

In nachstehender Grafik (QQ-Diagramm, Abb. 117) sind die einzelnen Selenmesswerte als direkter Messwert (blau) und als logarithmierter Wert (grau) versus die theoretische Wahrscheinlichkeit einer Normalverteilung aufgezeichnet.

Das QQ-Diagramm zeigt augenscheinlich, dass die logarithmische Darstellung der Messwertreihen der Selenkonzentrationen im überwiegenden Maß auf der Winkelhalbierenden liegen. Kritisch müssen die Ausreißer im oberen Quadranten betrachtet werden. Diese Beobachtung findet Übereinstimmung mit der Feststellung von Messwertausreißern, die im vorhergehenden Kapitel diskutiert wurden. Naturgemäß wäre eine größere Anzahl an Messwerten mit verbesserter Qualität der Konzentrationswerte wünschenswert und kann für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen angeregt werden. In jedem Fall lässt sich auch optisch mit Betrachtung der baulen Punktreihe eine normalverteilte Grundgesamtheit ausschließen. Diese grafische Überprüfung bestätigt den bereits arithmetisch durchgeführten statistischen Verteilungstest des vorherigen Abschnitts.

474 [HEDD2018], p.481.

Die Trendlinie der grau geplotteten logarithmierten Messwerte liegt exakt auf der 45°-Linie und macht auch optisch die logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit offensichtlich.

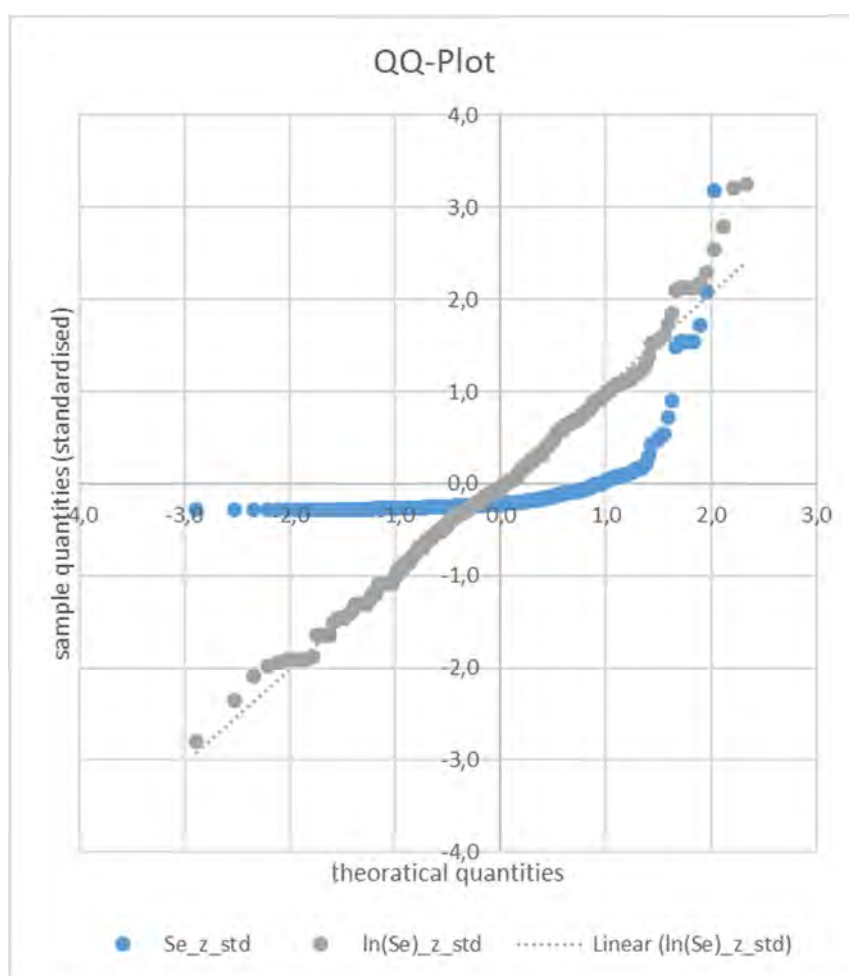


Abb. 117: Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Plot) der Selenmessreihen in standardisierter Transformation (blau) und die logarithmierten Werte (grau) der Messreihen⁴⁷⁵

475 eigene Auswertung.

6.1.3. Ergebnis der statistischen Auswertungen

Der Vollständigkeit halber, aber auch der besseren Übersicht wegen, werden die errechneten statistischen Parameter der Selenmesswertreihe übersichtlich zusammengestellt.

Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	155,80	ppm
	Median	34,13	ppm
	Standardabweichung	548,36	ppm
	Minimalwert	0,50	ppm
	Maximalwert	5680,71	ppm
	Schiefe	8	linksschief
	Kurtosis	73	schmalgipflig
	Standardfehler	34,14	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	3,63	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	123,96	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	3,53	
	Erwartungswert aus	112,03	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,54	
	Erwartungswert aus	387,60	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	-0,69	
	Maximalwert	8,64	
	Schiefe	0,29	symmetrisch
	Kurtosis	0,51	symmetrisch
Standardfehler	0,10		

Im Folgenden werden für die einzelnen betrachteten Arten der Kupferlagerstätten die Selenwerte analysiert. Der mathematische Weg wurde im vorhergehenden Kapitel ausführlich abgeleitet und anhand der gesamten Messreihe erläutert. Es werden daher nachstehend nur mehr die Berechnungsergebnisse je Lagerstättentyp angeführt.

6.2. Selenkonzentration in orthomagmatischen Kupferlagerstätten

Orthomagmatischen Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt relativ geringe Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁴⁷⁸

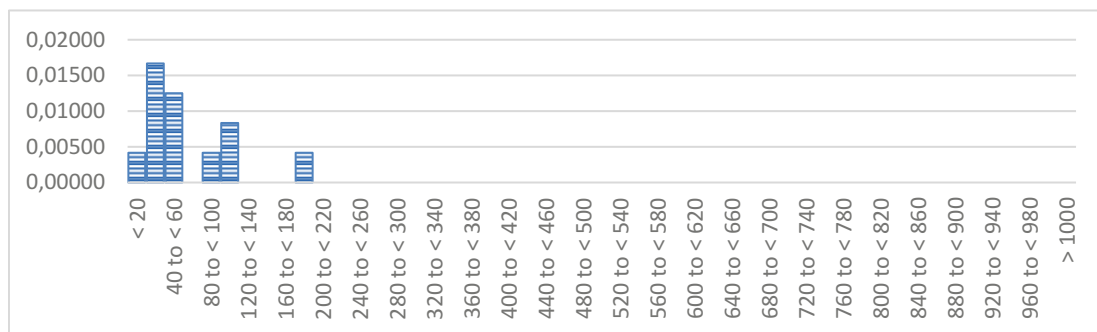


Abb. 118: Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten (linear)⁴⁷⁶

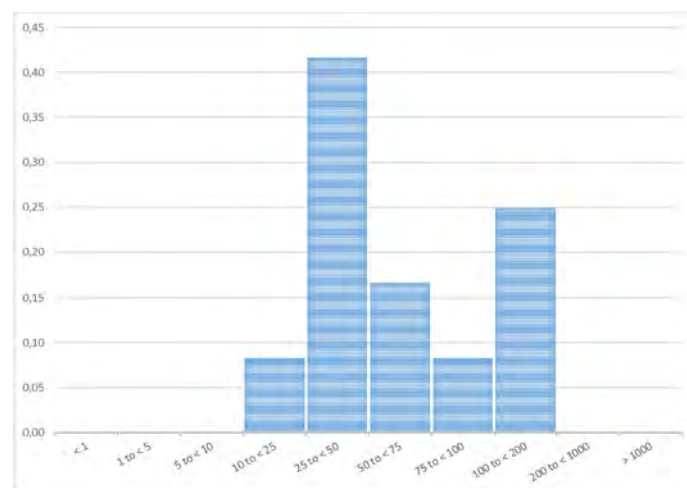


Abb. 119: Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten (gruppiert)⁴⁷⁷

476 eigene Auswertung.

477 eigene Auswertung.

478 ppm: parts per million.

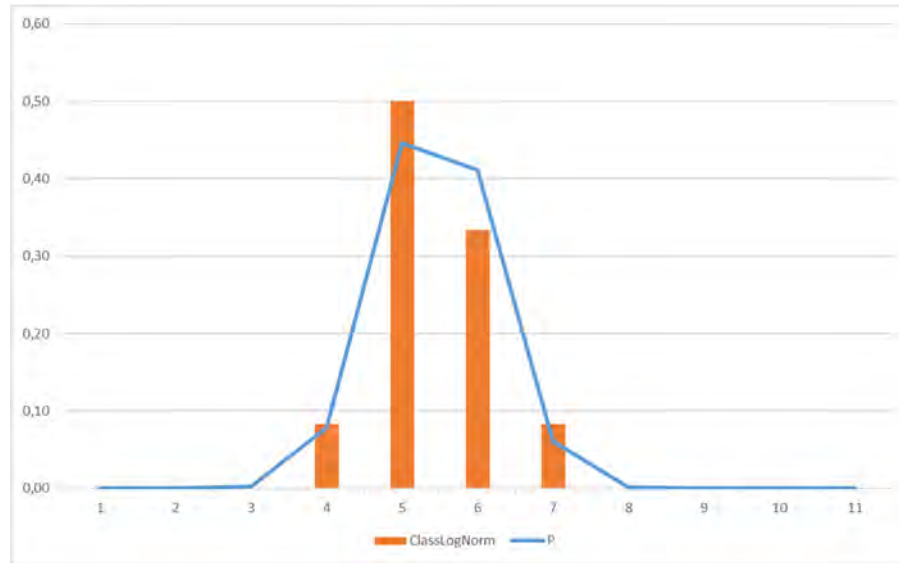


Abb. 120: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁷⁹

Da $X^2 = 0,40 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁴⁷⁹ eigene Auswertung.

Selenkonzentration orthomagmatischer Kupferlagerstätten			
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	64,95	ppm
	Median	46,50	ppm
	Standardabweichung	47,77	ppm
	Minimalwert	17	ppm
	Maximalwert	182	ppm
	Schiefe	2	linksschief
	Kurtosis	2	schmalgipflig
	Standardfehler	13,79	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	3,96	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	65,84	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	3,83	
	Erwartungswert aus	58,05	ppm
	Median		
	Standardabweichung	0,68	
	Erwartungswert aus	50,56	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	2,83	
	Maximalwert	5,20	
	Schiefe	0,31	symmetrisch
	Kurtosis	-0,42	symmetrisch
Standardfehler	0,20		

6.3. Selenkonzentration in porphyrischen Kupferlagerstätten

Porphyrische Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt mittlere bis hohe Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁴⁸⁰

Das lineare Histogramm macht Ausreißer mit hohen Selenkonzentrationen sichtbar. Diese Werte fallen jedoch bei den Auswertungen durch die logarithmische Normalverteilung nicht wesentlich ins Gewicht.

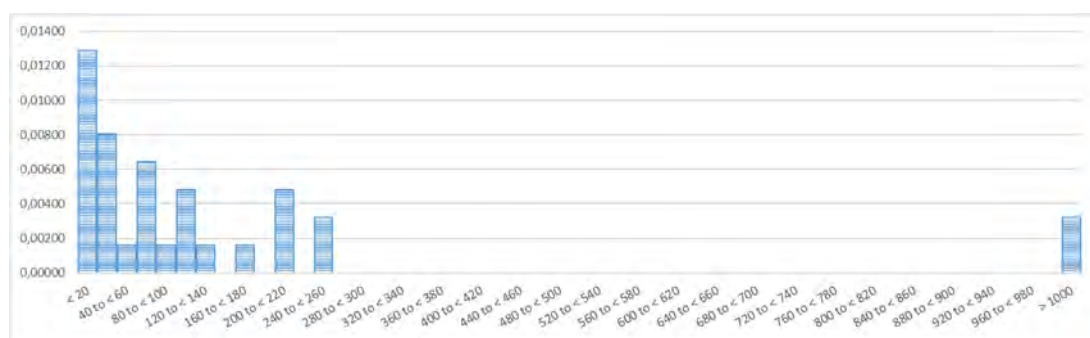


Abb. 121: Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten (linear)⁴⁸¹

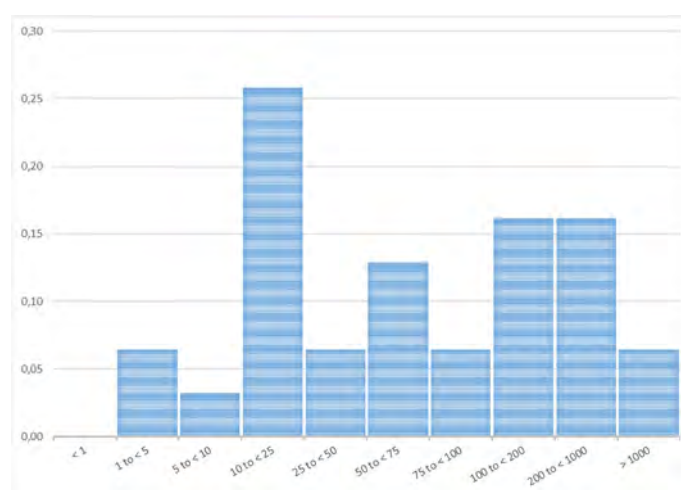


Abb. 122: Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten (gruppiert)⁴⁸²

480 ppm: parts per million.

481 eigene Auswertung.

482 eigene Auswertung.

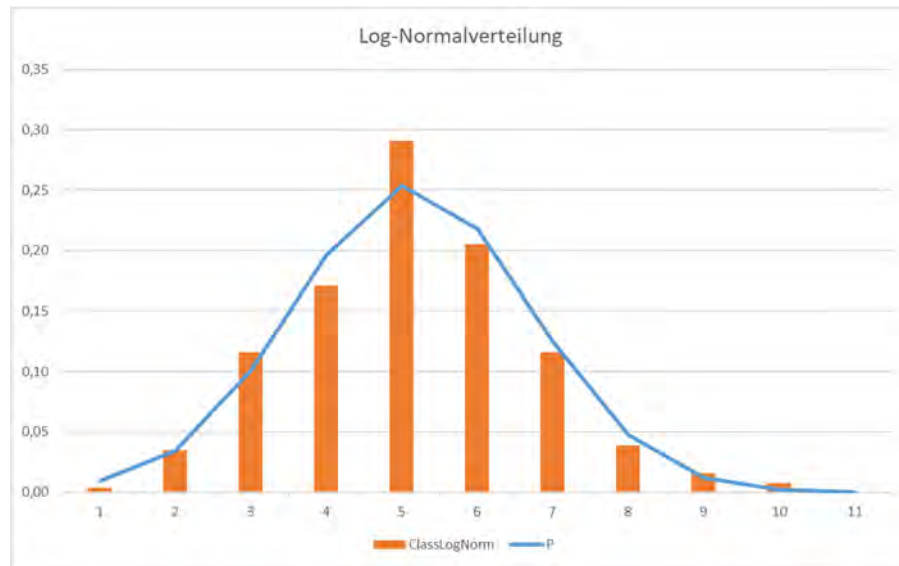


Abb. 123: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁸³

Da $X^2 = 1,95 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁴⁸³ eigene Auswertung.

Selenkonzentration porphyrischer Kupferlagerstätten			
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	141,10	ppm
	Median	60,00	ppm
	Standardabweichung	241,76	ppm
	Minimalwert	1,80	ppm
	Maximalwert	1000,0	ppm
	Schiefe	3	linksschief
	Kurtosis	10	schmalgipflig
	Standardfehler	43,42	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	3,96	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	164,11	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	4,09	
	Erwartungswert aus	186,82	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,51	
	Erwartungswert aus	483,91	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	0,59	
	Maximalwert	6,91	
	Schiefe	-0,13	symmetrisch
	Kurtosis	-0,23	symmetrisch
Standardfehler	0,27		

6.4. Selenkonzentrationen IOCG Kupferlagerstätten

IOCG Lagerstätten sind relativ neu als eigenständiger Lagerstättentyp anerkannt. Es ist daher wenig überraschend, dass es nur vergleichsweise wenige Literaturquellen und Angaben zu Selenkonzentrationen im Erz gibt. Die nachfolgend gezeigte statistische Auswertung hat folglich nur Anschauungscharakter und kann mangels ausreichend großer Stichprobe nicht als statistisch robust eingestuft werden. Gemäß den vorliegenden Angaben gibt es Indizien, dass IOCG Lagerstätten vergleichsweise nur sehr geringe Selenkonzentrationen aufweisen, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁴⁸⁶ Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die geringen Selenwerte einerseits aufgrund der kleinen verfügbaren Stichprobe zufällig ausgewiesen werden oder die gemessenen Selenkonzentrationen nicht repräsentativ für den Durchschnitt des Lagerstättentyps sind.

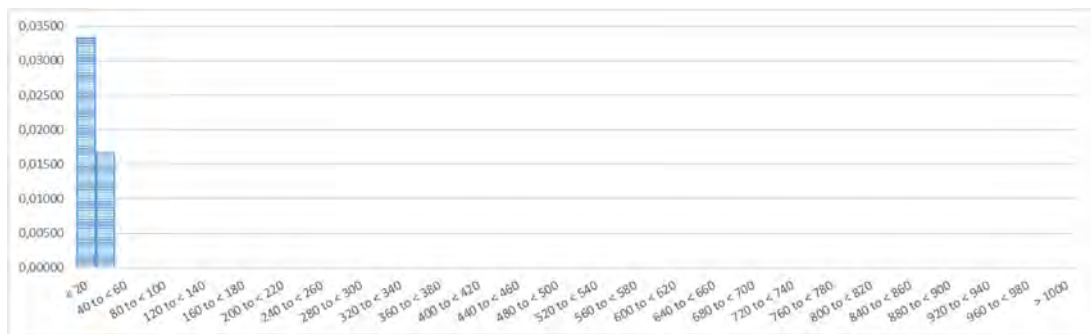


Abb. 125: Selenkonzentration von IOCG Kupferlagerstätten (linear)⁴⁸⁵

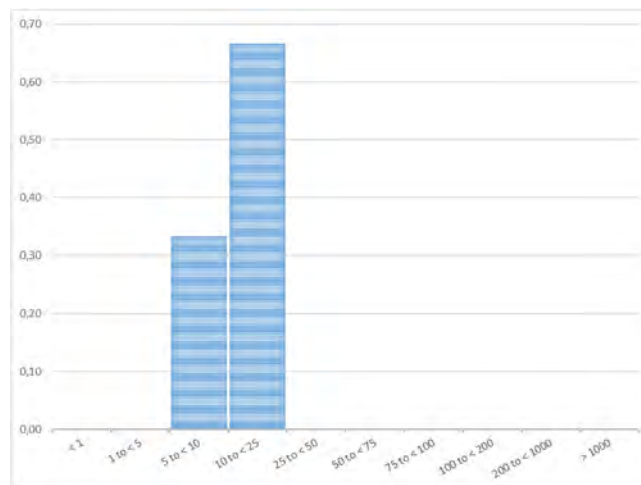


Abb. 124: Selenkonzentration von IOCG Kupferlagerstätten (gruppiert)⁴⁸⁴

484 eigene Auswertung.

485 eigene Auswertung.

486 ppm: parts per million.

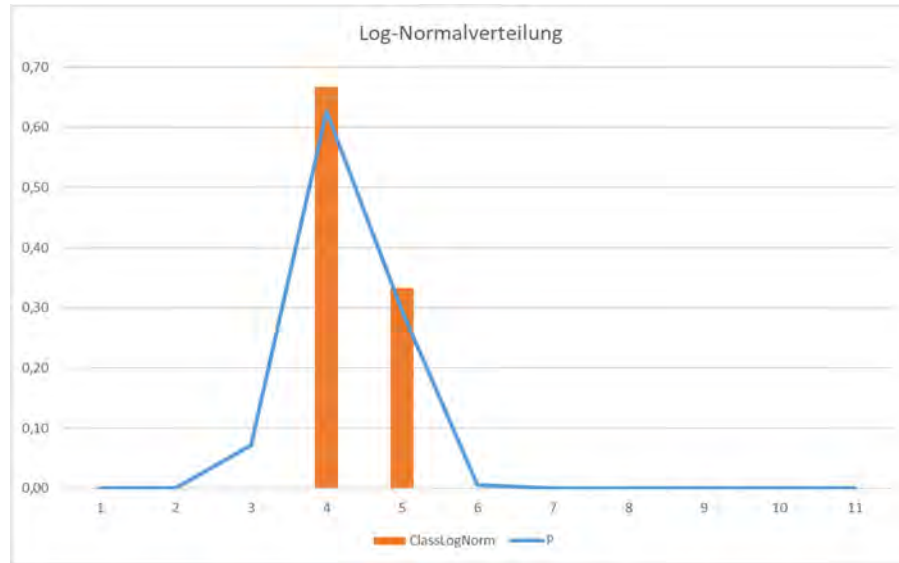


Abb. 126: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von IOCG Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁸⁷

Aufgrund des kleinen Stichprobenumfanges ist eine weitere statistische Analyse nicht sinnvoll und möglich, obwohl die bedeutendste IOCG-Lagerstätte Olympic Dam in der Stichprobe und Datenbank erfasst ist. Die grafische Häufigkeitsverteilung könnte auch hier Hinweis auf eine logarithmische Verteilung geben.

⁴⁸⁷ eigene Auswertung.

		Selenkonzentration IOCG Kupferlagerstätten	
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	16,67	ppm
	Median	18,80	ppm
	Standardabweichung	7,14	ppm
	Minimalwert	8,70	ppm
	Maximalwert	22,50	ppm
	Schiefe	---	
	Kurtosis	---	
	Standardfehler	4,12	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	2,74	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	17,54	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	2,93	
	Erwartungswert aus	21,35	ppm
	Median		
	Standardabweichung	0,50	
	Erwartungswert aus	9,45	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	2,16	
	Maximalwert	3,11	
	Schiefe	---	
	Kurtosis	---	
Standardfehler	0,29		

6.5. Selenkonzentrationen von gang-kluft-förmige Vererzungen (Vein) von hydrothermalen Kupferlagerstätten

Gang-kluft-förmige Vererzungen (Vein) von hydrothermalen (magmatogenen) Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt mittlere bis hohe Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁴⁸⁸

Die große Anzahl der vorliegenden Messwerte zeigen ein sehr konsistentes, etwas linksschiefes Histogramm mit einer Konzentration knapp unter 50 ppm.

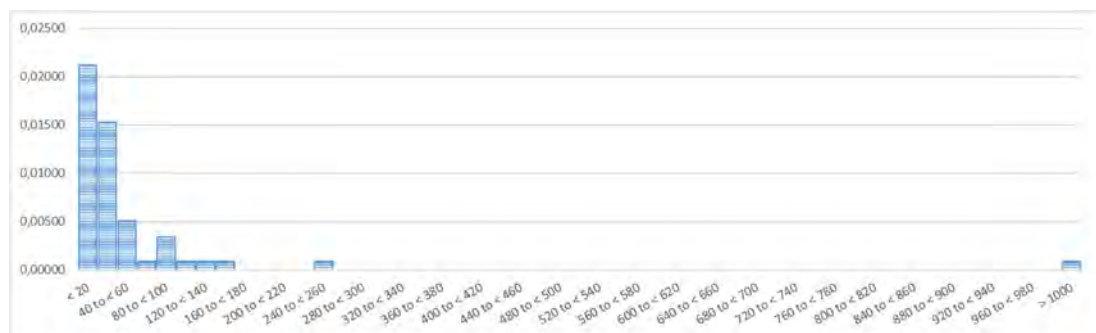


Abb. 127: Selenkonzentration von gang-kluft-förmigen Kupferlagerstätten (Vein) (linear)⁴⁸⁹

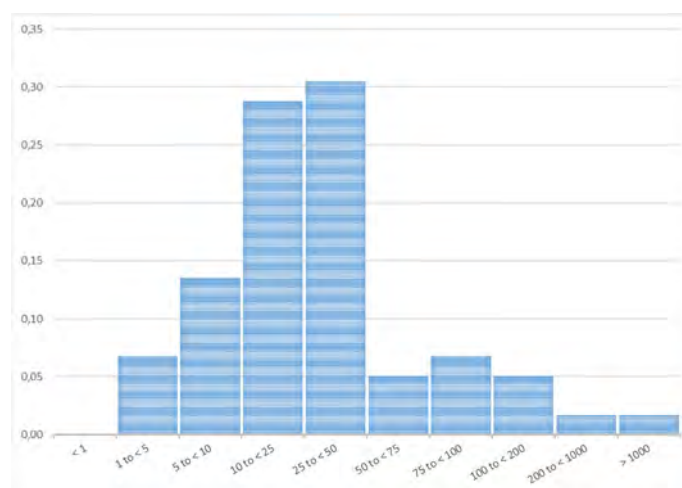


Abb. 128: Selenkonzentration von gang-kluft-förmigen Kupferlagerstätten (Vein) (gruppiert)⁴⁹⁰

488 ppm: parts per million.

489 eigene Auswertung.

490 eigene Auswertung.

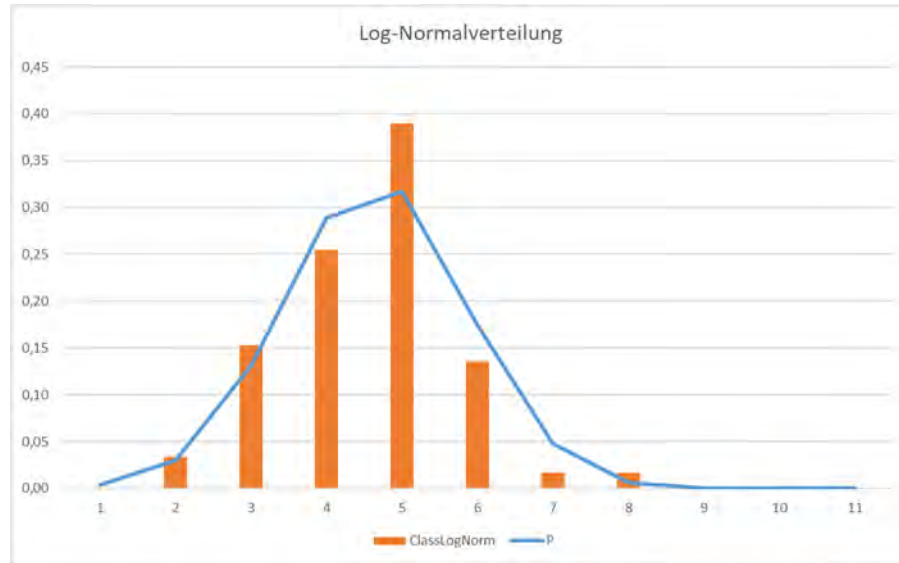


Abb. 129: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von gang-kluft-förmigen Kupferlagerstätten (Vein) zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁹¹

Da $X^2 = 4,36 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁴⁹¹ eigene Auswertung.

		Selenkonzentration Vein Kupferlagerstätten	
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	52,32	ppm
	Median	25,00	ppm
	Standardabweichung	132,15	ppm
	Minimalwert	1,5	ppm
	Maximalwert	1000,0	ppm
	Schiefe	7	linksschief
	Kurtosis	48	schmalgipflig
	Standardfehler	17,20	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	3,14	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	45,40	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	3,22	
	Erwartungswert aus	49,30	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,17	
	Erwartungswert aus	77,17	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	0,41	
	Maximalwert	6,91	
	Schiefe	0,30	symmetrisch
	Kurtosis	1,15	schmalgipflig
Standardfehler	0,15		

6.6. Selenkonzentrationen von Skarn Kupferlagerstätten

Skarn Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt geringe bis mittlere Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁴⁹²

Die große Anzahl der vorliegenden Messwerte zeigen ein sehr kontinuierliches Histogramm.

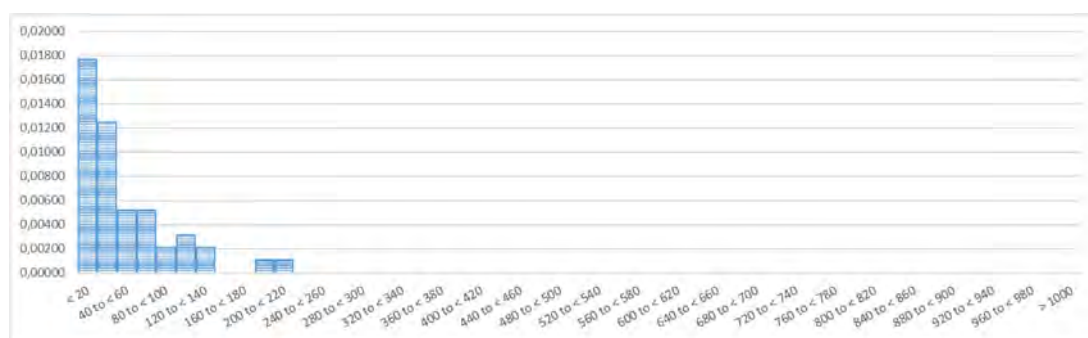


Abb. 130: Selenkonzentration von Skarn Kupferlagerstätten (linear)⁴⁹³

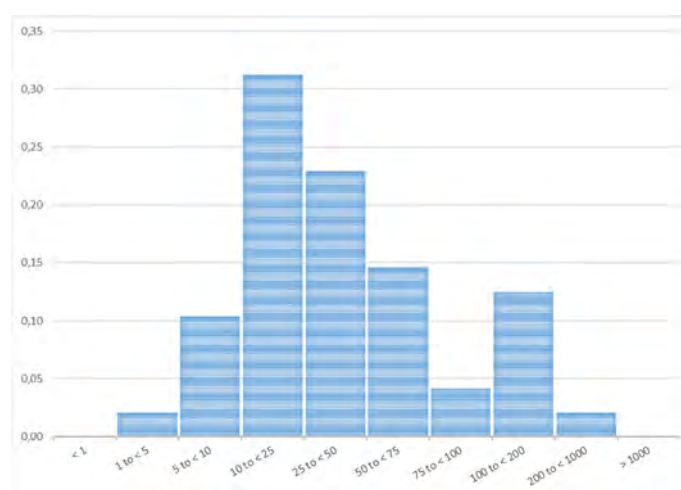


Abb. 131: Selenkonzentration von Skarn Kupferlagerstätten (gruppiert)⁴⁹⁴

492 ppm: parts per million.

493 Auswertung.

494 eigene Auswertung.

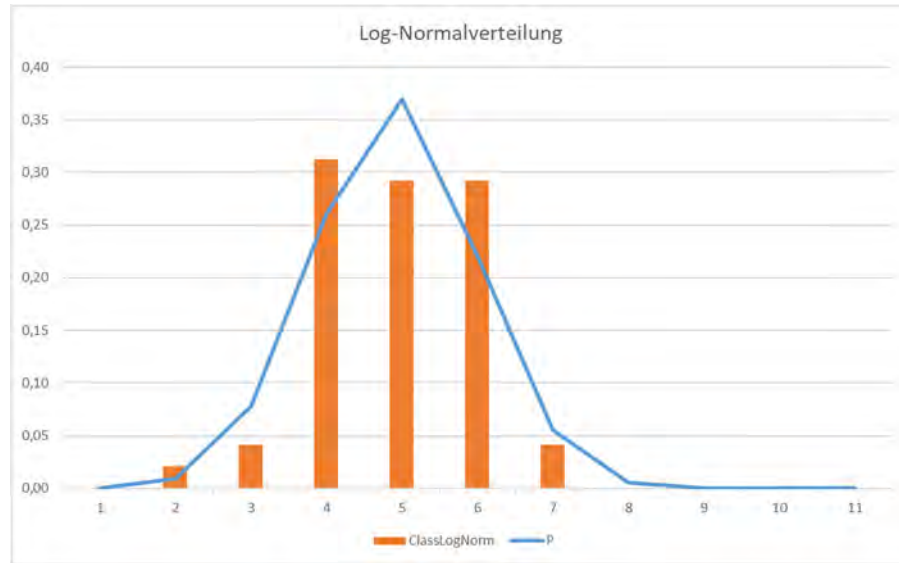


Abb. 132: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von Skarn Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁹⁵

Da $X^2 = 4,27 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁴⁹⁵ eigene Auswertung.

Selenkonzentration Skarn Kupferlagerstätten			
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	47,40	ppm
	Median	28,16	ppm
	Standardabweichung	46,83	ppm
	Minimalwert	1,0	ppm
	Maximalwert	213,0	ppm
	Schiefe	2	linksschief
	Kurtosis	3	schmalgipflig
	Standardfehler	6,67	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	3,40	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	51,38	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	3,34	
	Erwartungswert aus	48,15	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,04	
	Erwartungswert aus	71,27	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	0,00	
	Maximalwert	5,36	
	Schiefe	-0,53	symmetrisch
	Kurtosis	1,15	etw.schmalgipflig
Standardfehler	0,15		

6.7. Karbonatite

Wie im Kapitel 4.7.4.2.5 (S.139) ausgeführt, ist für die Kupfergewinnung nur eine Quelle dieses Typus in Betrieb, die Mine von Palabora in Südafrika. Für diese Lagerstätte sind keine Selenanalysen bekannt und daher wurden Karbonatitlagerstätten nicht in die weitere Analyse der Selenwerte von Kupferlagerstätten mit einbezogen.

6.8. Selenkonzentrationen von VMS Kupferlagerstätten

VMS Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt hohe Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁴⁹⁶

Trotz einer großen Anzahl an Messwerten zeigt das Histogramm diskrete Selenkonzentrationen. Es kann folglich gemutmaßt werden, dass dieser Lagerstättentyp eine größere Schwankungsbreite abhängig nach geografischer Lage und Bildungssituation ausweist. Dennoch kann das Ergebnis als robust betrachtet werden.

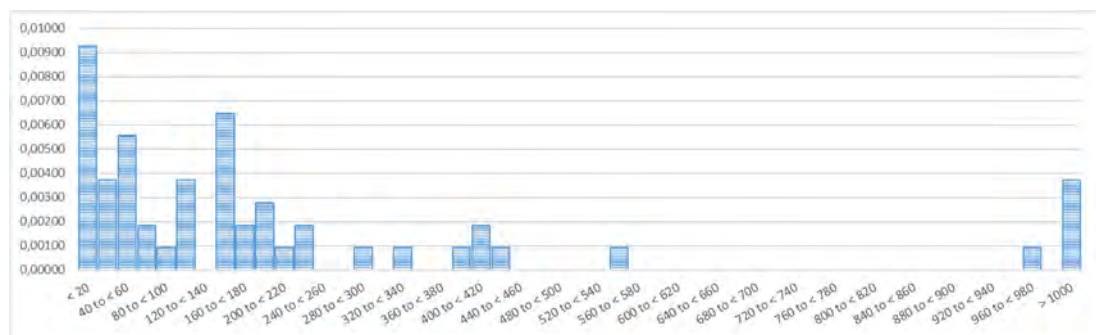


Abb. 133: Selenkonzentration von VMS Kupferlagerstätten (linear)⁴⁹⁷

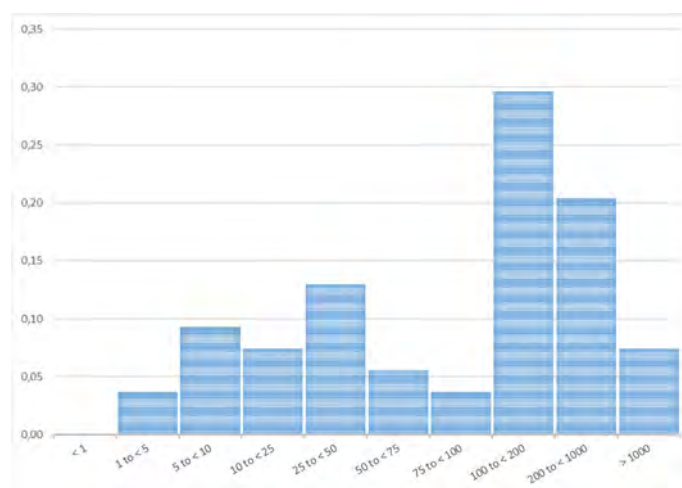


Abb. 134: Selenkonzentration von VMS Kupferlagerstätten (gruppiert)⁴⁹⁸

496 ppm: parts per million.

497 eigene Auswertung.

498 eigene Auswertung.

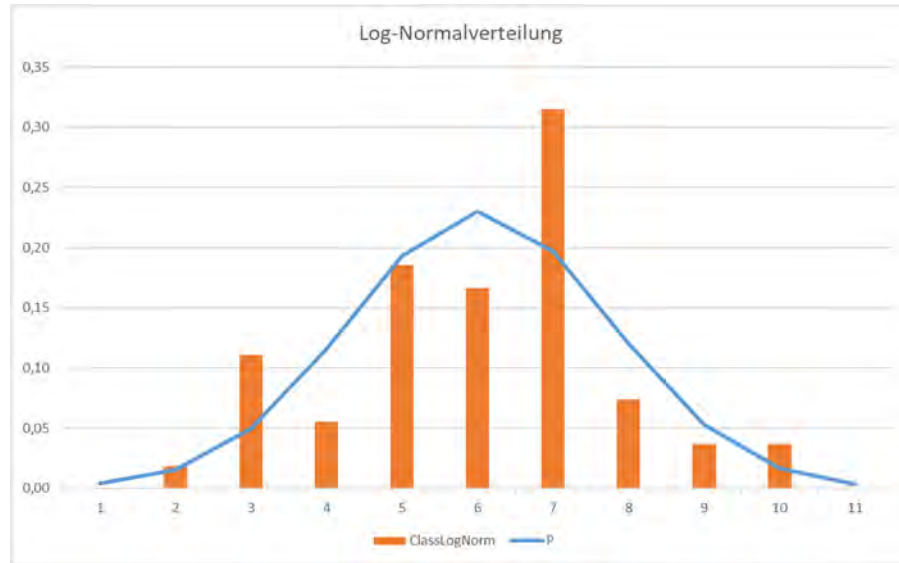


Abb. 135: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von VMS Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁴⁹⁹

Da $X^2 = 13,58 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁴⁹⁹ eigene Auswertung.

		Selenkonzentration VMS Kupferlagerstätten	
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	388,40	ppm
	Median	126,67	ppm
	Standardabweichung	1048,73	ppm
	Minimalwert	2,0	ppm
	Maximalwert	5680,7	ppm
	Schiefe	5	linksschief
	Kurtosis	21	schmalgipflig
	Standardfehler	142,71	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	4,53	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	398,24	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	4,84	
	Erwartungswert aus	540,55	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,71	
	Erwartungswert aus	1661,97	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	0,69	
	Maximalwert	8,64	
	Schiefe	-0,04	symmetrisch
	Kurtosis	0,18	symmetrisch
Standardfehler	0,23		

6.9. Selenkonzentrationen von SEDEX Kupferlagerstätten inkl. Massive Sulfide (MS)

SEDEX inkl. Massive Sulfide Kupferlagerstätten weisen im Durchschnitt geringe Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁵⁰⁰

Die Werte im Säulendiagramm mit linearer Selengruppierung können die Häufigkeiten nicht als Ausreißer klassifiziert werden und sind somit in das Gesamtergebnis mit einbezogen. Die Ursache für das diskontinuierliche Histogramm scheint eher in einer zu kleinen Stichprobe als in Messwertfehlern zu suchen sein.

