

Kobalt

Informationen zur Nachhaltigkeit



27 58,933

Co

Kobalt

AUF EINEN BLICK

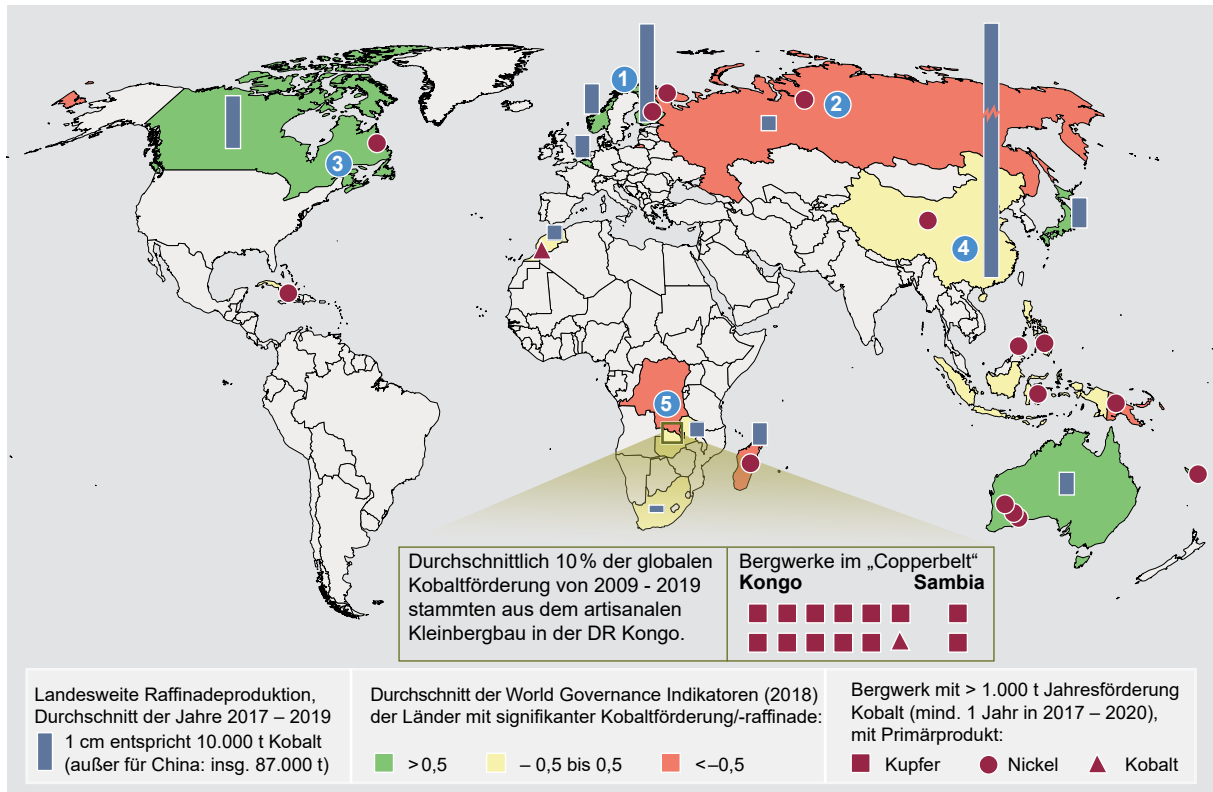


Abb. 1: Kobaltproduktion in den größten Bergwerken (Einzelstandorte) und Raffinadezentren (auf Landesebene) und Fragestellungen zur Nachhaltigkeit. World Governance Indikatoren der Weltbank als Mittelwert dargestellt.

- 1 Skandinavien ist derzeit Europas Zentrum der Kobaltproduktion. Neben Anlagen zur Raffinade beheimatet Finnland das Terrafame-Projekt, in dem Kobalt und weitere Metalle mittels Biolaugung gewonnen werden. Im finnischen Kokkola werden zudem russische Vorprodukte raffiniert.
- 2 Die langjährigen Verhüttungstätigkeiten in den Anlagen des Norinickel-Konzerns führten dazu, dass Norilsk als schmutzigste Stadt der Welt bezeichnet wurde. Im Jahr 2020 sorgte die großflächige Kontamination lokaler Ökosysteme durch Beschädigung eines Dieseltanks für internationales Aufsehen.
- 3 Die Grube Voisey's Bay stellt ein Beispiel für eine gute „social license to operate“ dar. Nach Verhandlungen mit den Inuit und Innu wurde das Projekt kleiner als geplant umgesetzt. Die Aufbereitung wurde an einen neuen Standort verlegt, um Wasserschutzgebiete nicht zu gefährden.
- 4 Die VR China ist der global wichtigste Produzent von Kobaltchemikalien. Zugleich ist China weltgrößter Absatzmarkt für die Elektromobilität und ein Schlüsselland für den Ausbau des Kobaltrecyclings. Der Großteil des in China verarbeiteten Kobalts stammt aus der DR Kongo.
- 5 Historische Verhüttungsaktivitäten führten zu Schäden der Ökosysteme im „Copperbelt“. Bei der Vergabe industrieller Abbaukonzessionen ist oft Korruption ein Problem. Ein Teil der Förderung erfolgt im Kleinbergbau, oft ohne legale Grundlage und mit Problemen der Arbeitssicherheit und der Kinderarbeit.

INHALT

1. Relevanz von Kobalt	S. 3
2. Von der Lagerstätte zum Metall	S. 4
3. Recycling	S. 9
4. Nachhaltigkeitsaspekte des Bergbaus	S. 10
5. Nachhaltigkeitsaspekte der Weiterverarbeitung	S. 18
6. Fazit	S. 21

1 RELEVANZ VON KOBALT

Die Relevanz von Kobalt ist eng mit der steigenden Verbreitung von Lithiumionen-Akkumulatoren verflochten. Kobalt ist ein wichtiger Bestandteil des Ausgangsmaterials vieler Akku-Kathoden. Die Kobaltnachfrage aus diesem Sektor stieg im Zeitraum 2013 – 2018 um durchschnittlich 16,5% pro Jahr. Aktuell finden 50 – 60% des global produzierten Kobalts Verwendung in derartigen Akkus [1]. Auch wenn die Nutzung kobalthaltiger Lithiumionen-Akkus medial häufig mit Bezug auf die Elektromobilität thematisiert wird, so ist die Marktrelevanz des Elektroniksektors derzeit noch knapp doppelt so hoch wie die des Automobilsektors. Mit dem globalen Ausbau der Elektromobilität, im Verbund mit den im Vergleich zu Elektronikgeräten um ein Vielfaches größeren Akkus, wird die Nachfrage aus dem Automobilsektor jedoch steigen und zunehmend das wichtigste Anwendungsfeld für Kobalt darstellen. Der Kobaltgehalt verschiedener Produkte und Akkus ist in Tabelle 1 dargestellt.

Prognosen zur Marktentwicklung der Elektromobilität und des daraus resultierenden Rohstoffbedarfs der sogenannten Batteriemetalle – neben Kobalt unter anderem Lithium, Nickel, Mangan und Graphit – sind mit hohen Unsicherheiten verbunden. So gehen aktuelle Schätzungen von einer Spannweite von 25 – 45 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2029 aus [2]. Dies reflektiert Unwägbarkeiten in der globalen Nachfrageentwicklung und des resultierenden Rohstoffbedarfs. Beeinflusst wird dies beispielsweise durch Veränderungen in der Subventionspolitik der chinesischen Regierung oder die wirtschaftlichen Verwerfungen der Coronavirus-Pandemie. Zudem verändert sich im Zuge der Technologieentwicklung die chemischen Zusammensetzung der Kathoden, bis hin zu komplett kobaltfreien Materialien. Auch wenn unstrittig ist, dass der globale Kobaltbedarf durch die Verbreitung der Elektromobilität stark ansteigen wird, so sind konkrete Bedarfsprognosen, insbesondere Langfristprognosen über das Jahr 2030 hinaus, daher mit Vorsicht zu behandeln.

Vor allem aus Kostengründen wird der in den Kathoden von Lithiumionen-Akkus für die Elektromobilität durchschnittlich verbaute Anteil von Kobalt durch Substitution reduziert. Dies ähnelt der Entwicklung des Kobaltgehalts in Magneten seit den 1980er Jahren – auch hier erfolgte aus Preisgründen eine Substitution von Kobalt durch Neodym (Seltene Erden). Darüber hinaus spielen technologische Faktoren bei der Substitution eine Rolle. Diese beziehen sich auf Anforderungen an die Akkus mit Blick auf deren Energiedichte (und damit deren Gewicht und Reichweite), die Betriebssicherheit sowie Anzahl und Geschwindigkeit der Ladezyklen. Daneben

ist die Verwendung von Kobalt für die Hersteller teils mit Reputationsrisiken verbunden, die sich aus den Umständen der Kobaltgewinnung in Zentralafrika ergeben. Der durch Substitutionseffekte reduzierte durchschnittliche Kobaltgehalt pro Akku wird jedoch durch das prognostizierte Wachstum des Gesamtmarktes für Lithiumionen-Akkus mehr als ausgeglichen. Deshalb ist zumindest mittelfristig von einem weiter steigenden Kobaltbedarf auszugehen. Außer in Elektrofahrzeugen werden Lithiumionen-Akkus auch weiterhin in Elektronikgeräten wie Smartphones oder Laptops eingesetzt werden. Zudem ist ihr Einsatz in Energiespeichersystemen im Rahmen der Energiewende relevant.