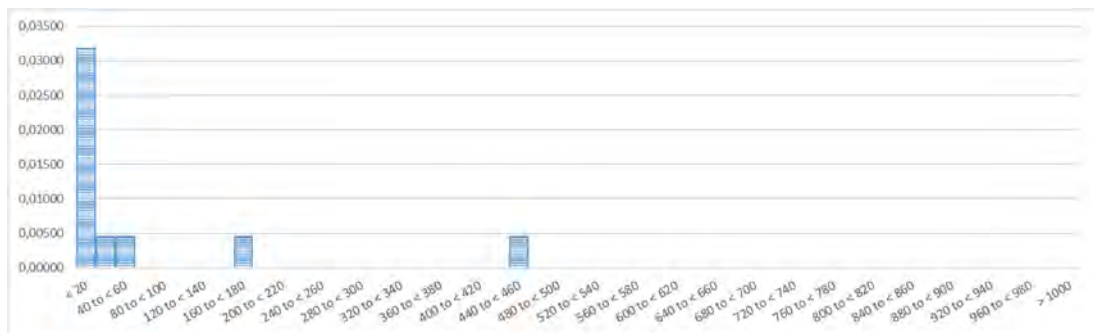


Abb. 136: Selenkonzentration SEDEX (MS) Kupferlagerstätten (linear)⁵⁰¹

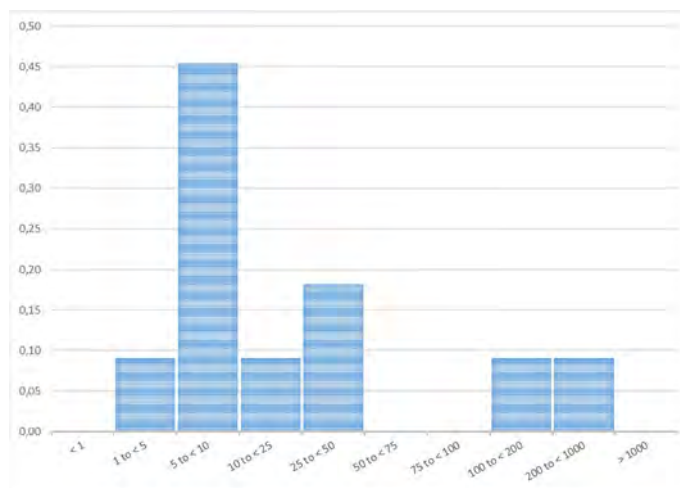


Abb. 137: Selenkonzentration SEDEX (MS) Kupferlagerstätten (gruppiert)⁵⁰²

500 ppm: parts per million.

501 eigene Auswertung.

502 eigene Auswertung.

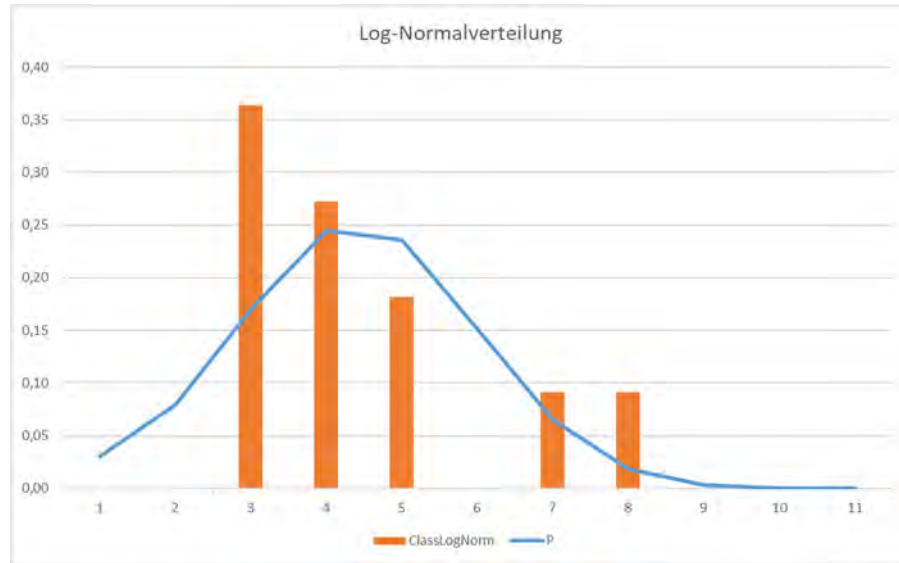


Abb. 138: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von SEDEX (MS) Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁵⁰³

Da $X^2 = 8,67 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁵⁰³ eigene Auswertung.

		Selenkonzentration SEDEX (MS) Kupferlagerstätten	
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	67,49	ppm
	Median	9,00	ppm
	Standardabweichung	135,21	ppm
	Minimalwert	4,16	ppm
	Maximalwert	449,0	ppm
	Schiefe	3	linksschief
	Kurtosis	8	schmalgipflig
	Standardfehler	40,77	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	2,90	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	60,56	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	2,20	
	Erwartungswert aus	29,90	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,55	
	Erwartungswert aus	191,89	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	1,43	
	Maximalwert	6,11	
	Schiefe	1,14	leicht linksschief
	Kurtosis	0,37	symmetrisch
Standardfehler	0,47		

6.10. Selenkonzentrationen von Sediment hosted Kupferlagerstätten

Sediment hosted Kupferlagerstätten („Sedhost“) weisen im Durchschnitt mittlere Selenkonzentrationen auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigen. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁵⁰⁴

Die hohen Werte im Säulendiagramm mit linearer Selengruppierung sind Ausreißer und fallen durch die weitere mathematische Behandlung nicht wesentlich ins Gewicht.

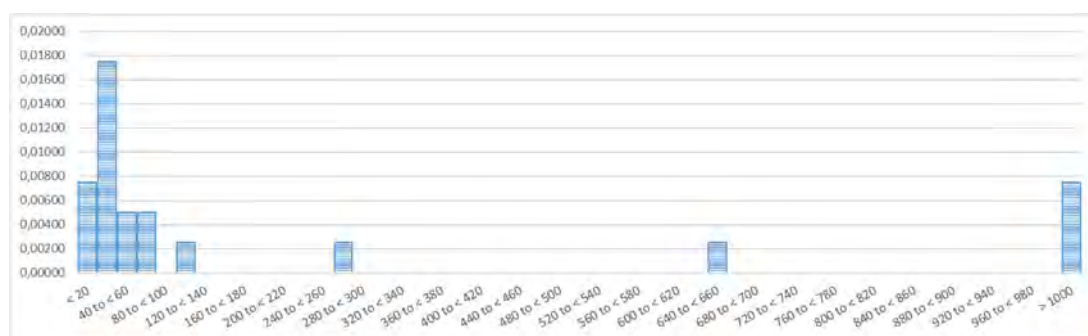


Abb. 139: Selenkonzentration von Sedhost Kupferlagerstätten (linear)⁵⁰⁵

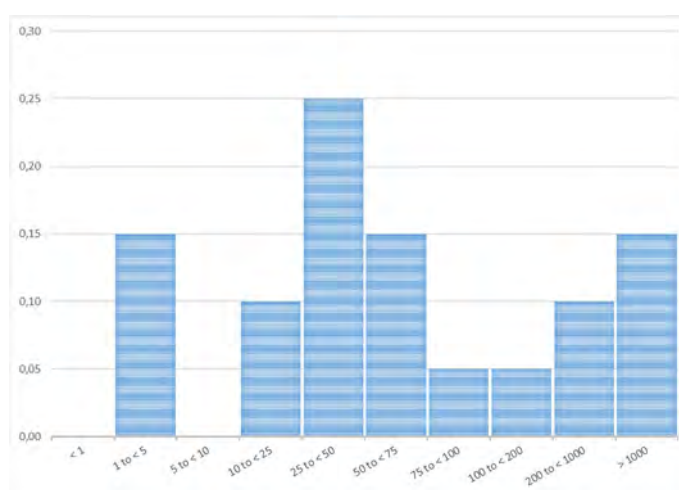


Abb. 140: Selenkonzentration von Sedhost Kupferlagerstätten (gruppiert)⁵⁰⁶

504 ppm: parts per million.

505 eigene Auswertung.

506 eigene Auswertung.

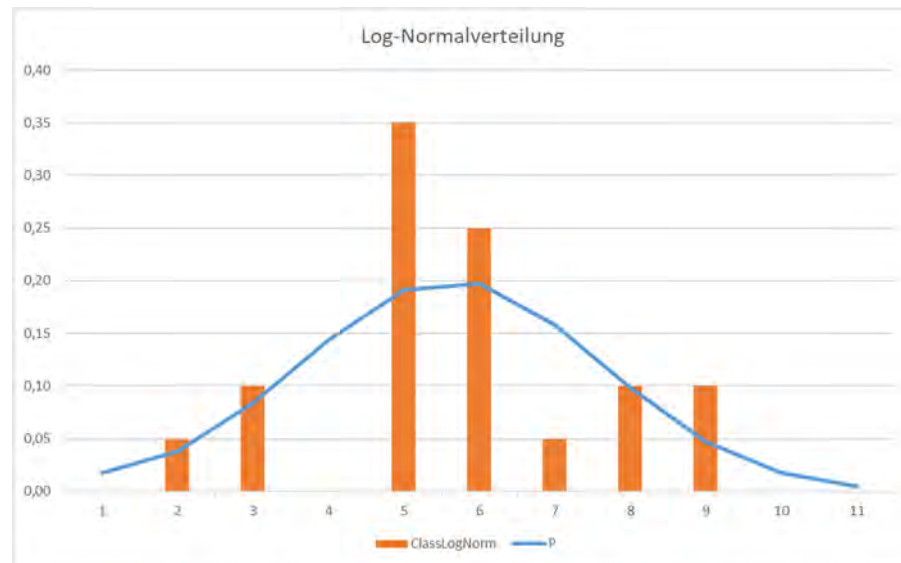


Abb. 141: Gegenüberstellung der Verteilung (Häufigkeiten) der Messwerte der Selenkonzentration von Sediment hosted Kupferlagerstätten zu einer logarithmischen Normalverteilung⁵⁰⁷

Da $X^2 = 9,39 < \chi^2_{(0,95;8)} = 15,51$ gilt, kann eine logarithmische Normalverteilung der Grundgesamtheit angenommen werden. Die grafische Häufigkeitsverteilung in logarithmischen Klassen bestätigt dieses Bild.

⁵⁰⁷ eigene Auswertung.

Selenkonzentration Sedhost Kupferlagerstätten			
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	358,67	ppm
	Median	47,00	ppm
	Standardabweichung	739,38	ppm
	Minimalwert	1,19	ppm
	Maximalwert	2797,8	ppm
	Schiefe	3	linksschief
	Kurtosis	6	schmalgipflig
	Standardfehler	165,33	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	4,13	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	424,12	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	3,84	
	Erwartungswert aus	317,19	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,96	
	Erwartungswert aus	2873,52	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	0,65	
	Maximalwert	7,94	
	Schiefe	0,37	symmetrisch
	Kurtosis	-0,12	symmetrisch
Standardfehler	0,44		

6.11. Seabed („deep-sea nodule“)

Wie bereits mehrfach erläutert, ist eine systematische Datenbasis der Selenkonzentrationen in den (Kupfer-)Lagerstätten nicht verfügbar. Dieser Mangel wird besonders bei der Diskussion von Selenkonzentrationen in wirtschaftlich nicht bedeutender Kupferlagerstätten sichtbar. Die wahrscheinlichen Hintergründe dieses Datenmangels wurden ebenfalls bereits in dieser Arbeit diskutiert. Noch aussichtloser ist das Unterfangen, Selenkonzentrationen von wirtschaftlich nicht sehr bedeutenden Lagerstättentypen zu recherchieren. Da Selen in der Praxis immer als Begleitelement meist beim Kupferbergbau mitgefördert wird, ist es für die Analyse der (wirtschaftlich) verfügbaren Selenressourcen praktisch unerheblich, wenn derartige Lagerstättentypen nicht weiter einbezogen werden. Im Besonderen sind damit folgende Lagerstättentypen gemeint.

Der Seabed Vorratstypus wurde im Kap. 4.7.5.3 (S.149) erläutert. Die in Manganknollen schlummernden weltweiten Erzreserven sind gewaltig und könnten die Menschheit u.a. mit Kupfer bis weit in das nächste Jahrhundert versorgen. Jedoch sind die für die Förderung erforderlichen Technologien (noch) nicht im industriellen Maßstab verfügbar. Es sind weder Analysen repräsentativer Selenkonzentrationen bekannt, noch wird Kupfer aus einer solchen Art von Lagerstätte gewonnen. Es wurde daher dieser Lagerstättentypus nicht weiter in die Berechnung der Selenressourcen integriert.

6.12. Diagenetische Lagerstätten

In Kap. 4.7.7 (S.154) wurde bereits erwähnt, dass es sich hierbei für den Kupferbergbau um den Kupferschiefertypus handelt. Obwohl dieser an sich gut analysiert ist, sind in der Literatur keine repräsentativen Selenkonzentrationen verfügbar. Für die weiteren Berechnungen in dieser Arbeit wurde der Kupferschiefertypus nicht als eigenständiger Lagerstättentypus behandelt, sondern gemeinsam mit den sedimentgebundenen Lagerstätten (sedhost, Kap. 4.7.5.2 (S.145); Kap. 6.10 (S.234)) betrachtet.

6.13. Selenkonzentrationen nicht zuordenbarer Kupferlagerstätten

Zahlreiche gemessene Selenkonzentrationen können nicht eindeutig und ausreichend zuverlässig einem Lagerstättentyp zugeordnet werden. Um einerseits nicht Gefahr zu laufen, die Analysen der Selenkonzentrationen je Lagerstättentyp zu verfälschen und andererseits durch einfache Nichtberücksichtigung der vorliegenden Selenmesswerte statistisch in die Stichprobe einzugreifen, werden diese Daten in diesem Abschnitt getrennt analysiert und statistisch ausgewertet. Die Werte weisen trotz unterschiedlicher geologischer Herkunft eine überraschend konvergierende Verteilung bei mittlerer Konzentration um die 50 ppm auf, wie die normierten Histogramme (Fläche 100% oder 1) zeigt. Die folgende Darstellung gibt Aufschluss nach auf der Abszisse linear aufgetragener Selenkonzentrationen sowie gruppierter Darstellung in ppm.⁵¹⁰

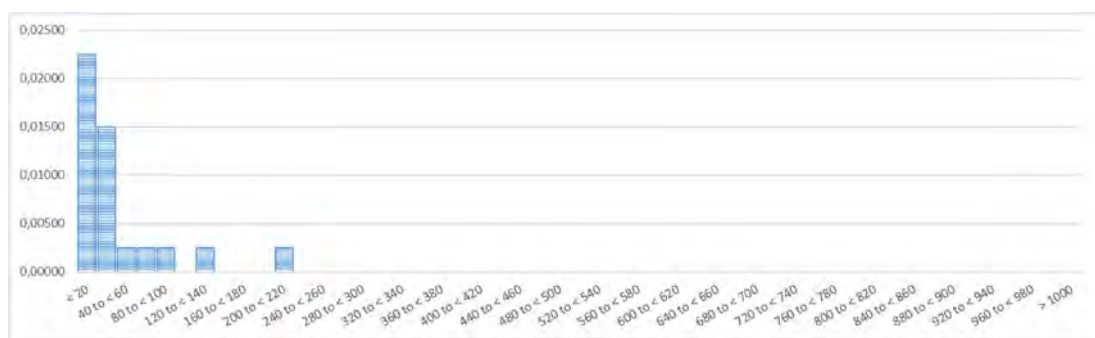


Abb. 143: Selenkonzentration von nicht zuordenbaren Kupferlagerstätten (linear)⁵⁰⁹

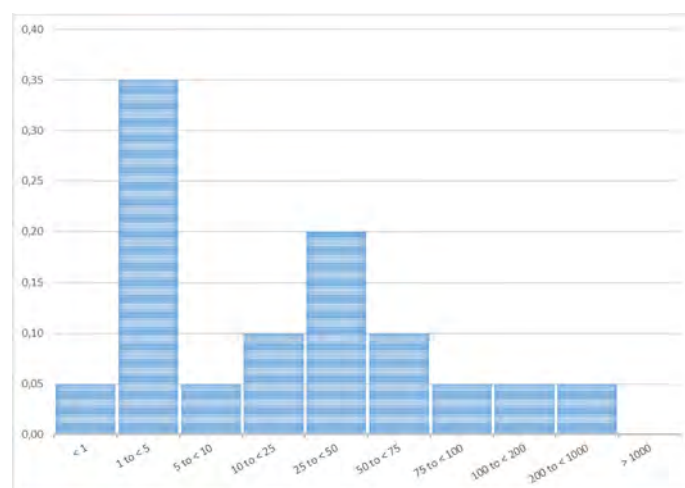


Abb. 142: Selenkonzentration von nicht zuordenbaren Kupferlagerstätten (gruppiert)⁵⁰⁸

508 eigene Auswertung.

509 eigene Auswertung.

510 ppm: parts per million.

		Selenkonzentration nicht zuordenbarer Kupferlagerstätten	
Messwerte der Selenkonzentrationen (Normalverteilung)	Arithmetischer Mittelwert	37,00	ppm
	Median	22,50	ppm
	Standardabweichung	52,42	ppm
	Minimalwert	0,5	ppm
	Maximalwert	208,0	ppm
	Schiefe	2	etw. linksschief
	Kurtosis	5	schmalgipflig
	Standardfehler	11,72	ppm
	Arithmetischer Mittelwert	2,54	
	Erwartungswert aus arithmetischem Mittelwert	52,92	ppm
Messwerte der Selenkonzentrationen (logarithmische Normalverteilung)	Median	3,11	
	Erwartungswert aus	93,79	ppm
	Median		
	Standardabweichung	1,69	
	Erwartungswert aus	214,18	ppm
	Standardabweichung		
	Minimalwert	-0,69	
	Maximalwert	5,34	
	Schiefe	-0,14	symmetrisch
	Kurtosis	-1,08	etw. breitgipflig
Standardfehler	0,38		

6.14. Gegenüberstellung der Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten

Tabelle 12: Zusammenstellung der statistischen Berechnungen der Selenkonzentrationen je Kupfer-Lagerstättentypus (Konzentrationen bezogen auf die Masse in ppm = mg/kg)

	type of deposit	Orthomagmatic	Porphyries	IOCG	Veins	Skarns	VMS	SEDEX - Massive sulphides (MS)	Sediment hosted	UNKNOWN
LINEAR	Mittelwert	64,95	141,10	16,67	52,32	47,40	388,40	67,49	358,67	37,00
	Median	46,50	60,00	18,80	25,00	28,16	126,67	9,00	47,00	22,50
	StdDev	47,77	241,76	7,14	132,15	46,83	1048,73	135,21	739,38	52,42
	Min	17,00	1,80	8,70	1,50	1,00	2,00	4,16	1,91	0,50
	Max	182,00	1000,00	22,50	1000,00	213,00	5680,71	449,00	2797,77	208,00
	Schiefe	1,52	3,13	n/a	6,63	1,80	4,59	2,72	2,60	2,25
	Kurtosis	2,21	9,70	n/a	47,50	3,38	21,13	7,56	6,46	5,47
	Stand.fehler	13,79	43,42	4,12	17,20	6,76	142,71	40,77	165,33	11,72
	MW Se (lg)	3,96	3,96	2,74	3,14	3,40	4,53	2,90	4,13	2,54
	Median Se (lg)	3,83	4,09	2,93	3,22	3,34	4,84	2,20	3,84	3,11
LOGARITHMIC	EW MW Se(lg)	65,84	164,11	17,54	45,40	51,38	398,24	60,56	424,12	52,92
	EW Median (lg)	58,05	186,82	21,35	49,30	48,15	540,55	29,90	317,19	93,79
	StdDev Se (lg)	0,68	1,51	0,50	1,17	1,04	1,71	1,55	1,96	1,69
	EW StdDev (lg)	50,56	483,91	9,45	77,17	71,27	1661,97	191,89	2873,52	214,18
	Min (lg)	2,83	0,59	2,16	0,41	0,00	0,69	1,43	0,65	-0,69
	Max (lg)	5,20	6,91	3,11	6,91	5,36	8,64	6,11	7,94	5,34
	Schiefe	0,31	-0,13	n/a	0,30	-0,53	-0,04	1,14	0,37	-0,14
	Kurtosis	-0,42	-0,23	n/a	1,15	1,15	0,18	0,37	-0,12	-1,08
	Stand.fehler	0,20	0,27	0,29	0,15	0,15	0,23	0,47	0,44	0,38

In Tabelle 12 sind die Resultate nach Berechnungen durch geostatistische Algorithmen zusammengestellt. Diese Ergebnisse müssen einer kritischen Betrachtung unterzogen und gegebenenfalls korrigiert werden. Die Datenvalidität ist im nachfolgenden Kapitel erläutert und das Resultat in Tabelle 13 angeführt.

6.15. Diskussion der Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten

6.15.1. Überprüfung der Datenvalidität und der Fehlerbandbreite

Wie ausgeführt, sind die statistischen Analysen mit großer Sorgfalt und mathematischer Genauigkeit erfolgt, jedoch unter den erläuterten Rahmenbedingungen der zugrunde liegenden Daten der Stichproben. Es ist daher sinnvoll zur zusätzlichen Absicherung der Datenlage, bevor sie für weitere Berechnungen herangezogen werden, die Bandbreite des möglichen Schätzfehlers zu ermitteln. Als generelles Konfidenzintervall für diese Studie wurde bereits früher 95% (oder ein Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) festgelegt. Konfidenzintervalle sind wichtig, um die Validität empirischer Tests und Forschungsergebnisse zu bestimmen. Sind die zugrunde liegenden Daten etwa normalverteilt, kann der Standardfehler zusammen mit dem Mittelwert, Standardfehler und der Normalverteilung verwendet werden, um Konfidenzintervalle zu berechnen oder umgekehrt, die Fehlerbandbreite zu bestimmen.

Allgemein besteht der Zusammenhang, dass sich das obere und untere Konfidenzintervall entsprechend der Formel

$$\bar{x} \pm SE \cdot z_{1-\alpha/2}$$

errechnet, wobei $z_{1-\alpha/2}$ dem Quantil der Standardnormalverteilung entspricht (inverse kumulative Verteilungsfunktion). SE steht für den Standardfehler des Mittelwertes, \bar{x} ist Mittelwert. Mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ vereinfacht sich die Formel

$$\bar{x} \pm 1,96 \cdot SE,$$

da ein Wert von 1,96 einem Quantil von 0,975 der Standardnormalverteilung entspricht.

Es wird in dieser Arbeit für die folgenden Analysen mit dem Standardfehler gearbeitet, da dieser Aussagen wie weit der Mittelwert der Stichprobe wahrscheinlich von dem Mittelwert der Grundgesamtheit entfernt ist, ermöglicht. Die Alternative, mit der Standardabweichung die Abschätzung vorzunehmen, erweist nicht geeignet, da die Standardabweichung Aufschluss gibt, wie weit sich einzelne Datenpunkte innerhalb einer Stichprobe vom Mittelwert der Stichprobe unterscheiden, nicht jedoch innerhalb der Grundgesamtheit. Durch den Zusammenhang von Standardabweichung, Standardfehler und Stichprobenumfang wird sich der Standardfehler mit ansteigender Stichprobengröße immer weiter verkleinern und im Grenzfall an null nähern. Mit jeder weiteren Vergrößerung der Stichprobe wird sich die Schätzung des Mittelwertes der Grundgesamtheit an den „wahren“ Mittelwert annähern und die Standardabweichung der Stichprobe sich an die Standardabweichung der Grundgesamtheit angleichen.

Die oben geführten Analysen zeigen, dass die zugrunde liegenden Daten der Grundgesamtheit nicht normal, sondern logarithmisch-normalverteilt sind. Daher muss das Signifikanzniveau auch auf die logarithmische Verteilung angewendet werden.

6.15.2. Festsetzung der charakteristischen Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten

Im vorigen Kapitel wurde der Konfidenzbereich abgeschätzt, in dem statistisch belastbar die Selenkonzentration des jeweiligen Kupferlagerstättentypus angenommen werden kann. Aus diesem Vertrauensbereich ist ein charakteristischer Wert für die weiteren Berechnungen auszuwählen, der am besten diesen Lagerstättentypus kennzeichnet. Es soll jedoch vermieden werden, dass der Eindruck entsteht, dass es sich bei diesem Wert um (a) eine mathematisch exakt ermittelte Konzentrationsdosis handelt und (b) soll dieser Betrag in keinem Fall die Selenkonzentration „überschätzen“. Fokus dieser Arbeit ist eine möglichst realistische Abschätzung der Selenressourcen, die auch wirtschaftlich und technisch umsetzbar ist. Daher wurden die Stichproben nach den statistischen Analysen einzeln einer kritischen Betrachtung unterzogen und gegebenenfalls mit Abschlägen versehen. In der folgenden Tabelle 13 sind die berechneten Werte zusammengestellt. In der ersten Zeile sind die festgestellten charakteristischen Selenkonzentrationen ausgewiesen. Mit diesen Ergebnissen ist die **Hauptfragestellung** dieser Arbeit, nach der unterschiedliche Kupferlagerstättentypen bestimmte charakteristische Konzentrationen an Selen enthalten, **bestätigt**.

In der nachstehenden Grafik (Abb. 144) sind die wesentlichen Analysewerte der Selenkonzentrationen der Kupferlagerstätten in einem Bild illustriert. Die orange Raute markiert den arithmetischen Mittelwert aus der logarithmischen Normalverteilungsanalyse. Zu beachten sind die beiden (linearen) Skalen, die dieselbe physikalische Größe, nämlich die Selenkonzentration in ppm indizieren, jedoch um den Faktor 10 abweichen. Die Daten jedes Lagerstättentyps werden in jeweils zwei Säulen dargestellt. Die jeweils linke Säule (blau) referenziert zur linken Ordinate und zeigt den oben genannten arithmetischen Mittelwert aus der logarithmischen Normalverteilungsanalyse als orange Markierung. Der Fehlerindikator markiert Fehlerbandbreite unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung in einem Konfidenzintervall von 95%. Die in blau gedruckte Säulenhöhe zeigt die vom Autor als **charakteristisch** festgestellte repräsentative **Selenkonzentration** des jeweiligen Lagerstättentypus.

Die rechts neben der blauen Säule liegende braune Säule hat dieselbe Aussage, jedoch im Maßstab der rechten Ordinate, daher um den Faktor 10 verkleinert. Dieser Teil stellt die Minimal- (grün) und Maximalwerte (rot) ihrem logarithmischen Mittelwert (orange) und der gewählten Selenkonzentration (brauner Balken) gegenüber.

Bedingt durch die logarithmische Normalverteilung der Selenkonzentrationen sind die Fehlertoleranzen asymmetrisch und die positiven Abweichungen deutlich größer. Die relativ geringe Anzahl der verfügbaren Daten je Lagerstättentypus lassen die Fehlertoleranzen recht hoch erscheinen. Von praktischer Relevanz sind die negativen Toleranzen, da eine willkürliche Überschätzung der durchschnittlichen Selenkonzentrationen vermieden werden soll. Die negativen Toleranzen bewegen sich in einem Bereich von 20 bis 40% und lassen die Berechnungen als robust bewerten. Die relativ hohen positiven Toleranzen unterstützen die vorsichtige Schätzung und sichern zusätzliches Reservepotenzial.

Tabelle 13: Charakteristische Selenkonzentrationen in typischen Typologien von Kupferlagerstätten (Konzentrationen bezogen auf die Masse in ppm = mg/kg)

Lagerstättentyp		Orthomagmatic	Porphyries	IOCG	Veins	Skarns	VMS	SEDEX - Massive sulphides (MS)	Sediment hosted	UNKNOWN
Se (charakteristisch)	mg/kg	60	165	18	45	48	350	30	320	50
MW	mg/kg	64,95	141,10	16,67	52,32	47,40	388,40	67,49	358,67	37,00
Median	mg/kg	46,50	60,00	18,80	25,00	28,16	126,67	9,00	47,00	22,50
Standardabweichung	mg/kg	47,77	241,76	7,14	132,15	46,83	1048,73	135,21	739,38	52,42
ME (lg)	mg/kg	65,84	164,11	17,54	45,40	51,38	398,24	60,56	424,12	52,92
Median (lg)	mg/kg	58,05	186,82	21,35	49,30	48,15	540,55	29,90	317,19	93,79
Standardfehler	mg/kg	13,79	43,42	4,12	17,20	6,76	142,71	40,77	165,33	11,72
Standardabweichung (lg)	mg/kg	50,56	483,91	9,45	77,17	71,27	1661,97	191,89	2873,52	214,18
Minimalwert	mg/kg	17,00	1,80	8,70	1,50	1,00	2,00	4,16	1,91	0,50
Maximalwert	mg/kg	182,00	1000,00	22,50	1000,00	213,00	5680,71	449,00	2797,77	208,00
unt.Wert(lg)		3,57	3,43	2,17	2,84	3,11	4,08	1,99	3,27	1,80
ob.Wert(lg)		4,34	4,50	3,31	3,43	3,70	4,99	3,82	4,99	3,28
EW unt.Wert	mg/kg	44,79	96,54	9,91	33,72	38,33	252,60	24,24	179,52	25,23
EW ob.Wert	mg/kg	96,78	278,97	31,05	61,12	68,87	627,85	151,32	1001,99	110,97
MW ob/unt. Wert	mg/kg	70,79	187,75	20,48	47,42	53,60	440,22	87,78	590,75	68,10
max. Fehler (KI95%) unterer Wert	%	-25,3	-41,5	-45,0	-25,1	-20,2	-27,8	-19,2	-43,9	-49,5
max. Fehler (KI95%) oberer Wert	%	18,0	13,8	13,8	5,4	11,7	25,8	192,6	84,6	36,2

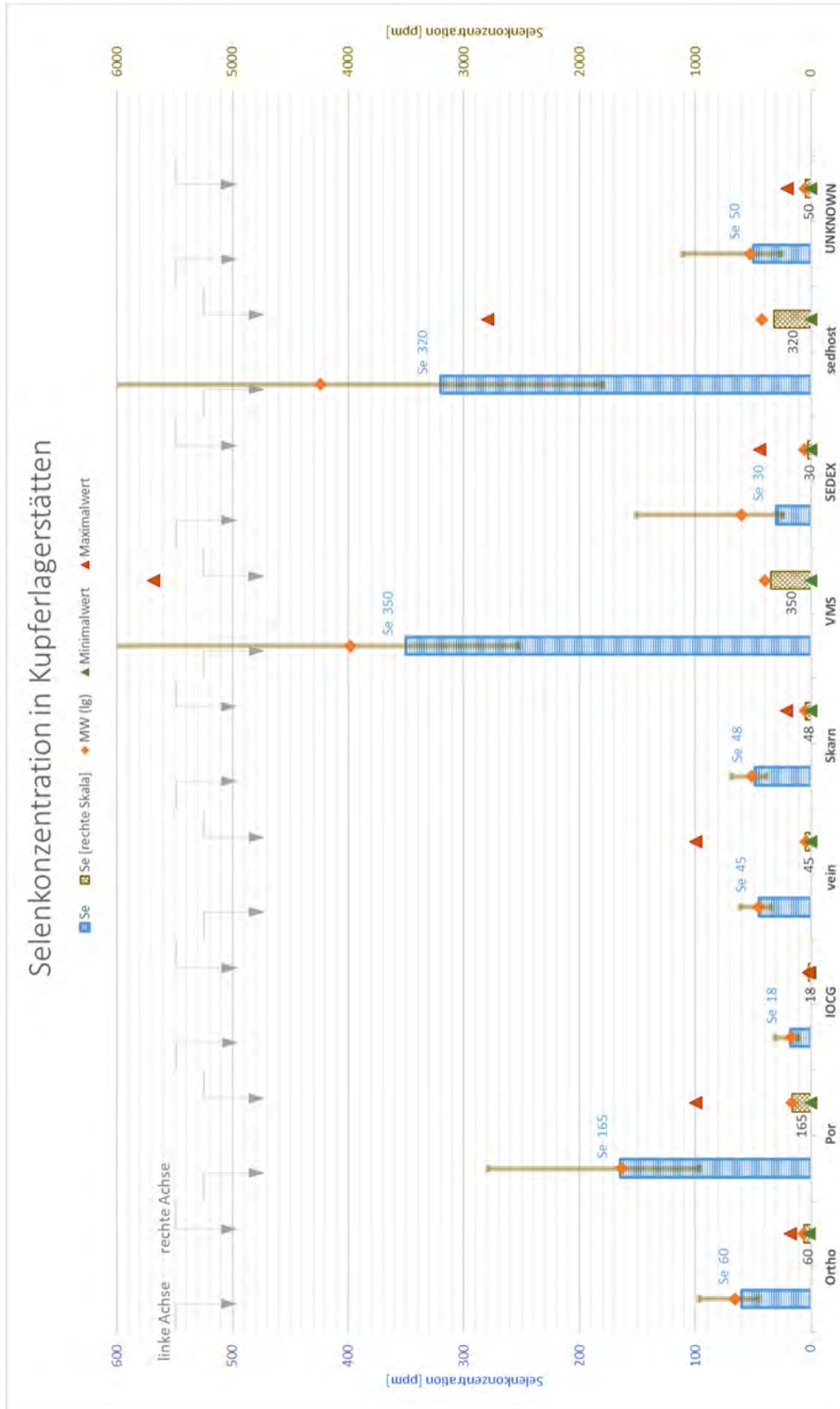


Abb. 144: Selenkonzentration in Kupferlagerstätten⁵¹¹ (Konzentrationen bezogen auf die Masse in ppm = mg/kg)

⁵¹¹ eigene Auswertung und Darstellung.

6.15.3. Vergleich mit den bisher bekannten Selenkonzentrationen

Schon bisher wurde immer wieder versucht, mit Annahmen einer durchschnittlichen Selenkonzentration Hochrechnungen durchzuführen. Wie in Kap. 5.8 (S.195) bereits dargestellt, sind die bekannten, auch von USGS verwendeten Werte wenig valide und erklären daher auch zu einem Teil die recht inkonsistenten, lückenhaften und wenig mit der Produktion korrelierenden Ressourcenangaben in den Publikationen.⁵¹²

Ein USGS Papier aus dem Jahr 2017 nimmt die durchschnittliche Selenkonzentration in magmatischen Sulfiden generell mit 200 ppm an.⁵¹³ Diese Zahl von 200 ppm hat sich als der am häufigste genannte Wert für den durchschnittlichen Selengehalt in magmatischen und damit verbundenen hydrothermalen Sulfiden durchgesetzt. Die Herstellung von Neukupfer erfolgt weltweit zu 75-80% aus Sulfiden, womit Angaben über Sulfide praktisch hohe Relevanz haben. Andererseits zitiert USGS in derselben Publikation für Porphyr-Kupfererz einen Selengehalt von 2,5 ppm (bzw. ein Kupfer-Selen-Verhältnis von 2.000:1 bei 0,5% Kupfergehalt).⁵¹⁴

Die bisher bekannten Werte konnten durch die Analysen in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Für porphyrische Kupferlagerstätten liegt der charakteristische Wert der Selenkonzentration deutlich höher bei 165 ppm. Hingegen sind die recht pauschal angenommen 200 ppm nach den Untersuchungen der relevanten Lagerstättentypologien sehr optimistisch und scheinen den realen Selengehalt deutlich zu überschätzen. Orthomagmatische (liquidmagmatische) Lagerstätten zeigen eine charakteristische Selenkonzentration 60 ppm, also nur in etwa ein Drittel vom bisher angenommen Wert. Diese Größenordnung wird von Messungen bestätigt. In der bedeutenden orthomagmatischen Kupferlagerstätte Sudbury in Ontario, Kanada wurden von Hawley und Nichol⁵¹⁵ 1959 in unterschiedlichen Erzkörpern fünf Selen-Stichproben analysiert, die zwischen 25 und 130ppm Selenkonzentration aufwiesen und weitere 101 mit einem Mittelwert von 63 ppm.

Bei IOCG und MS Lagerstättenarten liegt der Gehalt noch deutlich niedriger bei 18 ppm und 30 ppm. Der VMS Typus hingegen zeigt eine hohe charakteristische Selenkonzentration bei durchschnittlich 350 ppm.

512 bspw. Anderson, C. Schuyler, Selenium, Periodicals, USGS, USA, 2020 | <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-selenium.pdf> (20.05.2020) [USGSSE2020a]

513 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

514 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

515 [HAWL1959], p.615-616.

7. Diskussion der Selenkonzentration nach geologischem Alter der Lagerstätten und der Bildungstemperatur

7.1. Selenkonzentration nach geologischem Alter der Lagerstätten

Selen findet sich überwiegend in hydrothermalen Lagerstätten und zum überwiegenden Teil in porphyrischen Kupferlagerstätten. Die Selenkonzentration korreliert sehr stark mit dem Typus der Lagerstätte. Das geologische Zeitalter ist mittelbar ein Indikator, da sich verschiedene Lagerstättentypologien in unterschiedlichen geologischen Epochen gebildet haben. Ein besonderer Erkenntnisgewinn für eine darüberhinausgehende Prüfung der Zusammenhänge lässt sich aus dem vorliegenden Datenmaterial nicht ableiten. Vorsichtshalber bleibt anzumerken, dass die Stichproben nicht für jedes geologische Alter in ausreichender Anzahl vorliegen. Etwa ein Drittel des Stichprobenumfanges lässt keine verlässliche zeitliche Zuordnung zu und musste daher statistisch getrennt behandelt werden. Die Analyse der vorliegenden Daten ist in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

In der letzten Zeile sind unter „n“ alle nicht zeitlich zuordenbaren Stichproben ausgewertet. Die Stichprobengrößen für Neogen, Kreide, Jura, Trias, Silur, Ordovizium, Kambrium und Proterozoikum lassen keine statistisch robusten Aussagen zu. Hingegen ist die Datenlage für Paläogen, Perm, Karbon, Devon und Archaikum sehr verlässlich.

Ma/Ka	Äonothem/ Ärathem	Äonothem/Ärathem english	Abk.	System	System engl.	Abk.	MW (Se)		
11,6 Ka	Känozoikum	Cenozoic		Quartär	Quaternary	CenQ	n/a		
2,6 Ma				Neogen	Neogene	CenN	380		
5,3 Ma				Paläogen	Palaeogene			CenP	70
23,8 Ma									
33,7 Ma									
54,8 Ma				Mesozoikum	Mesozoic		Kreide	Cretaceous	MesC
98,9 Ma	Jura	Jurassic	MesJ				760		
142 Ma	Trias	Triassic						MesT	560
156,5 Ma									
178 Ma									
200 Ma									
235 Ma	Paläozoikum	Palaeozoic	PalIX				Perm	Permian	PalP
242,5 Ma				Karbon	Carboniferous			PalCarb	140
251 Ma									
260 Ma				Devon	Devonian			PalD	50
302 Ma									
326,5 Ma									
358 Ma									
381 Ma									
392,5 Ma									
417,5 Ma				Silur	Silurian			PalS	90
423 Ma									
443 Ma									
458 Ma									
470 Ma	Ordovizium	Ordovician			PalO	20			
495 Ma									
505 Ma									
518 Ma	Kambrium	Cambrian			PalCam	60			
545 Ma									
1000 Ma	Proterozoikum	Proterozoic	Proterozoic	Neoproterozoikum	Neoproterozoic	NProt	90		
1600 Ma				Mesoproterozoikum	Mesoproterozoic	MProt	10		
2500 Ma				Paläoproterozoikum	Paleoproterozoic	PProt	900		
4000 Ma	Archaikum	Archaeozoic	Archaean			Archaean	270		
		nn				nn	60		

Abb. 145: mittlere Selenkonzentration in ppm in Kupferlagerstätten nach geologischem Alter⁵¹⁶ (Konzentrationen bezogen auf die Masse in ppm = mg/kg; Ma = Millionen Jahre)

516 eigene Auswertung.

7.2. Selenkonzentration nach Bildungstemperatur

In Kapitel 5.8 (S.195) wurde bereits der mögliche Zusammenhang zwischen Bildungstemperatur der Lagerstätte und dem Selengehalt angesprochen. Bei frühesten geochemischen Untersuchungen von Selen wurde zunächst postuliert, dass der Selengehalt in Sulfiden einen direkten positiven Zusammenhang mit der Temperatur hat und der Selengehalt mit der Temperatur steigt (Goldschmidt und Hefter (1933)⁵¹⁷; Goldschmidt und Strock (1935)⁵¹⁸, Auclair (1987)⁵¹⁹). Selen wurde als Spurenelement gesehen, dass in sulfidischen Erzen konzentriert wurde, die durch vulkanische, magmatische oder hydrothermale Prozesse bei hoher Temperatur gebildet wurden.⁵²⁰

Später erkannte man, dass diese generelle Aussage nicht zu halten war, da regionale geologische Faktoren den Selengehalt von Sulfiden beeinflussten (Edwards und Carlos 1954⁵²¹; Tischendorf 1959⁵²²; Tischendorf 1966⁵²³).⁵²⁴ Heute weiß man, dass die Selenkonzentrationen stark variieren, mit typischen Konzentrationen in Granit von 70 ppm, in Basalt von 300 ppm, in Schiefer von 600 ppm und in Chondritmeteoriten von 9 ppm.⁵²⁵

Eine Untersuchung der Selenkonzentrationen in hydrothermalen sulfidischen Lagerstätten mit hoher Bildungstemperatur indiziert einen möglichen Zusammenhang zwischen Temperatur und Selengehalt.⁵²⁶ Begründet wird diese Korrelation damit, dass Schwefel und Selen ähnliche Ionenradien haben und daher im Ausfällungsprozess Selen an die Stelle von Schwefel treten kann.⁵²⁷ Die entnommenen Proben aus einem sulfidischen Kupfererz, das durch einen Black Smoker entstanden ist, zeigen im Inneren sehr hohen Selengehalt (im Mittel ca. 1000 ppm), der nach außen zwar abnimmt, aber nicht mit derselben Flankensteilheit. An den Stellen, an denen die hydrothermale Lösung mit dem kalten Meerwasser in Kontakt kam, ist weniger Selen konzentriert, jedoch schwankt dieser Wert zwischen den an diesen äußeren Stellen entnommenen Stichproben erheblich (ca. 50 ppm; ca. 100 ppm; ca. 1000 ppm).⁵²⁸ Die Autoren sprechen von drei Stellen, anderen sie

517 Goldschmidt, V. M. and O. Hefter (1933), „Zur Geochemie des Selens.“, Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse Nachrichten III-35, IV-36: 245-252.

518 Goldschmidt, V. M. and L. W. Strock (1935), „Zur Geochemie des Selens II.“, Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse Nachrichten [1]4: 123.

519 [AUCL1987], p.582.

520 [AUCL1987], p.582.

521 Edwards, A. B. and G. C. Carlos (1954), “The selenium content of some Australian sulphide deposits.” Proc. Austral. Instit. Min. Metall. 172: 31-64.

522 Tischendorf, G. (1959), “Zur Genesis einiger Selenidvorkommen insbesondere von Tilkerode im Harz.“, Freiburger Forschungshefte C69: 1-168.

523 Tischendorf, G. (1966), “Zur Verteilung des Selens in Sulfiden.“, Freiburger Forschungshefte C208: 1-162.

524 zitiert in: Fitzpatrick (2008): [FITZ2008], p.4

525 vgl. Kapitel 5.8 (S.171)

526 [AUCL1987]

527 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

528 [AUCL1987], p.581

von der Mitte entlang des Erzkörpers zum Meereswasser einige Messproben entnommen haben. Möglich scheint, dass die Lage und Anzahl der Proben nicht repräsentativ waren, um diese Aussagen auf alle Lagerstätten dieses Typus zu übertragen.

Black Smoker waren an der Bildung der Kupferlagerstätten der Typen VMS und SEDEX beteiligt. Die Analyse der Selenkonzentrationen verschiedener VMS Anreicherungen in dieser Arbeit ergab in der Tat die höchste charakteristische Selenkonzentration aller untersuchten Lagerstättenarten von 350 ppm.

Die in genannten, von Auclair 1987 durchgeführten Studie ergaben die Untersuchungen für MS-Lagerstätten (massive sulfides, SEDEX) ebenfalls hohe Selenkonzentrationen zwischen ca. 100 und 1000 ppm auf. Obwohl auch die Bildung dieser Lagerstättenart auf Black Smokers zurückgeht, zeigen die Proben eine eher homogenere Selenverteilung.⁵²⁹ Die Autoren führen das auf die höhere Porosität der Mineralien zurück, durch die ein besserer Temperatenausgleich erfolgte, der zu einer niedrigeren Bildungstemperatur geführt hat.

Die Analysen in dieser vorliegenden Arbeit ergaben deutlich geringere Selenkonzentrationen für MS-Lagerstätten bzw. für den SEDEX-Typus von charakteristisch 30 ppm. Auffallend ist die große Differenz um den Faktor zehn der Selenkonzentrationen zwischen den Lagerstättentypen VMS und MS (SEDEX). Obwohl beide bei hohen Temperaturen durch Black Smoker gebildet werden, kann keine Korrelation zur Selenanreicherung festgestellt werden. Ganz im Gegenteil hat der VMS-Typus die höchste charakteristische Selenkonzentration und der MS-Typus (SEDEX) liegt am unteren Ende im Vergleich zu allen Kupferlagerstätten.

Während die meisten Quellen eher von einer positiven Korrelation von Bildungstemperatur und Selenkonzentration ausgehen, stellten Hawley und Nichol⁵³⁰ eine stärkere Anreicherung bei niedrigeren Temperaturen fest. Sie unterlegen das u.a. mit Messungen in verschiedenen Tiefen von porphyrischen Erzformationen. Während in größeren Tiefen kaum Unterschiede in der Selenkonzentration zwischen Erzen hoher und niedriger Bildungstemperatur messbar waren, sind in geringeren Tiefen der Lithosphäre niedertemperierte Erze doppelt so stark angereichert, wie solche mit hoher Bildungstemperatur.⁵³¹ Es scheint angebracht, diesen Aspekt der Bildungstemperatur in Verbindung mit der Anreicherung von Selen in zukünftigen Studien eingehender zu untersuchen.

529 [AUCL1987], p.581-582

530 [HAWL1959], p.608.

531 [HAWL1959], p.620.

8. Geografische Verteilung der Selenmesswerte

Wie bereits erwähnt, wurde jede Stichprobe durch ausführliche und teilweise sehr aufwendige Recherche geografisch mit GPS-Daten verortet und in der Datenbank hinterlegt. Es sollte die Hypothese geprüft werden, ob eine besondere Auffälligkeit von Selenkonzentrationswerten in ausgeprägten geologischen Formationen erkennbar werden, was nicht bestätigt werden konnte.

Dafür war es nötig, die Stichproben geografisch in einer Karte der Erde darzustellen. Als einfach und kostengünstig verfügbares Softwarewerkzeug wurde rasch „Google Earth“⁵³² identifiziert. Für die in dieser Arbeit verfügbaren Darstellungen wurde die Version „Google Earth Pro“ in der Version 7.3.2 als installierte Software verwendet, die kostenfrei verfügbar ist. Technisch war es nötig, eine Schnittstelle von der relationalen Datenbank zu Google Earth zu entwickeln. Vom Autor wurden die relevanten Daten in der Datenbank aufbereitet und in ein von MS-Excel⁵³³ lesbares Datenformat konvertiert. Die Daten müssen im Anschluss in Excel weiter aufbereitet und schließlich in ein „Keyhole Markup Language“ Format (KLM) konvertiert werden. Eine sogenannte kml-Datei gehört zu den GIS (geografisches Informationssystem) Dateiformaten. KML ist wie HTML eine Auszeichnungssprache und beinhaltet geografische Informationen sowohl in Vektorform wie Punkten, Linien und Polygone als auch in Rasterform, wie zum Beispiel Luft- oder Satellitenaufnahmen.⁵³⁴ Im Prinzip entspricht die Syntax dem XML-Format.

Das Datenformat ermöglicht, mehrere Informationen gleichzeitig in der Karte von Google Earth darzustellen. Aufgrund der Vielzahl der Selen-Stichproben, die sich naturgemäß oft geografisch in gewissen Gebieten clustern, musste von verbalen Einträgen in der Karte abgesehen werden. Stattdessen wurden für jede dargestellte Stichprobe drei Informationen in einem Symbol zusammengefasst.

- Die Größe des Symbols ist ein Indikator für die Selenkonzentration. Ein Selenwert zwischen 10 und 25 ppm wird mit 100% Symbolgröße dargestellt. Geringere Selenkonzentrationen sind gemäß nachfolgender Tabelle in Gruppen zusammengefasst mit kleineren Symboldurchmessern visualisiert und darüber liegende entsprechend ansteigend bis zur circa dreifachen Größe (300% Skalierung).

532 Google Earth ist ein geschütztes Markenzeichen | www.google.at/earth/

533 Microsoft Excel ist eine lizenzpflichtige Software und ein geschütztes Markenzeichen | www.microsoft.com

534 <https://www.dateiendung.com/format/kml> (03.05.2020)

Se [ppm]	Scale	Se [ppm]	Scale
< 1	0,3	75 to < 100	2,0
1 to < 5	0,4	100 to < 200	2,3
5 to < 10	0,6	200 to < 1000	2,6
10 to < 25	1,0	> 1000	2,9
25 to < 50	1,3	> 100.000	3,2
50 to < 75	1,7		

- Jedes Symbol ist mit einem Buchstaben codiert. Dieser indiziert den Lagerstätten-
typ gemäß nachfolgender Aufstellung. Ein fehlender Buchstabe ist ein Hinweis auf
eine nicht einem Lagerstättentyp verlässlich zuordenbare Stichprobe.

Deposit Type	Symbol- code
IOCG	(I)
Orthomagmatic	(O)
Porphyries	(P)
SEDEX	(X)
Sediment hosted	(S)
Skarns	(K)
UNKNOWN	()
Veins	(V)
VMS	(M)

- Die Farbe des Symbols zeigt das Alter der Lagerstätte an. Die Farbschattierung
wurde so gewählt, dass mit zunehmendem Alter der Lagerstätte eine dunklere
Farbgebung erfolgt. Weiß zeigt an, dass eine Epochenbestimmung nicht verläss-
lich möglich ist.

System	System engl.	Abk.	Colour	Color Code
Quartär	Quaternary	CenQ	gelb	#FF8C00#
Neogen	Neogene	CenN	gold	#FFD700#
Paläogen	Palaeogene	CenP	orange	#FF8C00#
Kreide	Cretaceous	MesC	magenta	#FF00FF#
Jura	Jurassic	MesJ	pink	#FF1493#
Trias	Triassic	MesT	ziegelrot	#B22222#
Perm	Permian	PalP	pflaumenblau	#C2938D#
Karbon	Carboniferous	PalCarb	hellgrün	#BFFF00#
Devon	Devonian	PalD	grün	#00FF00#
Silur	Silurian	PalS	cyan	#00FFFF#
Ordovizium	Ordovician	PalO	hellblau	#00BFFF#
Kambrium	Cambrian	PalCam	blau	#4169E1#
Neoproterozoikum	Neoproterozoic	NProt	dunkelblau	#483D8B#
Mesoproterozoikum	Mesoproterozoic	MProt	indigo-blau	#8A2BE2#
Paläoproterozoikum	Paleoproterozoic	PProt	braun	#8B4513#
Archaean	Archaean	Archaean	grau	#808080#
		nn	weiß	#F5F5F5#

8.1. Überblick



Abb. 146: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten⁵³⁵

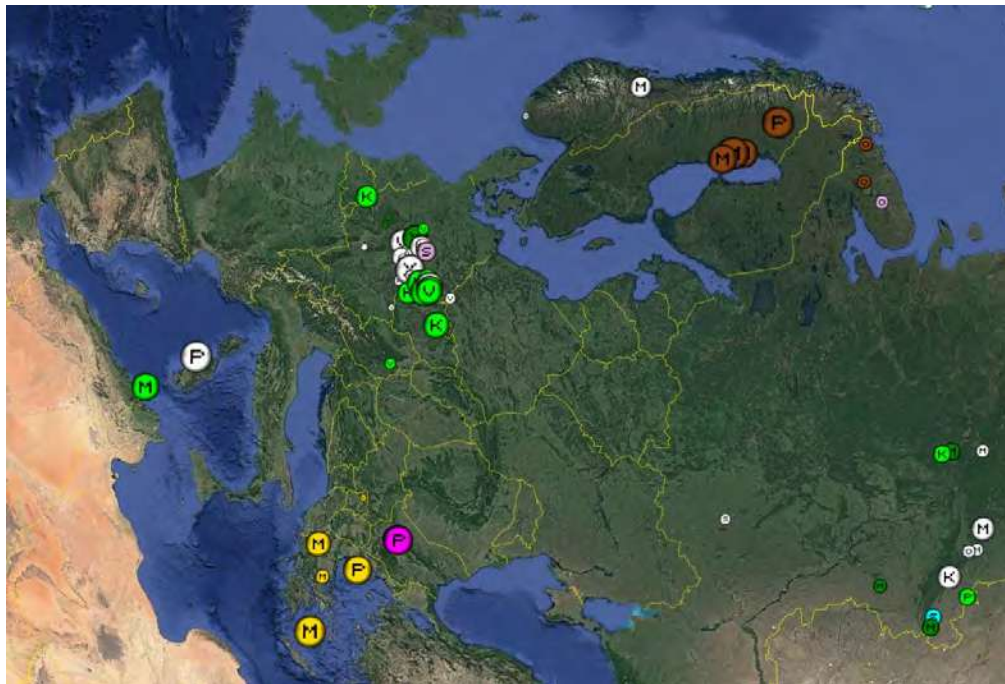


Abb. 147: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa⁵³⁶

535 eigene Auswertung.

536 eigene Auswertung.

8.1. Europa

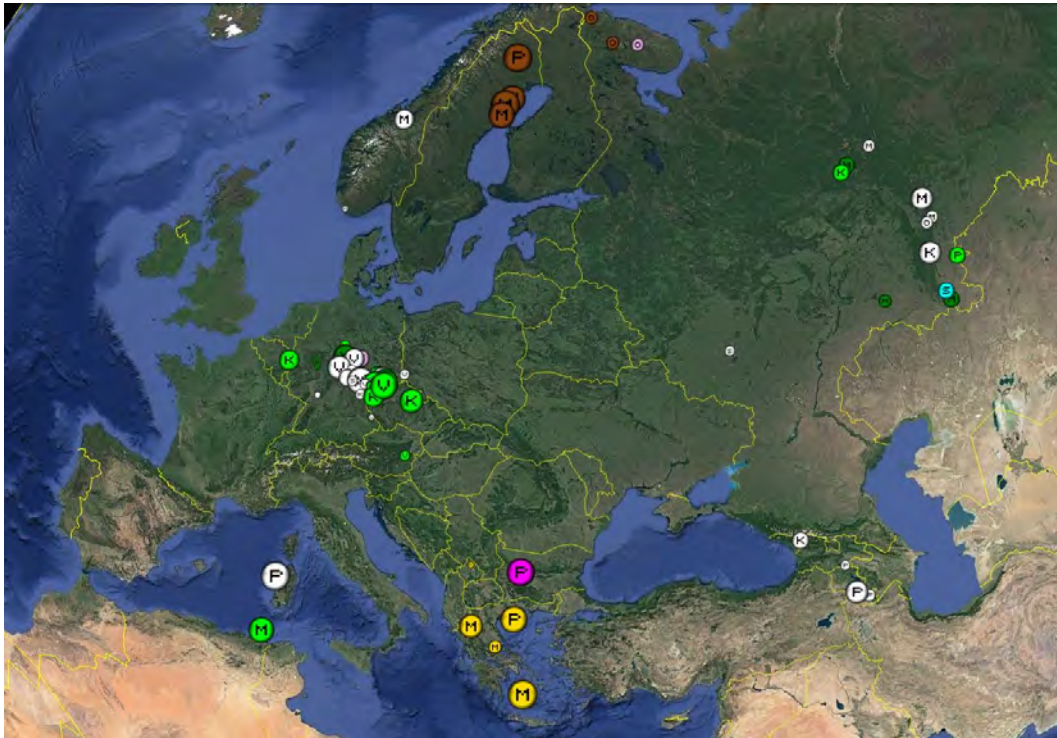


Abb. 149: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa⁵³⁸

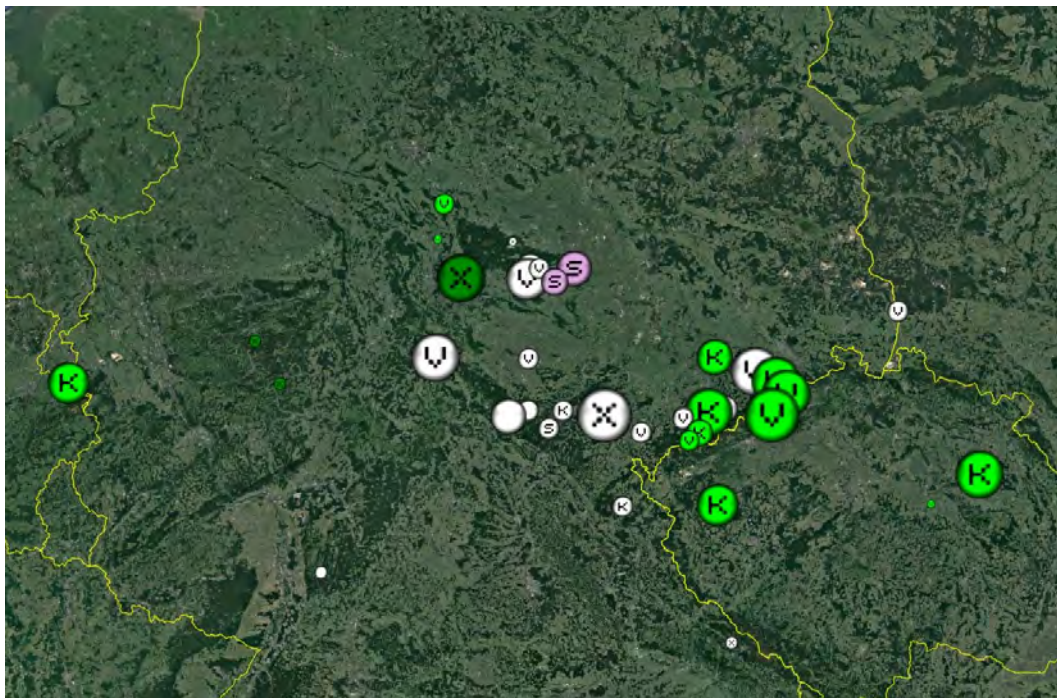


Abb. 148: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa – Ausschnitt Deutschland⁵³⁷

537 eigene Auswertung.

538 eigene Auswertung.



Abb. 150: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Europa – Ausschnitt Nordeuropa⁵³⁹

8.2. Amerika

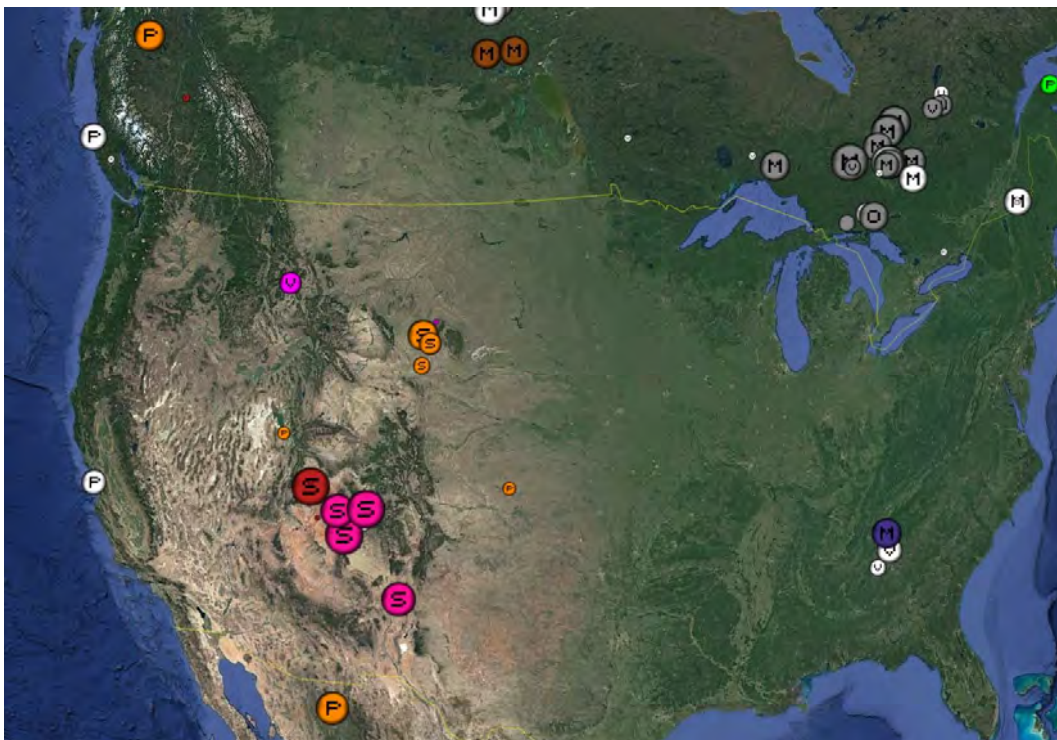


Abb. 151: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in den USA⁵⁴⁰

539 eigene Auswertung.

540 eigene Auswertung.

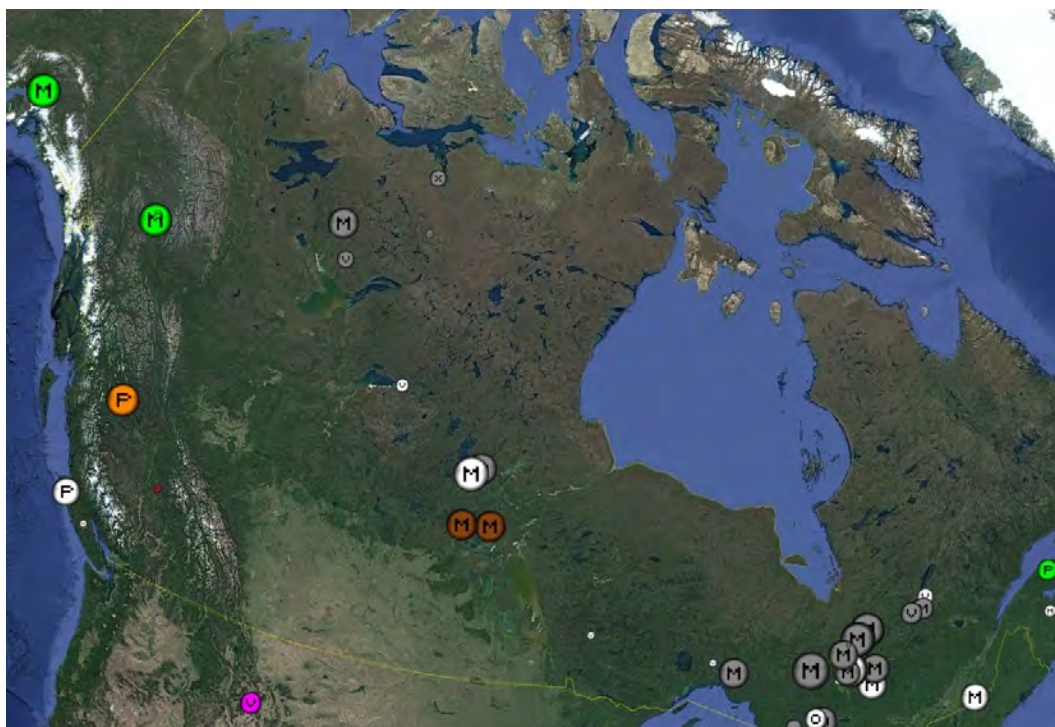


Abb. 152: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Kanada⁵⁴¹

541 eigene Auswertung.

8.3. Asien

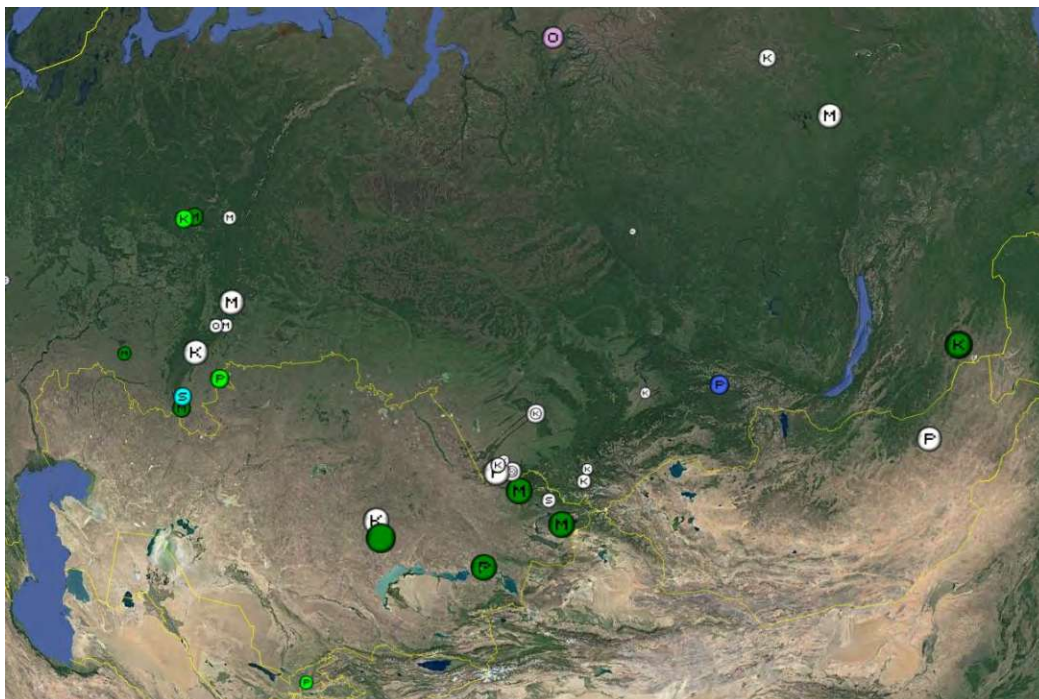


Abb. 153: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Russland⁵⁴²

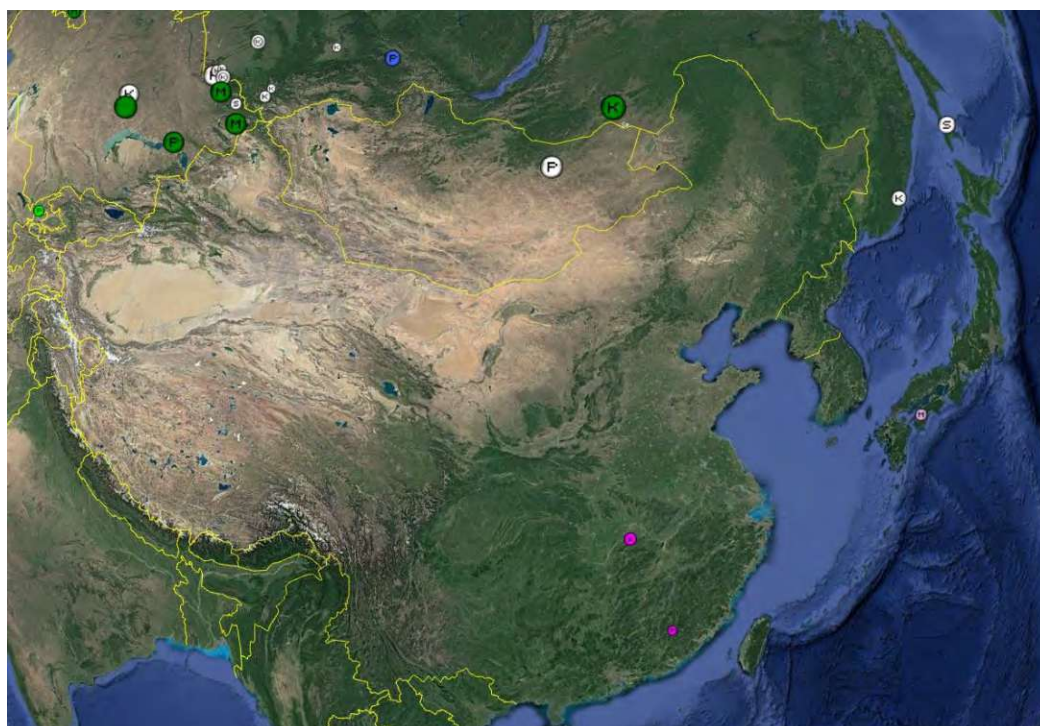


Abb. 154: Verteilung, Größe und geologisches Alter der analysierten Selenstichproben (Auswahl) in Kupferlagerstätten in Südostasien⁵⁴³

542 eigene Auswertung.

543 eigene Auswertung.

9. Weltweite Selenressourcen aus Kupferlagerstätten

9.1. Datengrundlagen

Im Abschnitt 4.8 (S.156) wurde die Datengrundlage der Kupferlagerstätten erläutert. Die Datenbasis für die Reserven und Ressourcen der Kupfervorräte sind kumulierte Werte von repräsentativen Bergbauunternehmen aus dem Jahr 2019. Die charakteristischen Selenkonzentrationen je Lagerstättentypus wurde aus Einzelmessergebnissen mit statistischen Verfahren im Kapitel 6.15 (S.241) berechnet und sind in Tabelle 13 (S.243) zusammengefasst. Die beiden vorliegenden Datenbanken wurden in der Folge verschnitten, um die verfügbaren Selenvorräte abschätzen zu können.

Zur Abschätzung und Hochrechnung der Vorratsdaten von Selen werden die *aktiven*, einem Lagerstättentyp zuordenbaren Kupferminen herangezogen. Die kumulierten Kupferreserven aus den analysierten Kupferlagerstätten betragen 475,33 Millionen Tonnen und die Kupferressourcen wurden mit 956,45 Millionen Tonnen aufsummiert berechnet (Tabelle 7, S.158). Wie oben dokumentiert, betragen die weltweiten Kupferreserven für das Jahr 2019 gemäß USGS 870 Millionen Tonnen und ICSG hat die globalen Kupferressourcen mit 2.100 Millionen Tonnen (identified resources) abgeschätzt (vgl. Kap. 4.3, S.109). L. Weber weist 2.529 Millionen Tonnen Ressourcen unter Mitberücksichtigung der als inferred bewerteten Ressourcen aus und bewertet die Kupferreserven mit 570 Millionen Tonnen. Die Datenbank deckt sehr repräsentativ die Vorratsdaten auf Basis einzelner Lagerstätten ab. Die analysierten Reserven für die in der Datenbank für 2019 betrachteten Lagerstätten repräsentieren circa 54,6% der Weltreserven des Jahres 2019. Bei den Ressourcen decken die in der Datenbank hinterlegten Werte 45,5% der Weltressourcen des Jahres 2019 ab. Mit den reziproken Werten, d.h. mit dem Faktor 1,830 für die Reserven und mit dem Faktor 2,196 für die Ressourcen, werden die aggregierten Daten aus den einzelnen Lagerstätten aus der Datenbank je Lagerstättentypus hochgerechnet. Diese Hochrechnungen sind in Tabelle 15 ausgeführt. Im Folgenden wird die Abkürzung „Res“ für Ressourcen (Resources) und das Kürzel „RSV“ für Reserven (Reserves) verwendet.

Tabelle 15: Weltweite Reserven und Ressourcen von im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk | \bar{Cu} : durchschnittlicher Kupfergehalt | ΣCu : Kupfermenge | Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits activ	Σ Reserves	\bar{Cu} %Reserves	ΣCu Reserves	$\Sigma \Sigma Cu$ Reserves	Cu%Rsv	Σ Ressourcen	\bar{Cu} %Resources	ΣCu Resources	$\Sigma \Sigma Cu$ Resources	Cu%Res
Porphyries	69.309.759.393	0,299	343.344.716	628.431.000	72,233	147.484.121.485	0,373	680.996.941	1.495.206.000	71,200
Sediment hosted	5.741.007.000	0,806	48.348.048	88.492.000	10,171	10.180.818.000	1,288	116.085.345	254.879.000	12,137
Skarns	4.356.947.000	0,462	34.280.887	62.745.000	7,212	7.179.939.900	0,510	47.299.059	103.850.000	4,945
IOCG	3.139.068.485	0,873	23.433.951	42.892.000	4,930	11.501.608.684	0,974	61.354.678	134.711.000	6,415
Orthomagmatic	1.576.736.000	0,933	15.151.178	27.732.000	3,188	3.572.443.000	0,711	28.791.049	63.214.000	3,010
VMS	576.537.779	1,086	5.048.306	9.240.000	1,062	961.547.959	1,324	8.266.283	18.150.000	0,864
Veins	443.923.700	0,410	3.090.735	5.657.000	0,650	1.583.697.000	0,694	8.929.954	19.607.000	0,934
MS / SEDEX	53.523.000	1,010	828.960	1.517.000	0,174	127.630.000	1,028	1.701.709	3.736.000	0,178
unkn. / misc.	285.218.308	0,295	1.799.786	3.295.000	0,379	493.635.100	0,483	3.027.653	6.647.000	0,317
Total	85.482.720.665	0,556	475.326.567	870.000.000	100,0	183.085.441.128	0,522	956.452.671	2.100.000.000	100,0

Tabelle 14: Weltweite Reserven und Ressourcen an Selen auf Basis der im aktiven Förderbetrieb befindlichen Kupferlagerstätten (ΣSe Reserves und ΣSe Ressourcen: Menge auf Basis des Hauwerks | $\Sigma \Sigma Se$ Reserves: weltweite Selen-Reserven | $\Sigma \Sigma Se$ Ressourcen: Weltweite Selen-Ressourcen | Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits activ	Se_ppm	ΣSe Reserves	$\Sigma \Sigma Se$ Reserves	Se%Rsv	ΣSe Resources	$\Sigma \Sigma Se$ Resources	Se%Res	Se/Cu_Rsv	Se/Cu_Res
Porphyries	165	11.436.110	20.932.000	82,47	24.334.880	53.430.000	84,54	3,331	3,573
Sediment hosted	320	1.837.122	3.363.000	13,25	3.257.862	7.153.000	11,32	3,800	2,806
Skarns	48	209.133	383.000	1,51	344.637	757.000	1,20	0,610	0,729
IOCG	18	56.503	103.000	0,41	207.029	455.000	0,72	0,240	0,338
Orthomagmatic	60	56.503	103.000	0,41	207.029	455.000	0,72	0,371	0,720
VMS	350	201.788	369.000	1,45	336.542	739.000	1,17	3,994	4,072
Veins	45	19.977	37.000	0,15	71.266	156.000	0,25	0,654	0,796
MS / SEDEX	30	1.606	3.000	0,01	3.829	8.000	0,01	0,198	0,214
unkn. / misc.	50	8.553	16.000	0,06	12.256	27.000	0,04	0,486	0,406
Total	162	13.865.397	25.380.000	100,0	28.782.648	63.200.000	100,0	2,917	3,010

Der Hauptteil der Kupferproduktion stammt aus porphyrischen Lagerstätten, wie die Werte in den Tabellen (insbesondere in Tabelle 15) belegen. Der Anteil dieses Lagerstättentyps beträgt circa zwei Drittel bis maximal drei Viertel der aktiven Minen. ICSG weist mit Bezug auf Daten der USGS in einer bereits zehn Jahre zurückliegenden Studie „circa 60%“ der Weltkupferproduktion den porphyrischen Quellen zu. Derselben Untersuchung werden den sedimentären Lagerstätten etwa ein Fünftel der Kupfermenge zugeordnet.⁵⁴⁴ In Summe gehen ICSG und USGS davon aus, dass 80% der Weltkupferversorgung von diesen beiden Lagerstättentypen – porphyrisch und sedimentär – kommen. Dieses Verhältnis stimmt gut mit der Auswertung aus den in der Datenbank hinterlegten Kupferlagerstätten überein. An Kupferreserven beträgt der Anteil dieser beiden Lagerstätten circa 82%, an Kupferressourcen knapp über 83%. Die in Prozent zweistellige Produktionsausweitung im letzten Jahrzehnt kam zum überwiegenden Teil aus den riesigen porphyrischen Bergbaubetrieben. Der in der Tabelle 15 ausgewiesene Anteil von 72% der Reserven und 71% gemessen an den Ressourcen an porphyrischen Kupferquellen repräsentiert folglich die gestiegene Bedeutung dieses Lagerstättentyps. Die sedimentären Ressourcen haben einen Anteil von über einem Zehntel.

544 [ICSG2019], p.7.