Während Kobalt heutzutage hauptsächlich in Lithiumionen-Akkus verwendet wird, so wird es aufgrund seiner spezifischen Materialeigenschaften wie beispielsweise der Hitzebeständigkeit in einer Reihe weiterer industrieller Anwendungen genutzt. Bis in die 1990er Jahre hinein entsprach dies dem Hauptanwendungsfeld, momentan repräsentiert es noch etwa 40% des Gesamtverbrauchs von Kobalt. Als Komponente von Superlegierungen findet Kobalt Verwendung in der Luft- und Raumfahrt. Die Metallindustrie nutzt Kobalt als Legierungselement in Werkzeugstählen und Diamantwerkzeugen. Weitere wichtige Einsatzfelder finden sich in der Pigmentindustrie, in der Nutzung von Kobalt als Katalysator in der petrochemischen Industrie sowie, aufgrund seiner ferromagnetischen Eigenschaften, als Magnetwerkstoff. Fast alle dieser Einsatzfelder weisen deutliche Wachstumsraten auf, allerdings wächst der Markt für Lithiumionen-Akkus etwa doppelt so schnell.

Tabelle 1: In Produkten/Kathodenmaterial enthaltene Kobaltmengen/-anteile (nach [3], [4]).

Produkt	Kobaltmenge
Smartphone	5 – 20 g
Tablet oder Laptop	20 – 50 g
Plug-In-Hybridfahrzeug (Pkw)	1 – 4 kg
Vollelektrisches Fahrzeug (Pkw)	4,5 – 15 kg
Kathodenmaterial	Kobaltanteil
Lithium-Kobalt-Oxid (LCO; Elektronik)	60 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide (NMC; E-Mobilität, Einsatz vor allem in Pkws)	6 – 20 %
Lithium-Eisen-Phosphat (LFP; E-Mobilität, Einsatz bislang vor allem in chinesischen Bussen)	0 %

2 VON DER LAGERSTÄTTE ZUM METALL

2.1 Geologie

Der größte Teil des heutzutage geförderten Kobalterzes tritt in drei Lagerstättentypen auf: (1) in den vorrangig stratiformen sedimentgebundenen Kupferlagerstätten des sogenannten Copperbelts, auf Deutsch auch „Kupfergürtel“ genannt (DR Kongo, Sambia), (2) in lateritischen Nickellagerstätten (z. B. Philippinen, Indonesien, Kuba) und (3) in liquidmagmatischen Nickel-Kupferlagerstätten (z. B. Kanada, Russland, Australien). Lateritische Erze sind oxidischer und silikatischer Natur, Nickel-Kupfererze in liquidmagmatischen Lagerstätten sulfidisch. Das im Copperbelt abgebaute Erz ist verwitterungsbedingt oberflächennah oxidisch ausgeprägt. Darunter folgt eine Übergangszone, ab etwa 250 m Teufe steht dann das primäre sulfidische Erz an.

Daneben ist Kobalt in einer Reihe weiterer Lagerstättentypen zu finden. In Finnland bestehen signifikante Vorkommen als Teil einer polymetallischen Mineralisation in Schwarzschiefer, aus der Kobalt und weitere Buntmetalle mittels Biolaugung gewonnen werden. Als Arseniderz wird Kobalt in der Gangerzlagerstätte Bou-Azzer in Marokko als alleiniges Wertmineral gewonnen. Die Vorräte der Lagerstätte neigen sich allerdings dem Ende zu. Signifikante Kobaltressourcen sind in Manganknollen enthalten, die in 4 – 6 km Tiefe auf dem Ozeanboden lagern. Für eine der potentiellen Abbauzonen in der pazifischen Clarion-Clipperton-Störungzone (CCZ) wurden im Jahr 2016 formelle Ressourcen

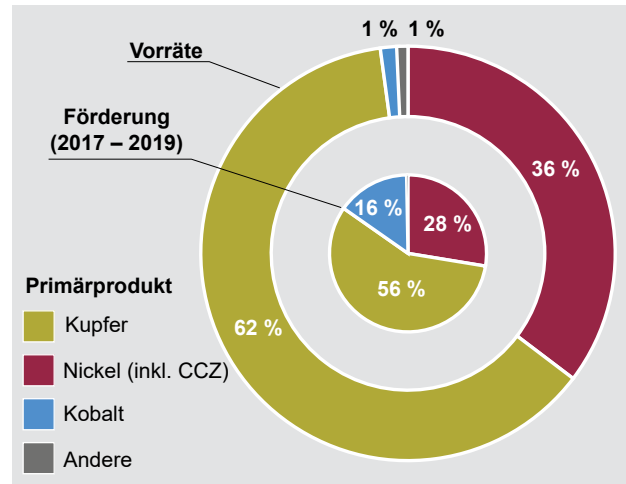


Abb. 2: Anteilige Kobaltvorräte und -förderung nach Primärrohstoff. Die Auswertung basiert auf Projekten entsprechend der Auswahlkriterien in Tabelle 2. Die artisanale Förderung wird mit Kobalt als Primärprodukt erfasst.

ausgewiesen. Eine kommerzielle Förderung im Tiefseebergbau besteht jedoch derzeit nicht. Die verschiedenen Lagerstättentypen sind in Tabelle 2 hinsichtlich ihrer wirtschaftsgeologischen Merkmale zusammengefasst.

Aus dieser Lagerstättenverteilung ergibt sich, dass Kobalt überwiegend als Nebenprodukt gefördert wird (Abb. 2). Derzeit sind gut 60% der Kobaltvorräte in Kupferlagerstätten enthalten, auf Nickellagerstätten (Laterite, Manganknollen in der CCZ und Schwarzschiefer) entfallen etwa ein Drittel der Vorräte. Der artisanale Förderanteil in der DR Kongo ist global relevant, jedoch werden dabei keine Vorräte ausgewiesen. Dies

Tabelle 2: Wirtschaftsgeologische Merkmale wichtiger Kobaltlagerstätten.

Lagerstättentyp	Abbau	Globaler Anteil der Förderung & Vorräte *	Erzgehalte (Durchschnitt/Variation) *
Stratiforme sedimentgebundene Kupfer-Lagerstätten	zumeist Tagebau, teils untertage	70 % (Förderung) 60 % (Vorräte)	0,3 % Co (0,1 – 0,8 %), 2,2 % Cu (1 – 5 %); 1,5 – 5 % Co im artisanalen Abbau
Lateritische Nickel-Lagerstätten	Tagebau	16 % (Förderung) 18 % (Vorräte)	0,08 % Co (0,02 – 0,13 %), 1,2 % Ni (0,5 – 2,5 %)
Liquidmagmatische Ni-Cu-Lagerstätten	zumeist untertage	11 % (Förderung) 11 % (Vorräte)	0,04 % Co (0,01 – 0,13 %), 1,1 % Ni (0,1 – 3,3 %), 0,7 % Cu (0,1 – 1,9 %)
Schwarzschiefer (Finnland)	Tagebau (Biolaugung Halde)	0,8 % (Förderung) 1,5 % (Vorräte)	0,02 % Co, 0,25 % Ni, 0,14 % Cu
Arsenid-Gangerz (Marokko)	Untertage	1,4 % (Förderung) 0,1 % (Vorräte)	1,3 % Co
Manganknollen (CCZ*)	Meeresboden (4 – 6 km Tiefe)	z. Z. keine Förderung 7 % (Vorräte)	0,2 % Co, 1,3 % Ni, 1,1 % Cu, 29 % Mn

* CCZ = Clarion-Clipperton-Zone-Projekt, Nautilus Minerals, Tonga. Datenquelle für Förderung, Vorräte und Erzgehalte: Berechnungen des Autors auf Basis projektspezifischer Auswertung entsprechend [5] und BGR-seitig ergänzter Angaben. Es wurden nur Projekte mit aktiver Förderung im Zeitraum 2017 – 2019 oder Vorräten > 100 kt Kobalt für die Auswertung berücksichtigt. Vorräte hier definiert als Summe von Reserven und Ressourcen.