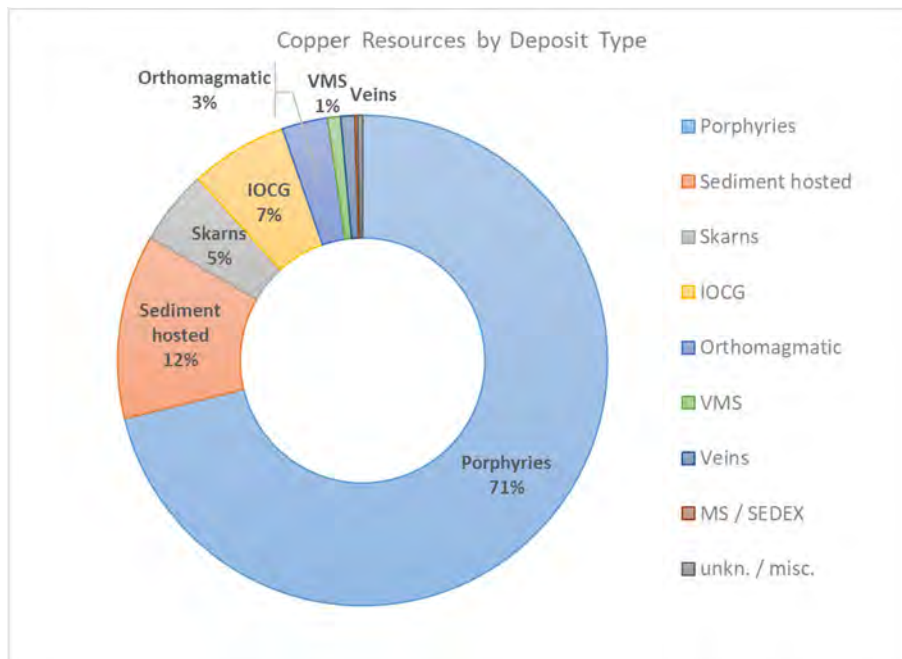


Abb. 155: Verteilung der Kupfer-Ressourcen nach Lagerstättentypologie⁵⁴⁵

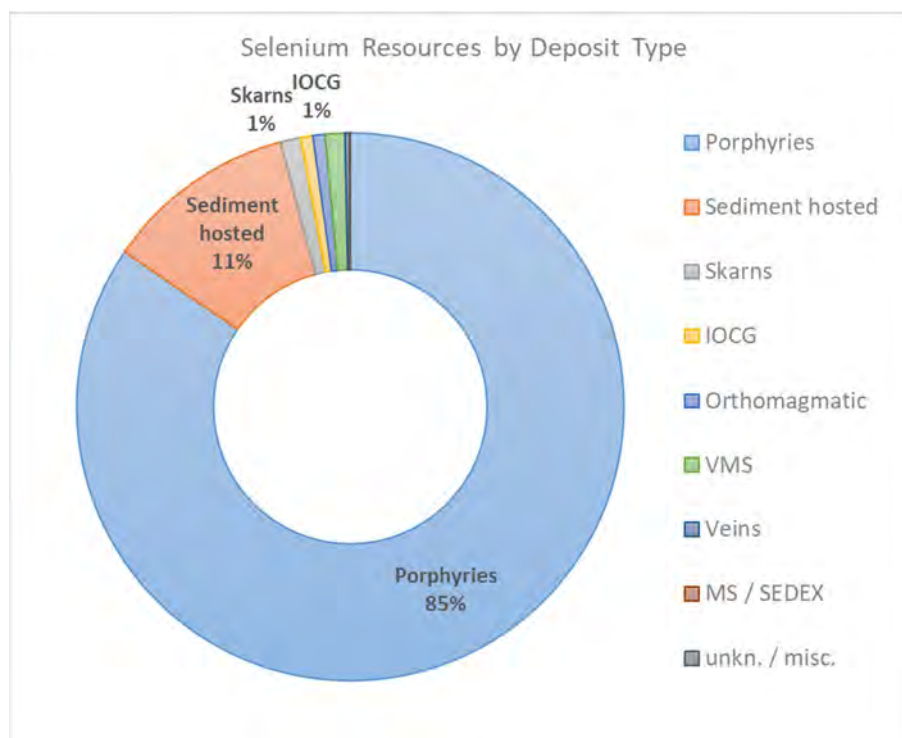


Abb. 156: Verteilung der Selen-Ressourcen nach Lagerstättentypologie⁵⁴⁶

545 eigene Auswertung.

546 eigene Auswertung.

9.2. Ressourcen und Reserven an Selen

9.2.1. Vorratsabschätzung aus Kupferlagerstätten

In Tabelle 15 sind die Vorratsberechnungen für Selen zusammengestellt. Die charakteristische Selenkonzentration des Lagerstättentypus wurde mit den hochgerechneten Vorratsdaten der Kupferminen verschnitten und sind in den Spalten „ $\sum\sum\text{Se Reserves}$ “ und „ $\sum\sum\text{Se Resources}$ “ ausgewiesen. Die weltweiten (potenziellen) Reserven an Selen aus aktiven Kupferbergbauen betragen 25.380.000 Tonnen (25,4 Mto.) und die (measured & indicated) Ressourcen 63.200.000 Tonnen (63,2 Mto.).

Die Selen-Reserven und –Ressourcen wurden in Kapitel 5.5 (S.187) und Kapitel 5.8 (S.195) anhand der Daten von USGS analysiert. Wie dort in Abb. 112 ausgewiesen, wurden die Selenreserven 2014 mit 120.000 Tonnen angegeben, fünf Jahre (2019) später trotz höheren Verbrauchs mit nur 99.000 Tonnen (Abb. 104). Die Weltproduktion von Selen betrug 2018 und 2019 um die 2.800 Tonnen, wobei die Datenqualität bereits im erwähnten Abschnitt analysiert und kritisch hinterfragt wurde. Das Potenzial für die Selengewinnung mit Reserven von 25,4 Millionen Tonnen ist circa um den Faktor 250 größer als bisher von USGS mit knapp hunderttausend Tonnen eingeschätzt. Die **Unterthese A**, dass die tatsächlichen Selenvorräte in Kupferlagerstätten signifikant größer als von geologischen Diensten bisher ausgewiesen wurden (z.B. USGS), konnte durch die vorliegende Analyse **verifiziert** werden.

Die in dieser Arbeit berechneten Selenvorräte sind vielversprechend. Die Gründe, warum Selen entweder nicht als Nebenmetall gefördert wird oder möglichst wenig Daten über Selenkonzentrationen öffentlich gemacht werden, wurden bereits in Abschnitt 5 und insbesondere in Kapitel 5.8 (S.195) erläutert. Die Gesellschaft und Wirtschaft in den 1970er Jahren hatte andere Schwerpunkte und mineralische Rohstoffe und Bergbau wurden als wichtige Bestandteile eines prosperierenden Wirtschaftssystems und strategischer (manchmal auch militärischer) Unabhängigkeit gesehen. Zieht man in Betracht, dass 1973 von USGS die Selenressourcen mit fast 13 Mto. angenommen wurden und dass sich die Kupferproduktion seit den 1970er Jahren knapp vervierfacht hat (vgl. Abb. 40; 13 Mto. mal 4 \approx 50 Mto.), so sind die in dieser Arbeit errechneten rund 60 Mto. Selen-Ressourcen plausibel.

In Kapitel 5.3 wurde bereits auf die historische Entwicklung hingewiesen, dass USGS noch 1973 die weltweit identifizierten Selenressourcen auf fast 13 Millionen Tonnen schätzte. Es wurde auch ein Verhältnis von Kupfer zu Selen ehemals angegeben. Man schätzte basierend auf dem Selengehalt der identifizierten Kupferressourcen den Gehalt von 0,325 kg gewonnenem Selen pro Tonne produziertem Kupfer ab. Das Verhältnis Se/Cu lautet sohin 0,033%.

Das Verhältnis von Selen zu gewonnenem Kupfer wurde in der Vergangenheit unterschätzt. Die Ursachen dafür sind mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit technologische. Die

Separierung und Aufbereitung von Selen erfordert prozesstechnisches Know-how und ist auch energieintensiv und kostspielig. Der aus den 1970er Jahren stammende Kennwert von 0,033% bildet diesen Sachverhalt ab. Mit den heute verfügbaren Prozessen und verfügbaren Techniken zur Behandlung des Anodenschlammes (siehe Kapitel 0, S.99ff), ist eine höhere Selenausbeute technisch und wirtschaftlich machbar. Aus den geologischen Untersuchungen beträgt das Verhältnis zwischen Selen und Kupfer bei den beiden bedeutendsten (porphyrischen und sedimentären) Lagerstätten circa 2,8 bis 3,8%, d.h. pro Tonne Kupfer sind in etwa 28 bis 38 kg Selen verfügbar (vgl. Tabelle 15). Prozessbedingt müssen naturgemäß Abschläge je nach Beschaffenheit der Anlage und des Erzes berücksichtigt werden.

Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die beiden wirtschaftlich bedeutendsten Lagerstättentypen (porphyrische und sedimentäre Vorräte) einen überdurchschnittlichen Selengehalt versprechen. Diese beiden Lagerstättentypologien von Kupfervorrattypologien⁵⁴⁷ zeichnen für über 95% des verfügbaren Selens verantwortlich.⁵⁴⁸ Mit nur knapp 1% Mengenbeitrag hat der wirtschaftlich kaum bedeutende VMS-Kupferlagerstättentyp ein ähnlich hohes Se/Cu-Verhältnis. Bei allen anderen Arten von Kupferanreicherungen liegt das Verhältnis von Se/Cu deutlich unter 1%. Im gewichteten Durchschnitt kann theoretisch ein Se/Cu-Verhältnis von circa 3% angenommen werden (vgl. letzte beiden Spalten in Tabelle 15).

Dieser Wert ist statistisch sowohl für die Reserven als auch die Ressourcenbetrachtung sinnvoll anzunehmen. Werden die beiden wirtschaftlich wesentlichen Haupttypologien – die porphyrische und sedimentogenen Lagerstätten – gemeinsam betrachtet, ergibt sich ein Se/Cu-Verhältnis für die Reserven von 3,39% und für die Ressourcen eine Relation von 3,46%, wie aus Tabelle 14 nachvollzogen werden kann. Es kann daher für die weiteren Abschätzungen davon ausgegangen werden, dass das wirtschaftlich relevante Se/Cu-Verhältnis für alle Vorratsarten in etwa gleich ist. Mit dieser Erkenntnis lassen sich sowohl die Reserven der Kategorien „probable“ und „proven“ als auch die Ressourcen der Kategorien „measured“ und „indicated“ für Selen aus Kupferlagerstätten abschätzen. Es kann mit einiger Sicherheit auch davon ausgegangen werden, dass bei den „inferred Resources“ dieses Verhältnis der beiden Metalle in etwa gleichbleibt.

547 eigene Auswertung.

548 Die mögliche reduzierte statistische Robustheit der charakteristischen Selenkonzentrationen anderer Typologien von Kupferlagerstätten fallen somit für die Gesamtaussage nicht ins Gewicht. Die überwiegende Anzahl der recherchierten und analysierten Selenkonzentrationen stammt aus diesen beiden Lagerstättentypen.

Tabelle 19: Kupfer-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstättenprojekte (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfer-gehalt / Σ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposit Projects	Σ Reserves	\emptyset Cu%Reserves	Σ Cu_Reserves	$\Sigma\Sigma$ Cu_Reserves	Cu%Rsv	Σ Ressourcen	\emptyset Cu%Resources	Σ Cu_Resources	$\Sigma\Sigma$ Cu_Resources	Cu%Res
Porphyries	14.162.164.732	0,150	54.890.462	100.467.000	65,145	62.782.508.286	0,411	250.455.115	549.903.000	60,345
Sediment hosted	952.896.894	0,925	14.717.092	26.937.000	17,467	5.834.037.075	1,895	96.694.686	212.304.000	23,298
Skarns	619.900.000	0,385	6.937.610	12.698.000	8,234	1.747.884.000	0,543	12.567.681	27.594.000	3,028
IOCG	939.617.037	0,391	5.221.285	9.557.000	6,197	2.940.709.662	1,302	21.133.749	46.402.000	5,092
Orthomagmatic	395.374.000	0,228	1.091.320	1.997.000	1,295	2.219.804.000	0,682	10.201.394	22.398.000	2,458
VMS	157.686.467	0,560	1.280.383	2.344.000	1,520	2.017.789.313	1,807	8.900.875	19.543.000	2,145
Veins	21.485.000	0,078	110.708	203.000	0,132	297.810.000	0,916	1.165.043	2.558.000	0,281
MS/SEDEX	3.300.000	0,020	6.600	12.000	0,008	592.086.000	0,746	1.659.985	3.645.000	0,400
unkn. / misc.	0	0,000	0	0	0,000	1.151.658.000	4,693	12.259.323	26.917.000	2,954
Total	17.252.424.130	0,488	84.255.460	154.215.000	100,0	79.584.286.336	0,522	415.037.851	911.264.000	100,0

Tabelle 18: Selen-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstättenprojekte (Σ Se_Reserves und Σ Se_Ressourcen: Menge auf Basis des Hauwerks / $\Sigma\Sigma$ Se_Reserves: Selen-Reserven / $\Sigma\Sigma$ Se_Ressourcen: Selen-Ressourcen / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposit Projects	Se_ppm	Σ Se_Reserves	$\Sigma\Sigma$ Se_Reserves	Se%Rsv	Σ Se_Resources	$\Sigma\Sigma$ Se_Resources	Se%Res	Se/Cu_Rsv	Se/Cu_Res
Porphyries	165	2.336.757	4.277.000	84,36	10.359.114	22.745.000	78,27	4,257	4,136
Sediment hosted	320	304.927	558.000	11,01	1.866.892	4.099.000	14,11	2,072	1,931
Skarns	48	29.755	54.000	1,07	83.898	184.000	0,63	0,425	0,667
IOCG	18	16.913	31.000	0,61	52.933	116.000	0,40	0,324	0,250
Orthomagmatic	60	23.722	43.000	0,85	133.188	292.000	1,00	2,153	1,304
VMS	350	55.190	101.000	1,99	706.226	1.551.000	5,34	4,309	7,936
Veins	45	967	2.000	0,04	13.401	29.000	0,10	0,985	1,134
MS / SEDEX	30	99	0	0,00	17.763	39.000	0,13	0,000	1,070
unkn. / misc.	50	0	0	0,00	2.917	6.000	0,02	n/a	0,000
Total	160	2.768.331	5.066.000	100,0	13.236.333	29.061.000	100,0	3,285	3,189

Tabelle 17: Kupfer-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstätten in Wartung (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfer-gehalt / Σ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits care	Σ Reserves	\emptyset Cu%Reserves	Σ Cu_Reserves	$\Sigma\Sigma$ Cu_Reserves	Cu%Rsv	Σ Ressourcen	\emptyset Cu%Resources	Σ Cu_Resources	$\Sigma\Sigma$ Cu_Resources	Cu%Res
Porphyries	448.113.000	0,363	588.793	1.078.000	5,936	4.277.296.000	0,397	11.392.958	25.015.000	39,001
Sediment hosted	465.439.000	1,138	8.928.464	16.342.000	89,989	647.852.000	1,777	16.645.502	36.547.000	56,980
Skarns	10.042.000	0,040	4.017	7.000	0,039	10.042.000	0,040	4.017	9.000	0,014
IOCG	0	0,000	0	0	0,000	0	0,000	0	0	0,000
Orthomagmatic	5.400.000	0,167	27.000	49.000	0,270	131.200.000	0,283	353.200	775.000	1,208
VMS	17.812.000	0,905	335.610	614.000	3,381	21.012.000	1,230	377.210	828.000	1,291
Veins	0	0,000	0	0	0,000	0	0,000	0	0	0,000
MS/SEDEX	0	0,000	0	0	0,000	0	0,000	0	0	0,000
unkn. / misc.	2.500.000	1,103	38.050	70.000	0,385	35.200.000	2,090	440.180	966.000	1,506
Total	949.306.000	1,045	9.921.934	18.160.000	100,0	5.122.602.000	0,570	29.213.067	64.140.000	100,0

Tabelle 16: Selen-Reserven und -Ressourcen aus Kupfer-Lagerstätten in Wartung (Σ Se_Reserves und Σ Se_Ressourcen: Menge auf Basis des Hauwerks / $\Sigma\Sigma$ Se_Reserves: Selen-Reserven / $\Sigma\Sigma$ Se_Ressourcen: Selen-Ressourcen / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits care	Se_ppm	Σ Se_Reserves	$\Sigma\Sigma$ Se_Reserves	Se%Rsv	Σ Se_Resources	$\Sigma\Sigma$ Se_Resources	Se%Res	Se/Cu_Rsv	Se/Cu_Res
Porphyries	165	73.939	135.000	32,14	705.754	1.550.000	75,98	12,523	6,196
Sediment hosted	320	148.940	273.000	65,00	207.313	455.000	22,30	1,671	1,245
Skarns	48	482	1.000	0,24	482	1.000	0,05	14,286	11,111
IOCG	18	0	0	0,00	0	0	0,00	n/a	n/a
Orthomagmatic	60	324	1.000	0,24	7.872	17.000	0,83	2,041	2,194
VMS	350	6.234	11.000	2,62	7.354	16.000	0,78	1,792	1,932
Veins	45	0	0	0,00	0	0	0,00	n/a	n/a
MS / SEDEX	30	0	0	0,00	0	0	0,00	n/a	n/a
unkn. / misc.	50	0	0	0,00	0	0	0,00	0,000	0,000
Total	242	229.919	420.000	100,0	928.775	2.040.000	100,0	2,313	3,181

Es ist sinnvoll, von den geologischen Daten statistisch ermittelten Se/Cu-Verhältnis einen technisch bedingten Abschlag vorzunehmen. Setzt man einen realistischen Abschlag von einem

Drittel an, ergibt sich das praktisch nutzbare **Se/Cu-Verhältnis**⁵⁴⁹ zu circa **2%**. Zu berücksichtigen sind in diesem Abschlag auch die Verluste von Selen und anderen Mineralien in den zur Kupferherstellung nötigen Aufbereitungsprozessschritten (vgl. Kap. 5.4, S.184). Diese Abschätzungsmethode ist sehr nützlich. Die Kupferproduktions- und Vorratsangaben sind transparent verfügbar somit können auch die verfügbaren Mengen an Selen mit den sich veränderten Daten für Kupfer auch zukünftig rasch abgeschätzt werden, da anzunehmen sein wird, dass sich an der geologischen Zusammensetzung der Erze nichts Grundlegendes ändert.

Diese Annahme ist nach Analyse der in Planung befindlichen Lagerstättenprojekte zulässig. Die Datengrundlagen sind in den folgenden Tafeln (Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen die sich in Planung befindlichen Kupferbergbauprojekte) zusammengestellt. Die oben erarbeiteten Aussagen für aktive Bergbaustätten findet in der Tendenz auch Bestätigung bei Minenprojekten, die mit gewissen Wahrscheinlichkeiten in Zukunft in Betrieb gehen. Eine exakte Analyse für zukünftige Bergbauoperationen ist unmöglich, da nur ein kleiner Teil dieser Projekte jemals den aktiven Betrieb aufnehmen werden, wie oben bereits erwähnt wurde. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den in Wartung befindlichen bergmännischen Betrieben, die in den folgenden Aufstellungen (Tabelle 16 und Tabelle 17 stellen die derzeit nicht operativen Betriebe („care“) zusammen) zusammengestellt sind. Erstens sind diese vorübergehend inaktiven Minen von der Größenordnung (weit unter 1% der aktiven Betriebe) durchaus vernachlässigbar. Andererseits weisen sie korrelierende Charakteristika auf. Der höhere Anteil an sedimentogenen Lagerstätten kann als Zufall im Augenblick der Feststellung des Betriebsstatus' bewertet werden. Es konnte daher auf eine Miteinbeziehung von Lagerstätten, die nicht aktiv sind, für die weitere Datenanalyse bewusst verzichtet werden.

Die Zusammenstellungen aller erfasster und analysierter Kupferlagerstätten (Tabelle 20 und Tabelle 21) zeigen eine nahezu idente Struktur wie die Teilmenge der aktiven Bergbaubetriebe. Der Anteil der Reserven von porphyrischen und sedimentogenen Lagerstätten gemessen an den Reserven unterscheiden sich nur um wenige zehntel Prozent (z.B. die Selenreserven aus aktiven Betrieben haben einen Anteil von 82,10% zu gesamt 82,47%). Eine unwesentlich größere Abweichung von circa einem Prozentpunkt ist bei den Ressourcen feststellbar.

Für die weiteren Berechnungen ist eine robuste Korrelation zwischen der Kupfer- und Selenmenge relevant. Hier zeigt sich besondere Übereinstimmung zwischen den aktiven Betrieben zu allen analysierten Kupferlagerstätten. Das Selen-Kupferverhältnis der Reserven beträgt bei den aktiven Minen 2,917% zu 2,962% bei Betrachtung aller Vorratsgebiete. Bei den Ressourcen ist die Relation von 3,010% bei aktiven zu 3,066% bei Betrachtung aller Lagerstätten ebenfalls sehr ähnlich (vgl. Tabelle 14 und Tabelle 20). Wie bereits ausgeführt, kann daher ohne Qualitätsverlust mit den hochgerechneten Werten aus den aktiven Bergbaubetrieben die weitere Analyse erfolgen.

⁵⁴⁹ eigene Auswertung.

Tabelle 21: Kupfer-Reserven und -Ressourcen kumuliert aus den Status (aktiv, Projekt, Wartung) der Kupfer-Lagerstätten (Σ Reserves und Σ Ressourcen: Menge Hauwerk / \emptyset Cu: durchschnittlicher Kupfer-gehalt / Σ Cu: Kupfermenge / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits (all)	Σ Reserves	\emptyset Cu%Reserves	Σ Cu_Reserves	$\Sigma\Sigma$ Cu_Reserves	Cu%Rsv	Σ Ressourcen	\emptyset Cu%Resources	Σ Cu_Resources	$\Sigma\Sigma$ Cu_Resources	Cu%Res
Porphyries	83.920.037.125	0,233	398.823.971	729.976.000	70,030	214.543.925.771	0,391	942.845.014	2.070.123.000	67,312
Sediment hosted	7.159.342.894	0,880	71.993.604	131.771.000	12,641	16.662.707.075	1,602	229.425.533	503.730.000	16,379
Skarns	4.986.889.000	0,436	41.222.514	75.450.000	7,238	8.937.865.900	0,508	59.870.757	131.453.000	4,274
IOCG	4.078.685.522	0,656	28.655.236	52.448.000	5,032	14.442.318.346	1,122	82.488.427	181.113.000	5,889
Orthomagmatic	1.977.510.000	0,602	16.269.498	29.778.000	2,857	5.923.447.000	0,668	39.345.643	86.388.000	2,809
VMS	752.036.246	0,804	6.664.299	12.198.000	1,170	3.000.349.272	1,572	17.544.368	38.521.000	1,253
Veins	465.408.700	0,233	3.201.443	5.860.000	0,562	1.881.507.000	0,812	10.094.997	22.165.000	0,721
MS/SEDEX	56.823.000	0,620	835.560	1.529.000	0,147	719.716.000	0,891	3.361.694	7.381.000	0,240
unkn. / misc.	287.718.308	0,738	1.837.836	3.364.000	0,323	1.680.493.100	5,993	15.727.156	34.530.000	1,123
Total	103.684.450.795	0,549	569.503.961	1.042.370.000	100,0	267.792.329.464	0,523	1.400.703.589	3.075.400.000	100,0

Tabelle 20: Selen-Reserven und -Ressourcen kumuliert aus den Status (aktiv, Projekt, Wartung) der Kupfer-Lagerstätten (Σ Se_Reserves und Σ Se_Ressourcen: Menge auf Basis des Hauwerks / $\Sigma\Sigma$ Se_Reserves: Selen-Reserven / $\Sigma\Sigma$ Se_Ressourcen: Selen-Ressourcen / Mengenangaben in metrischen Tonnen (t))

Cu Deposits (all)	Se_ppm	Σ Se_Reserves	$\Sigma\Sigma$ Se_Reserves	Se%Rsv	Σ Se_Ressourcen	$\Sigma\Sigma$ Se_Ressourcen	Se%Res	Se/Cu_Rsv	Se/Cu_Res
Porphyries	165	13.846.806	25.344.000	82,10	35.399.748	77.724.000	82,42	3,472	3,755
Sediment hosted	320	2.290.990	4.193.000	13,58	5.332.066	11.707.000	12,41	3,182	2,324
Skarns	48	239.371	438.000	1,42	429.018	942.000	1,00	0,581	0,717
IOCG	18	73.416	134.000	0,43	259.962	571.000	0,61	0,255	0,315
Orthomagmatic	60	118.651	217.000	0,70	355.407	780.000	0,83	0,729	0,903
VMS	350	263.213	482.000	1,56	1.050.122	2.306.000	2,45	3,951	5,986
Veins	45	20.943	38.000	0,12	84.668	186.000	0,20	0,648	0,839
MS / SEDEX	30	1.705	3.000	0,01	21.591	47.000	0,05	0,196	0,637
unkn. / misc.	50	8.553	16.000	0,05	15.173	33.000	0,03	0,000	0,001
Total	163	16.863.647	30.870.000	100,0	42.947.755	94.300.000	100,0	2,962	3,066

Zusammengefasst kann somit festgehalten werden, dass das ermittelte Se/Cu-Verhältnis von 2% robust auf die bekannten Reserve- und Ressourcendaten von wirtschaftlich relevanten Kupferlagerstätten zur Ermittlung der Selenreserven und -ressourcen angewendet werden kann. Die Robustheit dieser Se/Cu Relation wird durch sehr ähnliche Verhältnisse sowohl in aktiven als auch geplanten Bergbauen als auch zwischen Reserven- und Ressourcen-Daten gewährleistet.

9.2.2. Abschätzung der nutzbaren Ressourcen und Reserven an Selen

Selen wird wirtschaftlich immer als Nebenmetall in erster Linie beim Kupferabbau und Kupfererzeugung gewonnen. Das primäre Interesse gilt folglich der Optimierung der Prozesse zur Kupfererzeugung. Die Extrahierung von Nebenelementen können zur zusätzlichen Wertschöpfung des Minenbetriebes beitragen. Welche Nebenelemente gefördert werden, hängt vor allem von der Konzentration (Anreicherung) des jeweiligen Elements im Erz und den Folgeprozessen ab, und ob die Extrahierung technisch, ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll durchführbar ist. Nebenelemente wie Selen können daher nur in der Theorie im vollen Umfang des geologischen Vorkommens genutzt werden. Praktisch muss davon ausgegangen werden, dass selbst unter optimalen Bedingungen in Laufe Kupfererzeugungsprozesses Selen dem Extrahierungsprozess verloren geht. In dieser Arbeit wird nicht das willkürliche Beiseitlassen der Selenutzung berücksichtigt, jedoch die technologischen Faktoren. Zusätzlich wurde gezeigt, dass Kupfer aus porphyrischen

und sedimentogenen Lagerstätten zu über 95% zu den Selen-Ressourcen und –Reserven beitragen. Somit ist die charakteristische Selenkonzentration dieser beiden Lagerstättentypologien ausschlaggebend für die verfügbare Selenmenge. Nach den in den vorangegangenen Kapiteln erfolgten Analysen wird von einem technisch nutzbaren Selen-Kupfer-Verhältnis von 2% ausgegangen (siehe vorheriges Kapitel, Seite 263).

Wie oben (s. Kap. 4.4 (S.107), Kap. 4.8 (S.156)) bereits erläutert, sind folgende globale Kupfervorräte abgeschätzt worden:

Kupfer-Reserven:	≈ 870 Mto
Kupfer -Ressourcen:	≈ 2.100 Mto (identified resources)
Kupfer -Ressourcen:	≈ 3.500 Mto (undiscovered resources) ⁵⁵⁰

Mit dem angenommenen Se/Cu-Verhältnis von 2% errechnen sich (abgerundet) die Selenvorratsdaten wie folgt:

Selen-Reserven:	≈ 17 Mto
Selen-Ressourcen:	≈ 40 Mto (identified resources)
Selen-Ressourcen:	≈ 70 Mto (undiscovered resources)

Das in Kapitel 4.8.1 (S.156ff) zitierte Verhältnis von Ressourcen zu Reserven nach Werten von USGS aus den 1970er Jahren ist sehr ähnlich dem Ergebnis der hier durchgeführten Berechnungen und gibt diesem Arbeitsergebnis Plausibilität. Das Verhältnis von (identified) Kupfer-Ressourcen und Reserven ist circa 2,4 und spiegelt auch das Verhältnis der (identified) Selen-

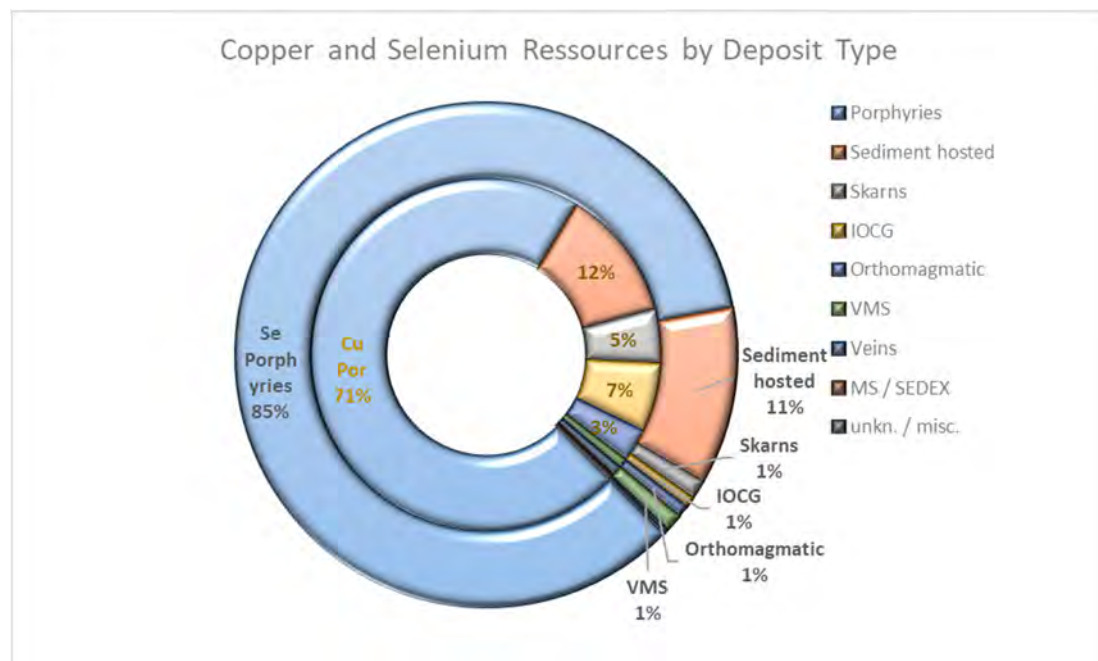


Abb. 157: Ressourcenanteile von Selen (äußerer Ring) und Kupfer (innerer Ring) nach Lagerstättentypologie⁵⁵¹

550 [USGSCU2020], p.53, („3.5 billion tons“).

551 eigene Auswertung; gerundete Werte.

Ressourcen und Reserven in etwa wider. Die als „undiscovered“ angegebenen Selen-Ressourcen ergeben sich durch Abschätzung aus den von USGS ausgewiesenen 3,5 Mrd. Tonnen⁵⁵² an noch nicht prospektierten Kupfervorräten.

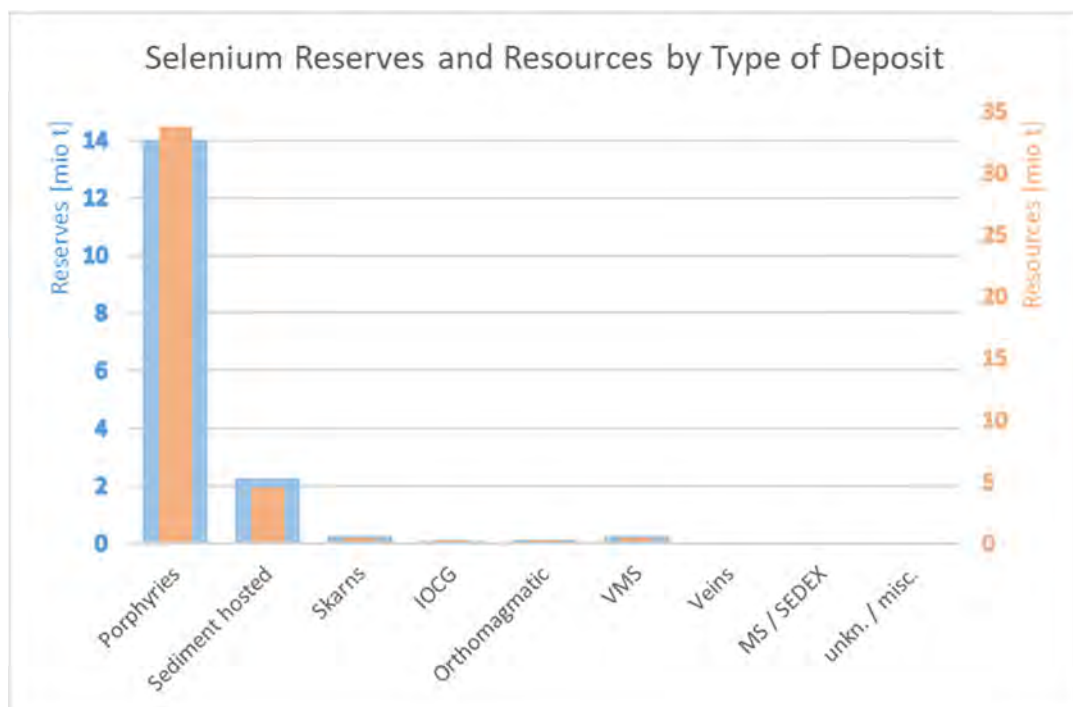
Diese Abschätzung auf Basis der globalen Daten ergibt Selen-Reserven von rund 17 Mto. und Selen-Ressourcen von circa 40 Mto. (identified resources). Die statistische Errechnung in dieser Arbeit aus der Kupferdatenbank weist Selen-Reserven von rund 25 Mto. und Selen-Ressourcen von circa 63 Mto. aus (vgl. Tabelle 14). Die Differenz erklärt sich aus dem oben beschriebenen Abschlag des Se/Ce-Verhältnisses von etwa einem Drittel aus technologischen Gründen.

Zusammengefasst und rückgerechnet ergeben sich sohin folgende Selenvorräte (Tabelle 22). Wie bereits oben erläutert, sind die wirtschaftlich bedeutenden Kupferlagerstättentypologien auch jene, die im Schnitt die höchste Selenkonzentration aufweisen (siehe Abb. 157). Im Sinne einer erhöhten Effizienz der Nutzung von Minen kann und muss die Extrahierung von Selen empfohlen werden. Die geologische Verfügbarkeit von Selen ist hinreichend gegeben, sodass ein industrieller Mehrbedarf durch eine Aufbereitung von Selen bei der Kupferproduktion möglich ist.

552 ebd.

Tabelle 22: Selen-Reserven und Selen-Ressourcen in metr. Tonnen je Lagerstättentypus

Cu Deposits	Se [ppm]	Se Reserves	%-Se-Rsv.	Se Resources	%-Se-Res.	%-Se/Cu-Rsv	%-Se/Cu-Res
Por	165	14.021.000	82,47	33.816.000	84,54	2,231	2,262
sedhost	320	2.253.000	13,25	4.527.000	11,32	2,546	1,776
Skarn	48	257.000	1,51	479.000	1,20	0,410	0,461
IOCG	18	69.000	0,41	288.000	0,72	0,161	0,214
Ortho	60	116.000	0,68	298.000	0,75	0,418	0,471
VMS	350	247.000	1,45	468.000	1,17	2,673	2,579
vein	45	25.000	0,15	99.000	0,25	0,442	0,505
MS / SEDEX	30	2.000	0,01	5.000	0,01	0,000	0,000
unkn. / misc.	50	11.000	0,06	17.000	0,04	n/a	n/a
Total	110	17.000.000	100,0	40.000.000	100,0	2,0	2,0

Abb. 158: Verteilung der Selenressourcen (rot) und der Selenreserven (blau) nach Lagerstättentypologie⁵⁵³

553 eigene Auswertung; gerundete Werte.

9.3. Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätte

Die Lagerstätten haben sich im Laufe der Erdgeschichte in verschiedenen Epochen gebildet. In nur einigen wenigen Abschnitten der Erdentwicklung entstanden die heute bedeutendsten Kupferanreicherungen. Mehr als zwei Drittel der Kupferreserven wurden vor circa 50 Millionen Jahren gebildet und stammen aus dem Paläogen (CenP).⁵⁵⁴ Es sind erdgeschichtlich eher junge Lagerstätten. Mit 12-13% sind die Anreicherungen aus dem noch jüngeren Neogen (vor circa 20 Millionen Jahren (CenN)) ebenfalls von Relevanz (siehe Tabelle 23 und Abb. 160). Somit entstanden etwa drei Viertel der heute bekannten Kupferreserven aus diese jungen Erdentwicklung, gemessen an den Ressourcen etwa zwei Drittel. Erwähnenswert mit je einem Zwanzigstel sind die Erdzeitabschnitte Neoproterozoikum (vor circa einer Mrd. Jahren (NProt)), das etwa doppelt so alte Paläoproterozoikum (PProt) sowie die Perm-Periode (ca. 300 Mio. Jahre (PalP)). Gemeinsam sind diese in den fünf genannten geologischen Zeiträumen gebildeten Lagerstätten für über 90% der Kupferreserven und knapp 86% der Kupferressourcen verantwortlich.

Tabelle 23: Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätte (Mengen in metr. Tonnen; Rsv = Reserven; Res = Ressourcen)

Geol.Age	mio yrs	Cu_Rsv	Cu_Rsv_%	Cu_Res	Cu_Res_%	Se_Rsv	Se_Rsv_%	Se_Res	Se_Res_%
CenN	5	121.060.000	13,915	259.740.000	12,368	1.590.000	9,350	3.790.000	9,480
CenP	35	532.120.000	61,163	1.134.630.000	54,030	11.840.000	69,639	25.540.000	63,838
MesC	100	17.380.000	1,998	135.610.000	6,458	480.000	2,835	3.540.000	8,845
MesJ	150	4.300.000	0,494	9.440.000	0,450	110.000	0,650	290.000	0,717
MesK	200	1.990.000	0,228	7.940.000	0,378	60.000	0,359	240.000	0,592
MesT	235	5.130.000	0,590	32.800.000	1,562	190.000	1,091	730.000	1,825
PalP	260	39.880.000	4,583	93.510.000	4,453	340.000	1,998	700.000	1,755
PalCarb	320	11.860.000	1,363	19.300.000	0,919	390.000	2,283	680.000	1,688
PalD	380	7.910.000	0,909	21.680.000	1,032	200.000	1,148	390.000	0,968
PalO	450	5.830.000	0,670	18.940.000	0,902	120.000	0,732	310.000	0,771
PalCam	500	80.000	0,010	1.830.000	0,087	4.000	0,021	20.000	0,047
NProt	1000	56.540.000	6,498	185.370.000	8,827	1.140.000	6,720	2.470.000	6,169
MProt	1600	4.170.000	0,480	11.380.000	0,542	4.000	0,026	20.000	0,038
PProt	2500	40.270.000	4,629	130.680.000	6,223	420.000	2,470	1.080.000	2,700
Arch	4000	19.460.000	2,236	31.630.000	1,506	100.000	0,592	180.000	0,455
unknown	n/a	2.020.000	0,232	5.540.000	0,264	10.000	0,088	40.000	0,111
Total		870.000.000	100,0	2.100.000.000	100,0	17.000.000	100,0	40.000.000	100,0

Ähnlich verhält es sich folglich auch bei den Selenvorräten. Lagerstätten aus dem Paläogen (CenP)⁵⁵⁵ und Neogen (CenN) tragen in etwa zu drei Viertel zu den heute bekannten Anreicherungen bei (79% der Reserven und 73% der Ressourcen). Werden die Anreicherungen aus dem Neoproterozoikum (NProt), dem Paläoproterozoikum (PProt) und Perm (PalP) hinzugerechnet, erklären sich ebenfalls über 90% der heute bekannten Selen-Reserven und 84% der Selenressourcen (siehe Tabelle 23 und Abb. 160). Auch in der Kreidezeit (MesC) und im Karbon (PalCarb) entstanden signifikante Selenanreicherungen. Kumuliert erklären diese in den sieben angeführten geologischen Zeiträumen gebildeten Lagerstätten circa 95% der Selen-Reserven und –Ressourcen.

⁵⁵⁴ Die Abkürzungen der geologischen Zeitskala sind in Abb. 145 zusammen gestellt.

⁵⁵⁵ Die Abkürzungen der geologischen Zeitskala sind in Abb. 145 zusammen gestellt.

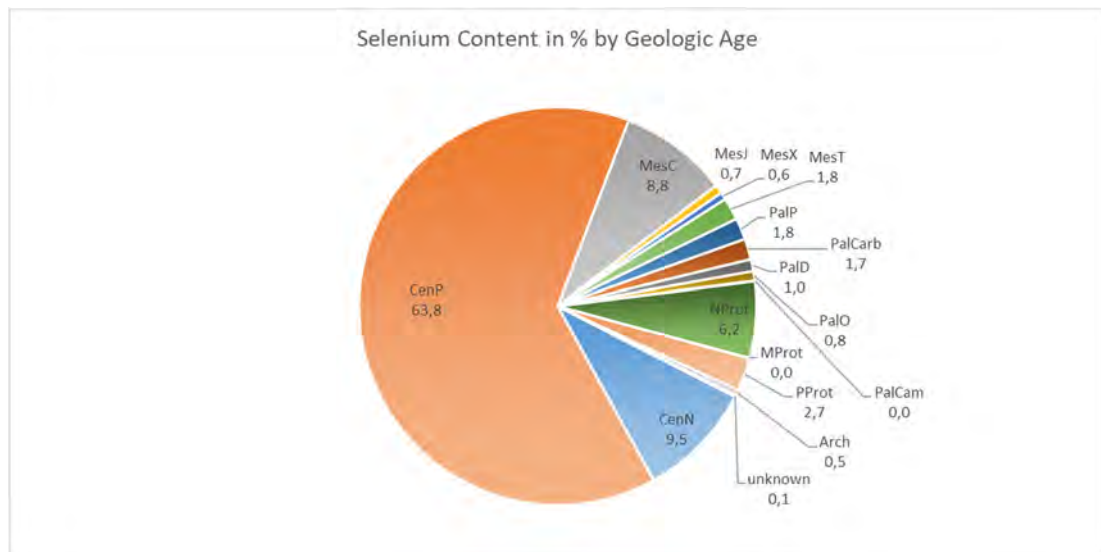


Abb. 159: Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätten⁵⁵⁶ Der größte Anteil von Selen stammt aus dem Paläogen (CenP) ergänzt von Bildungen im Neogen (CenN), Kreidezeit (MesC) und Neoproterozoikum (NProt).

Die Abkürzungen für die geologische Zeitskala sind in Abschnitt 6.15.3 (S.245) erläutert. „PalX“ ist ein Hinweis, dass diese Lagerstätten im Paläozoikum gebildet wurden, aber eine genauere Datierung nicht möglich bzw. gesichert ist. Ähnlich ist die Angabe „MesX“ als Zuordnung zum Mesozoikum ohne genauere Datierung zu verstehen.

Es wurden für die Aussagen zu den Selen-Reserven und –Ressourcen in den jeweiligen geologischen Abschnitten, die oben ermittelten, charakteristischen Selenkonzentrationen der Lagerstättentypen mit den Lagerstätten des jeweiligen Erdzeitalters verschnitten. In einer Detailauswertung wurde untersucht, welche Lagerstättentypen im jeweiligen geologischen Zeitabschnitt für die heute bekannten Selenvorräte besondere Bedeutung hat.

Diese Datenauswertung für das Neogen ergibt, dass die Selenanreicherungen vor allem in porphyrischen Vererzungen (93%) und Skarnen (knapp 7%) zu finden sind, geringfügig auch in gang-klufförmige Vererzungen (Veins). Die porphyrischen Vorräte dominieren auch mit 93% überproportional die Selenvorkommen aus dem Paläogen. Etwa 6% sind den sedimentären Vorkommen zuzurechnen und geringfügige Anteile tragen Skarne bei (Abb. 161).

⁵⁵⁶ eigene Auswertung. Abkürzungen für die geologische Zeitskala sind in Abschnitt 6.15.3 (S.265) erläutert.

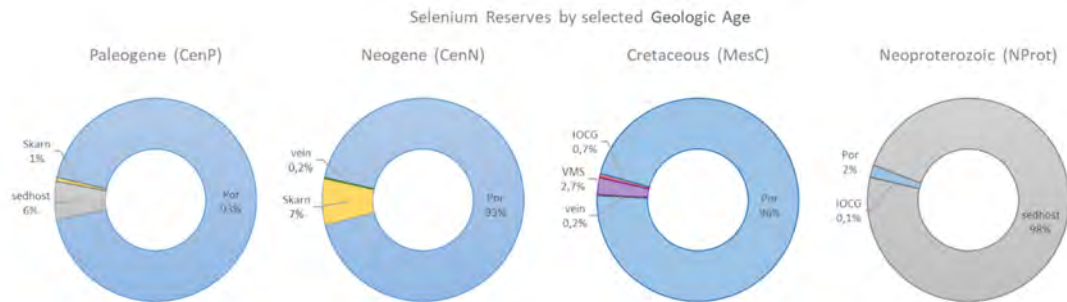


Abb. 161: Bedeutende Lagerstättentypologien von Selenreserven des Paläogens, Neogens, Kreide und Neoproterozoikum⁵⁵⁸

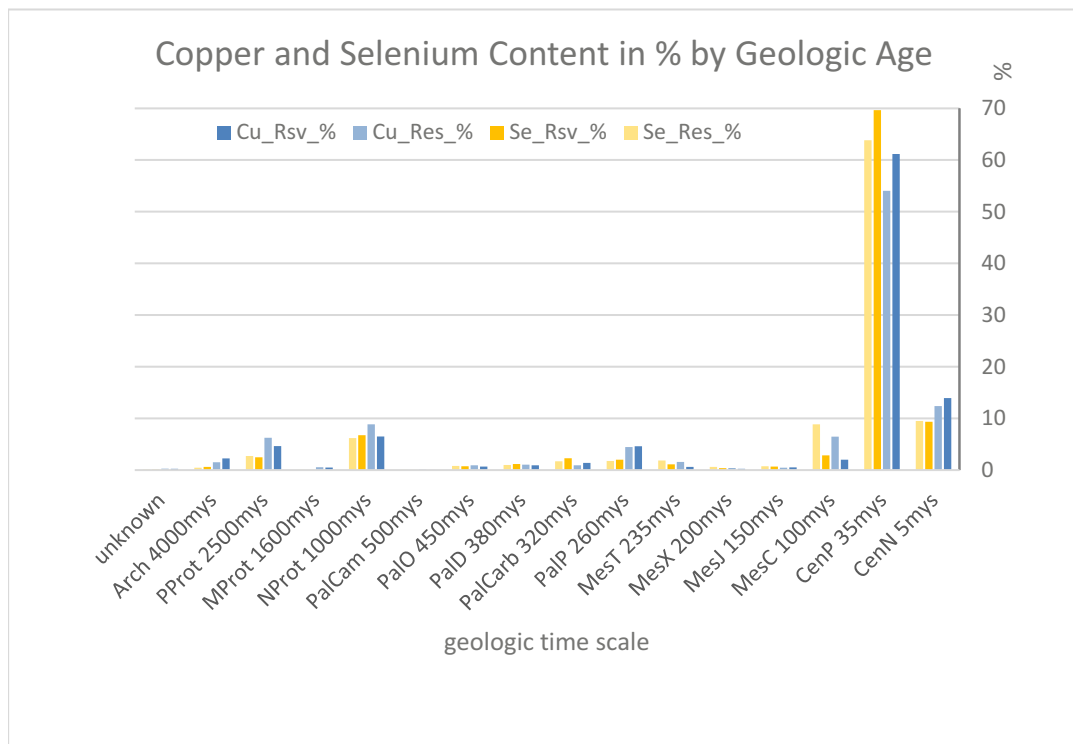


Abb. 160: Selenvorräte nach geologischem Alter der Lagerstätten⁵⁵⁷ Der größte Teil der Ressourcen (Res) und Reserven (Rsv) wurde im Paläogen (CenP) gebildet mit deutlichem Vorsprung zu Neogen (CenN) und Neoproterozoikum (NProt).

Noch dominanter ist der Anteil (96%) der porphyrischen Vererzungen in Lagerstätten, die in der Kreidezeit gebildet wurden. Geringfügig tragen die Lagerstättenarten VMS, IOCG und die gang-klufförmige Vererzungen (Veins) bei. Die bereits vor langer Zeit im Neoproterozoikum gebildeten Anreicherungen stechen mit einer gänzlich anderen Struktur heraus und zeigen, dass insbesondere die sedimentogenen Vorkommen (98%) in dieser geologischen Epoche gebildet wurden.

557 eigene Auswertung.

558 eigene Auswertung.

9.4. Selenvorräte nach Regionen und Ländern

Im Kapitel 5.3 (S.182) wurden die Vorratsangaben der USGS diskutiert. USGS weist nur wenigen Ländern Selen-Reserven zu (vgl. Abb. 112 und Abb. 104) und hat die Datenqualität mutmaßlich in den letzten Jahren nicht verbessert, wie bereits oben angeführt.

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Lagerstättendatenbank hat eine hohe, repräsentative Abdeckung insbesondere mit Bezug auf genaue geologische Zuordnungen. Eine vollständige und verlässliche geografische Abdeckung mit den genannten und überprüfbaren Attributen ist nahezu unmöglich zu erzielen. Die analysierten Daten ergeben eine sehr gute Datenlage und Repräsentanz für die Regionen (Kontinente) Europa und Afrika. Auch für die Region Lateinamerika ist die Abdeckung sehr gut. Die Datenlage für Nordamerika leidet unter den unterschätzten Vorräten in den USA und Mexiko. Überraschenderweise weisen auch die Auswertungen für Australien eine Abdeckung von lediglich einem Fünftel auf und daher wird das Vorratsaufkommen in Ozeanien statistisch unterschätzt. Weniger überraschend ist, dass China die Transparenz in der Region Asien maskiert. Nur geringfügig besser ist die Datenlage in Russland. Hingegen sind die Auswertungen aus Indonesien und Kasachstan überraschend repräsentativ.

Da Kupfer ein metallischer Wertstoff der Weltwirtschaft ist, weist USGS regelmäßig Produktionsdaten und auch die Kupfervorräte⁵⁵⁹ aus. Die ausgewiesenen Kupfer-Reserven, die in Abb. 50 zusammengestellt sind, geben einen guten Überblick über die kupferproduzierenden Länder und es kann daher davon von einer repräsentativen Datenlage ausgegangen werden.

Wie oben ausgeführt, kann mit guter Annäherung von den Kupfer-Ressourcen und -Reserven auf die Selen-Ressourcen und -Reserven geschlossen werden. Aus Kombination der drei genannten Quellen, den von USGS publizierten Selen-Vorratsangaben und den ebenfalls von USGS ausgewiesenen Kupfervorräten sowie insbesondere aus der dieser Arbeit zugrunde gelegten eigenen Datensystematik, wurde eine Abschätzung der weltweiten Selenvorräte vorgenommen. Diese Vorratsdaten stimmen sehr gut mit den in Tabelle 22 (S.267) in dieser Arbeit abgeleiteten und errechneten Werten überein.

Ausgangspunkt der Berechnung waren insbesondere die Angaben der Kupfer-Reserven ausgewählter Länder (vgl. Abb. 50). Diese Daten wurden mit den kumulierten Zahlen für die Reserven des jeweiligen Landes verglichen. Für einige Länder weist dieser Vergleich eine gute Übereinstimmung auf, wie für Gambia und Chile. Staaten wie DRC (Kongo), Indonesien, Kasachstan, Russland, Mexiko, USA und Australien werden von USGS mit größeren Reserven ausgewiesen als die Kumulierung der einzelnen, aktiven Lagerstätten ergibt. Diese Tatsache ist erklärbar mit dem Faktum, dass die Datenbank der Kupferlagerstätten sehr repräsentativ, aber eben nicht vollständig ist. In diesen Fällen wurde davon ausgegangen, dass die Summen-Daten von USGS aussagekräftiger sind und wurden daher für die weitere Analyse benutzt.

⁵⁵⁹ [USGSCU2020], p.53.

USGS weist ein Viertel der Kupfer-Reserven keinen Ländern zu, sondern fasst diese in „other countries“ zusammen.⁵⁶⁰ Besonders an dieser Stelle erweist sich die Kupferlagerstätten-Datenbank als unabdingbar wertvoll, da die Reserveangaben der Lagerstätten Länder zugeordnet werden können. Besonders ins Auge sticht die Tatsache, dass USGS kein einziges europäisches Land namentlich mit Kupfer-Reserven ausweist. Polen hat eine durchaus bemerkenswerte Kupferindustrie mit eigenen Lagerstätten, die über Hälfte der europäischen Reserven ausmachen. Weitere Länder sind Schweden und Serbien, die jeweils über 15% der Reserven halten. Europa hat eine Gesamtmenge an Kupfer-Reserven von gut 16 Mt. Die Kupfer-Reserven im Iran sind in der Größenordnung von 17 Mto., Brasilien 8 Mto., Kanada 7 Mto. und Papua-Neuguinea 8 Mto. Für Peru weist USGS 87 Mto. aus, die aus den Geschäftsberichten kumulierten Reserveangaben für peruanische Kupferminen betragen circa 105 Mto., sind somit um fast ein Viertel größer. In all diesen Fällen wurden die Kupfer-Reserven den jeweiligen Staaten zugeordnet.

Aus den in den soeben erläuterten Schritten und länderspezifisch ermittelten Kupfer-Reserven wurden mit der oben abgeleiteten Korrelation zwischen Kupfer- und Seleninhalt die Selen-Reserven pro Land errechnet. Diese Werte wurden mit den von USGS ausgewiesenen Selen-Reserven (vgl. Abb. 104) verglichen. Es zeigt sich, dass durchgehend die USGS-Werte unter den aus den aktiven Kupferlagerstätten ermittelten liegen. Die Selenreserven konnten bis auf einen akzeptablen Rest von knapp zehn Prozent Ländern zugeordnet werden.

Die allgemein verfügbare Datenlage für länderspezifische Kupfer-Ressourcen ist deutlich eingeschränkter. Die bereits zitierte, dieser Arbeit zugrundeliegende Datenbank von Kupferminen liefert einen sehr guten Überblick über auch über die Kupfer-Ressourcen je Staat. Aus diesen Daten kann wie bei den Reserven der Selengehalt ermittelt werden. In Kapitel 4.8 (S.156) wurde auf die Korrelation von Kupfer-Ressourcen und –Reserven hingewiesen und eine mittlere Verhältniszahl von 2,2:1 abgeleitet. Da das Modell, das dieser Arbeit zugrundeliegende liegt, einen im Durchschnitt linearen Zusammenhang zwischen Kupfer- und Seleninhalt ausweist, kann mit demselben linearen Verhältnis von den Selen-Reserven auf die Selen-Ressourcen geschlossen werden. Eine Gegenüberstellung von ausgewählten Selenressourcen aus beiden Rechenmodellen zeigt in den meisten Ländern eine gute Übereinstimmung. Beispielsweise werden für die Demokratische Republik Kongo (DRC) aus den Kupferressourcen der Datenbank die Ressourcen an Selen mit 890 Tt berechnet; mit der Verhältnisabschätzung (2,2:1) zwischen Reserven und Ressourcen werden 840 Tt ermittelt. Ähnliche Übereinstimmungen finden sich in zahlreichen anderen Ländern, wie Namibia, Tansania, Sambia, Polen, Spanien, Kolumbien, Mexiko und Kanada.

Erhebliche Abweichungen zeigen sich in den Staaten China, Indonesien, Kasachstan, Mongolei, Russland, Serbien, Peru und Australien. In diesen Fällen weist die Abschätzung aus den Selen-Reserven validere Werte aus. Dies ist dem Faktum geschuldet, dass in den angeführten Ländern

560 [USGSCU2020], p.53.: USGS weist von 870 Mto. Gesamtkupfer-Reserven 220 Mto. „anderen Ländern“ kumuliert zu.

die aktiven Kupferbergbaue nicht vollständig in der Datenbank erfasst sind. In diesen Fällen wurden die aus den Reserven ermittelten Werte für die Selenressourcen ausgeworfen und in die Tabelle übernommen.

Die nach Ländern aufgeschlüsselten Selenreserven und -ressourcen, geben einen Überblick über die geographisch mannigfaltig (divers) verfügbaren Lagerstätten aus denen Selen als Nebennmetall gewonnen werden kann. Die kompakte Darstellung der Ressourcen und Reserven an Selen gegliedert nach Land und nach Regionen ist tabellarisch in Tabelle 25 und grafisch in Abb. 162 und Abb. 163 illustriert.

Tabelle 24: Selen-Ressourcen und –Reserven nach Regionen (Mengen in metr. Tonnen)

Selenium	Reserves	Resources	Rsv ratio [%]	Res ratio [%]
AF (Africa)	800.000	1.820.000	4,7	4,6
AS (Asia)	3.340.000	7.560.000	19,6	18,9
EU (Europe)	320.000	1.372.000	1,9	3,5
LA (Latin America)	7.070.000	15.730.000	41,6	39,3
NA (NorthAmerica)	2.220.000	5.200.000	13,1	12,9
OC (Oceania)	1.900.000	4.170.000	11,1	10,4
Other countries	1.360.000	4.150.000	8,0	10,4
Total	17.000.000	40.000.000	100,0	100,0

Selenium Reserves (inner circle) and Resources (outer circle) by Region

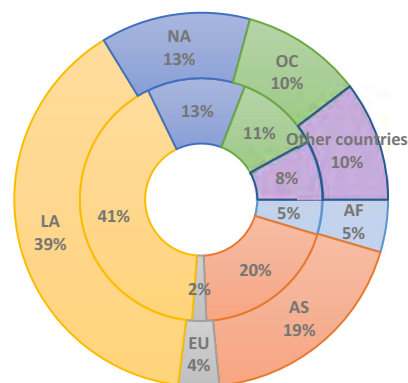


Abb. 162: Aufteilung der Selen-Reserven (innerer Kreis) und Selen-Ressourcen (äußerer Kreis) nach Regionen (Kontinenten)⁵⁶¹ (Abkürzungen s. Tabelle)

561 eigene Auswertung.

Tabelle 25: Selen-Ressourcen und –Reserven nach Ländern und Regionen (Mengen in metr. Tonnen)

Selenium	Reserves	Resources	Rsv ratio [%]	Res ratio [%]
AF (Africa)	800.000	1.820.000	4,7	4,6
BOTS	20.000	40.000	0,1	0,1
DRC	380.000	900.000	2,2	2,2
MAUR	2.000	5.000	0,0	0,0
MOROCCO	1.000	3.000	0,0	0,0
NAMIBIA	4.000	9.000	0,0	0,0
RSA	3.000	10.000	0,0	0,0
TANZ	1.000	3.000	0,0	0,0
ZAMBIA	380.000	840.000	2,2	2,1
ZIMBABWE	7.000	20.000	0,0	0,0
AS (Asia)	3.340.000	7.560.000	19,6	18,9
ARMENIA	50.000	100.000	0,3	0,3
AZERB	2.000	4.000	0,0	0,0
CHINA	520.000	1.140.000	3,1	2,9
INDIA	90.000	190.000	0,5	0,5
INDONESIA	560.000	1.230.000	3,3	3,1
IRAN	340.000	740.000	2,0	1,9
KAZ	400.000	880.000	2,4	2,2
KYR	1.000	2.000	0,0	0,0
LAOS	10.000	30.000	0,1	0,1
MONG	70.000	380.000	0,4	1,0
PHILIPPINES	30.000	60.000	0,2	0,2
RUSSIA	1.240.000	2.720.000	7,3	6,8
SAUDI ARABIA	6.000	10.000	0,0	0,0
TURKEY	30.000	60.000	0,2	0,1
EU (Europe)	320.000	1.372.000	1,9	3,5
BULG	4.000	40.000	0,0	0,1
FIN	8.000	20.000	0,0	0,0
MACED	2.000	4.000	0,0	0,0
POL	190.000	420.000	1,1	1,1
RUSSIA	10.000	20.000	0,1	0,1
SERBIA	40.000	720.000	0,2	1,8
SPAIN	21.000	42.000	0,1	0,1
SWE	60.000	120.000	0,3	0,3
LA (Latin America)	7.070.000	15.730.000	41,6	39,3
ARG	9.000	180.000	0,1	0,4
BRAZIL	160.000	340.000	0,9	0,9
CHILE	4.630.000	10.180.000	27,2	25,4
COLOMBIA	20.000	50.000	0,1	0,1
DOM	4.000	9.000	0,0	0,0
PERU	2.260.000	4.970.000	13,3	12,4
NA (North America)	2.220.000	5.200.000	13,1	12,9
CAN	140.000	310.000	0,8	0,8
MEX	1.060.000	2.650.000	6,2	6,6
USA	1.020.000	2.240.000	6,0	5,6
OC (Oceania)	1.900.000	4.170.000	11,1	10,4
AUSTRALIA	1.740.000	3.830.000	10,2	9,6
PAPUA	160.000	340.000	0,9	0,9
Other countries	1.360.000	4.150.000	8,0	10,4
Total	17.000.000	40.000.000	100,0	100,0

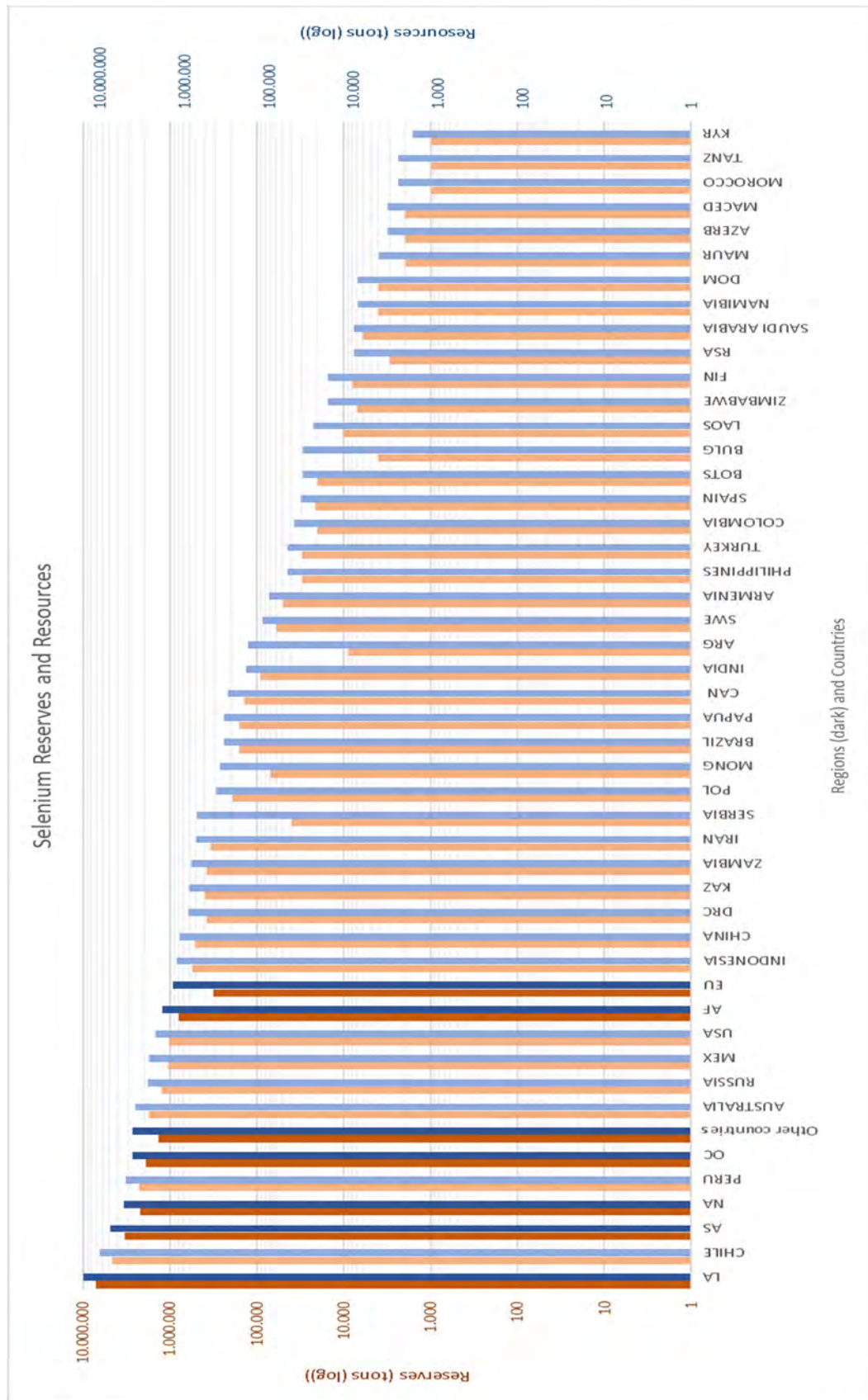


Abb. 163: Selen-Reserven und Selen-Ressourcen nach Regionen (Kontinenten)⁵⁶²

562 eigene Auswertung.

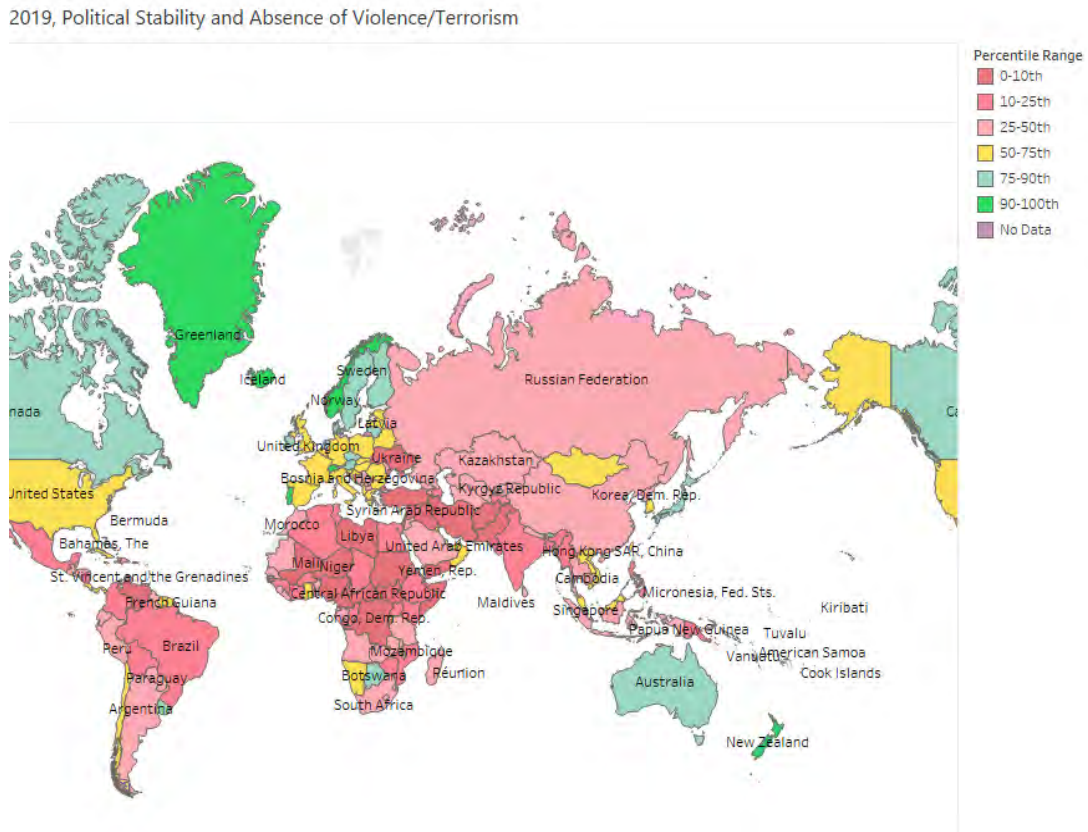


Abb. 164: Worldwide Governance Indicator (WGI) 2019⁵⁶⁵

Für die wirtschaftliche Verfügbarkeit eines Rohstoffs ist nicht nur das geologische Vorkommen ausschlaggebend, sondern auch mit welcher Sicherheit das Material nach Bedarf erhalten werden kann. Störungen des Rohstoffzuflusses können durch (politisch) Zwischenfälle im jeweiligen Land ausgelöst werden oder durch Unterbrechungen der Transportkette, also logistischen Ursprungs sein. Die Weltbank erhebt einen Index für die politische Stabilität eines Landes. Als Grad politischer Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus wird die Wahrscheinlichkeit politischer Instabilität und/oder politisch motivierter Gewalt, einschließlich Terrorismus bewertet. Die Schätzung gibt die Punktzahl des Landes für den Gesamtindikator in Einheiten einer Standardnormalverteilung an und liegt im Bereich von ungefähr -2,5 bis 2,5.⁵⁶³ Der „Worldwide Governance Indicator“ (WGI) wird jährlich erhoben und ist öffentlich unter www.govindicators.org⁵⁶⁴ verfügbar und in Abb. 164 illustriert.

Die kategorisierte Anwendung des WGI auf die ermittelten Selen Reserven und Ressourcen zeigt, dass circa die Hälfte dieser Vorratsmengen aus (ausreichend) stabilen Ländern verfügbar

⁵⁶³ World Bank | <https://datacatalog.worldbank.org/political-stability-and-absence-violenceterrorism-estimate> (04.10.2020).

⁵⁶⁴ Kaufmann, Daniel, Aart Kraay und Massimo Mastruzzi (2010).

⁵⁶⁵ <http://info.worldbank.org/governance/wgi/Home/Reports> (04.10.2020).

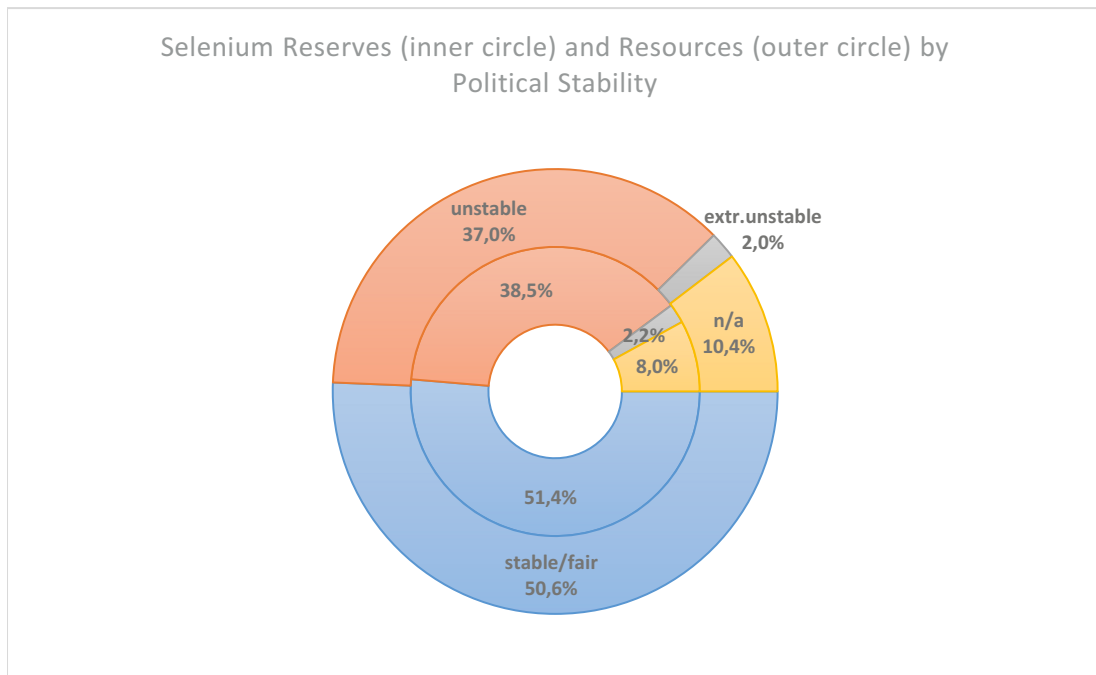


Abb. 165: Selen-Reserven (innerer Kreis) und Selen-Ressourcen (äußerer Kreis) nach politischer Stabilität⁵⁶⁶

sind. Umgekehrt zeigt diese Auswertung, dass an die vierzig Prozent der Ressourcen in ausgewiesenen instabilen Ländern liegen. Etwa ein Zehntel der Selenressourcen lassen sich keinen Ländern und damit keiner expliziten politischen Stabilitätsklasse zuordnen. Es wird jedoch anzunehmen sein, dass auch diese Vorräte in instabilen Ländern lagern, da im Regelfall die verfügbare Datenlage über Rohstoffvorkommen in stabilen Ländern verlässlicher und vollständiger ist (Tabelle 26 und Abb. 165).

Tabelle 26: Anteile der Selenmengen in (metr.) Tonnen aus politisch stabilen und instabilen Regionen

Selenium	Reserves	Resources	Rsv ratio [%]	Res ratio [%]
stable/fair	8.748.000	20.254.000	51,4	50,6
unstable	6.557.000	14.787.000	38,5	37,0
extr.unstable	370.000	800.000	2,2	2,0
n/a	1.360.000	4.150.000	8,0	10,4
Total	17.000.000	40.000.000	100,0	100,0

⁵⁶⁶ eigene Darstellung.

9.5. Analyse der Selenressourcen

9.5.1. Lagerstättengröße und -typus

Für die wirtschaftliche Nutzung ist die Größe der in der Lagerstätte vermuteten Ressourcen eine wesentliche Kennzahl. Je größer die Mengen von Reserven und Ressourcen eines Elements einer Lagerstätte sind, desto sicherer können Investitionen getätigt werden und die Höhe der Investition in Aufschließung, Infrastruktur, Ausbringung, Aufbereitung und Logistik ist auf eine in Summe größere Tonnagenmenge kalkulatorisch verteilbar. Dieses Kriterium wiegt im Regelfall schwerer als der Gehalt (grade) des Elements. Dieser Zusammenhang wurde bereits oben anhand der porphyrischen Lagerstätten, die im Regelfall zu den größten weltweit betriebenen Bergbauen gehören, erläutert. In Kapitel 4.8.2 (S.164) wurde nach den Analysen von L. Weber die durchschnittliche Größe einer Kupferlagerstätte je Lagerstättentypus ermittelt.

Für Selen sind diese wirtschaftlichen Parameter in gleicher Weise gültig. Wahrscheinlicher ist sogar, dass das wirtschaftliche Kriterium des Begleitelements größer wiegt, da der wirtschaftliche Hauptfokus auf dem Hauptelement Kupfer ruht. Die Aufbereitung von Selen erfordert zusätzliche Infrastruktur und Prozessschritte und folglich höhere Investitionen mit den oben angeführten Umweltrisiken. Für das Ziel, das Nebenelement Selen stärker verfügbar zu machen, ist eine möglichst große Menge an Selenressourcen wirtschaftlich hilfreich.

Es wurden in dieser Arbeit die einzelnen Kupferlagerstätten je Typus mit den Selenkonzentrationen verschnitten und die Selenressourcen ermittelt. Die Gesamtressourcen je Lagerstättentypus wurden mit den Selenkonzentrationen der einzelnen Lagerstätten mengenmäßig gewichtet in Beziehung gesetzt die (statistische) Größe einer durchschnittlichen Selenlagerstätte mengenmäßig gewichtet ermittelt. In Abb. 166 sind die Ergebnisse veranschaulicht. Die gelben diagonalen Linien indizieren angenommene Grenzbereiche für die Größenordnung der durchschnittlichen Lagerstättengrößen. Die Abszisse beinhaltet die Selenmenge in Tonnen je Lagerstättentypus und wird mit der durchschnittlich zu erwartenden Selenkonzentration auf der Ordinate veranschaulicht. Eine Multiplikation dieser beiden Achsenwerte ist daher unzulässig.

Die bedeutenden Kupferlagerstätten sind vom Typus der porphyrischen und sedimentogenen Vererzungen. Insbesondere diese beiden Lagerstättenarten weisen im Regelfall auch eine hohe Konzentration am Selen auf. Es ist daher schlüssig, dass diese beiden Kupferlagerstättentypen interessante Größenordnungen für durchschnittliche Selenlagerstätten ausweisen. Im gewichteten Durchschnitt beinhaltet eine Kupferlagerstätte vom porphyrischen Typus circa eine Milliarde Tonnen an Cu-Ressourcen. Die Selenressourcen sind ebenfalls vergleichsweise groß mit gut 160 tausend Tonnen (Tabelle 27).

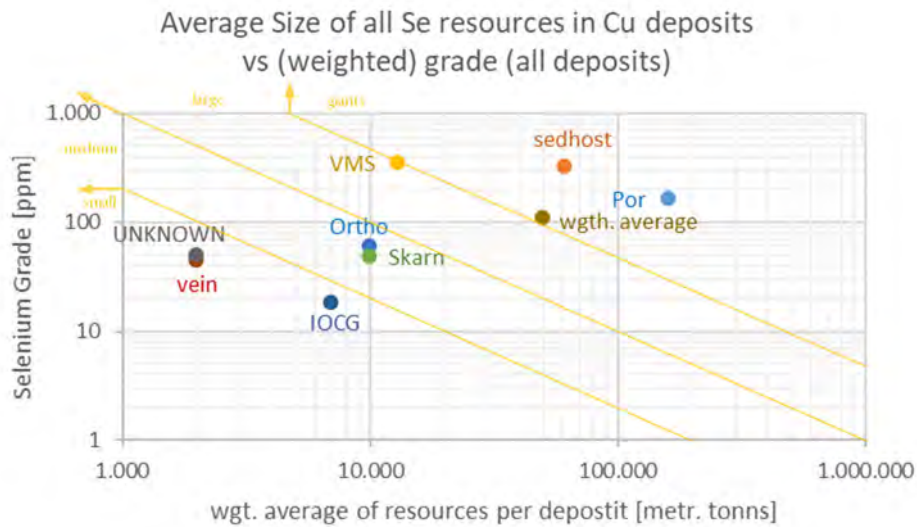


Abb. 166: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller analysierten Lagerstätten⁵⁶⁷

Tabelle 27: Durchschnittliche Menge an Selen-Ressourcen je Typus von Kupferlagerstätten (Mengen in metr. Tonnen; Selengehalt in ppm)⁵⁶⁸

Type of Deposit	ØSe-Resources per deposit [metr. tonnes]	Se content [ppm]
Porphyries (Por)	161.000	165
Sediment hosted (sedhost)	61.000	320
VMS	13.000	350
Orthomagmatic (Ortho)	10.000	60
Skarns	10.000	48
IOCG	7.000	18
Veins	2.000	45
UNKNOWN	2.000	50
wgth. average	50.000	110

Der Sedhost-Typus ist ähnlich wie für Kupfer eine Größenordnung im Durchschnitt kleiner (circa 60 tausend Tonnen Selen; 200 Mio. Tonnen Kupfer), weist aber eine höhere Konzentration aus (320 ppm Se; 1,5 bis 2% Cu) und somit ist auch dieser Lagerstättentypus von besonders hervorzuhebender Größenordnung. Der VMS-Typus hat im Ranking der Kupferlagerstätten eher geringe Bedeutung bezogen auf die durchschnittliche Größe und Kupferkonzentration, jedoch ist diese Lagerstättenart für Selen aufgrund der hohen Selenkonzentration durchaus beachtenswert. Im Gegenzug sind IOCG Lagerstätten von relevanter Größenordnung für die Kupfererzeugung, jedoch in hinsichtlich der Selenressourcen als klein einzustufen. Der Typus Vein ist sowohl auf

⁵⁶⁷ eigene Auswertung.