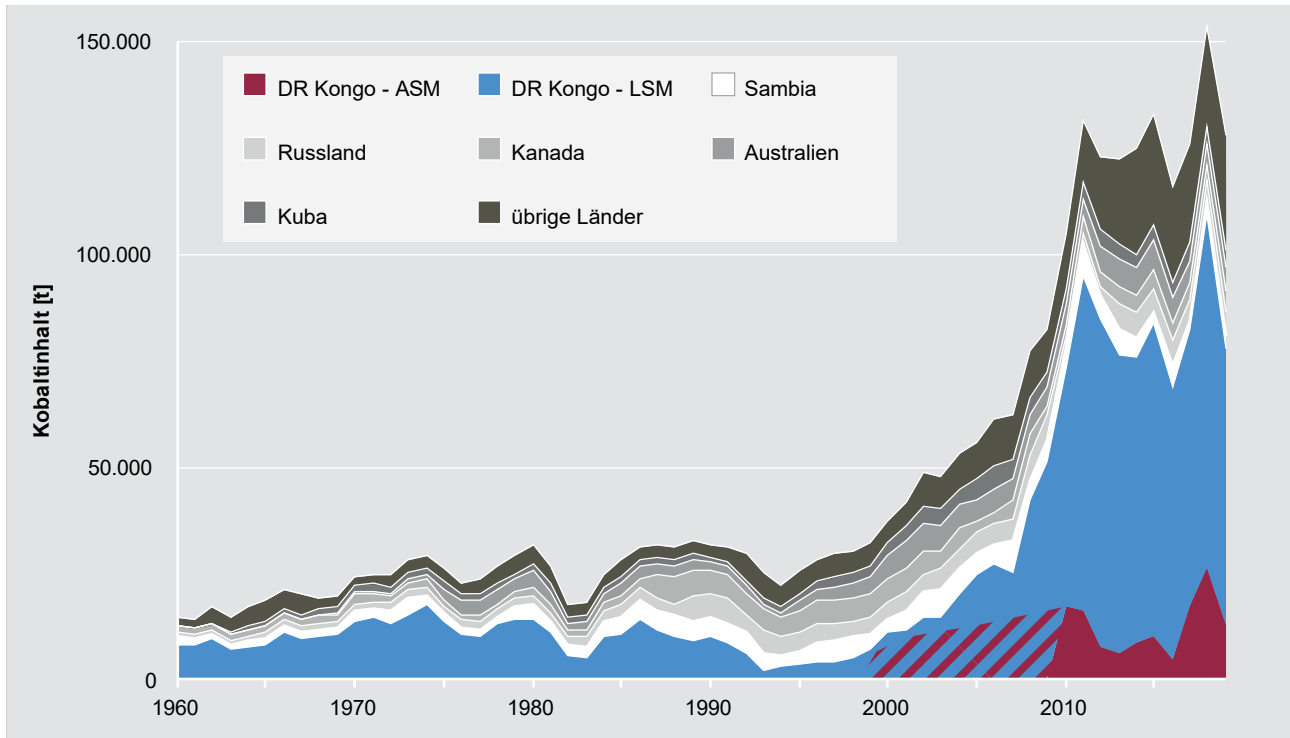


Abb. 3: Entwicklung der globalen Bergwerksförderung von Kobalt im Zeitraum 1960 – 2019. Angaben zur DR Kongo differenzieren artisanalen Kleinbergbau (ASM) und industriellen Großbergbau (LSM). Datenquelle: BGR-Rohstoffdatenbank; ASM-Anteil gemäß Recherchen des Autors.

ändert sich unter Umständen mit einer künftig verstärkten systematischen Ausweisung offizieller artisanaler Abbauzonen, die im kongolesischen Berggesetz vorgesehen ist.

Die Genese kobaltführender Lagerstätten umfasst eine lange erdgeschichtliche Zeitspanne und vielfältige Bildungsprozesse. Die sekundäre Anreicherung durch Verwitterung spielt eine Schlüsselrolle für die Wirtschaftlichkeit des Abbaus im zentralafrikanischen Copperbelt sowie in lateritischen Nickellagerstätten. Dementsprechend sind die meisten dieser Lagerstätten oberflächennah ausgebildet. Im Unterschied dazu tritt die Mineralisation in liquidmagmatischen Lagerstätten in bis zu 2 km Teufe auf. Die Erzkörper von kobaltführenden Nickel- oder Kupferlagerstätten umfassen häufig mehrere 100 Millionen Tonnen Erz. In Einzelfällen treten Lagerstätten mit > 1 Milliarde Tonnen Erz auf, beispielsweise die finnische Schwarzschiefermineralisation. Diese ist jedoch mit sehr niedrigen Erzgehalten assoziiert (Tabelle 2).

2.2 Bergbau und Aufbereitung

Die globale Kobaltproduktion wird maßgeblich von der Marktentwicklung der Primärprodukte Kupfer und Nickel beeinflusst. Im Zeitraum 2017 – 2019 entstammten durchschnittlich 56% der Kobaltproduktion aus der Förderung in Kupferbergwerken, 28% aus Nickelberg-

werken. Für etwa 16% der Gesamtbergwerksförderung dieses Zeitraums stellte Kobalt das Primärprodukt im Abbau dar. Dies bezieht sich auf die Bou-Azzer-Grube in Marokko sowie insbesondere auf die Förderung im artisanalen Kleinbergbau in der DR Kongo. Die Intensität des Kleinbergbaus variiert mit der Rohstoffpreisentwicklung. Daher kommt dem artisanalen Sektor eine wichtige Funktion für das Abfedern kurzfristiger Nachfragespitzen zu. Dies war zuletzt während des Kobalt-Preispeaks im Jahr 2018 der Fall, in dem sich der artisanale Abbau massiv ausweitete. Die beiden größten artisanalen Gruben, Kasulo und Mutoshi, erreichten dabei eine Jahresförderung von jeweils mehreren tausend Tonnen Kobaltinhalt. Damit waren sie auf individueller Basis für die globale Kobaltförderung bedeutender als alle großen industriellen Abbaustandorte außerhalb der DR Kongo. Der langfristige globale Förderanteil des Kleinbergbaus im Kobaltsektor liegt bei rund 10% (Durchschnitt für die Periode 2009 – 2019).

Seit rund zehn Jahren dominiert die Kobaltförderung aus den kongolesischen Kupferbergwerken den Weltmarkt (Abb. 3). Ohne diesen signifikanten Förderanteil wäre das im Zuge des Ausbaus der Elektromobilität erwartete Kobalt-Nachfragewachstum nicht zu befriedigen. Außerhalb von Zentralafrika stellen Nickel- oder Nickel-Kupferbergwerke die wichtigste Quelle für die Kobaltgewinnung dar. Hingegen sind primäre Kupferbergwerke im globalen Maßstab für die Kobaltgewinnung derzeit nahezu unbedeutend. In geringem Maße

tragen auch die Platinbergwerke des südlichen Afrikas zur Kobaltförderung bei.

In Abhängigkeit von der Rohstoffpreisentwicklung und den Erzgehalten nimmt Kobalt in einigen kobaltreichen industriellen Bergwerken des kongolesischen Copperbelts wirtschaftsgeologisch den Rang eines Koppelprodukts von Kupfer ein. Dies bedeutet, dass die Gewinnung von Kobalt die Wirtschaftlichkeit der Gesamtlagerstätte beeinflusst. Vor Kurzem wurde dieser Umstand beispielsweise in einer Entscheidung des im Land aktiven Schweizer Bergbaukonzerns Glencore reflektiert. In Zeiten sinkender Kobaltpreise entschied das Unternehmen, den Mutanda-Tagebau, mit der zu dieser Zeit weltgrößten Kobaltförderung, Ende 2019 vorläufig außer Betrieb zu nehmen. Insofern ist ein Teil des Kupfer-Kobalt-Bergbaus in der DR Kongo zunehmend direkt von der Kobaltmarktentwicklung abhängig. Hinzu kommen jedoch weitere lokale Entscheidungsfaktoren. Im Falle des Mutanda-Bergwerks stellte beispielsweise die Verfügbarkeit von Schwefelsäure zuletzt ein Problem dar, zudem erhöhte die kongolesische Regierung die Steuern auf den Kobaltexport.

Lateritische Lagerstätten weisen meist niedrige Abraum-Erz-Verhältnisse auf (z. B. Murrin Murrin 1,0, Ambatovy 0,6). Entsprechend der Lage und Geometrie der Erzkörper erfolgt die Förderung daher im Tagebau. Auch im kongolesisch-sambischen Copperbelt stellt dies die vorherrschende Fördermethode dar. In einigen dortigen Bergwerken sowie in vielen magmatischen Nickel-Kupferlagerstätten erfolgt der Abbau hingegen untertägig. Eine Sonderform nimmt der in der DR Kongo verbreitete Kleinbergbau ein. In Abhängigkeit von der Kobaltpreisentwicklung erschließen dabei 100.000 – 200.000 Kleinbergleute selektiv hochgradiges Kobalterz in den oberen Schichten der Erzkörper. Der Abbau erfolgt durch Abgraben mittels manueller Werkzeuge in Stollen in bis zu 80 m Teufe.

Im kongolesisch-sambischen Copperbelt sind durch die jahrzehntelange Förderung mehrere 100 Millionen Tonnen an Aufbereitungsabgängen und Schlacken entstanden. Versinnbildlicht wird dies durch den „Big Hill“ Schlackehügel, der ein landschaftsprägendes Merkmal der Stadt Lubumbashi darstellt. Die häufig zu beobachtende Kontamination von Flüssen und Böden in der Region deutet darauf hin, dass die oberflächennahe Ablagerung der historischen Aufbereitungsabgänge oft ohne adäquate Absicherung bzw. Abdichtung erfolgte. Bedingt durch die hohen Kobaltgehalte der Halden ist deren sekundäre Aufbereitung wirtschaftlich attraktiv und wird derzeit in mehreren industriellen Projekten geplant oder bereits betrieben. Auch Kleinbergleute sind häufig in der manuellen Wiederaufbereitung von

Halden aktiv. Die residualen Kobaltgehalte der Aufbereitungsabgänge liegen im Bereich von 0,2 bis zu >2 %, wobei nicht der gesamte Restkobaltgehalt wirtschaftlich rückgewinnbar ist.