⁵⁶⁸ eigene Auswertung.

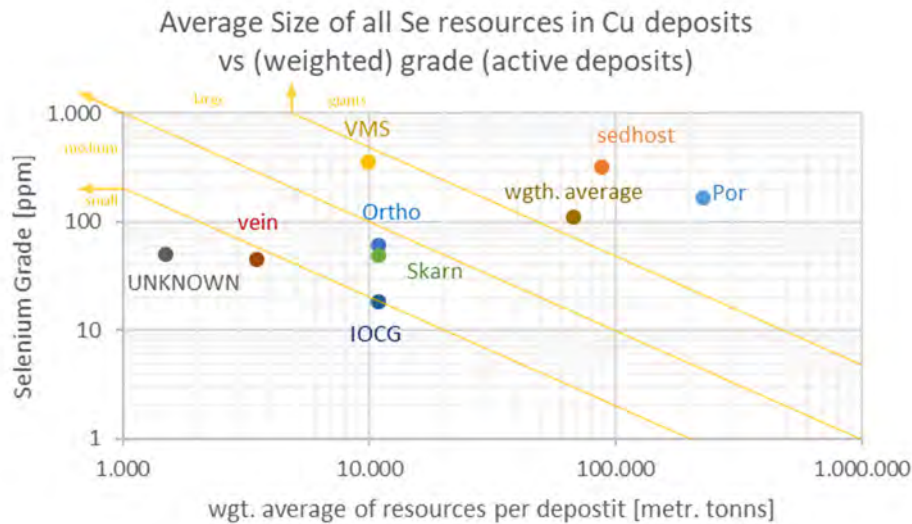


Abb. 167: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller aktiven Lagerstätten⁵⁶⁹

die durchschnittliche Menge von Kupfer- als auch Selen als klein zu klassifizieren. In die durchschnittlich mittlere Lagerstättengröße fallen mit Bezug auf Kupfer als auch Selen die Typologien der orthomagmatischen Vererzungen und Skarne. Im gewichteten Durchschnitt zeigen die Kupferlagerstätten beachtliche Selenressourcen von circa 50.000 Tonnen auf eine einzelne Lagerstätte bezogen.

Die nach gleichen Algorithmen vorgenommene getrennte Analyse der Lagerstätten nach solchen, die aktiv produzieren, nach Bergbauprojekten und jenen, die vorübergehend nicht fördern, ergibt ein ähnliches Bild. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen Abb. 167, Abb. 168 und Abb. 169 zusammengestellt. Es fällt auf, dass die in Exploration befindlichen Projekte im Durchschnitt um die Hälfte kleiner sind. Die zu erwartende Selenressourcenmenge reduziert sich von 68.000 Tonnen der derzeit aktiven Bergbaubetriebe auf etwa 32.000 Tonnen je Förderbetriebsstätte signifikant. Wie oben bereits ausgeführt, geht in der Regel nur ein kleiner Teil der als Projekte geführten Lagerstätten jemals in Produktion. Die geringere Ressourcenmenge erschwert sichtlich die wirtschaftliche Darstellung derartiger Projekte. Umso entscheidender ist es, die Selenaufbereitung in den derzeit (noch größeren) Kupferbergbaubetrieben voranzutreiben und diese Ressource nicht ungenutzt im Lagerstättenareal zurückzulassen. Meist wurde sie bereits mit dem Kupfererz ausgebracht, sodass nur mehr Investitionen in die Aufbereitung nötig sind.

⁵⁶⁹ eigene Auswertung.

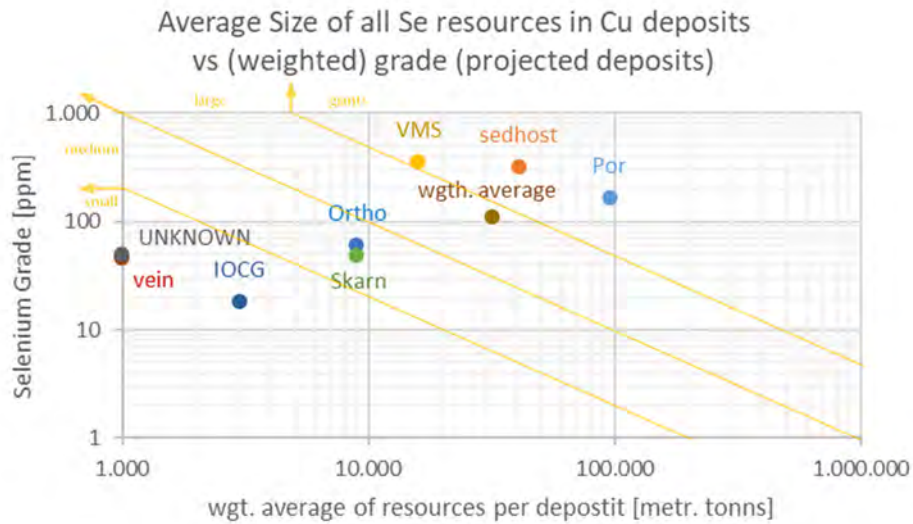


Abb. 168: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstättenprojekte⁵⁷⁰

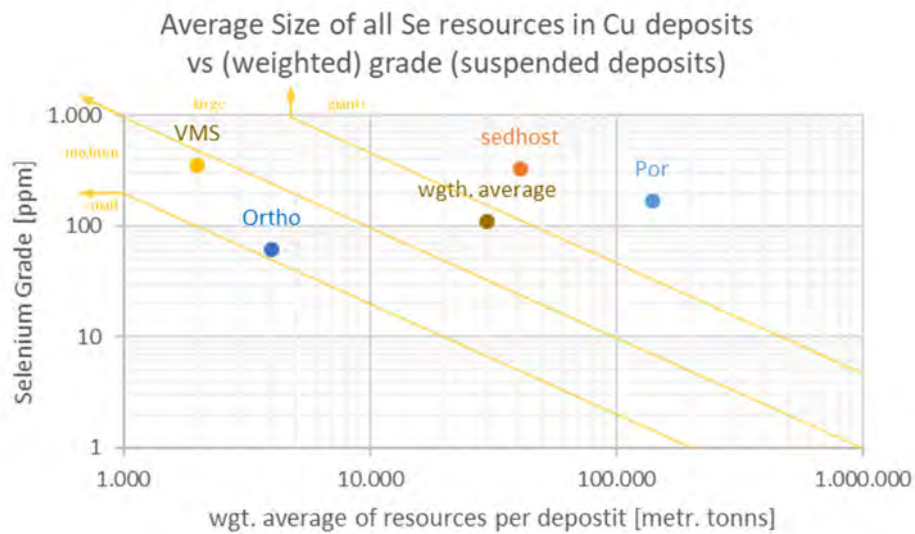


Abb. 169: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller vorübergehend nicht produzierenden Lagerstätten⁵⁷¹

570 eigene Auswertung.

571 eigene Auswertung.

9.5.2. Lagerstättengröße und politisch Stabilität

Die Bedeutung der politischen Stabilität für die resiliente Versorgung mit mineralischen Rohstoffen wurde oben bereits diskutiert. Ergänzend hierzu wird die durchschnittliche Lagerstättengröße gemessen an den Ressourcen je Lagerstättentypus mit der geografischen Zuordnung in Beziehung gesetzt. Daraus lässt sich abschätzen, wie groß die Resilienz der Kupferversorgung und damit auch die Verfügbarkeit von Begleitelementen ist.

Eine große Menge an Kupferressourcen von guter Qualität befindet sich am amerikanischen Kontinent, der im Allgemeinen als politisch ausreichend stabil bewertet wird. Es ist daher schlüssig, dass die Abb. 170 ausgewerteten Lagerstätten ein kohärentes Bild zu den oben analysierten Lagerstättenstrukturen ausweist. Die Ressourcenmengen je Lagerstättentypus in den wenig stabile bis instabile Länder sind mit durchschnittlich 36 tausend Tonnen Selen wesentlich kleiner als jene in stabilen Gebieten, die eine statistische Größe von 220 tausend Tonnen haben (Abb. 171). Dieses Ergebnis ist vor allem den Lagerstättentypen der porphyrischen, sedhost und IOCG Vererzungen geschuldet, die in der überwiegenden Anzahl in politisch stabilen Regionen liegen und den Gesamtdurchschnitt statistisch in instabilen Ländern drastisch verringert. Die Lagerstättentypologien Skarn, Ortho und VMS sind in der Mehrheit in schwierigen Regionen beheimatet und dort von deutlich größerer durchschnittlicher Ressourcenmenge. In Summe ist daher das Ergebnis weniger beruhigend als es auf den ersten Blick erscheinen mag.

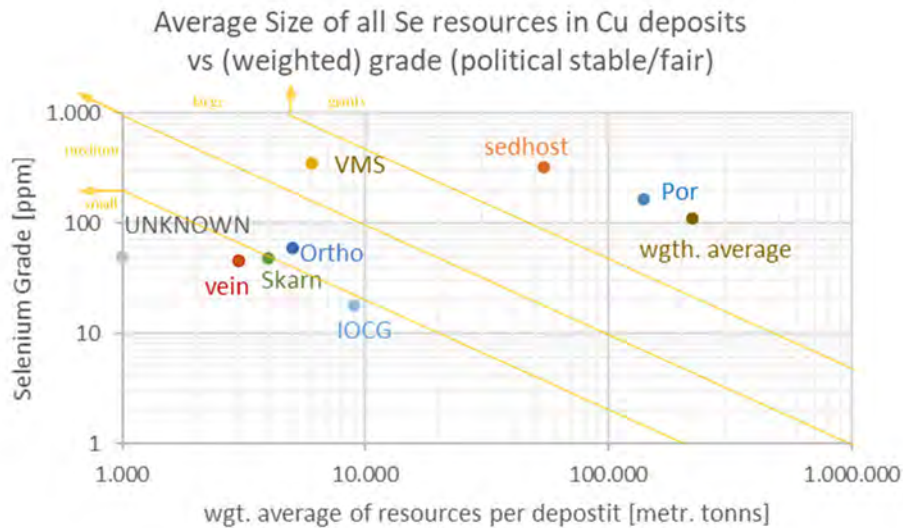


Abb. 170: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstätten in politisch stabilen Regionen⁵⁷²

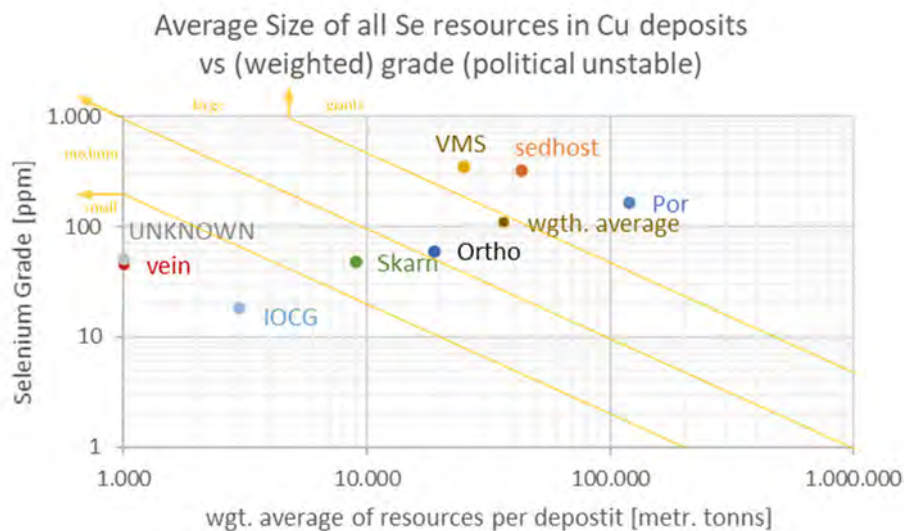


Abb. 171: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstätten in politisch nicht ausreichend stabilen Regionen⁵⁷³

572 eigene Auswertung.

573 eigene Auswertung.

9.5.3. Lagerstättengröße und Regionen

Einen Einblick in die Lagerstättenqualität und Ressourcenmenge je Betriebsstätte ermöglicht die Analyse der Kupferlagerstätten mit ihren korrespondierenden Selenkonzentrationen mit Bezug auf jene Regionen, in denen sich die Lagerstätten befinden. Die regionale Auswertung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten ist in der nachstehenden Tabelle (Abb. 172) und grafisch in Abb. 173 zusammengefasst.

Die großen porphyrischen Selenressourcen in Kupferlagerstätten befinden sich am amerikanischen Kontinent. Auch Europa spielt eine nicht zu unterschätzende Rolle und liegt nur knapp unter dem gewichteten Durchschnitt von 132.000 Tonnen dieses Vererzungstypus. Die durchschnittliche Lagerstätte in Asien und Ozeanien ist um rund die Hälfte kleiner als jene am amerikanischen Kontinent.

Sedimentogene Lagerstätten zeigen eine noch deutlichere Varianz in der Größenordnung. Die Ressourcenkonzentrationen sind in Lateinamerika um den Faktor 13,6 größer als im gewichteten Durchschnitt dieses Typus. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist im Regelfall in einer großen Betriebsstätte einfacher und längerfristiger zu realisieren. Europäisches VMS Lagerstätten sind hingegen fast doppelt so groß wie der weltweite Durchschnitt und einmal mehr wird die Bedeutung dieses Typus für den „alten Kontinent“ sichtbar. Ausgedehntere VMS Lagerstätten finden sich (durchschnittlich) nur am afrikanischen Kontinent. Beim orthomagmatischen Typus ist Asien im Vorteil und besitzt im Schnitt fünfmal größere Selenressourcen je Betriebsstätte, gefolgt von Afrika, das ebenfalls über dem weltweiten Mittelwert liegt. Alle weiteren Lagerstättentypologien sind im Durchschnitt sehr viel kleiner und zeigen auch mit diesem Parameter ihre weltwirtschaftlich geringere Bedeutung.

Im Regelfall gelten porphyrische Lagerstätten als die größten mit einem weltweit gewichteten Mittelwert von 132.000 Tonnen. Sedhost Betriebsstätten sind gemessen an ihrer Ressourcenmenge von 48.000 Tonnen nur etwa ein Drittel so groß. Alle weiteren Typologien sind deutlich kleiner. Die relativ größten Lagerstätten davon sind vom Typus VMS und sind im Mittel nur 23% von der Größe des Sedhost Typus und haben weniger als ein Zehntel der durchschnittlichen Ressourcenmenge im Vergleich zu den porphyrischen Lagerstätten.

Deposit-Type	LA	Ref	ØSeResources	Se_ppm	LA	Deposit-Type	Ref	ØSeResources	Se_ppm
Por	LA	L/po	138.000	165	LA	Por	L/po	138.000	165
Por	NA	N/po	171.000	165	LA	Sedhost	L/se	654.000	320
Por	AS	A/po	74.000	165	LA	VMS	L/vm	19.000	350
Por	OC	O/po	97.000	165	LA	Ortho	L/or	4.000	60
Por	AF	A/po	0	165	LA	Skarn	L/sk	10.000	48
Por	EU	E/po	111.000	165	LA	IOCG	L/io	4.000	18
Por	WO	W/po	132.000	165	LA	Vein	L/ve	1.000	45
Sedhost	LA	L/se	654.000	320	LA	UNKNOWN	L/un	1.000	50
Sedhost	NA	N/se	15.000	320	LA	wgth. aver	L/av	59.000	110
Sedhost	AS	A/se	106.000	320	NA	Por	N/po	171.000	165
Sedhost	OC	O/se	9.000	320	NA	Sedhost	N/se	15.000	320
Sedhost	AF	A/se	33.000	320	NA	VMS	N/vm	4.000	350
Sedhost	EU	E/se	62.000	320	NA	Ortho	N/or	6.000	60
Sedhost	WO	W/se	48.000	320	NA	Skarn	N/sk	3.000	48
VMS	LA	L/vm	19.000	350	NA	IOCG	N/io	5.000	18
VMS	NA	N/vm	4.000	350	NA	Vein	N/ve	0	45
VMS	AS	A/vm	6.000	350	NA	UNKNOWN	N/un	1.000	50
VMS	OC	O/vm	2.000	350	NA	wgth. aver	N/av	55.000	110
VMS	AF	A/vm	57.000	350	AS	Por	A/po	74.000	165
VMS	EU	E/vm	23.000	350	AS	Sedhost	A/se	106.000	320
VMS	WO	W/vm	11.000	350	AS	VMS	A/vm	6.000	350
Ortho	LA	L/or	4.000	60	AS	Ortho	A/or	51.000	60
Ortho	NA	N/or	6.000	60	AS	Skarn	A/sk	9.000	48
Ortho	AS	A/or	51.000	60	AS	IOCG	A/io	2.000	18
Ortho	OC	O/or	3.000	60	AS	Vein	A/ve	2.000	45
Ortho	AF	A/or	11.000	60	AS	UNKNOWN	A/un	0	50
Ortho	EU	E/or	5.000	60	AS	wgth. aver	A/av	28.000	110
Ortho	WO	W/or	9.000	60	OC	Por	O/po	97.000	165
Skarn	LA	L/sk	10.000	48	OC	Sedhost	O/se	9.000	320
Skarn	NA	N/sk	3.000	48	OC	VMS	O/vm	2.000	350
Skarn	AS	A/sk	9.000	48	OC	Ortho	O/or	3.000	60
Skarn	OC	O/sk	2.000	48	OC	Skarn	O/sk	2.000	48
Skarn	AF	A/sk	0	48	OC	IOCG	O/io	11.000	18
Skarn	EU	E/sk	0	48	OC	Vein	O/ve	5.000	45
Skarn	WO	W/sk	8.000	48	OC	UNKNOWN	O/un	0	50
IOCG	LA	L/io	4.000	18	OC	wgth. aver	O/av	29.000	110
IOCG	NA	N/io	5.000	18	AF	Por	A/po	0	165
IOCG	AS	A/io	2.000	18	AF	Sedhost	A/se	33.000	320
IOCG	OC	O/io	11.000	18	AF	VMS	A/vm	57.000	350
IOCG	AF	A/io	1.000	18	AF	Ortho	A/or	11.000	60
IOCG	EU	E/io	12.000	18	AF	Skarn	A/sk	0	48
IOCG	WO	W/io	6.000	18	AF	IOCG	A/io	1.000	18
Vein	LA	L/ve	1.000	45	AF	Vein	A/ve	4.000	45
Vein	NA	N/ve	0	45	AF	UNKNOWN	A/un	0	50
Vein	AS	A/ve	2.000	45	AF	wgth. aver	A/av	11.000	110
Vein	OC	O/ve	5.000	45	EU	Por	E/po	111.000	165
Vein	AF	A/ve	4.000	45	EU	Sedhost	E/se	62.000	320
Vein	EU	E/ve	0	45	EU	VMS	E/vm	23.000	350
Vein	WO	W/ve	2.000	45	EU	Ortho	E/or	5.000	60
UNKNOWN	LA	L/un	1.000	50	EU	Skarn	E/sk	0	48
UNKNOWN	NA	N/un	1.000	50	EU	IOCG	E/io	12.000	18
UNKNOWN	AS	A/un	0	50	EU	Vein	E/ve	0	45
UNKNOWN	OC	O/un	0	50	EU	UNKNOWN	E/un	0	50
UNKNOWN	AF	A/un	0	50	EU	wgth. aver	E/av	32.000	110
UNKNOWN	EU	E/un	0	50	WO	Por	W/po	132.000	165
UNKNOWN	WO	W/un	1.000	50	WO	Sedhost	W/se	48.000	320
wgth. aver	LA	L/av	59.000	110	WO	VMS	W/vm	11.000	350
wgth. aver	NA	N/av	55.000	110	WO	Ortho	W/or	9.000	60
wgth. aver	AS	A/av	28.000	110	WO	Skarn	W/sk	8.000	48
wgth. aver	OC	O/av	29.000	110	WO	IOCG	W/io	6.000	18
wgth. aver	AF	A/av	11.000	110	WO	Vein	W/ve	2.000	45
wgth. aver	EU	E/av	32.000	110	WO	UNKNOWN	W/un	1.000	50
wgth. aver	WO	W/av	41.000	110	WO	wgth. aver	W/av	41.000	110

Abb. 172: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in metr. Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstätten in Abhängigkeit ihrer geographischen Lage⁵⁷⁴

574 eigene Auswertung. (Abkürzungen: AF=Afrika, AS=Asien; EU=Europa; LA=Lateinamerika; NA=Nordamerika; OC=Ozeanien; WO=Welt/gesamt)

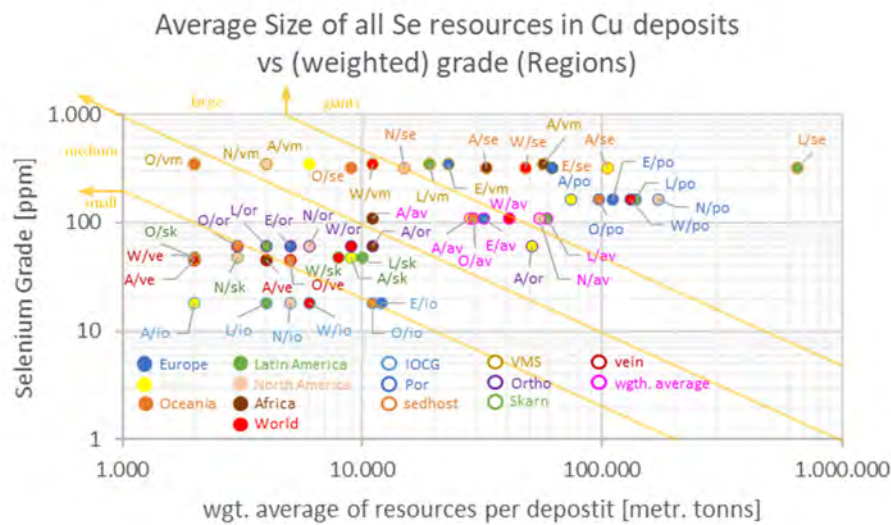


Abb. 173: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstätten in Abhängigkeit ihrer geographischen Lage⁵⁷⁵

Werden die Lagerstättentypologien in der jeweiligen Region betrachtet, sind porphyrische Lagerstätten in Nordamerika (171.000 Tonnen), Europa (111.000) und Ozeanien (97.000) die mit Abstand größten gemessen an der durchschnittlichen Ressourcenmenge von Selen. Erwähnenswert ist, dass am afrikanischen Kontinent keine porphyrische Vererzung bekannt ist, es dominieren die VMS Typologien. In Lateinamerika hingegen dominieren die sedimentogenen Lagerstätten mit außerordentlichen 654.000 Tonnen je statistisch gewichteter Betriebsstätte. In Asien ist dieser Lagerstättentypus ebenfalls der größte, jedoch ist mit 106.000 Tonnen der Unterschied nicht mehr so beeindruckend.

⁵⁷⁵ eigene Auswertung (Legende und Abkürzungen siehe Abb. 172).

9.5.4. Lagerstättengröße und geologisches Alter

Die erdgeschichtliche Entwicklung hat unterschiedliche Anreicherungen von Rohstoffen je nach Entstehungszeitpunkt ermöglicht. Die Analyse der Lagerstättenqualität und Ressourcenmenge je Betriebsstätte in Abhängigkeit des geologischen Entstehungszeitpunkts bzw. geologischen Alters, liefert verwertbare Ergebnisse auch hinsichtlich der durchschnittlichen Ressourcenmenge je Lagerstätte. Die Auswertung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten nach geologischem Alter ist in der nachstehenden Tabelle (Abb. 174) und grafisch in Abb. 175 dargestellt. Die Abkürzungen der geologischen Zeiträume sind in Abb. 145 zusammengestellt.

Porphyrische Lagerstätten entstanden in mehreren erdgeschichtlichen Zeitabschnitten und das bezogen auf die Selenressourcen in Größenordnungen mit vergleichsweise geringer Varianz von durchschnittlich 132.000 Tonnen je Lagerstätte. Nur im Neoproterozoikum (*NProt*, vor circa 1.000 Mio. Jahren) entstanden offenbar kleinere Vererzungen (11.000 Tonnen). Die größten Einzelanreicherungen wurden mit knapp 250 tausend Tonnen im Paläoproterozoikum (*PProt*, 2.500 Mio. Jahren) und mit etwas über 200 tausend Tonnen im erdgeschichtlich bedeutend jüngeren Paläogen (*CenP*, vor circa 50 Mio. Jahren) gebildet.

Die größte sedimentogene (sedhost) Vererzung hat sich im Paläogen (*CenP*) mit 1,1 Mio Tonnen Seleninhalt gebildet, und zwar in einer einzigen Lagerstätte namens El Tesoro in Chile. Im Paläoproterozoikum und Neogen (*CenN*, vor circa 23 bis 2,6 Mio. Jahren) sind - wenngleich um eine Größenordnung kleiner - dennoch große Lagerstätten mit durchschnittlich um die 100 tausend Tonnen gebildet worden. Die größte Anzahl an Lagerstätten dieses Typs entstand im Neoproterozoikum (*NProt*). Diese sind mit durchschnittlich 33.000 Tonnen viel kleiner, aber aufgrund der Vielzahl in Summe für die Selen-Ressourcen von Bedeutung und beeinflussen daher auch stark den gewichteten Durchschnitt von 48.000 Tonnen.

Wie oben bereits ausgeführt, sind die weiteren Lagerstättentypen statistisch im Durchschnitt viel kleiner. Im Paläogen (*CenP*) haben sich besonders viele Lagerstätten gebildet und diese haben verglichen mit anderen Erdepochen die größte Ressourcenakkumulation (116.000 Tonnen). In der Periode des Neogens (*CenN*) und der Kreide (*MesC*) entstanden Lagerstätten mit durchschnittlich 50 tausend Tonnen. In der frühen Phase der Erdentwicklung sind mittlere durchschnittliche Lagerstätten mit 27.000 Tonnen im Paläoproterozoikum und kleinere im Neoproterozoikum (11.000 Tonnen) entstanden.

Deposit-Type	geolog.Age	Ref	ØSeResources	Se_ppm	geolog.Age	Deposit-Type	Ref	ØSeResources	Se_ppm
Por	PProt	PPro/po	248.000	165	PProt	Por	PPro/po	248.000	165
Por	NProt	NPro/po	11.000	165	PProt	Sedhost	PPro/se	101.000	320
Por	MesC	MesC/po	116.000	165	PProt	VMS	PPro/vm	5.000	350
Por	CenP	CenP/po	204.000	165	PProt	Ortho	PPro/or	4.000	60
Por	CenN	CenN/po	105.000	165	PProt	IOCG	PPro/io	22.000	18
Por	all	all/po	132.000	165	PProt	Vein	PPro/ve	3.000	45
Sedhost	PProt	PPro/se	101.000	320	PProt	Misc	PPro/mi	6.100	50
Sedhost	NProt	NPro/se	33.000	320	PProt	wgth. aver	PPro/wg	27.000	110
Sedhost	CenP	CenP/se	1.125.000	320	NProt	Por	NPro/po	11.000	165
Sedhost	CenN	CenN/se	85.000	320	NProt	Sedhost	NPro/se	33.000	320
Sedhost	all	all/se	48.000	320	NProt	VMS	NPro/vm	68.000	350
VMS	PProt	PPro/vm	5.000	350	NProt	Ortho	NPro/or	3.000	60
VMS	NProt	NPro/vm	68.000	350	NProt	Skarn	NPro/sk	3.000	48
VMS	MesC	MesC/vm	17.000	350	NProt	IOCG	NPro/io	1.000	18
VMS	CenP	CenP/vm	7.000	350	NProt	Vein	NPro/ve	2.000	45
VMS	CenN	CenN/vm	3.000	350	NProt	Misc	NPro/mi	1.200	50
VMS	all	all/vm	11.000	350	NProt	wgth. aver	NPro/wg	11.000	110
Ortho	PProt	PPro/or	4.000	60	MesC	Por	MesC/po	116.000	165
Ortho	NProt	NPro/or	3.000	60	MesC	VMS	MesC/vm	17.000	350
Ortho	all	all/or	9.000	60	MesC	Skarn	MesC/sk	500	48
Skarn	NProt	NPro/sk	3.000	48	MesC	IOCG	MesC/io	4.000	18
Skarn	MesC	MesC/sk	500	48	MesC	Vein	MesC/ve	1.000	45
Skarn	CenP	CenP/sk	10.000	48	MesC	Misc	MesC/mi	100	50
Skarn	CenN	CenN/sk	11.000	48	MesC	wgth. aver	MesC/wg	50.000	110
Skarn	all	all/sk	8.000	48	CenP	Por	CenP/po	204.000	165
IOCG	PProt	PPro/io	22.000	18	CenP	Sedhost	CenP/se	1.125.000	320
IOCG	NProt	NPro/io	1.000	18	CenP	VMS	CenP/vm	7.000	350
IOCG	MesC	MesC/io	4.000	18	CenP	Skarn	CenP/sk	10.000	48
IOCG	all	all/io	6.000	18	CenP	Vein	CenP/ve	400	45
Vein	PProt	PPro/ve	3.000	45	CenP	Misc	CenP/mi	300	50
Vein	NProt	NPro/ve	2.000	45	CenP	wgth. aver	CenP/wg	116.000	110
Vein	MesC	MesC/ve	1.000	45	CenN	Por	CenN/po	105.000	165
Vein	CenP	CenP/ve	400	45	CenN	Sedhost	CenN/se	85.000	320
Vein	CenN	CenN/ve	1.000	45	CenN	VMS	CenN/vm	3.000	350
Vein	all	all/ve	2.000	45	CenN	Skarn	CenN/sk	11.000	48
Misc	PProt	PPro/mi	6.100	50	CenN	Vein	CenN/ve	1.000	45
Misc	NProt	NPro/mi	1.200	50	CenN	wgth. aver	CenN/wg	53.000	110
Misc	MesC	MesC/mi	100	50	all	Por	all/po	132.000	165
Misc	CenP	CenP/mi	300	50	all	Sedhost	all/se	48.000	320
Misc	all	all/un	5.800	50	all	VMS	all/vm	11.000	350
wgth. aver	PProt	PPro/wg	27.000	110	all	Ortho	all/or	9.000	60
wgth. aver	NProt	NPro/wg	11.000	110	all	Skarn	all/sk	8.000	48
wgth. aver	MesC	MesC/wg	50.000	110	all	IOCG	all/io	6.000	18
wgth. aver	CenP	CenP/wg	116.000	110	all	Vein	all/ve	2.000	45
wgth. aver	CenN	CenN/wg	53.000	110	all	Misc	all/un	5.800	50
wgth. aver	all	all/wg	41.000	110	all	wgth. aver	all/wg	41.000	110

Abb. 174: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstätten in Abhängigkeit ihres geologischen Alters⁵⁷⁶

576 eigene Auswertung.

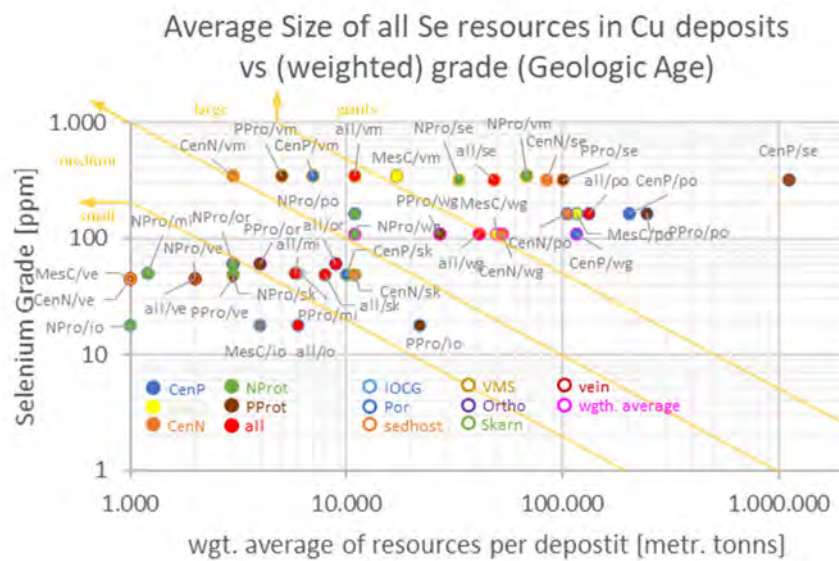


Abb. 175: Durchschnittliche (gewichtete) Lagerstättengröße an Selenressourcen (in Tonnen) auf Basis von Kupferlagerstätten im Vergleich zur Selenkonzentration (in ppm) auf Basis aller Lagerstätten in Abhängigkeit ihres geologischen Alters⁵⁷⁷

Ein Vergleich der durchschnittlichen Lagerstättengröße gemessen an den Selenressourcen über alle relevanten Erdepochen hinweg, zeigt folglich ein überraschend homogenes Bild mit geringer Varianz. Die größten Akkumulationen entstanden im Paläogen (*CenP*) mit 116.000 Tonnen, die geringste im Neoproterozoikum (11.000 Tonnen).

⁵⁷⁷ eigene Auswertung (Legende und Abkürzungen siehe Abb. 174 und Abb. 145 (geologische Zeiträume)).

9.6. Folgerungen

Die hier vorgestellte Methode zur Abschätzung von Reserven- und Ressourcendaten von Begleitelementen aus Kupferlagerstätten am Beispiel von Selen ist geeignet, auch auf andere Nebenelemente angewendet zu werden. Die Primärproduktion zahlreicher seltener Rohstoffe sind als Begleitelemente an die Herstellung von Wirts- bzw. Hauptmetallen wie Kupfer, Nickel, Blei oder Zink gebunden (Abb. 176). „So fällt etwa Gallium als Nebenprodukt der Aluminiumproduktion und Indium als Nebenprodukt der Zink- und Zinnproduktion an. Platin wird sowohl als Nebenprodukt der Nickelproduktion als auch als Koppelprodukt mit anderen Platingruppenmetallen gewonnen.“⁵⁷⁸ Die Verfügbarkeit der Begleitelemente ist daher unmittelbar gekoppelt mit den Hauptmetallen und davon abhängig, dass im Weiterverarbeitungsprozess diese seltenen Nebenelemente separiert und raffiniert werden.

Die starke Bedarfsentwicklung von Selen wurde bereits im Kapitel 5.7 (S.194) erläutert. Für andere als Nebenelemente gewonnene Rohstoffe gilt diese dynamische Nachfrageentwicklung in noch viel größerem Maß, wie beispielhaft in Abb. 177 dargestellt ist. Die hier vorgestellte Ressourcenabschätzungs-Methode kann auf Begleitelemente der Kupfervererzungen, wie den Metallen der Platingruppe, Kobalt, Wismut, Molybdän und Tantal mit vergleichsweise geringem Aufwand angewendet werden.

Gleichfalls ist die vorgestellte Methode geeignet, auch für andere Wirtslagerstätten angewendet zu werden, wie Erzlagerstätten für Nickel, Blei, Zink oder Aluminium. Dafür werden zusätzlich die Daten der jeweiligen Lagerstättentypologien des Hauptrohstoffs benötigt. Insbesondere Gallium wird eine zwanzigfache Nachfragesteigerung vorhergesagt und fällt in den Rotschlämmen bei der Aluminiumherstellung in großen Mengen an. Wenn die Mengenbalance aus Verfügbarkeit von Nebenmetallen und deren steigender Bedarf nicht mehr gegeben ist, führt dies unweigerlich zu Preisanstiegen, nicht selten auch zu Preissprüngen, wie dies etwa bei Indium, Iridium und Ruthenium beobachtet werden konnte. Steigende Preise steigern auch das Interesse an diesen seltenen Begleitrohstoffen und sichern die dafür erforderlichen Investitionen ab. Die ziemlich große verfügbare Ressourcenmenge zeigt allerdings auch, wenn alle Metalle aus den Rückständen genutzt werden, würde dies zu einem Überangebot – verbunden mit Preisverfällen – führen.

578 [SATW2010], S.11.

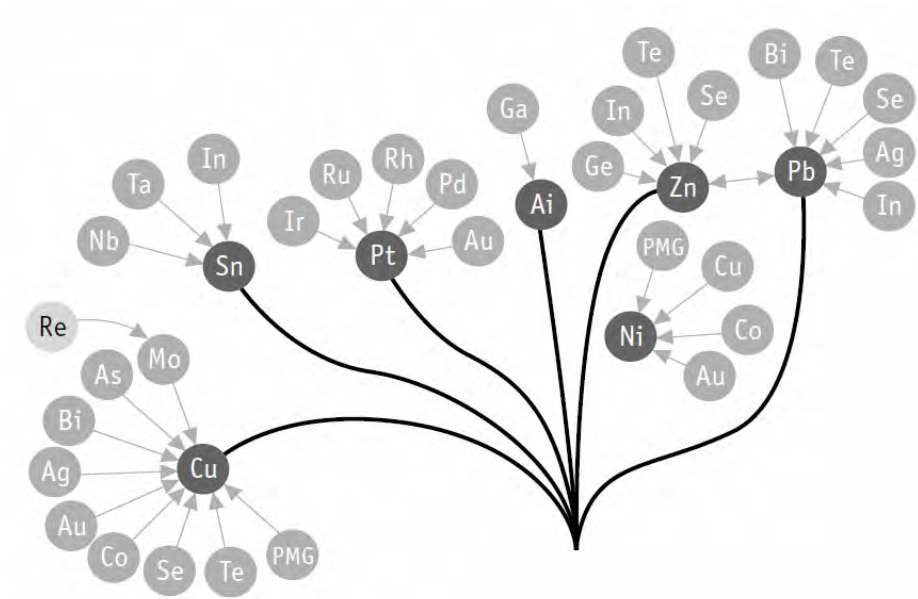


Abb. 176: Ausgewählte Kopplungen bei der Primärproduktion von seltenen Metallen (Hagelüken und Meskers, 2010)⁵⁷⁹

	weltweite Nachfrage 2006		weltweite Nachfrage 2030	Zukunftstechnologien
Gallium	28 t (0,28)	x 21,5	603 t (6,09)	Dünnschicht-Photovoltaik, integrierte Schaltung, weiße Leuchtdioden (LED)
Germanium	28 t (0,31)	x 7,9	220 t (2,44)	Glasfaserkabel, IR-optische Technologien
Indium	234 t (0,40)	x 8,2	1911 t (3,29)	Displays, Dünnschicht-Photovoltaik
Neodym	4 t (0,55)	x 7	27,8 t (3,82)	Lasertechnik, Permanentmagnete
Platin	gering	?	345 t (1,56)	Brennstoffzellen, Katalyse
Scandium	gering	?	3 t (2,28)	Al-Legierungen, Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC)
Tantal	551 t (0,39)	x 2,6	1410 t (1,01)	Mikrocondensatoren, Medizintechnik

In Klammern: Verhältnis aus weltweiter Nachfrage und Weltjahresproduktion 2006

Abb. 177: Rohstoffbedarf ausgewählter Zukunftstechnologien 2006 effektiv und 2030 möglich⁵⁸⁰

579 angelehnt an [HAGE2010], p.177 aus: [SATW2010], S.10. (Korrektur: in der Abbildung muss es statt „Ai“ Aluminium (Al) heißen.)

580 aus: [SATW2010], S.11.

10. Zusammenfassung, Ergebnisse und Empfehlungen

10.1. Zusammenfassung und Ergebnisse

- Methode

Selen wird wirtschaftlich als Begleitelement in erster Linie beim Raffinadeprozess gewonnen, wo es sich im Anodenschlamm von sulfidischen Erzen ansammelt.⁵⁸¹ Die globalen Angaben über die Ressourcen und Reserven von Selen sind unvollständig und können zu gravierenden Fehleinschätzungen führen, was insbesondere für seine steigende Verwendung in der Photovoltaikindustrie kritisch ist. Für die hier vorgeschlagene Methode zur Vorratsdatenabschätzung von Begleitelementen am Beispiel von Selen wurden die Selenkonzentrationen von Kupferlagerstätten analysiert. Zur Anwendung dieser Methode ist einerseits die Kenntnis der Ressourcen und Reserven von Kupferlagerstätten und deren Typologien nötig, andererseits Stichproben von Selenkonzentrationswerten, die Lagerstätten-typologien zugeordnet werden können (für Details siehe Kap. 1.3 (S.13ff) und insb. Abb. 2).

Die Stichprobenwerte wurden geostatistisch eingehend untersucht und ein charakteristischer Wert („Normkonzentration“) für die Selenkonzentration je Kupferlagerstättentypus in ppm ermittelt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Datenqualität und statistische Robustheit des Ergebnisses gelegt, die eine Überschätzung der Selenkonzentration vermeidet. Die Berechnungen wurden unter Zugrundelegung der nachgewiesenen logarithmischen Normalverteilung in einem Konfidenzintervall von 95% durchgeführt.

Zur Berechnung der Selen-Reserven und -Ressourcen in Tonnen je Lagerstättenkategorie wurden die charakteristischen Selenkonzentrationen mit den Ressourcen/Reserven der Kupferlagerstätten des gleichen Lagerstättentyps verschnitten und auf Basis der globalen Kupfer-Reserven und -Ressourcen hochgerechnet. Es ist gelungen, das in der Literatur bereits öfters abgeschätzte Verhältnis von Kupfer- und Selenvorräten mit den aktuellen und robusten Daten zu berechnen. Dies erfolgte unter der Berücksichtigung der durch die Separierung des Selen im Kupferaufbereitungsprozess bedingten Verluste und wird für weiterführende Analysen verwendet. Diese Modellrelationen ermöglichen es, die Selen-Ressourcen/Reserven auf Länderbasis abzuschätzen und auch zukünftig effizient regelmäßig zu aktualisieren.

⁵⁸¹ Aus dem hydrometallurgische oder das SX/EW-Verfahren (Solvent Extraction-Electrowinning) für oxidische Erze, kann kein Selen zurückgewonnen werden. Es wird jedoch nur etwa ein knappes Fünftel der Gesamtkupferproduktion mit dem SX/EW-Verfahren erzeugt.

• Vorratsklassifikationssysteme

Ausgangsbasis für die hier durchgeführten Berechnungen sind die Reserven und Ressourcen in den verschiedenen Typologien der Kupferlagerstätten nach den geläufigen Definitionen (Kap. 3, S.50ff). Diese Angaben werden anhand von Vorratsklassifikationssystemen ermittelt und ausgewiesen. Ein Klassifikationssystem muss zumindest die Grundprinzipien der transparenten Nachvollziehbarkeit und Allgemeinverständlichkeit mit unzweideutigen Definitionen erfüllen, um eine breite Akzeptanz von möglichst vielen Interessengruppen und Organisationen zu erhalten. Ein Bericht muss von einer der Geologie kundigen „Competent Person“ als vollständig bestätigt und von ihr verantwortet werden, damit die Vorratsdaten wirtschaftlichen Wert zuerkannt bekommen und beispielsweise für Finanzierungsinstrumente herangezogen werden können. In diesem Prozess bestimmen die Parameter der sogenannten „Modifying Factors“ über die Quantität und Qualität der mineralischen Ressourcen und Reserven und deren Bewertungen. Diese haben eine Fülle komplexer geologischer, geotechnischer, berg- und verfahrenstechnischer, rechtlicher, juridischer, ökonomischer, sozialer und umweltrelevanter Faktoren zu berücksichtigen. Trotz aller Sorgfalt beruhen die Vorratsangaben immer (nur) auf Schätzungen, sind mit Restrisiken behaftet und stellen nur eine Momentaufnahme dar.

Erfolgreich verliefen die langjährigen Bemühungen mit dem CRIRSCO-Standard, der auf den australischen JORC-Code aufbaut, die verschiedenen – meist nationalen – Klassifizierungssysteme zu harmonisieren, um die Vorratsdaten konvertieren zu können. Alle relevanten rohstofffördernden Länder – mit Ausnahme Chinas – akzeptieren das CRIRSCO-Template. In Kanada gilt darüber hinaus das strengere, gesetzlich verankerte Regime des National Instruments NI 43-101, welches selbst kein Reporting Code ist, jedoch die Offenlegungspflichten für Emittenten regelt.

Alle in der Bergbauindustrie genutzten („klassischen“) Kodizes zielen jedoch nur auf die Erfassung des Hauptelements ab und geben keine sinnvolle Möglichkeit, nutzbare Spureminerale mit zu erfassen. Es konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass die **Begleitelemente** nicht oder nur unzureichend Berücksichtigung finden und daher ihre Vorräte häufig unterschätzt werden, wie das Beispiel Selen zeigt.

Einen grundsätzlich anderen Ansatz zu Klassifizierung verfolgt die „United Nations Framework Classification“ (UNFC). Es stellt eine Basis für die Vergleichbarkeit der vielen weltweit unterschiedlichen nationalen Klassifizierungen bereit, insbesondere neben CRIRSCO auch für Länder, die sich erst in Richtung freier Marktwirtschaften entwickeln (vgl. Abb. 36). Das UNFC definiert zwar keine verantwortliche Person für die Berichte, zielt aber auf eine „Corporate Responsibility“ der Stakeholder ab, also auf ein nachhaltiges Gleichgewicht im Dreieck zwischen ökonomischen, ökologischen und sozialen Erfolg. Die nach UNFC harmonisierten Daten können länderweise aggregiert werden und verbessern

die Übersicht über die globalen mineralischen Rohstoffvorräte. Ein Alleinstellungsmerkmal hat UNFC bei der Möglichkeit, auch **Begleitelemente** qualifiziert zu erfassen, jedoch mit dem Manko, dass die Anwendung des UNFC unverbindlich ist.

• Kupferlagerstätten

Kupfererze kommen in der Erdkruste sowohl in magmatogenen, sedimentogenen als auch metamorphogenen Gesteinen vor und sind in bestimmten Lagerstättentypen angereichert. Wirtschaftliche Bedeutung haben besonders **porphyrische** Anreicherungen, die einen Anteil von circa 60% an der weltweiten Kupfergewinnung haben. An zweiter Stelle liegen die **sedimentogene** bzw. sedimentgebundene Lagerstätten (sediment hosted deposits). Die Gruppe der Volcanogenic Massive Sulfide (**VMS**) Lagerstätten tragen zu circa 10% zur jährlichen Weltkupferproduktion bei. Geologisch eng mit dem VMS-Typus sind die **SEDEX** („sedimentary exhalative“) bzw. Massive Sulfide (**MS**) Lagerstätten verwandt, aus denen jedoch weniger als ein Prozent der jährlichen Kupfermenge gefördert wird. Für die Weltproduktion mit einem Anteil von circa 20% bedeutend sind hingegen die sedimentgebundenen Lagerstätten (**sediment hosted deposits**) des „afrikanischen“ Typus im zentralafrikanischen Kupfergürtel. Der hydrothermale **IOCG** Lagerstättentypus (Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätte) und die Mineralisierungen bei **orthomagmatischen** Lagerstättengengese haben in je knapp 5% Anteil an der Weltkupferproduktion. Geringere Kupfermengen werden aus den Vererzungen des hydrothermalen Typus der gang-klufftörmigen Lagerstätten (Veins), den Skarnen und den Karbonatiten gefördert. Sehr große Kupfervorkommen, die jedoch auf absehbare Zeit technisch nicht gefördert werden können, sind in Manganknollen und metallhaltigen Schlämmen am Meeresboden („**Seabed**“) gespeichert.

• Kupfer-Reserven und -Ressourcen

Die Kupfer-Reserven werden von der International Copper Study Group (ICSG) mit 830 Millionen (metrische) Tonnen (Mto.) und von USGS mit 870 Mto. beziffert. ICSG weist deckungsgleich mit USGS die „Identified Resources“ mit 2.100 Mto. aus (Abb. 41). Die totalen Ressourcen werden von ICSG mit 5.600 Mto. angegeben und die „undiscovered resources“ von USGS mit 3.000 Mt.⁵⁸² Die ausgewiesenen Kupferreserven sind in den letzten zwei Jahrzehnten deutlich um 57% angestiegen (entspricht ca. 2% per anno). Über die größten Reserven mit einem Anteil von einem Fünftel verfügt Chile, gefolgt von Peru und Australien mit circa je ein Zehntel. Weitere nennenswerte Kupferreserven befinden sich in Russland, USA, Mexiko, Indonesien und mit einem vergleichsweise kleinen Anteil von 3% in China.

582 [USGSCU2020]

Die gesamte primäre Kupfererzeugung beläuft sich auf rund 20 Millionen Tonnen pro Jahr. Mit fast 30% der Weltproduktion dominiert Chile den Kupfermarkt, gefolgt von Peru (ca. 12%), China (ca. 8%), DRC (Kongo) und USA mit je 6%; weitere Länder mit einem Anteil je unter 5% sind Australien, Sambia, Russland, Mexiko, Indonesien und Kasachstan. Mehr als die Hälfte der Kupferversorgung kommt somit aus Regionen, die gemäß Weltbankindex als politisch stabil eingestuft werden (Großteils OECD-Raum). Umgekehrt bedeutet das, dass beachtliche Kupfermengen bestimmten Versorgungsrisiken ausgesetzt sind. Die entwickelten Länder können sich nur zu einem geringen Teil (circa 17,5%) selbst versorgen.

- **Unterschiede zwischen anthropogene Selen- und Kupfer-Zyklus**

In einer umfangreichen Studie⁵⁸³ des Kupferzyklus wurde nachgewiesen, dass 85% des im Laufe der Menschheitsgeschichte abgebauten und genutzten Kupfers nach wie vor verwendet wird, weil es erst im letzten halben Jahrhundert zu einer enormen Steigerung des Kupferverbrauchs gekommen ist und diese Anwendungen meist eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten haben.

Der Selen-Zyklus ist hingegen äußerst dissipativ, denn mehr als zwei Drittel des primär erzeugten Selens ging verloren. Diese Tatsache lässt sich nicht ausschließlich aus den typischen Anwendungsgebieten von Selen erklären und ist ein Indikator für Potenzial zur Verbesserung des Materialkreislaufs. Mit den in dieser Arbeit vorgelegten Berechnungen der Ressourcen und Reserven von Selen, kann die Kritikalität des Rohstoffs genauer analysiert werden.

- **Auswirkungen des zukünftigen Trends des Kupfergehaltes in Lagerstätten auf Selenressourcen**

Die naheliegende Vermutung, dass der **Kupfergehalt** in der Zukunft abnimmt, kann für die wirtschaftlich bedeutenden Lagerstättentypologien dem Grunde nach bestätigt werden. Die in Betrieb befindlichen porphyrischen Rohstofflager weisen jedoch konstanten Kupfergehalt über die Betriebszeit von 0,46% auf. Für zukünftige Projekte zeigt sich eine Reduktion um circa 13% auf 0,40%. Bei den „Sediment hosted deposits“ kann sogar mit steigendem Kupfergehalt in zukünftigen Betrieben von gemittelt 1,3% gerechnet werden. Diese Auswertung ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet, da erfahrungsgemäß nur eine

583 Die Ergebnisse des STAF-Projekts sind in einer Serie von vier Artikeln zusammengefasst: [GRAD2002] beschreibt die Methode; [SPAT2002] erläutert die Ableitung des europäischen Kupferzyklus für ein Jahr; [BERT2002] analysiert das Abfallmanagement- und Recycling-System, [RECH2002] legt das Augenmerk auf die statistische Entropie des Kupferzyklus, der das Verständnis des industriellen Metabolismus („Stoffwechsel“) verbessert.

Teilmenge der prospektierten Bergbauprojekte in den wirtschaftlichen Betrieb übernommen wird. Der zu erwartende Trend zeigt sich am besten beim VMS- bzw. MS-Typus mit einem Rückgang des durchschnittlichen Kupfergehaltes um gut die Hälfte. Offenbar sind hingegen reichhaltigere IOCG-Lagerstätten exploriert worden, die zwar nicht an den Kupfergehalt früherer Minen anschließen können, jedoch scheinen die Projekte um gut ein Drittel mehr Kupfergehalt aufzuweisen als durchschnittlich aktuell in Betrieb befindliche.

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Lagerstätte sind neben dem Kupfergehalt die **Größe des erzführenden Körpers** und der **Cut-off Grade** ein wesentliches Kriterium. Porphyrische Kupferlagerstätten sind im Schnitt drei- bis viermal so groß ist, wie solche der Typen IOCG und „Sediment hosted deposits“, jedoch mit oft nur halb so hohen Kupfergehalt. Die Mehrzahl der zukünftig erschlossenen Kupfererzlagerstätten aller bisher genutzten Typologien zeigen kaum Verschlechterung im Kupfergehalt, aber geringere Lagerstättengröße und liegen zum überwiegenden Teil in politisch nicht stabilen Regionen. Eine Ausnahme bilden die (noch) nicht wirtschaftlich nutzbaren Seabed-Lagerstätten.

Der (wirtschaftliche) Cut-off Grade ist auf 0,2% gefallen (vgl. Abb. 1), weshalb sich die Ressourcenbasis für Kupfer um 80% erhöht hat. Damit hast sich auch die Ressourcenbasis für das Nebenmetall Selen erhöht, da mehr Kupfererz, das auch Selen beinhaltet, abgebaut wird.

- **Charakteristische Selenkonzentration in Kupferlagerstätten**

Die enge chemische Verwandtschaft von Selen mit Schwefel ist der Grund dafür, dass Kupfererze eine Ressource für Selen sind. Industriell wird Selen als Nebenprodukt bei der elektrolytischen Kupfer- und Nickelherstellung aus dem Anodenschlamm durch Abrösten und Reduktion mit Hilfe von Schwefeldioxid zum elementaren Selen gewonnen. Mittels statistischer Analysen konnte gezeigt werden, dass jeder Kupferlagerstättentypus aufgrund der Genese eine charakteristische Selenkonzentration aufweist. Die Berechnungen wurden unter Einhaltung eines Konfidenzintervalls von 95% der zugrundeliegenden logarithmisch normalverteilten Selenmengen unter Berücksichtigung von Verlusten bei der Separierung und Aufbereitung vorgenommen, um eine Überschätzung der Ressourcen und Reserven zu vermeiden. Mit den ermittelten Werten, die in Tabelle 28 zusammengestellt sind, konnte die Hauptthese dieser Arbeit, nach der unterschiedliche Kupferlagerstättentypologien charakteristische Konzentrationen an Selen aufweisen, bestätigt werden.

Tabelle 28: Charakteristische Selenkonzentration je Kupferlagerstättentypus unter Angabe der absoluten und prozentuellen Toleranzen im 95%-Konfidenzintervall (Konzentrationen sind bezogen auf die Masse in ppm = mg/kg)

type of deposit	Se concentration mg/kg	lower limit mg/kg	upper limit mg/kg	neg. tolerance %	pos. tolerance %
Porphyries	165	97	279	-41%	+69%
Sediment hosted	320	180	1002	-44%	+213%
Skarns	48	38	69	-20%	+43%
IOCG	18	10	31	-45%	+72%
Orthomagmatic	60	45	97	-25%	+61%
VMS	350	253	628	-28%	+79%
Veins	45	34	61	-25%	+36%
MS / SEDEX	30	24	151	-19%	+404%
UNKNOWN	50	25	111	-50%	+122%

In der Literatur wurde der durchschnittliche Selengehalt sehr inkonsistent abgeschätzt; für sulfidische Kupfererze wurde häufig die Konzentration mit 200 ppm angegeben.⁵⁸⁴ Es kann dieser hohe Wert durch die Analysen in dieser Arbeit nicht bestätigt werden und auch die in anderen Quellen genannten auffallend geringen Selenkonzentrationen, wie 2,5 ppm für porphyrische Kupfererze,⁵⁸⁵ sind nicht nachvollziehbar. Für die wirtschaftlich bedeutenden porphyrischen Kupferlagerstätten liegt der charakteristische Wert der Selenkonzentration nach den hier getätigten Untersuchungen deutlich höher bei 165 ppm.

• Ressourcen und Reserven von Selen in Kupferlagerstätten

Auf Basis der Erzmengen in den einzelnen Typologien der Kupferlagerstätten wurden mit den charakteristischen Selenkonzentrationen die Reserven und Ressourcen von Selen abgeschätzt. Die weltweiten (potenziellen) Reserven an Selen aus aktiven Kupferlagerstätten betragen in Summe 25,4 Mto. und die (measured & indicated) Ressourcen 63,2 Mto.⁵⁸⁶ Davon entfallen rund 85% der Ressourcen auf die porphyrischen Kupferlagerstätten (53,4 Mto.) und auf Basis der Reserven 82,5% oder 20,9 Mto. Die zweite bedeutende Quelle für Selen sind die sedimentären Lagerstätten mit einem Anteil von 11% an den Ressourcen (7 Mto.) und 13% an den Reserven (3 Mto.). Einen Beitrag von knapp über einem Prozent steuern die Skarne bei. Diese drei genannten Lagerstättenarten umfassen über 97% der wirtschaftlich nutzbaren Selenquellen aus Kupferlagerstätten, während IOCG, orthomagmatische und gang-klufftformige Vererzungen nur einen unbedeutenden

584 USGS (2017): Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper 1802–Q, p.Q9

585 ebd.

586 siehe Tabelle 14.

Betrag leisten können. Für Selen bedeutet das eine starke Zuspitzung auf zwei Lagerstättentypologien, die zwar auch für die Kupfererzeugung eine wichtige Rolle spielen, aber Kupfer darüber hinaus zu über 15% der Reserven auch aus Skarnen, IOCG, orthomagmatischen und VMS Lagerstätten gewonnen wird und damit über diversere Quellen und somit höhere Versorgungssicherheit verfügt. Dennoch ist das Potenzial für die Selengewinnung mit Reserven von 25,4 Mto. circa um den Faktor 250 größer als bisher von USGS mit knapp hunderttausend Tonnen eingeschätzt wurde. Die Unterthese A dieser Arbeit, dass die bisher ausgewiesenen Selenvorräte mengenmäßig deutlich zu gering bewertet wurden, konnte durch die vorliegende Analyse bestätigt werden.

- **Verhältnis von Selen- zur Kupfermenge**

Das Verhältnis von Selen- zu der erzeugten Reinkupfermenge wurde gewichtet mit knapp über drei Prozent sowohl in Bezug auf Reserven als auch Ressourcen festgestellt und liegt somit deutlich über bisher veröffentlichten Werten. Die bei der Selenaufbereitung anfallenden Verluste bedingen, dass das technisch nutzbare Verhältnis rund 2% beträgt, und somit je Tonne Kupfer rund 20 kg Selen gewonnen werden können. Diese Relation zeigt sich auch in derzeit in Planung befindlichen Lagerstättenprojekten, sodass diese Verhältniszahl nützlich ist, um in der Zukunft auf Basis der validen und verfügbaren Reserven und Ressourcen von Kupfer auf die Selenvorräte zu schließen. In folgender Tabelle 29 sind die globalen verfügbaren Ressourcen und Reserven von Kupfer sowie Selen, das als Begleitelement aus Kupferlagerstätten technisch gewonnen werden kann, angeführt. Die Selenmengen in der vorletzten Spalte geben die aus den Kupfererzen und den charakteristischen Selenkonzentrationen ermittelten und im Erz enthaltenen geologischen Vorräte an. Da Selen immer als Nebenelement aus dem Kupferproduktionsprozess ausgekoppelt und aufbereitet wird, sind Prozessverluste zu berücksichtigen, die als technisch zur Nutzung in Weiterverarbeitung und Produkten verfügbare Reserven in der mittleren Spalte ausgewiesen sind. Die verfügbaren Ressourcen/Reserven nach Lagerstättentypus sind in Abb. 158 illustriert.

Tabelle 29: Globale Ressourcen und Reserven von Kupfer und Selen in Kupferlagerstätten (Mto = Millionen metrische Tonnen | techn. = Selenmenge, die nach Aufbereitung zur Nutzung verfügbar ist | geologisch = im Erz enthaltene Selenmenge | USGS = Selenangaben von USGS)⁵⁸⁷

	Kupfer [†]	Selen (techn.) ^{**}	Selen (geolog.) ^{**}	Selen (USGS)
Reserven	≈ 870 Mto	≈ 17 Mto	≈ 25 Mto	≈ 0,1 Mto*
Ressourcen (identified)	≈ 2.100 Mto	≈ 40 Mto	≈ 63 Mto	≈ 13 Mto [†]
Ressourcen (undiscovered)	≈ 3.500 Mto	≈ 70 Mto	n/a	n/a

• Bildungsalter der Selen- und Kupfervererzungen

Die Kupferlagerstätten haben sich im Laufe der Erdgeschichte in verschiedenen Epochen gebildet, jedoch entstanden die heute bedeutendsten Kupferanreicherungen in nur einigen wenigen Abschnitten der Erdentwicklung. Mehr als **zwei Drittel der Kupferreserven** wurden im **Paläogen** vor circa 50 Millionen Jahren gebildet und zählen zu den erdgeschichtlich jungen Lagerstätten. Mit 12-13% sind die Anreicherungen aus dem noch jüngeren Neogen (vor circa 20 Millionen Jahren) ebenfalls von Relevanz. Etwa drei Viertel der heute bekannten Kupferreserven und zwei Drittel der Ressourcen entstanden sohin in der jüngeren Erdentwicklung. Einen Anteil von jeweils an die rund fünf Prozent haben die Lagerstätten mit der Genese im Neoproterozoikum (vor circa einer Milliarde Jahren), im etwa doppelt so alten Paläoproterozoikum sowie in der Perm-Periode (ca. 300 Mio. Jahre). Gemeinsam stellen diese in den fünf genannten geologischen Zeiträumen gebildeten Lagerstätten über 90% der bekannten Kupferreserven und knapp 86% der Kupferressourcen (vgl. Tabelle 23).

Folglich verhält es sich ähnlich bei den **Selenvorräten**. Lagerstätten aus den jungen Perioden des **Paläogens und Neogens tragen in etwa zu drei Viertel** zu den heute bekannten Ressourcen/Reserven von Selen bei. Knapp 90% der heute bekannten Selen-Reserven finden sich durch Hinzurechnung der Anreicherungen aus dem Neoproterozoikum, dem Paläoproterozoikum und Perm. Aber auch in der Kreidezeit (ca. 100 Mio. Jahre) und im Karbon (ca. 320 Mio. Jahre) entstanden signifikante Selenanreicherungen, die kumuliert etwa 95% der Selen-Reserven ergeben. In allen Zeitabschnitten dominieren die **porphyrischen Lagerstätten** mit einem **Anteil von circa 90%** der gebildeten Kupfervererzungen. Nur

587 (†) Abschätzung von USGS aus dem Jahr 1973 in: [USGS1973].

(*) Reserves of Selenium in U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020 [USGSSE2020a]

(‡) Quelle: USGS und ICSG.

(**) Berechnungen nach der in dieser Arbeit vorgestellten Methode.

das **Neoproterozoikum** war praktisch vollkommen dominiert von **sedimentogener Lagerstättengense**.

• Selenvorräte nach Regionen und Ländern

USGS weist in den jährlichen Reports für Selen die Reserven nur für sechs Länder sowie eine Summenzeile für „andere Staaten“ aus. Das mit Abstand größte kupferproduzierende Land Chile ist beispielsweise nicht in dieser Aufstellung berücksichtigt, was wenig plausibel ist und weshalb diesen Angaben keine umfassende Gültigkeit zugemessen werden kann. Auch eine genauere Gliederung der Kupfer-Reserven nach USGS wäre wünschenswert, da ein Viertel der Kupfer-Reserven nur kumuliert unter „other countries“⁵⁸⁸ ausgewiesen werden. Beispielsweise ist kein einziges europäisches Land namentlich angeführt, obwohl zumindest Polen über eine durchaus beachtliche Kupferindustrie mit eigenen Lagerstätten verfügt und auch Schweden und Serbien nicht unbeachtliche Kupferreserven haben.

Um dieses Manko auszugleichen, wurde auf die in dieser Arbeit ermittelte Korrelation von Kupfer-Ressourcen und -Reserven zurückgegriffen, die als mittlere Verhältniszahl von 2,2:1 ermittelt wurde. Da das Modell, das dieser Arbeit zugrunde liegt, einen im Durchschnitt linearen Zusammenhang zwischen Kupfer- und Seleninhalt ausweist, kann mit demselben Verhältnis von den Selen-Reserven auf die Selen-Ressourcen geschlossen werden.

Unter Zuhilfenahme dieses erweiterten Modells konnte eine nahezu komplette Übersicht der Selen-Ressourcen und -Reserven nach Ländern und Regionen ermittelt werden (siehe Kap. 9.4, S.271ff). Die Aufstellung zeigt, dass die Selenressourcen etwa zur Hälfte in politisch stabilen Ländern verfügbar sind. Umgekehrt bedeutet dies, dass gut vierzig Prozent der Selenversorgung von ausgewiesen instabilen Staaten abhängen. Etwa ein Zehntel der Selenressourcen lassen sich keinen Ländern und damit keiner expliziten politischen Stabilitätsklasse zuordnen.

• Auswirkungen der Lagerstättengröße

Für die wirtschaftliche Nutzung ist die Gesamtmenge der in der Lagerstätte vermuteten Ressourcen eine wesentliche Kennzahl. Je größer die Reserven und Ressourcen eines Elements sind, desto besser sind die meist sehr hohen Investitionen in die Aufschließung, Aufbereitung und Logistik abgesichert. Die wirtschaftlich gewinnbare Kupfermenge ist relevanter als ausschließlich ein hoher Kupfergehalt (grade), wie das Beispiel des porphyrischen Lagerstättentypus zeigt. Diese wirtschaftlichen Parameter sind zumindest in gleicher

588 [USGSCU2020], p.53.: USGS weist von 870 Mt Gesamtkupfer-Reserven 220 Mt „anderen Ländern“ kumuliert zu.

Weise auch für Begleitelemente wie Selen gültig, obschon wegen des zusätzlichen Aufwandes für die Aufbereitung des Nebenmetalls die Menge noch relevanter ist.

Die bedeutendsten Kupfererzlagerstätten sind daher vom räumlich ausgedehnten porphyrischen und sedimentogenen Typus. Durch die relativ hohe Selenkonzentration dieser Lagerstättenarten sind diese auch die **effizientesten Quellen für die Selengewinnung**. Durchschnittlich kann aus einer porphyrischen Lagerstätte rund 160 tausend Tonnen und aus einer sedimentogenen Mine etwa 60 tausend Tonnen Selen gewonnen werden. Bei einem niedrig angenommenen Marktpreis für Selen von zehn US-Dollar je Pfund entsprechen diese Vorratsmengen einem (virtuellen) Wert von 2,8 Mrd. Euro für eine durchschnittliche porphyrische Lagerstätte und eine Milliarde Euro für eine mittlere sedimentogene Kupferlagerstätte. In Zukunft wird die durchschnittliche Größe einer Mine gemessen an den Ressourcen um die Hälfte geringer ausfallen. Der Rohstoffwert wäre zwar weiterhin beachtlich, dennoch wird die wirtschaftliche Darstellung der Investitionen schwieriger, weshalb der Fokus auf große, bereits bestehende Kupferbetriebe, die Selen nicht extrahieren, gelegt werden sollte.

- **Versorgungssicherheit und geografische Lage der Selenressourcen**

Die Resilienz der Selenverfügbarkeit ist eng mit der Kupferversorgung verknüpft. Gemessen an der durchschnittlichen Bergbaugröße liegen die an Ressourcen reichen Lagerstätten in politisch stabilen Ländern, insbesondere am amerikanischen Kontinent, der im Allgemeinen als politisch ausreichend stabil bewertet wird. In Summe ist die **Versorgungssicherheit etwas größer** als für das Hauptelement Kupfer, dennoch verbleiben nicht zu vernachlässigende Versorgungsrisiken.

Die Analysen dieser Arbeit geben auch einen Einblick über die geografische Lage der jeweiligen Lagerstättentypologien mit ihren korrespondierenden Selenkonzentrationen und durchschnittlichen Ressourcenmengen. Die großen porphyrischen Selenressourcen in Kupferlagerstätten befinden sich hauptsächlich am amerikanischen Kontinent. Auch Europa spielt eine nicht zu unterschätzende Rolle und liegt nur knapp unter dem gewichteten Durchschnitt von rund 111 tausend Tonnen Selen für den porphyrischen Typus (vgl. Abb. 172). Die durchschnittliche Lagerstätte in Asien und Ozeanien ist statistisch um rund die Hälfte kleiner als jene am amerikanischen Kontinent. Die an Ressourcen reichsten sedimentogenen Kupferlagerstätten sind mit Abstand in Lateinamerika zu finden, gefolgt von Asien.

- **Auswirkungen der Lagerstättenform und des Bildungsalters**

Wie bereits erwähnt, erfolgte die Genese von Kupferlagerstätten gehäuft in nur wenigen Perioden der Erdentwicklung. Die hier vorgenommene Analyse der Lagerstättenqualität und Ressourcenmenge je Betriebsstätte in Abhängigkeit des geologischen Entstehungszeitpunkts bzw. geologischen Alters, liefert verwertbare Ergebnisse auch hinsichtlich der durchschnittlichen Ressourcenmenge je Lagerstätte. **Porphyrische Vererzungen** entstanden in mehreren erdgeschichtlichen Zeitabschnitten und das bezogen auf die Selenressourcen in Größenordnungen mit vergleichsweise geringer Varianz von durchschnittlich rund 130.000 Tonnen je Lagerstätte. Nur im Neoproterozoikum (vor circa 1.000 Mio. Jahren) entstanden offenbar kleinere Vererzungen (11.000 Tonnen). Die größten Einzelanreicherungen wurden mit knapp 250.000 Tonnen im Paläoproterozoikum (2.500 Mio. Jahren) und mit etwas über 200.000 Tonnen im erdgeschichtlich bedeutend jüngeren Paläogen (vor circa 50 Mio Jahren) gebildet.

Die größte **sedimentogene Vererzung** hat sich im **Paläogen** mit 1,1 Mio. Tonnen Seleninhalt gebildet, und zwar in einer einzigen Lagerstätte namens El Tesoro in Chile. Im Paläoproterozoikum und Neogen (vor circa 23 bis 2,6 Mio. Jahren) sind – wenngleich um eine Größenordnung kleiner – dennoch große Lagerstätten mit durchschnittlich um die 100.000 Tonnen gebildet worden. Die größte Anzahl an Lagerstätten dieses Typs entstand im Neoproterozoikum (1.000 Mio. Jahren). Diese sind mit durchschnittlich 33.000 Tonnen viel kleiner, aber aufgrund der Vielzahl in Summe für die Selen-Ressourcen von Bedeutung. Die mittlere Lagerstättengröße von durchschnittlich rund 40.000 Tonnen Selenressourcen, berechnet über alle relevanten Erdepochen, ist von geringer Varianz und zeigt eine Spitze im Paläogen mit 116.000 Tonnen.

10.2. Empfehlungen

- **Klassifizierungssysteme**

Die „klassischen“ Codes zielen nur auf die Erfassung des tatsächlich genutzten Hauptelements ab und geben keine sinnvolle Möglichkeit, Begleitminerale mit zu erfassen. Lediglich der UNFC-Code hat dafür ein explizites System. Es wird daher **empfohlen**, im CRIRSCO-Standard ebenfalls die **Vorratsdatenerfassung** möglichst auf alle in der jeweiligen Lagerstätte nutzbaren Ressourcen und Reserven – insbesondere auch auf „Minor Metals“ – gemäß ihrer jeweiligen Klassifizierung verpflichtend auszuweisen, um längerfristig die Datenqualität für **Nebenelemente** zu verbessern und diese durch zukünftigen technischen Fortschritt oder Marktpreisveränderungen nutzbar zu machen. Insbesondere eine Aufnahme der Vorratsbewertung von Begleitelementen in das NI 43-101 wäre wünschenswert, da eine Vorbildwirkung erwartet werden kann.

Derzeit sieht nur das UNFC eine Erfassung anthropogener Stoffe und von erneuerbaren Energieformen vor. Eine allgemeine Verpflichtung oder zumindest eine Aufnahme in die Corporate Governance Empfehlungen („comply or explain“ Prinzip), im CRIRSCO-Template sowohl Nebenelemente als auch anthropogene Materialien zu erfassen, würde das Bewusstsein für nicht erneuerbare Rohstoffe schärfen und mithelfen, die Materialkreisläufe zu schließen (Kreislaufwirtschaft).

Klassischen Codes sind vor allen auf Stakeholder mit wirtschaftlichen Interessen ausgerichtet und zielen auf ökonomisch nutzbringende Rohstoffe und deren Klassifizierung ab nach dem aktuellen Stand der Technik ab. Durch eine regelmäßige Prüfung der „Modifying Factors“ können heute ökonomisch unwirtschaftlich oder technisch nicht förderbare Vorkommen in Zukunft zu interessanten Reserven konvertiert werden. Daher ist Möglichkeit einer **Dokumentation von „undiscovered“ und „uneconomical“ Ressourcen** auch im CRIRSCO-Standard wünschenswert. Sie ist derzeit nur im UNFC-Code vorgesehen.

- **Versorgungssicherheit**

Die Selen-Ressourcen liegen zu 96% in den porphyrischen und sedimentogenen Lagerstättentypen und zu einem weiteren Prozentpunkt in Skarn-Vererzungen und somit ist das Nebenelement kritischer in der Versorgung als das Wirtsmetall Kupfer selbst, das über diese drei Lagerstättentypologien hinaus aus IOCG und orthomagmatischen Lagerstätten gewonnen wird, die zusammen 97% der Kupfer-Reserven bilden. Diese enge Ressourcenbasis erfordert eine **Intensivierung der Nebenelementgewinnung** und **Transparenz der Daten** sowie den Fokus auf den Rohstoffkreislauf am Ende der Produktnutzung.

- **Aktualisierung der Ressourcen und Reserven von Selen**

Das Verhältnis der technisch aus dem Kupferaufbereitungsprozess nutzbaren Selenmenge zur Kupferproduktion ist rund 2%. Diese Verhältniszahl kann in den Folgejahren genutzt werden, aus den jährlich aktualisierten und validen Mengen an Reserven und Ressourcen von Kupfer die an Reserven und Ressourcen von Selen zu berechnen. Diese Werte unterscheiden sich um Größenordnungen von den bisher von USGS ausgewiesenen.

- **Selenproduktion**

Der Selenvorrat hat in einer durchschnittlich großen Kupferlagerstätte einen großen ökonomischen Wert von mehr als einer Milliarde Euro zusätzlich zu den anderen Rohstoffen. Da angenommen werden muss, dass in Zukunft die neu eröffneten Kupferbergbaubetriebe gemessen an den Ressourcen kleiner sein werden, wird mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit

und Investitionssicherheit bereits bestehenden Kupferbetrieben, die Selen nicht extrahieren, empfohlen, die Auskopplung dieses Begleitelements vorzusehen und die Anlagen nachzurüsten.

- **Anwenden der Methode auf andere Begleitelemente**

Die entwickelte Methode zur Abschätzung von Reserven- und Ressourcendaten von Begleitelementen aus Kupferlagerstätten am Beispiel von Selen ist geeignet, auch auf andere Nebenelemente angewendet zu werden. Die Primärproduktion zahlreicher seltener Rohstoffe sind als Begleitelemente an die Herstellung von Wirts- bzw. Hauptmetallen wie Kupfer, Nickel, Blei oder Zink gebunden (Abb. 176). Durch die starke Bedarfsentwicklung insbesondere der als Nebenelemente gewonnen Rohstoffen ist es auch wirtschaftlich sinnvoll, deren Reserven und Ressourcen möglichst genau zu erheben.

Wie in Kapitel 9.6 (S.290) erläutert, können insbesondere die Vorratsdaten der Begleitelemente in Kupferlagerstätten – wie die Metalle der Platingruppe, Kobalt, Wismut, Molybdän und Tantal – mit vergleichsweise geringem Aufwand erhoben werden. Ebenso ist es mit der vorgestellten Methode möglich, auch die Ressourcen und Reserven der Nebenelemente anderer Wirtslagerstätten zu ermitteln. Beispielsweise wird das stark nachgefragte Gallium als Nebenprodukt bei der Aluminiumherstellung aus Bauxit gewonnen. Bevor die Balance von Angebot und Versorgungslage verloren geht und Preissprünge nach sich ziehen, ist zu empfehlen, einerseits die Vorratsdaten der Begleitelemente zu erheben und diese gemeinsam mit der Produktion des Hauptelements herzustellen.