Die durch die Erzeigenschaften bedingten Aufbereitungsprozesse (Abb. 4) spielen eine Schlüsselrolle für die Wirtschaftlichkeit der Lagerstätten. Besonders die Errichtung der Aufbereitungsanlagen von lateritischen Nickelprojekten ist mit hohen Investitionskosten in Höhe von mehreren Milliarden USD verbunden. Wenn derartige Anlagen auf die Gewinnung von Ferronickel mittels Verhüttung ausgelegt sind, wird Kobalt in der Aufbereitung, trotz oft signifikanter Gehalte im lateritischen Erz, im Regelfall nicht separiert. Kobalt wird hingegen gemeinsam mit Nickel aus lateritischen Lagerstätten gewonnen, wenn in der Aufbereitung ein Laugungsprozess etabliert ist. Der aktuelle Standard in den meisten dieser Bergwerke ist das HPAL-Verfahren (high pressure acid leach). Dieses beruht auf der thermischen Laugung des Erzes mittels Schwefelsäure in Autoklaven und anschließenden kontrollierten Ausfällungsprozessen aus der angereicherten Lösung. Dabei werden die Zwischenprodukte Nickel-Kobaltsulfid (MSP) oder -hydroxid (MHP) erzeugt, aus deren anschließender Raffination Kobaltmetall und zunehmend Kobaltchemikalien gewonnen werden. Die Gesamtausbringungsraten von Kobalt sind relativ hoch und betragen bis zu etwa 85 % (Abb. 4). Historisch ist neben dem HPAL-Verfahren auch der Caron-Prozess relevant und wird weiterhin auf einigen Aufbereitungsanlagen angewandt. Dieser Prozess ist dem HPAL-Verfahren jedoch hinsichtlich Ausbringungsraten und Energiebedarf unterlegen.

Die Gewinnung von Kobalt aus den teils sulfidischen, teils oxidischen Kupferlagerstätten des Copperbelts ist zumeist mit typischen Ausbringungsraten von 45 – 70 % verbunden. Für rein oxidische Erze ist das Ausbringen etwas höher. Insbesondere auf modernisierten, auf Kobalt hin optimierten Anlagen ist das Ausbringen relativ hoch. Die Aufbereitung der oxidischen Kupfer-Kobalterze erfolgt hydrometallurgisch mittels Laugung und anschließenden pH-kontrollierten Ausfällungsprozessen zur Abtrennung von Verunreinigungen sowie zur Abscheidung von Kobalt als Hydroxidsalz. Kupfer wird zuvor mittels Solventextraktion abgetrennt (Abb. 4). Das derart gewonnene Kobalt-Rohhydroxid mit einem typischen Kobaltgehalt von 30 % stellt ein Vorprodukt dar, das international primär in China zu hochreinen Kobaltchemikalien raffiniert wird.

Um Kobalt im Rahmen der hydrometallurgischen Aufbereitung der oxidischen Kupfer-Kobalterze effektiv in Lösung zu bringen, erfolgt die Laugung mit Schwefelsäure in einem reduzierenden Milieu. Als Reduktions-

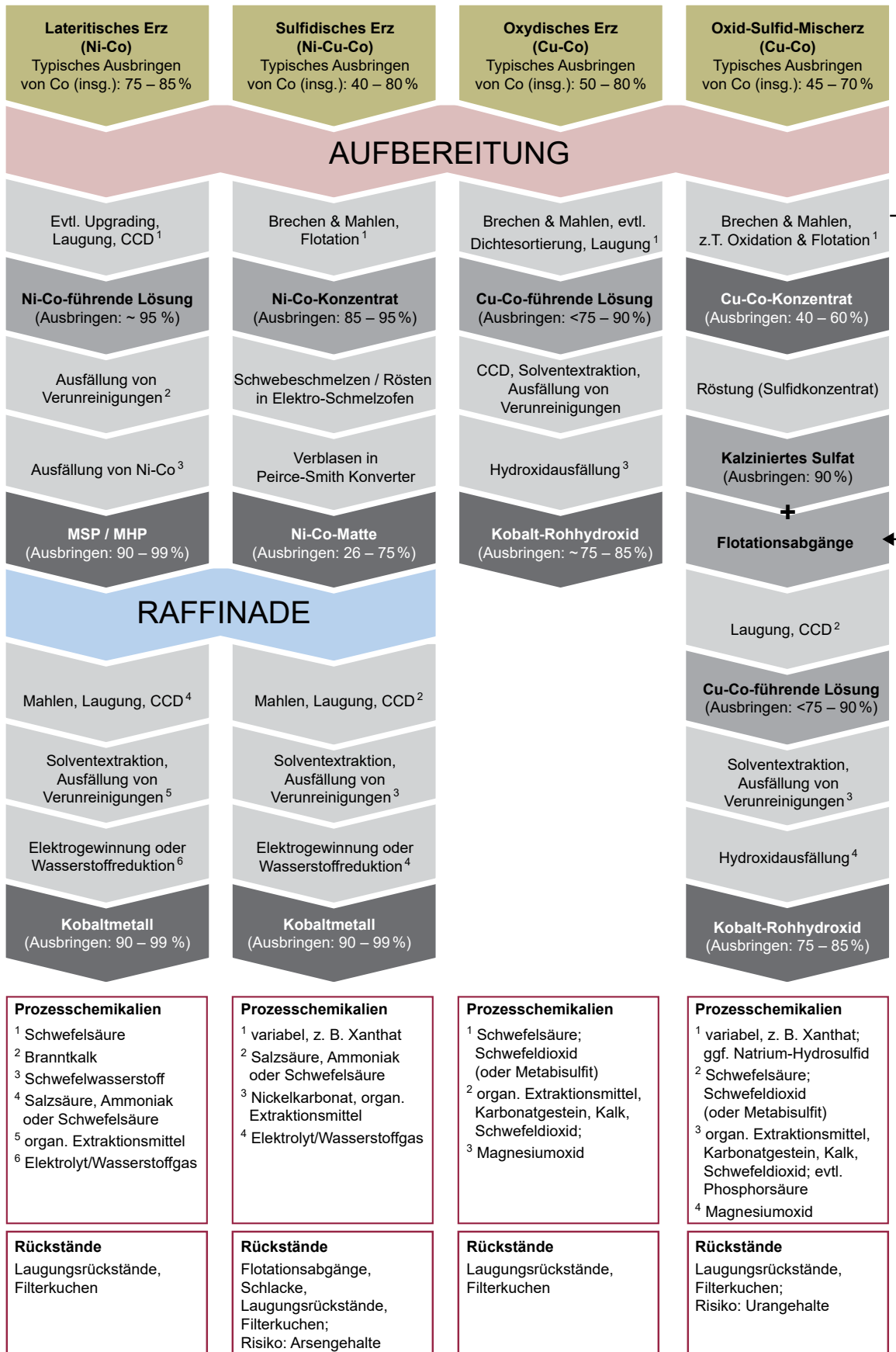


Abb. 4: Schematische Prozessübersicht zu den derzeit wichtigsten Verfahren für Aufbereitung und Raffinade von Kobalt. Dunkelgraue Felder kennzeichnen Vor-, Zwischen- und Endprodukte, die zum Teil international verschifft werden; graue Felder kennzeichnen weitere Prozessprodukte; hellgraue Felder bezeichnen Prozesse. Angaben zum Ausbringen beziehen sich nur auf Kobalt, basierend auf [6], ergänzt mit Beobachtungen der BGR sowie [5], [27]. MSP / MHP = mixed sulfide / hydroxide product (gemischte Nickel-Kobaltsulfide/-hydroxide), CCD = counter current decantation.

mittel kommt zumeist Schwefeldioxid zum Einsatz. Dieses ist, im Vergleich zu dem historisch verwendeten Kupfer- oder Natrium-Metabisulfit, preiswerter und wird zudem für die Schwefelsäureherstellung genutzt. Einige Lagerstätten des Copperbelts weisen erhöhte Urangelhalte auf, die gesonderte Reinigungsschritte in der Aufbereitung notwendig machen. Aufgrund einer Überschreitung der zulässigen Urankonzentration in Kobalhydroxid (75 g/t) wurde dem Betreiber der Kamoto-Grube in der DR Kongo im Jahr 2019 temporär die Ausfuhr der Produkte untersagt. Mittlerweile hat der Betreiber des Bergwerks zwei Verfahren (Ionenaustausch und Phosphatausfällung) zur Uranreduzierung erfolgreich getestet. Welches dieser Verfahren letztlich zur Anwendung kommt und wie mit den radioaktiven Prozessrückständen verfahren wird, ist derzeit nicht öffentlich bekannt.

Im Falle von oxidischen und sulfidischen Mischerzen kommt in der DR Kongo eine Kombination aus Flotation, Röstung und hydrometallurgischer Behandlung zum Einsatz. Dabei werden auch die Flotationsabgänge gelaugt (Abb. 4). Einzelne Aufbereitungsanlagen werden auf individuelle Oxid-Sulfid-Erzverhältnisse hin optimiert eingestellt. Die hydrometallurgische Erzeugung von Kobalt-Rohhydroxid aus oxidischen Erzen ist im Vergleich zur teils pyrometallurgischen Aufbereitung sulfidischer Erze mit wirtschaftlichen Vorteilen für die Betreiber verbunden. Artisanale Kleinbergleute bauen ebenfalls oxidische Erze ab und führen teils eine Dichtesortierung durch. Das artisanale Erz wird entweder lokal aufgekauft und als Kobalt-Rohhydroxid aufbereitet oder direkt als Konzentrat exportiert.

Die Kobaltgewinnung aus liquidmagmatischen Sulfidlagerstätten ist während der Verhüttung eher ineffizient, da sich das in den Nickel-Kobaltkonzentraten enthaltene Kobalt pyrometallurgisch schlecht von Eisen abtrennen lässt. Die auf die Flotation folgende, für die Nickelgewinnung optimierte pyrometallurgische Behandlung ist daher häufig mit niedrigen Ausbringungsraten von Kobalt verbunden (Abb. 4). Dementsprechend weist die Schlacke hohe Kobaltgehalte auf und ist für die sekundäre Aufbereitung interessant. Da Nickelsulfiderze teils mit arsenhaltigen Mineralen vergesellschaftet sind, sind die Arsengehalte der Prozessprodukte und Aufbereitungsabgänge sorgfältig zu kontrollieren.

Neben den oben genannten Abbau- und Aufbereitungsverfahren von Nickel-, Kupfer-, und Kobalterzen spielen eine Reihe weiterer Prozesse eine Nebenrolle in der globalen Kobaltgewinnung. Hierzu zählt die Aufbereitung von Kobalt-Arseniderzen in Marokko, aus deren Konzentraten hydrometallurgisch Kobalt gewonnen wird. Das Unternehmen Terrafame gewinnt Nickel,

Kupfer, Zink und Kobalt mittels Bio-Haufenlaugung aus einem großflächigen Schwarzschiefer-Vorkommen in Finnland. Durch die anschließende hydrometallurgische Aufbereitung und Raffinade werden Kobalt- und Nickelsulfat für die Verwendung in den Kathoden von Lithiumionen-Akkus erzeugt. Am Rande sei noch die synthetische Erzeugung von radioaktivem Kobalt-60 erwähnt. Das Isotop dient spezialisierten Anwendungen in der Medizintechnik und wird unter anderem in Kernkraftwerken erzeugt.

Noch nicht praxisrelevant ist die Förderung von kobalthaltigen Manganknollen und weiteren Vorkommen in der Tiefsee. Zwar wurden hier bereits in einem Gebiet geologische Ressourcen quantifiziert. Jedoch ist die technische und finanzielle Machbarkeit der Gewinnung noch nicht geklärt. Zudem bestehen offene Fragen zur Umweltverträglichkeit sowie zu den Regularien der zuständigen Internationalen Meeresbodenbehörde. Ebenfalls noch nicht in der Praxis etabliert, jedoch von potentiell Interesse im Rahmen der Schließung und Nachnutzung von Bergbauflächen, ist das sogenannte Phyto-Mining. Dabei kommen Hyperakkumulator-Pflanzen auf Halden zum Einsatz, die selektiv besonders hohe Konzentrationen an bestimmten Metallen wie Kobalt oder Nickel aus dem Boden aufnehmen. Sodann werden diese Pflanzen eingeäschert, das resultierende hochgehaltige „Bio-Erz“ steht für eine anschließende Aufbereitung zur Verfügung.

2.3 Weiterverarbeitung

Die Raffinade der Aufbereitungsprodukte von Kobalt dient entweder der Produktion von Kobaltmetall oder hochreiner Kobaltchemikalien. Aufgrund der wachsenden Bedeutung von Lithiumionen-Akkus steigt der Produktionsanteil von Chemikalien im Verhältnis zu Metall im Laufe der Zeit kontinuierlich an. Derzeit (2019) wird Kobalterz zu etwa 60% zu Chemikalien raffiniert.

Kobaltchemikalien in Form von Oxiden (v.a. Tetroxid) und Sulfaten stellen ein wichtiges Zwischenprodukt für die Herstellung von kobalthaltigem Kathoden-Ausgangsmaterial zur Fertigung von Lithiumionen-Akkus dar. Daneben werden sie in der Pigmentherstellung eingesetzt. Kobaltchemikalien werden aus Konzentraten oder Vorprodukten (Hydroxid) gewonnen, für die keine vorhergehende Raffinade in Form von Kobaltmetall erforderlich ist. Ein Großteil der Kobaltförderung in der DR Kongo wird entlang dieser Wertschöpfungskette weiterverarbeitet. Die Raffinade zu Kobaltchemikalien findet im Wesentlichen in der Volksrepublik China statt, dort erfolgt auch ein Großteil der globalen Fertigung von Lithiumionen-Akkus. Der chinesische Marktanteil

an der Fertigung von Lithiumionen-Akkus betrug im Jahr 2019 circa 75%, während der europäische Anteil bei etwa 5% lag [7].

Beim lokalen Transport und der internationalen Verschiffung der Vorprodukte sind besondere Vorschriften zu beachten, da Kobalhydroxid bei Inhalation als toxisch klassifiziert ist. Der Raffinadeprozess für Chemikalien umfasst die Laugung mit Schwefelsäure unter Zugabe von Natriumdisulfid, Lösungsfiltration und Solventextraktion von enthaltenem Kupfer und weiteren Verunreinigungen. Sodann wird Kobalt konzentriert und als Sulfat oder Chlorit aus der Lösung kristallisiert. Zur Erzeugung von Kobaltoxiden wird das Chlorit mit Ätznatron oder Ammoniumsalz umgesetzt, mit anschließender Kalzination oder Pyrolyse. Die Fertigung von Ausgangsmaterial für die Kathoden von Lithiumionen-Akkus erfolgt entweder hydro- oder pyrometallurgisch. Dabei werden die zum Einsatz kommenden Metallchemikalien in bestimmten Verhältnissen kombiniert (z. B. Nickel, Mangan und Kobalt im Verhältnis 6 : 2 : 2), anschließend erfolgt die Lithiierung des Materials mit Lithiumkarbonat oder -hydroxid.

Auch Kobaltmetall kann in der Fertigung von Kathoden für Lithiumionen-Akkus eingesetzt werden, z. B. des Akku-Typs Lithium-Kobalt-Oxid (LCO), der in Elektronikprodukten verwendet wird. Zudem ist eine Weiterverarbeitung von Metall zu Kobaltchemikalien möglich. Im Vergleich zu der direkten Nutzung von Kobaltchemikalien spielt dies allerdings eine untergeordnete Rolle. Deutlich wichtiger sind hingegen andere Verwendungszwecke von Kobaltmetall, beispielsweise als Beimischung in Nickellegierungen, in Werkzeugstählen sowie als Magnetwerkstoff. Die Raffinade der aufbereiteten Kobalterzprodukte zu Kobaltmetall erfolgt teils in Anlagen in relativer Abbaunähe, teils sind die Aufbereitungs- und Raffinadestätten über Pipelines mit bis zu 220 Kilometern Länge an die Abbaustandorte angebunden (vgl. Kapitel 5.2). Des Weiteren erfolgt die Raffinade auch entlang von global verteilten Standorten. So nutzt beispielsweise das Unternehmen Glencore seine Anlagen in Norwegen zur Raffinade des in seinen kanadischen Bergwerken aufbereiteten und teils aus Schrotten zurückgewonnenen Kobalts. Insgesamt unterliegt die globale Raffinade von Kobaltmetall damit einer wesentlich geringeren Marktkonzentration als die von China dominierte Raffinade von Kobaltchemikalien.

Der Raffinadeprozess beruht auf einer hydrometallurgischen Behandlung mit abschließender Kobaltgewinnung durch Wasserstoffreduktion oder Elektrolyse (Abb. 4). Das Ausbringen von Kobalt im Raffinationsprozess ist durchgängig hoch (> 90%). Das so gewonnene Kobalt wird auf dem Markt in Form von Pulver,

Brikett oder Kathoden in unterschiedlichen Spezifikationen verkauft.

3 RECYCLING

Recycling spielt im Kobaltmarkt aktuell eine relativ untergeordnete Rolle. Für die Jahre 2017 – 2019 wurde im Mittel eine Recyclingmenge von circa 13.000 t Kobalt pro Jahr abgeschätzt [1]. Der Beitrag des Recyclings zum Gesamtangebot von Kobalt liegt damit bei etwa 10%. Allerdings ist absehbar, dass integrierte Recycling-Systeme signifikante finanzielle Auswirkungen auf die Preisstruktur in den Lieferketten der Elektromobilität ausüben können, indem sie letztlich zu einer Senkung der Produktionskosten von Lithiumionen-Akkus beitragen. Auch wenn dem Markt momentan nur geringe Mengen zur Verfügung gestellt werden, so wird der Recyclingsektor daher auf lange Sicht eine deutlich stärkere Rolle für die Versorgung mit Kobalt und weiteren „Batteriemetallen“ spielen.

Lithiumionen-Akkus enthalten eine Vielzahl von Wertstoffen, die mit geeigneten Verfahren rückgewinnbar sind. Diese beinhalten Kupfer, Aluminium, Eisen, Kobalt, Lithium, Nickel, Mangan, Graphit und Plastik. Die Produktlebensdauer von Lithiumionen-Akkus umfasst 2,5 – 8 Jahre für Akkus in Elektronikgeräten, in Elektrofahrzeugen sind dies 8 – 10 Jahre. Hinzu kommt häufig eine Sekundärverwendung der Produkte, die in Entwicklungs- und Schwellenländern verbreitet ist und deren Lebensdauer weiter verlängert. Dementsprechend wird der steigende Kobaltbedarf kurz- bis mittelfristig im Wesentlichen durch den Ausbau der Primärförderung zu decken sein. Parallel werden integrierte Recyclingkonzepte zunehmend zur Marktreife entwickelt und langfristig signifikant zur Versorgung sowie zu den Geschäftsmodellen der Unternehmen beitragen.