Literaturverzeichnis

- [AUCL1987]: Auclair, Gilles; Fouquet, Yves, Distribution of Selenium in high-temperature hydrothermal sulfide, Vol. 25, pp. 577-587, The Canadian Mineralogist p.582, Canada, 1987 | https://www.researchgate.net/publication/279565143_DISTRIBUTION_OF_SELENIUM_IN_HIGH-TEMPERATURE_HYDROTHERMAL_SULFIDE_DEPOSITS_AT_13_degree_NORTH_EAST_PACIFIC_RISE (16.02.2019).
- [AVAR2015]: Katri Avarmaa; H. O'Brien; H. Johto; P. Taskinen, Equilibrium Distribution of Precious Metals Between Slag and Copper Matte at 1250–1350°C, J. Sustain. Metall. (2015) 1:216–228, Springer, DOI 10.1007/s40831-015-0020-x2015 | <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs40831-015-0020-x.pdf> .
- [BACKSTR2010]: J. Bäckström, Copper, Nickel and Tellurium Yields During Leaching of Anode Slime, Master Thesis, Lulea University of Technology, ISSN: 1402-16172010 | <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1031251/FULLTEXT01.pdf> .
- [BAHL2017]: Bahlburg, Heinrich; Breitzkreuz, Christoph, Grundlagen der Geologie, 5. Auflage, Springer, ISBN 978-3-662-54930-8, Germany, 2017.
- [BERT2002]: Bertram, M. et al., The contemporary European copper cycle: waste management subsystem, Ecological Economics 42, Elsevier Science, pp.43-57, USA, 2002
- [BRET2004]: Bretschger, L.; Smulders, S., Sustainability and substitution of exhaustible natural resources. How resource prices affect long-term R&D-investments. CER-ETH, Schweiz, 2004.
- [CERNY1995]: Cerny, Immo; Schroll, Erich, Heimische Vorräte an Spezialmetallen (Ga, In, Tl, Ge, Se, Te und Cd) in Blei-Zink- und anderen Erzen, Band 18, S.5-33, Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, ISSN 0253-097X, S.17, Tab. 81995 | https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=AL0018_005_A.pdf (12.02.2019).
- [CHEN2005]: Chen, T.T.; Dutrizac, J.E., Mineralogical Characterization of a Copper Anode and the Anode Slimes from the La Caridad Copper Refinery of Mexicana de Cobre, VOLUME 36B, p.229-230, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS Bp.2292005 | <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11663-005-0024-1> (19.02.2019).
- [CIM2010]: CIM Special, Mineral Resource/Reserves and Valuation Standards, Volume 56, CIM-Westmount, Quebec, 2010.
- [COOK2011]: Cook, Nigel J. et.al., Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study, Geochimica et Cosmochimica Acta, Elsevier, Volume 75, Issue 21, p.6473-6496, Australia, 2011 | <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703711004777?via%3Dihub> (14.03.2020).
- [CRIR2019]: CRIRSCO, International Reporting Template (November 2019), ICMM, 2019 | http://www.crisco.com/templates/CRIRSCO_International_Reporting_Template_November_2019.pdf (06.12.2020)
- [ECON1998]: Economou-Eliopoulos, Maria; Eliopoulos, D.G., Selenium Content of Sulfide Ores Related to Ophiolites of Greece, Begell House, Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology, 17(3&4):199-204, 0731-8898/98, p.199,202, Greece, 1998 | https://www.researchgate.net/profile/Maria_Economou-Eliopoulos/publication/13558495_Selenium_content_of_sulfide_ores_related_to_ophiolites_of_Greece/links/574c626e08ae8cd111f6f8a3/Selenium-content-of-sulfide-ores-related-to-ophiolites-of-Greece.pdf?origin=publication_detail (16.02.2019).

- [EDWA1954]: Edwards, A. B. and G. C. Carlos, "The selenium content of some Australian sulphide deposits.", Proc. Austral. Instit. Min. Metall. 172: 31-64, 1954.
- [EVAN1992]: Evans, Anthony M., Erzlagerstättenkunde, Stuttgart, Enke, ISBN 978-3-432-99801-5, S.9, Deutschland, 1992.
- [EVAN2013]: Evans, Anthony M., Ore Geology and Industrial Minerals, third edition, Blackwell Science, ISBN 978-0-632-02953-2, UK, 2013.
- [FENG2004]: Feng, Caixia et al., Geochemistry of the Yutangba Se Deposit in Western Hubei, China, Chinese Journal of Chemistry, Vol. 23 No. 3, China, 2004 | <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02842073>
- [FISC1072]: Fischer, R. and F. Leutwein, Selenium. Handbook of Geochemistry. K. H. Wedephol. New York, Springer-Verlag. 2-3: 34A31-34O31, 1972.
- [FITZ2008]: Fitzpatrick, Alexander John, The measurement of the Se/S ratios in sulphide minerals and their application to ore deposit studies, Kingston, Ontario, Queen's University, App. B, Canada, 2008 | https://qspace.library.queensu.ca/bitstream/handle/1974/1045/Fitzpatrick_Alexander_J_200802_PHD.pdf;jsessionid=01222F1AD053048330D2D25EA54824EB?sequence=1 (01.02.2018).
- [FITZ2009]: Fitzpatrick, Alexander John, et al., Selenium measurement in sulphides by hydride generation-high-resolution inductively coupled plasma mass spectrometry, Geochemistry: Exploration, Environment Analysis, Vol.9, 2009, pp. 93–100, Geological Society of London, DOI 10.1144/1467-7873/07-160, p.98, UK, 2009 | <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.544.4718&rep=rep1&type=pdf> (14.02.2019).
- [FORS2017]: O. Forsén; J. Aromaa; M. Lundström, Primary Copper Smelter and Refinery as a Recycling Plant—A System Integrated Approach to Estimate Secondary Raw Material Tolerance 2017 | www.mdpi.com/2313-4321/2/4/19/pdf.
- [FRAU2009]: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, "Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage", Schlussbericht, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, I D 4 - 02 08 15 - 28/07, Deutschland, 2009.
- [GLOE2015]: Glöser, Simon et al., Raw Material Criticality in the Context of Classical Risk Assessment, Resources Policy, DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.12.003, 2015.
- [GOCH2013]: Gocht, W., Wirtschaftsgeologie und Rohstoffpolitik: Untersuchung, Erschließung, Bewertung, Verteilung und Nutzung mineralischer Rohstoffe, Ausgabe 2, Springer Verlag, ISBN 9783642480706, Deutschland, 2013.
- [GOLD1933]: Goldschmidt, V. M. and O. Hefter, „Zur Geochemie des Selens.“, Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse Nachrichten III-35, IV-36: 245-252, 1933.
- [GOLD1935]: Goldschmidt, V. M. and L. W. Strock, „Zur Geochemie des Selens II.“, Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse Nachrichten [1]4: 123, 1935.
- [GORD2002]: Gordon, Robert B., Production residues in copper technological cycles, Resources, Conservation and Recycling, Elsevier, 36 (2002) 87–106, p.87-89, USA, 2002 | (25.04.2020).
- [GORD2006]: Gordon, R.B. et al., Metal stocks and sustainability, PNAS, 103 (5) 1209-1214, 2005 | <https://www.pnas.org/content/103/5/1209> (27.12.2020)
- [GORD2007]: Gordon, R.B. et al., On the sustainability of metal supplies: A response to Tilton and Lagos, Resources Policy, Elsevier Ltd., Vol. 32, p.24–28, USA, 2007.

- [GRAD2002], Graedel, T.E. et al., The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles, *Ecological Economics* 42, Elsevier Science, pp.9–26, USA, 2002.
- [GRAD2004], Graedel, T.E. et al., Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper, *Environmental Science & Technology* Voll. 38, No. 4, Elsevier Science, pp.1242-1252, USA, 2004.
- [GRAD2012], Graedel, T.E. et al., Criticality of the geological copper family: Methodology of metal criticality determination, *Environmental Science & Technology*, 46 (2), 1063-1070, USA, 2012.
- [GRAN2015], Grandell, Leena; Höök, Mikael, Assessing Rare Metal Availability Challenges for Solar Energy Technologies, *Sustainability*, www.mdpi.com/journal/sustainability, pp.11818-11837, USA, 2015, doi:10.3390/su70911818.
- [HAGE2010]: Hagelüken, Christian; Meskers, Christina, *Complex Life Cycles of Precious and Special Metals, Linkages of sustainability*, Chapter 10, ISBN: 0-262-01358-4, Germany, 2010.
- [HANN2005]: Hannington, Mark, et al., *Sea-Floor Tectonics and Submarine Hydrothermal Systems*, Society of Economic Geologists, Inc., *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 111–141p. 38-392005 | <https://core.ac.uk/download/pdf/11897322.pdf> (12.02.2019).
- [HAWL1959]: Hawley, J.E., Nichol, I., Selenium in some Canadian sulfides, *Economic Geology*, Vol. 54, pp. 608-628Selenium Table 1 pp.615, p.619/Table 31959 | <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.859.1389&rep=rep1&type=pdf> (12.02.2019).
- [HEDD2018]: Hedderich, Jürgen; Sachs, Lothar, *Angewandte Statistik*, 16. Auflage, Springer, ISBN 978-3-662-56656-5Deutschland, 2018.
- [HOHN2010]: Höhme, Florian, *Ressourcenknappheit und nachhaltiges Wachstum*, Grin, V154537, S.8ff, 25ff, Deutschland, 2010.
- [ICSG2017]: ICSG, *The World Copper Factbook 2017*International Copper Study Group (ICSG) Cu World production, Portugal, 2017 | <http://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/2462>.
- [ICSG2019]: International Copper Study Group (ICSG), *The World Copper Factbook 2019*Portugal, 2019 | <https://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/2965> (24.04.2020).
- [JORC2004]: *The JORC Code, Australasian Code for Reporting of Exploration Results*, Edition 20042004 | http://www.jorc.org/pdf/jorc2004print_v2.pdf (13.08.2011).
- [KAUF2010]: Kaufmann, Daniel; Kraay, Aart; Mastruzzi, Massimo, *The Worldwide Governance Indicators - Methodology and Analytical Issues*, September 2010, Policy Research Working Paper 5430, WPS5430, USA, 2010 | https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1682130 (04.10.2020)
- [KAVL2013]: Kavlak, Goksin; Graedel, T.E., *Global anthropogenic selenium cycles for 1940–2010, Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier B.V., Volume 73, p.17-22 USA, 2013 | <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000220> (27.12.2020)
- [KESL2017]: Kesler, Stephen E.; Simon, Adam C., *Mineral Resources, Economics and the Environment*, second edition, Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-07491-0, pp.218-255, UK, 2017.
- [KIRK1996]: R.V. Kirkham; W.D. Sinclair, *Porphyry Copper, Gold, Molybdenum, Tungsten, Tin, Silver*.

- [KRAL2018]: Kral, Ulrich et al., Vorratsklassifikation von anthropogenen Ressourcen, Presentation, TU Wien Austria, 2018 | <https://www.researchgate.net/publication/329389855> (15.05.2020).
- [LANG2011]: Langner, Bernd E., Understanding Copper, First Edition, Wulf, ISBN 978-3-00-036273-6 Germany, 2011.
- [LAYT2008]: Layton-Matthews, D. et al., Distribution, Mineralogy, and Geochemistry of Selenium in Felsic Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits of the Finlayson Lake District, Yukon Territory, Canada, Economic Geology, v. 103, pp. 61–88, Society of Economic Geologists, Inc. p.12008 | https://www.academia.edu/attachments/44447538/download_file?st=MTU1MDAwNDc1OCwxODguMjluMTc4Ljc3LDEw-MjI2ODg2OA%3D%3D&s=swp-toolbar (12.02.2019).
- [LAYT2013]: Layton-Matthews, D. et al., Multiple sources of selenium in ancient seafloor hydrothermal systems: Compositional and Se, S, and Pb isotopic evidence from volcanic-hosted and volcanic-sediment-hosted massive sulfide deposits of the Finlayson Lake District, Yukon, Canada, Geochimica et Cosmochimica Acta, Elsevier, Volume 117, p.313-331, Canada, 2013 | <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.05.002> (10.11.2019).
- [LOBA2012]: Lobanov, K.V., Gaskov, I.V., The Karchiga copper massive sulfide deposit in the high-grade metamorphosed rocks of the Kurchum block: Geologic structure, formation, and metamorphism (Rudny Altai), 53(1), Russian Geology and Geophysics, 10.1016/j.rgg.2011.12.006, p.77–91 2012 | https://www.researchgate.net/publication/257480435_The_Karchiga_copper_massive_sulfide_deposit_in_the_high-grade_metamorphosed_rocks_of_the_Kurchum_block_Geologic_structure_formation_and_metamorphism_Rudny_Altai (06.01.2020).
- [MASO1982]: Mason, B. and C. B. Moore, Principles of Geochemistry. New York, Wiley, 1982.
- [MCKA2001]: Mckay, Bill & Lambert, Ian & Miskelly, Norman, International harmonisation of classification and reporting of mineral resources.2001 | <http://www.jorc.org/pdf/mckay1.pdf> (13.08.2011).
- [MCKE1972]: McKelvey, V.E., Mineral resource estimates and public policy. American Science 60, pp.32-40, 1972
- [MEDO1972]: Medows, Dennis et al., Die Grenzen des Wachstums (engl. Originaltitel: The Limits to Growth) Deutsche Verlags-Anstalt, USA/D, 1972.
- [MINL2019]: Kot-Niewiadomska, Alicja; Galos, Krzysztof, MINLAND: Mineral resources in sustainable land-use planning, Topic: SC5-15d | Deliverable 4.1., EC, Ref. Ares (2019)571755 - 31/01/2019 Poland, 2019 | <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c11cc165&appId=PPGMS> (15.05.2020).
- [MISR2000]: Misra, Kula C., Understanding Mineral Deposits, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-045530092, The Netherlands, 2000.
- [MOON2006]: Moon, Charles J. et al., Introduction to Mineral Exploration, 2nd edition, Blackwell Publishing, ISBN 978-1405113175 , pp.52, 198, 244, UK, 2006.
- [MORY2005]: Mory, Arthur et al., Geology of the northern Perth Basin, Western Australia. A field guide, Technical Report, ResearchGate, 2005/9, p.36, Fig.41, Australia, 2005 | https://www.growinggreatergeraldton.com.au/Profiles/progressmidwest/Assets/ClientData/Documents/GGG_Library_2019/Regional_development/Geology_of_the_Northern_Perth_Basin.pdf | https://www.researchgate.net/publication/233726107_Geology_of_the_northern_Perth_Basin_Western_Australia_A_field_guide (02.11.2019).

- [NAEN2011]: NAEN-CRIRSCO, Russian Code for the Public Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves (NAEN Code), CRIRSCO, Russia, 2011 | http://www.crirSCO.com/news_items/naen_code.pdf (06.12.2020)
- [NAGA1978]: M. Nagamori; P. J. Mackey, Thermodynamics of Copper Matte Converting: Part II. Distribution of Au, Ag, Pb, Zn, Ni, Se, Te, Bi, Sb and As Between Copper, Matte and Slag in the Noranda Process, METALLURGICAL TRANSACTIONS B, VOLUME 9B, DECEMBER 1978-567, AMERICAN SOCIETY FOR METALS AND THE METALLURGICAL SOCIETY OF AIME1978 | <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF03257205>.
- [OFFE2019]: Offerman, S. Erik, Critical Materials - Underlying Causes and Sustainable Mitigation Strategies, Delft University of Technology, World Scientific Series in Current Energy Issues Volume 5, ISBN 9789813271043, Singapore and USA, 2019.
- [OKRU2014]: Okrusch, Martin; Matthes, Siegfried, Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, 9. Auflage, Springer, ISBN 978-3-642-94659-0, Germany, 2014.
- [ÖNORM G1050]: ÖNORM G1050, Klassifikation von Vorkommen fester mineralischer Rohstoffe (Classification of resources and occurrences for solid mineral raw materials), Österr. Normungsinstitut, DK 553.6.001.33:622.3, Austria, 1. April 1989.
- [PERC2008]: Pan-European Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Reserves ("The PERC Reporting Code"), 2008.
- [PERC2017]: PERC, PERC REPORTING STANDARD 2017, 2017, PERC, 0.521-825-257Bruselles, 2017 | <http://www.vmine.net/PERC/documents/PERC%20REPORTING%20STANDARD%202017.pdf> (15.05.2020).
- [PERK2004]: Perkins, R. B., A. L. Foster and J. R. Hein, "Mineral affinities and distribution of selenium and other trace elements in black shale and phosphorite of the Phosphoria 149 Formation. Life cycle of the Phosphoria Formation; from deposition to the post-mining environment", J. R. Hein. Amsterdam, Elsevier. 8: 251-295, 2004.
- [PERE2004]: Perez-Tello, Manuel et al., A Kinetic Model for the Oxidation of Selenium and Tellurium in an Industrial Kaldo Furnace Universidad de Sonora, JOM, p.52-54, p.52, Mexico, 2004 | <http://www.mperez.iq.uson.mx/Archivos%20FD/JOM-0412-52.pdf> (19.02.2019).
- [PINT2014]: Pinto, A. et al., High-Tech Metals in the zinc-rich massive ores of the Neves Corvo Deposit, IX CNG/2º CoGeLiP, Porto 2014, Comunicações Geológicas (2014) 101, Especial II, 825-828, ISSN: 0873-948X; e-ISSN: 1647-581X, p.1. , Portugal, 2014 | http://www.Ineg.pt/download/9662/48_3087_ART.CG14_ESPECIAL_II.pdf (16.02.2019).
- [POHL2020]: Pohl, Walter L., Economic Geology: Principles and Practice. Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons - Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits, 2nd edition, Schweizerbart'sche, E., ISBN 978-3510654413, Germany, 2020.
- [PRED2015]: Preda, Christina et al., Selenium in the Environment: Essential or toxic to human health?, Vol.15, No. 4, 913-921, Environmental Engineering and Management Journal, Romania, 2015 | <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ> (12.09.2020)
- [RAFO2004]: Rafoth, Astrid, Selen und Quecksilber - Von der Lagerstätte bis zur Verwendung, Geochemisches Seminar WS 03/04S.6, Germany, 2004 | <https://web.archive.org/web/20131012004328/http://www.rz.uni-karlsruhe.de/~dg21/geochem0304/HgSe.pdf> (16.02.2019).
- [RECH2002], Rechberger, H. et al., The contemporary European copper cycle: statistical entropy analysis, Ecological Economics 42, Elsevier Science, pp.59-72, USA, 2002.

- [REVU2018]: Revuelta, Manuel Bustillo, Mineral Resources - From Exploration to Sustainable Assessment, Springer, ISBN 978-3-319-58758-5, Spain, 2018.
- [SATW2010]: Wäger, Patrick A.; Lang, Daniel J. et al., Seltene Metalle - Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Seltene Metalle, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, SATW Schrift Nr. 41, ISBN 3-908235-17-0, Schweiz, 2010.
- [SKIN1976]: Skinner, B.J., A Second Iron Age Ahead?, American Scientist 64, p.558-569, 1976.
- [SPAT2002]: Spatari, S. et al., The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows, Ecological Economics 42, Elsevier Science, pp.27-42, USA, 2002.
- [STIF2013]: Stiftner, R., Rohstoffe haben Zukunft. Aber in der EU? Ein Plädoyer für die Reindustrialisierung Europas. , Berg Huettenmaenn Monatshefte (BHM), Springer, 158, pp.395–409, Austria, 2013 | <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-013-0206-0> (10.05.2020).
- [STIF2018]: Stiftner, R.; Kolroser, V., Herausforderungen für die Mineralrohstoffwirtschaft, Berg Huettenmaenn Monatshefte (BHM), Springer, 163, pp.292–296, Austria, 2018 | <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-018-0759-z> (10.05.2020).
- [TILT2002], Tilton, John, Assessing the Threat of Mineral Depletion, Minerals and Energy, Raw Materials Report 18(1):33-42, 2002, https://www.researchgate.net/publication/232976290_Assessing_the_Threat_of_Mineral_Depletion.
- [TISC1959]: Tischendorf, G., "Zur Genesis einiger Selenidvorkommen insbesondere von Tilkerode im Harz.", Freiburger Forschungshefte C69: 1-168, 1959.
- [TISC1966]: Tischendorf, G., "Zur Verteilung des Selens in Sulfiden.", Freiburger Forschungshefte C208: 1-162, 1966.
- [TOKM2002]: Tokmakchieva, Margarita, Valuable minor components in the composition of porphyry copper deposits, Annual, vol.45, part I, Geology, Sofia, 2002, pp. 71-75, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" p.73, Tab.1, Bulgaria, 2002 | http://mgu.bg/annual/public_html/2002/en/gpf_en/dokladi_pdf/Tokmakchieva_a.pdf (16.02.2019).
- [TUFA1963]: Tufar, Werner, Die Erzlagerstätten des Wechselgebietes, Johanneum, Mineralogisches Mitteilungsblatt 1/1963, Universität Wien S.35ff, Austria, 1963 | https://www.zobodat.at/pdf/MittAbtMineralogie-Joanneum_1_1963_0001-0060.pdf (16.02.2019).
- [UNFC2009]: United Nations Economic Commission for Europe, United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009UN, ISSN1014-7225USA, Schweiz, 2010 | https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/unfc2009/UNFC2009_ES39_e.pdf (15.05.2020).
- [USGS1973]: J. G. Watt et al, Geological Survey, 3rd printing 1981, USGS, No. 73-600060, p.3.: CLASSIFICATION OF RESOURCES SELENIUM: p.5721973 | <https://pubs.usgs.gov/pp/0820/report.pdf>.
- [USGS2008]: Singer, Donald A., et al., Porphyry Copper Deposits of the World: Database And Grade and Tonnage Models U.S. Geological Survey, Open-File Report 2008-1155, PorCuEX2008.xls: Excel file containing the porphyry copper database, USA, 2008 | <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1155/of2008-1155.pdf> (14.02.2019).
- [USGS2010]: Berger, Byron R. et al., Porphyry Copper Assessment of Western Central Asia, Global Mineral Resource Assessment , USGS, Scientific Investigations Report 2010–5090–N, p.158, 178, USA, 2010 | <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5090/n/pdf/sir2010-5090-N.pdf> (19.02.2019).

- [USGS2013]: USGS, Estimate of Undiscovered Copper Resources of the World, Global Mineral Resource Assessment, Fact Sheet 2014–3004 | <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20143004> (22.11.2020).
- [USGS2017]: Stillings, Lisa L., Selenium, Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, U.S. Geological Survey, USGS, Professional Paper 1802–QUSA, 2017 | <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/q/pp1802q.pdf> (14.03.2020).
- [USGS2020], Anderson, C. Schuyler, Minerals Yearbook 2017, Selenium and Tellurium, advanced release, USGS, USA, 2020, <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/selenium/myb1-2016-selen.pdf>.
- [USGSCR2017]: USGS, Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper, USGS, 1802, full discription of almost all elements, USA, 2018 | https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802_entirebook.pdf .
- [USGSCU2004]: T. G. Goonan, Flows of Selected Materials Associated with World Copper Smelting , U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1395, USGS, Report 2004–1395 USA, 2004 | <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1395/2004-1395.pdf> .
- [USGSCU2007]: Cox, Dennis P. et al., Sediment-Hosted Copper Deposits of the World: Deposit Models and Database, 2003, revised 2007, USGS, Open-File Report 03-107, pp.1-7, 2007 | <http://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-107/> (11.06.2020).
- [USGSCU2020]: USGS, Copper Data Sheet, Oct 19, USGS Cu Reserves, USA, 2020 | <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-copper.pdf> (10.05.2020).
- [USGSCUDA2017]: M. Brininstool; D. M. Flanagan, 2015 Minerals Yearbook, Copper, [advanced release], USGS Cu production data & by materials, USA, 2017 | <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/myb1-2015-coppe.pdf>.
- [USGSPH2010]: Donald I. Bleiwas, Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic CellsUSGS, Circular 1365, Se use in photovoltaics, price, recycling, USA, 2010 | <https://pubs.usgs.gov/circ/1365/Circ1365.pdf> .
- [USGSSE2004]: W.C. Butterman; R.D. Brown, Jr., Selenium, Mineral Commodity Profiles USGS, Report 03–018USA, 2004 | <https://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-018/of03-018.pdf>.
- [USGSSE2015]: C. Schuyler Anderson, 2015 Minerals Yearbook, Selenium and Tellurium, [advanced release], USGSUSA, 2017 | <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/myb1-2015-selen.pdf>.
- [USGSSE2017]: Lisa L. Stillings, Selenium Chapter Q of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, Professional Paper, USGS, 1802–Q, full Se description, p.9. Deposit Types, USA, 2017 | <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/q/pp1802q.pdf>.
- [USGSSE2020]: Anderson, C. Schuyler, Selenium and Tellurium, Minerals Yearbook 2017, USGS, 65.8USA, 2020 | <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-seleni.pdf> (20.05.2020).
- [USGSSE2020a]: Anderson, C. Schuyler, Selenium, Periodicals, USGSUSA, 2020 | <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-selenium.pdf> (20.05.2020).
- [USGSSEDA2017]: C. Schuyler Anderson, Selenium, Data, USGS production data, USA, 2017 | <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/mcs-2017-selen.pdf>.

- [WEBE1997]: Weber, Leopold, Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs - Erläuterungen zur metallogenetischen Karte von Österreich 1:500000 unter Einbeziehung der Industriemineralien und Energierohstoffe, Verlag der Geologischen Bundesanstalt, ISBN: 978-3-900312-98-5, Austria, 1997.
- [WANG2016]: Wang, C. et al., Selenium minerals and the recovery of selenium from copper refinery anode slimes, Volume 116, p.593-600, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 116, Table VI2016 | <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v116n6/18.pdf> (19.02.2019).
- [WEBE1990]: Weber, Leopold, Die Blei-Zinkerzlagerstätten des Grazer Paläozoikums und ihr geologischer Rahmen: mit 25 Tabellen, Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt 12, ISBN 3900312729, 1990.
- [WEBE2010]: Weber, Leopold, Angewandte- und Umweltgeologie II Applied and Environmental Geology, Vorlesungsunterlage, Universität Wien, Modul BA25Austria, 2010.
- [WEBE2012]: Weber, L.; Stiftner R. (Hsg.), Rohstoffe sind Zukunft / Raw Materials are the Future, Band 1, Der österreichische Bergbau, zweisprachig Deutsch/Englisch, ISBN 978-3-901074-32-5, Austria, 2012.
- [WEBE2013]: Weber, Leopold, Stärken und Schwächen internationaler Vorratsklassifikationssysteme, BHM Vol. 158, Springer-Verlag, DOI 10.1007/s00501-013-0122-3Austria, 2013 | <https://rd.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00501-013-0122-3.pdf> (15.05.2020).
- [WEBER2015]: Leopold Weber, Interpretation von Reserven und Ressourcenangaben aus wirtschaftsgeologischer Sicht, ISSN 0005-8912, Volume 160, Number 2, 160:71-78, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte Austria, 2015.
- [WEBER2020]: Leopold Weber, Interpretation von Reserven und Ressourcen von Kupferlagerstätten, noch nicht veröffentlicht, 2020.
- [WELL2008]: Wellmer, F.-W.; Dalheimer, M.; Wagner, M., Economic Evaluations in Exploration, second edition, Springer-Verlag 978370922008.
- [WENS1984]: Wen-Shing Juang, The Origin of the Tungshan Cupriferous Pyrite Deposit of Ilan-Hsien, Eastern Taiwan - a geochemical approach, Special publication of the Central Geological Survey No 3, pp.171-194, p.185, Table 9, Taiwan, 1984 | <http://cgsweb.moeacgs.gov.tw/Result/publish/19820001/000003/0171.pdf> (19.02.2019).
- [WMD2020]: Reichl, Christian; Schatz, Michael, World Mining Data 2020, Volume 35, Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism, ISBN 978-3-901074-48-6, Austria, 2020 | <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2020.pdf> (23.8.2020)
- [WRDB2017]: World Bank Group, The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future, The World Bank, USA, June 2017 | <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/minerals-and-metals-to-play-significant-role-in-a-low-carbon-future> (27.12.2020)
- [YUDO1985]: Yudovich, Y. E. and M. P. Ketris, "Selenium in Pay Khoy black shales", Geochem. Int. 22: 109-116, 1985.
- [ZHOU2020]: Zhou, Yanjing et al., Dynamic criticality of by-products used in thin-film photovoltaic technologies by 2050, Journal of Cleaner Production 263, 121599, Elsevier, China, 2020.
- [ZHU2003]: Zhu, Jianming et al., Occurrence of native selenium in Yutangba and its environmental implications, Geochemistry, China 2003, | https://www.researchgate.net/publication/248337084_Occurrence_of_native_selenium_in_Yutangba_and_its_environmental_implications (12.09.2020)

Stichwortverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI	DRC	161
Abkürzungen.....	3	dynamische Reichweite	114
Abstract (english).....	1	Eigenschaften von Selen.....	183
afrikanischer Typ.....	146	Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerst. (IOCG)	135
Alter.....	272, 291	El Teniente (porphy. Kupferlagerstätte)....	132
Anodenschlamm	92, 102	El Tesoro (Chile)	291
Anreicherung.....	27	Electrowinning.....	99
Anreicherungsfaktor	122	Elektrolyse.....	190
anthropogene Lagerstätten.....	41, 90	Entscheidungsprozess	57
anthropogenen Ressourcen.....	92	Entscheidungsprozess, Lagerstättenaufsuchung	56
anthropogener Selen-Zyklus.....	42	Entwicklung der Reporting Codes	82
Aufbereitung von Kupfererz	99	Entwicklung von Klassifikationssystemen...49	
Aufbereitungsprozess von Kupfer	99	Erzlagerstätten.....	198
Aufsuchungsprojekt.....	55	Erzlagerstätten, Klassifikation.....	124
Auftreten	29	Erzmineral.....	121
Aurubis	104	European Code.....	67
Australien	65	Feasibility	56
Beurteilungsprozess	58	Feasibility study	119
BHP Group.....	136	Fragestellungen	13
Bildungstemperatur.....		Gallium	91
.....133, 142, 153, 156, 198, 250, 252		Gangart	121
Bingham	134, 135	Gang-klufförmige Lagerstätten	136
Black Smoker	252	Geologie von Kupfervorkommen.....	121
charakteristische Selenkonzentration	246	geologisches Alter.....	272, 291
China Nonferrous Metal Mining (CNMC).....	162	Gesteinsmetamorphose.....	125
Chinesisches Klassifizierungssystem.....	80	Gesundheit (Selen)	201
Chuquicamata (Chile).....	130, 132	GKZ, Russian Reporting System.....	69
CIM Code	66	Glossar.....	3
CIS-PV-Zellen	198	Governance Indicator (WGI)	280
Clarke-Wert	27, 35, 122	Grauackengebiet.....	143
Club of Rome.....	22	größte Kupferlagerstätten	121
Coal Question	22	Grundprinzipien von Codes	53
code of ethics	53	Hochsee Manganknollen	111
Codelco	132, 133	Hütte	98
Codes	59	Hüttenprozess	101, 102
Codes (Gegenüberstellung).....	90	Hydrothermale Lagerstätten.....	131, 139
Competency	53	ICSG	21, 111
Competent Person	53, 63, 86	igneous	124
copper belt.....	147	Impartiality	54, 68
CRIRSCO	51, 59, 85, 87	indicated.....	77
Cut-off Grade	8, 300	Indicated Resource	63, 119
deep-sea nodule	111, 127, 150, 241	inferred.....	77
Deposit	29	Inferred Mineral Resource.....	64
Deselenisierung.....	102	Interessentengruppen	51, 52
Diagenetische Lagerstätten	155, 241		

International Copper Study Group	111, 298	Kupferressourcen
Investitionsentscheidung	119	111, 158, 263, 265, 269, 271, 272
IOCG Lagerstätte	135	Kupfer-Ressourcen/Reserven Verhältnis .	160
Ivanhoe Mines	162	Kupferschiefer.....	241
IWCC.....	21	Kupferschiefertyp.....	155
JORC	50, 65, 86, 119	Kupfervorkommen	93, 121
Kakula-Kupferlagerstätte (DRC)	162	Kupfervorräte.....	269
Kambalda (Australien)	128	Kupferzyklus	37
Kamoa-Kakula Gebiet.....	162	Kurzfassung (deutsch).....	2
Kamoa-Kupferlagerstätte (DRC)	161	Lagerstätte	27, 29, 121
Kanada.....	66	Lagerstätten, Klassifikation.....	124
Karbonatite.....	127, 140, 231	Lagerstättenarten	127
Kashin-Beck-Krankheit	204	Lagerstättenbildung.....	124
Keshan Krankheit.....	204	Lagerstättenforschung	49
Klassifikation.....	57	Lagerstättengenese.....	124
Klassifikationssysteme.....	90	Lagerstättengröße	282, 286, 288, 291
Klassifikationssysteme, Entwicklung	49	Lagerstättenkapazität.....	118
kompetente Person.....	54	Lagerstättenklassifizierung.....	123
Kompetenter Experte	86	Lebensdauer.....	114, 115
Kompetenz.....	53	Machbarkeit	56
Konzepte Ressourcenverteilung	35	Machbarkeitsstudie.....	119
Kritikalität	32	magmatisch	124
Kupfer, Anwendungen	94	magmatische Prozesse	124
Kupfer, Aufbereitung.....	99	magmatogen	123
Kupfer, Eigenschaften	94	Magmatogene Lagerstätten.....	128
Kupfer, historisch.....	93	Malthus, Thomas Robert	23
Kupfer, Verfügbarkeit.....	111	Manganknollen.....	241
Kupfer, Verwendung.....	94, 95	Markteintrittsbarriere	118
Kupfer, Weltproduktion.....	97	Marktwirtschaft	24
Kupferanteil in der Produktion.....	104	Massive Sulfide (MS).....	145, 253
Kupferaufbereitung	105	Materiality	53
Kupferbergbauprojekte.....	161	McKelvey-Diagramm	28
Kupfererz, Aufbereitung	99	measured.....	77
Kupfererzeugung.....	98	Measured Mineral Resource	63
Kupfererzminerale	122	Medizin	203
Kupfergürtel.....	147	Medows, Dennis	22
Kupferhütte	98, 101	metamorph.....	124, 152
Kupferkonzentrat.....	100, 102	metamorphe Prozesse	125
Kupferlagerstätte, Struktur.....	126	metamorphogen.....	124, 152
Kupferlagerstätten.....	93, 121, 127	Metamorphogene Lagerstätten.....	152
Kupferlagerstätten (Gegenüberstellung)	156	Metamorphose	125
Kupferlagerstätten, Karte	121	Methode.....	14
Kupferlagerstätten, Übersicht.....	131	Methoden zur Ressourcenerfassung	49
Kupferproduktion.....	106	Mineral Classification System of China	80
Kupferproduktion, weltweite	106	mineralogische Barriere	36
Kupferrefining	101	Modifying Factors	55, 84, 119
Kupfer-Reserven.....	111	MRRCC	80
Kupferreserven, weltweite.....	113	MS-Lagerstätte	253

Nachhaltigkeit	30	Reinkupfererzeugung.....	102
NAEN Code (Russia)	69	Reporting Codes	52, 83, 86
Nahrungsselen	203	Reserven	29, 84, 158, 167
National Instrument (NI) 43-101	79	Reserven (Selen).....	190
Nebenmetalle	183	Ressourcen	29, 84, 158, 167
Neuseeland	65	Ressourcen (Selen)	190
NI 43 101 Reports (Cu)	161	Ressourcenerfassung.....	49
NI 43-101.....	66, 79	Ressourcenmangel.....	22
Nomenklatur	3	Retorte (Aurubis).....	104
Noril'sk (Russland)	128	Rio Tinto	134, 143
Noril'sk-Talnakh-Region (Russland)	129	Risikominimierung	56
Normkonzentration.....	15	Risk Management.....	56
Nutzungsdauer.....	115	Rohstoffmangel.....	22
Occurence.....	29	Rohstoffpreise	116, 117
Ölpreiskrise.....	22	Rückgewinnung	103
Olympic Dam	135	Rückgewinnung von Selen	104
open pit.....	126	rules of conduct	53
optimale Nutzungsdauer	115	Russian Reporting System (GKZ).....	69
optimalen Lebensdauer.....	115	Russisches Klassifizierungssystem	69
Orthomagmatische Lagerstätten.....	128	Schema Methode Ressourcenabschätzung ..	15
Palabora.....	141, 231	Se/Cu-Verhältnis	267, 269
Pan-European Code	67	Seabed	127, 241
PERC	54	Seabed deposits	150
PERC Code.....	67	SEDEX	132, 142, 145, 253
Plattentektonik	132	sedhost.....	241
politische Stabilität	286	Sediment hosted deposits	146
polnischer Kupferschiefer.....	155	sedimentär	124
Porphyrische Lagerstätten.....	132	sedimentärer Kreislauf.....	125
predicted.....	77	Sedimentary Exhalative (SEDEX)	
Prefeasibility.....	56	Lagerstätten	145
Preiskalkulation.....	116	sedimentgebundene Lagerstätten	142, 146, 241
Primärkupfererzeugung	98	sedimentogen.....	123
Prinzipien von Codes	53	Selen	21, 102, 183
Probable Ore Reserve	64	Selen Vorkommen	281
probable reserves.....	119	Selen, Daten.....	19
Probebohrungen.....	56	Selen, Eigenschaften	183
process mining.....	105	Selen, Medizin	203
Produktion, Kupfer	97	Selen, Nahrung.....	203
Produktionsmenge, Kupfer	106	Selen, Rückgewinnung.....	104
Proved Ore Reserve	64	Selen, Umwelterwägungen	201
proven reserves.....	119	Selenbedarf.....	197
Qualified Person.....	86	Selenerzeuger (Unternehmen)	189
Refining Prozesses	99	Selengehalt.....	198
Refining von Kupfer	101	selenhaltige Sulfidablagerungen.....	199
Regionen	288	Selenkonzentration.....	207, 208, 242
Reichweite.....	114	Selenkonzentration (Bildungstemperatur) ..	252
Reichweite, dynamisch	114	Selenkonzentration (geolog. Alter)	250
Reichweite, statisch	114	Selenkonzentration Kupferlagerstätten	244

Selenkonzentration, charakteristisch nach Lagerstättentypus	246	Termingeschäfte	116
Selenkonzentration, IOCG	223	These	13, 90, 246, 264
Selenkonzentration, MS	235	Transparency	53
Selenkonzentration, Ortho	217	Transparenz	53
Selenkonzentration, Por	220	Umwelterwägungen (Selen)	201
Selenkonzentration, SEDEX	235	UN-ECE	70
Selenkonzentration, sedhost	238	UNFC	70, 87, 90
Selenkonzentration, Skarn	229	UNFC, Aufbau	74
Selenkonzentration, Vein	226	United Nations Economic Commission for Europe	70
Selenkonzentration, VMS	232	United Nations Framework Classification	70
Selenlagerstätte (native)	190, 198	Unparteilichkeit	54, 68
Selenmangel	204	Untertagebergbau	126
Selenpreis	195	Urban Mining	41
Selenproduktion	187, 200	USGS	111, 186, 190, 275
Selen-Recycling	48	Vein deposits	136
Selenreserven	199	Vergleich Reporting Codes	90
Selen-Reserven	190	Verhältnis Kupfer-Ressourcen/Reserven	160
Selenressourcen	261, 263, 268, 269, 271, 272, 282	Verteilung von Elementen	35
Selen-Ressourcen	190	Verteilungsmodelle	35
Selenverwendung	185	Verwendung von Kupfer	94
Selenvorkommen	183	VMS	253
Selenvorräte	269, 272, 273, 274, 277, 279	VMS Lagerstätten	142, 143
Selenvorräte, Regionen	275	Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Lagerstätten	142, 143
Selen-Zyklus	42, 48	Vollständigkeit	53
Showing	29	Vorkommen	29
Skarne	133, 139, 152	Vorkommen, Def.	56
Smelter	98	Vorräte, Def.	56
Solvent Extraction	99	Vorratsklassifikation	49, 57
Spotmarkt	116	Vorratsklassifizierung, Grundprinzipien	52
Stakeholder	52	Warenbörse	116
statische Reichweite	114	Weltmarkt (Selen)	189
Statistik	21	WGI	280
Stiglitz, Joseph	24	Worldwide Governance Indicator	280
Sudbury (Ontario, Kanada)	129	Yutangba	190, 202
Sulfidablagerungen	199	Yutangba (China)	198
SX-EW	95, 99, 190	Zielgruppen der Klassifikation	51
Systematik der Kupferlagerstätten	127	Zijin Mining Group	162
Tabellenverzeichnis	XII	Zonarbau	133
Tagebau	126	Zonierung	133, 137
Temperatur (Selengehalt)	198	Zonierung einer Lagerstätte	126