Der heutige Recyclingmarkt für Kobalt ist von deutlichen geographischen Differenzen geprägt. In der EU operieren eine Reihe von Recycling-Dienstleistern, die von den Produktherstellern für das Recycling und die Entsorgung ihrer Produkte bezahlt werden. Dies weist darauf hin, dass der Recyclingprozess in der EU allein auf Basis des Materialwerts der enthaltenen rückgewinnbaren Rohstoffe in vielen Fällen derzeit nicht wirtschaftlich rentabel ist. Die EU sieht daher im Rahmen ihres „Green Deal“ unter anderem eine Unterstützung und einen Ausbau der Kreislaufwirtschaft vor. In China, dem global größten Markt für die Elektromobilität, ist die Ausgangslage etwas anders, jedoch besteht im Grundsatz eine ähnliche Problematik. Sämtliche in China im Kobaltrecycling aktiven Unternehmen integrieren

diese Aktivitäten mit anderen Geschäftsfeldern, um insgesamt einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten [1]. Lediglich in Hochpreisperioden, wie zuletzt während des Kobaltpreispicks der Jahre 2017 – 2018, rentiert sich der Recyclingprozess bereits allein auf Basis des Materialwerts.

Die mit dem Recycling assoziierten Geschäftsfelder chinesischer Unternehmen umfassen entweder direkt daran angeschlossene Dienstleistungen (zum Beispiel Verpackung und Vertrieb von Sekundärprodukten) oder die Raffinade und Weiterverarbeitung der Recyclingprodukte hin zu Ausgangsmaterial und Kathoden von Lithiumionen-Akkus. Somit wird deutlich, dass Recycling nicht als Einzelprozess sondern als ein integrierter Geschäftsprozess der Unternehmen zu betrachten ist. Aus dieser Perspektive heraus ist die zunehmende Ansiedelung von Fertigungsstandorten für Batteriezellen in der EU als eine wichtige Komponente für den Ausbau der Kreislaufwirtschaft zu verstehen.

Traditionell umfasst das Recycling von Kobalt Legierungen und Schrotte. Die Recyclingquoten sind stark variabel. In Superlegierungen betragen sie im Jahr 2005 etwa 90 %. Für andere Verwendungsformen (Katalysatoren, Magnete, Stähle) lag die Quote wesentlich niedriger, teils bei nur 10 % [1]. Vielfach wurden derartige Produkte aufgrund anderer enthaltener Wertstoffe recycelt, ohne dass das enthaltene Kobalt zurückgewonnen wurde. Lithiumionen-Akkus aus der Unterhaltungselektronik wurden in der Vergangenheit häufig nicht dem Recycling zugeführt, sondern auf Deponien entsorgt. Dies reflektiert den generell problematischen Umgang mit Elektronikschrott („e-waste“). Im Jahr 2017 wurden weltweit, bei einem geschätzten Materialwert von über 60 Milliarden USD, lediglich 20 % der im Elektronikschrott enthaltenen Wertstoffe im Rahmen des formalen Recyclings zurückgewonnen [8].

Technisch umfasst der Recyclingprozess von kobalt-haltigen Lithiumionen-Akkus folgende Schritte: Nach einer Sortierung der unterschiedlichen Akku-Typen erfolgt in vielen Fällen zunächst eine mechanische Vorbehandlung, in der die strukturellen Komponenten des Akkus – Elektrolyt, Anode und Kathode – separiert werden. Dies erfordert eine besondere Beachtung der Sicherheit, da die Akkus durch Kontakt mit der Luft oxidieren und verbrennen können. Als Teil dieses Schrittes erfolgt neben der mechanischen auch eine thermische Behandlung, um Bindemittel, Kohlenstoff und organische Zusatzstoffe mittels Pyrolyse auszutreiben.

Als Folgeschritt werden die Wertstoffe aus der Kathode gewonnen. Dabei ist eine hydrometallurgische Behandlung am meisten verbreitet, in China wird diese

in 60 % des Sektors angewandt. Mit dem Verfahren können nicht nur Kobalt, Nickel und Mangan, sondern auch Lithium zurückgewonnen werden. Die dafür erforderlichen Prozessschritte umfassen, ähnlich wie bei der Raffinade, die Laugung, Ausfällung, Ionenaustausch, Solventextraktion und die elektrochemische Separation. Dabei können mehr als 80 % der enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen werden [1]. Kobalt wird in der Regel als Sulfat, Karbonat oder Tetroxid gewonnen, sodass ein direkter Einsatz in der Fertigung von Kathoden-Ausgangsmaterial erfolgen kann.

Neben dem hydrometallurgischen Verfahren sind auch eine pyrometallurgische Behandlung sowie die „Kathode-zu-Kathode“ Verarbeitung etabliert. Mittels der pyrometallurgischen Behandlung wird eine Legierung von Kupfer, Kobalt, Nickel und Eisen erzeugt, aus der die Wertstoffe anschließend hydrometallurgisch gewonnen werden. Der Vorteil des Prozesses ist eine einfachere Handhabung, da die komplexe Vorbehandlung reduziert wird. Der Nachteil ist eine geringe Prozesseffizienz. Zudem ist Lithium in der entstehenden Schlacke zumeist nicht wirtschaftlich rückgewinnbar. In der „Kathode-zu-Kathode“ Behandlung wird eine alte Kathode prinzipiell in einen neuen Lithiumionen-Akku eingesetzt. Dazu werden lediglich der alte Elektrolyt extrahiert, die Zellenkomponenten separiert und das Kathodenmaterial erneut einer Lithiierung unterworfen. Es bestehen jedoch derzeit Zweifel, ob das Leistungsverhalten derart gefertigter Lithiumionen-Akkus dem Leistungsverhalten eines neuen Akkus entspricht.

4 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DES BERGBAUS

Kobalt wird überwiegend als Nebenprodukt des Kupfer- oder Nickelbergbaus gewonnen. In einigen kongolesischen Kupferbergwerken repräsentiert Kobalt ein Koppelprodukt. Daher ist die Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte der Kobaltgewinnung eng mit denen der jeweiligen Hauptprodukte verbunden. Die im Folgenden genannten Werte bezüglich Wasserbedarf, Energieverbrauch und Emissionen sind deshalb jeweils auf eine Tonne Erz und sämtliche im Erz enthaltenen Metalle bezogen. Aus diesen Werten kann, unter Bezugnahme auf die Angaben zur Erzaufbereitung in Tabelle 3, der Gesamtbedarf einzelner großer Bergwerke überschlägig hergeleitet werden.

Tabelle 3: Durchschnittliche Jahresförderung der zehn größten industriellen Kobaltbergwerke (2017 – 2019).

Bergwerk	Land	Betreiber (Haupteigentümer)	Kobaltinhalt der Förderung [t]	Erzdurchsatz p. a. [Millionen t]
Mutanda	DR Kongo	Glencore	25.400	6,3
Tenke Fungurume	DR Kongo	China Molybdenum Co.	17.100	5,4
Kamoto	DR Kongo	Katanga Mining (Glencore)	9.400	6,5
Etoile	DR Kongo	Chemaf (Shalina Resources)	5.300	1,1
Ruashi	DR Kongo	Jinchuan Group Int. Res. Co.	4.800	1,2
Taimyr-Komplex	Russland	Norilsk Nickel	3.500	17,7
Moa Bay	Kuba	Moa Nickel JV (Sheritt)	3.400	3,3
Ramu	Papua-Neuguinea	Metallurgical Corp. of China	3.200	3,6
Taganito	Philippinen	Taganito Mining Corp. (Nickel Asia Corp.)	3.100	3,1
Murrin Murrin	Australien	Minara Resources (Glencore)	3.000	3,0

Sämtliche Bergwerke fördern Kobalt als Neben- oder Koppelprodukt der Kupfer- oder Nickelgewinnung. Nur Projekte mit mindestens zwei Jahren aktiver Förderung erfasst. Förderung (Kobaltinhalt) auf 100 t, jährlicher Erzdurchsatz auf 100.000 t gerundet. Der Mutanda-Tagebau ist seit Ende 2019 vorläufig außer Betrieb. Die Kamoto-Grube wird seit dem Jahr 2018 sukzessive hochgefahren, das hier dargestellte dreijährige Mittel ist daher deutlich niedriger als deren finale Förderkapazität (bis zu 30.000 t Kobaltinhalt).

4.1 Umwelt

Flächennutzung und Rekultivierung

Die Gewinnung von Kobalt im Zuge des Kupfer- oder Nickelbergbaus belegt temporär Flächen für die Förder- und Aufbereitungsanlagen sowie für die Lagerung von Abraum- und Bergehalden, Aufbereitungsabgängen und Schlacken. Pauschal wurde für den globalen Nickelbergbau für das Jahr 2005 eine neue Flächeninanspruchnahme von knapp 2 km² abgeschätzt. In der Summe wurden von 1990 bis 2010 34 km² Fläche neu durch den Nickelbergbau belegt [9]. Die für den Kupferbergbau global beanspruchte Fläche ist ungleich größer, mit geschätzt 66 km² Fläche im Jahr 2016 [10]. Anteilig an der Globalförderung ergibt sich damit ein jährlicher Flächenbedarf von bis zu 3 km² für den industriellen Kupfer- und Nickelbergbau, in dem Kobalt ein Neben- oder Koppelprodukt darstellt. In der Praxis haben derartige aggregierte globalen Schätzungen für sich genommen jedoch eine geringe Aussagekraft. Entscheidend ist jeweils, inwiefern Flächen im lokalen Maßstab anderweitig wirtschaftlich beansprucht werden beziehungsweise wichtige Ökosystemfunktionen erfüllen. So ist beispielsweise der Nickel- (Kobalt-) Bergbau in Südostasien teilweise mit der Rodung von ökologisch wertvollem Regenwald verbunden.

Kritisch ist darüber hinaus eine sachgerechte und nachhaltige Rekultivierung oder Renaturierung der vom Bergbau nicht länger beanspruchten Flächen. Diese sollte nach Möglichkeit bereits parallel zum Abbaufortschritt durchgeführt werden. Diesem Anspruch wurden Bergwerksbetreiber in der Vergangenheit häufig nicht gerecht. Historische Altlasten belasten auch die heutzutage noch aktiven Konzessionsgebiete. Nirgendwo wird dies deutlicher als im kongolesisch-sambischen Copperbelt, in dem seit Beginn des 20. Jahrhunderts eine zunehmend intensive Förderung stattfindet. Die Vielzahl an aufgelassenen Tagebauen und Halden deutet darauf hin, dass in vielen Fällen keine sachgemäße Rekultivierung stattfand. Für das Jahr 2018 wird das Gesamtinventar von an der Oberfläche gelagerten Aufbereitungsabgängen und Schlacken im kongolesischen Teil des Copperbelts auf 416 Millionen Tonnen geschätzt [11]. Auch auf den vom Kleinbergbau betroffenen Flächen in der DR Kongo findet bislang in der Regel keine adäquate Rekultivierung statt.

Erschwert wird eine nachhaltige Rekultivierung in der Region des Copperbelts und anderen Bergbauzentren durch die hohe Anzahl an Lagerstätten entlang der häufigen Erztonen. Dabei besteht eine enge Verzahnung zwischen den Abbautätigkeiten der verschiedenen Betreiber und deren Verantwortlichkeiten zur Rekultivierung. Abbildung 5 sowie die nebenstehende Textbox illustrieren diese Problematik am Beispiel des Kamoto-

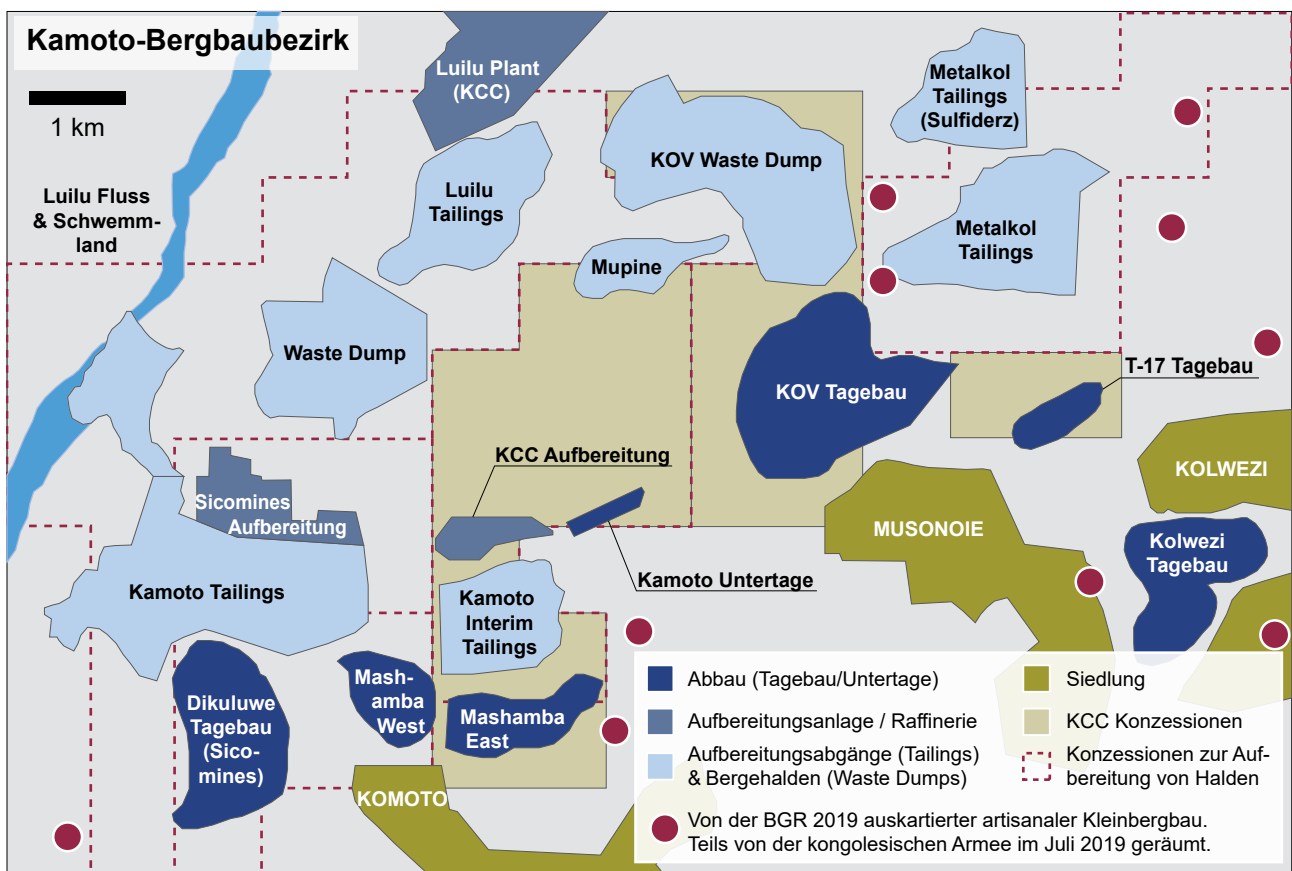
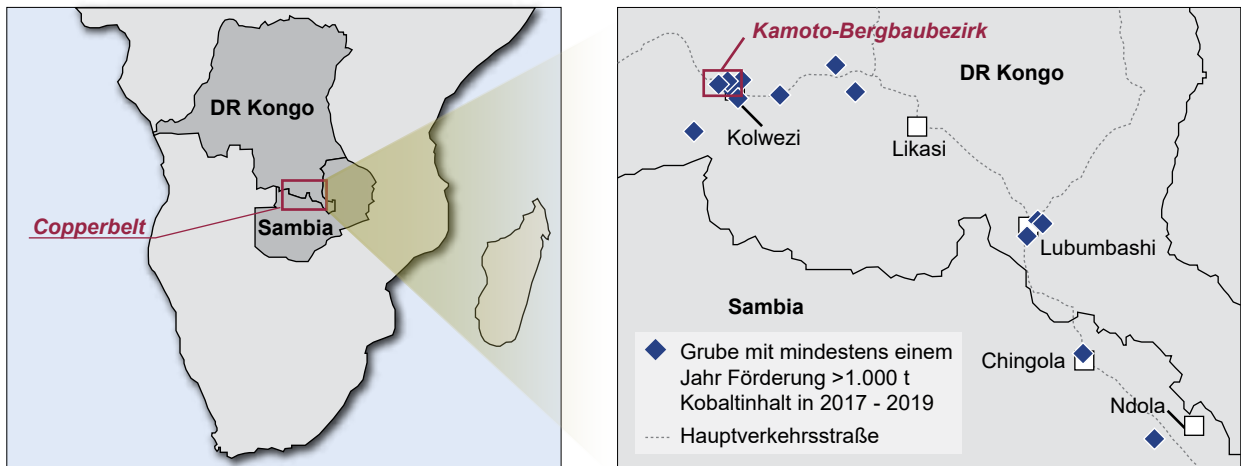


Abb. 5: Lage des Kamoto-Bergbaubezirks nahe der Provinzhauptstadt Kolwezi (oben) und lokale Verteilung der Abbauzonen und Bergehalden (unten). Die Förderung von Kupfer-Kobalterz findet sowohl untertage als auch im Tagebau statt. Zudem werden großflächig historische und rezente Aufbereitungsabgänge wieder aufbereitet. Als Basis der Darstellung dienten Satellitenbilder aus dem Jahr 2019.

Bergbaubezirks. Der Bezirk repräsentiert die derzeit weltweit wichtigste Kobaltförderregion. Ein positiver Nebeneffekt der steigenden Kobaltnachfrage ist, dass damit auch das wirtschaftliche Interesse steigt, historische Halden des Copperbelts erneut mit modernen Methoden aufzubereiten, um das dort enthaltene residuale Kobalt zurückzugewinnen. Auch aufgrund der heutzutage erhöhten öffentlichen Aufmerksamkeit steigen damit die Chancen, dass im Anschluss eine sachgemäße Rekulтивierung der betroffenen Flächen stattfindet.

Wasser

Der Wasserbedarf für die Förderung und Aufbereitung von australischen Nickel-Kobalterzen aus sulfidischen Lagerstätten liegt in der Größenordnung von 1.100 – 1.400 Litern Wasser pro Tonne Erz [13]. Im Falle des Abbaus lateritischer Erze mit angeschlossener hydrometallurgischer Aufbereitung und Raffinade der Metalle liegt der Wasserbedarf bei 1.000 – 4.500 l/t. Für die Kupfer-Kobalt-Bergwerke in der DR Kongo, einschließlich der dortigen Aufbereitung beziehungsweise

Raffinade bis zum Kobalt-Rohhydroxid oder Kathodenkupfer, schätzt die BGR einen ähnlichen Wasserbedarf ab (etwa 1.000 l/t für die von Glencore kontrollierten Bergwerke Mutanda und Kamoto). Für die russischen polymetallischen Bergwerke des Betreibers Nor Nickel werden bis zur Raffinade wesentlich höhere Werte, um die 30.000 l/t, zitiert [13]. Hier ist jedoch nicht quantifiziert, welchen Einfluss dabei die neben Nickel, Kupfer und Kobalt gewonnenen Platingruppenelemente haben und wie repräsentativ die genannten Werte sind.

Der Gesamtwasserbedarf der Bergwerke wird variabel gedeckt durch die Wasserentnahme sowie die Wiederverwendung von Nutzwasser, entweder mit oder ohne erneute Aufbereitung. Die Raten der Wiederverwendung und des Recyclings sind auf den für Kobalt relevanten Bergwerken stark variabel. So weist beispielsweise Glencore für seine zwei kongolesischen Bergwerke eine Effizienz von 73% aus. Damit beträgt die dortige Neuentnahme von Wasser für die Aufbereitung einer Tonne Erz lediglich 270 Liter. Im australischen Nickel-West-Komplex, der in einer ariden Region liegt, weisen die Zahlen des Betreibers BHP hingegen auf eine deutlich niedrigere Rate von etwa 34% hin.

Die Kobaltextraktion im Rahmen des Kupfer- oder Nickelbergbaus erfolgt global in Regionen ohne ausgeprägte Wasserknappheit, von wenigen australischen Bergwerken abgesehen. So ist beispielsweise der Südosten der DR Kongo mit gut 1200 mm Jahresniederschlag eine ausgesprochen niederschlagsreiche Region. Damit bestehen hohe Anforderungen an die Betreiber hinsichtlich Wassermanagement und Entwässerung, um den Zu- und Abfluss von Wasser in den Bergwerken zu kontrollieren und diese trocken zu halten. Insgesamt sind Risiken der Wasserknappheit für die für Kobalt relevanten Kupfer- und Nickelbergwerke wesentlich geringer ausgeprägt als beispielsweise für Kupferlagerstätten in Chile und Peru, die nicht mit Kobalt assoziiert sind. Demgegenüber stehen jedoch andere Herausforderungen, die sich aus dem sozio-ökonomischen Kontext der Bergwerke ergeben. So hatten in der DR Kongo im Jahr 2014 aufgrund der schwachen Staatlichkeit lediglich 26% der Bevölkerung direkten Zugang zu Trinkwasser, während der Durchschnittswert in Afrika 60% beträgt [14]. Aus diesem Umstand sowie dem von der Bevölkerung oft als wasserintensiv wahrgenommenen Bergbau resultieren Forderungen an die industriellen Betreiber, der Bevölkerung im Umfeld des Abbaus einen verbesserten Zugang zu Trinkwasser zu ermöglichen.

Die Beeinträchtigung und Kontamination von Oberflächengewässern, Grundwasser und Küstengewässern im Umfeld von Abbau- und Aufbereitungsanlagen so-

Bergbauflächen und Rekultivierung – Die Problematik des Kamoto-Bergbaubezirks im kongolesischen Copperbelt

Der Bergbaubezirk von Kamoto umfasst eine Reihe von zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten Kupfer-Kobalt-Lagerstätten. Derzeit repräsentiert der Bezirk das global wichtigste Zentrum für die Kobaltförderung. Die Lagerstätten werden, mit temporären Unterbrechungen, seit den 1950er Jahren im Tagebau sowie untertage erschlossen. Aus den historischen Bergbauaktivitäten und Halden resultieren großflächige Emissionsprobleme, die die Umwelt und die Gesundheit der Anwohner auch heute noch belasten.

Größter lokaler Betreiber im Bezirk ist Katanga Mining Ltd. (KML), ein Tochterunternehmen des Schweizer Bergbaukonzerns Glencore. Daneben sind chinesische und kasachische Betreiber aktiv. Das kongolesische parastaatlische Unternehmen Gécamines hält Beteiligungen an mehreren Projekten und ist zudem direkt für eine große Anzahl umliegender Konzessionen verantwortlich. Auch artisanale Kleinbergleute sind vielfach im Bezirk aktiv. Die Kobaltproduktion erfolgt einerseits im primären Bergbau, andererseits durch die Aufbereitung der großflächigen historischen Abraumhalden der letzten Jahrzehnte. Die Konzessionsflächen für den Abbau von Primärerzen sowie die Wiederaufbereitung von Halden überlagern sich (Abb. 5).

Glencores Beteiligung vor Ort basiert auf dem Abschluss eines Joint Ventures im Jahr 2005 sowie einer anschließenden Fusion lokaler Betreiber im Jahr 2008. Mit diesen Beteiligungen verfügt das Unternehmen über Abbaurechte in drei Konzessionen sowie das Recht zur Aufbereitung der assoziierten Halden, die teils außerhalb dieser Konzessionen lagern.

Aufgrund der Enge der Abbautätigkeiten im Bezirk ist der verfügbare Platz für die Ablagerung neuer Aufbereitungsabgänge limitiert. Derzeit werden die Abgänge von KML in den ehemaligen Mupine-Tagebau eingelassen – ab Ende 2021 ist das dort verfügbare Volumen jedoch voraussichtlich ausgeschöpft. Durch die Aufschichtung von Aufbereitungsabgängen auf ein Niveau oberhalb der Erdoberfläche entstehen zudem neue Risiken für mögliche Dammbürche. Verhandlungen von KML mit lokalen Landbesitzern zur Erschließung neuer Flächen zur Ablagerung der im laufenden Betrieb entstehenden Aufbereitungsabgänge scheiterten zuletzt vorläufig.

Die Kosten für die Schließung und Rekultivierung von Kamoto werden von KML mit 132 Millionen USD beziffert [12]. Diese Kosten beziehen sich jedoch nur auf die Bergbauhinterlassenschaften der letzten Jahre, für die das Unternehmen selbst verantwortlich ist. Aus der engen Verflechtung der Aktivitäten von KML und Gécamines ist die Verteilung der Schließungsverantwortlichkeiten sehr komplex. So muss KML beispielsweise historische Halden rekultivieren, auf die es selbst Material aufgestockt hat. Im Gegenzug hat sich Gécamines verpflichtet, für andere Halden auf der Konzession die Verantwortung zu übernehmen. Eine nachhaltige Rekultivierung des gesamten historischen Bergbaubezirks ist somit davon abhängig, dass alle beteiligten Betreiber ihrer jeweiligen Verantwortung vollumfänglich nachkommen.

wie Halden können ein signifikantes Problem darstellen. Darunter fallen auch durch saure Grubenwässer hervorgerufene Auswirkungen im Zusammenhang mit dem Abbau und der Aufhaltung von Sulfiderzen. In historischen Bergbauzentren hing die resultierende Umweltproblematik auch mit unzureichenden regulativen Standards zusammen. Heutzutage gelten hingegen meist striktere regulative Auflagen. Stattdessen spielen Unfälle oder Nachlässigkeiten der Betreiber, teils im Verbund mit Korruptionsrisiken eine Hauptrolle beim Auftreten von Problemen. Selbst wenn derartige Vorfälle punktuell und nicht für den Bergbausektor repräsentativ sind, bedingen sie eine negative Reputation und beeinträchtigen die gesellschaftliche Akzeptanz des Bergbaus weltweit. Auch wenn ein Eintrag von schwermetallbelasteten Abfallstoffen und Sickerwasser oder die Verschlammung von Fließgewässern aus früherer Abbautätigkeit stammt, benötigen die Ökosysteme meist Jahrzehnte, um sich zu regenerieren. So zeigen zum Beispiel Flusssedimente und Böden im Umfeld des kongolesischen Bergbauzentrums Kolwezi eine starke historisch bedingte Kontamination mit Kobalt, Kupfer, Nickel, Zink, Blei und Thorium, lokal auch Arsen und Uran. Die empfohlenen Grenzwerte werden bis um den Faktor 100 – 1.000 überschritten [15]. Diese Belastungen werden von den Anwohnern auch mit aktuellen Abbautätigkeiten in Verbindung gebracht, selbst wenn heutige Betreiber für diese Schäden keine direkte Verantwortung tragen.

Von aktueller Relevanz ist die Verschmutzung im Umfeld des Norilsk-Aufbereitungszentrums auf der russischen Taimyr-Halbinsel, nördlich des Polarkreises. Nach Beschädigung eines Dieseltanks in einem Kohlekraftwerk flossen im Mai 2020 bis zu 21.000 m³ Diesel (17.500 Tonnen; die genaue Menge wird zwischen Betreiber und Aufsichtsbehörden kontrovers diskutiert) unkontrolliert aus und kontaminierten Böden sowie Oberflächengewässer auf einer Fläche von etwa 350 km². Als Ursache der Beschädigung wird unter anderem auf das partielle Tauen des Permafrostbodens verwiesen, andere Quellen verweisen auf eine unzureichende Instandhaltung. Die Kosten der initialen Notfallmaßnahmen zur Sanierung werden auf knapp 150 Millionen USD geschätzt, die über einen Zeitraum von 5 – 10 Jahren erwarteten Gesamtkosten der Sanierung auf etwa 1,5 Milliarden USD [16]. Im Juni 2020 wurde von einem weiteren Vorfall in einer der Norilsk-Aufbereitungsanlagen berichtet. Dabei wurden 6.000 m³ ungereinigte Prozessabwässer illegal in die Umgebung abgelassen, um Überflutungen aufgrund schwerer Regenfälle zu vermeiden. Diese sowie die umfangreichen historischen Emissionen rund um den Norilsk-Komplex stehen insbesondere auch aufgrund der langsamen Regeneration der Umwelt in arktischen Regionen in der Kritik.

Energie und Emissionen

Bei der Betrachtung der Energie- und Emissionsprofile der Bergwerke zeigen sich deutliche Unterschiede, je nachdem, ob diese sulfidische oder lateritische Erze fördern und aufbereiten. Für einige Sulfiderze fördernde australische Nickel-Kupfer-Kobalt-Bergwerke wurde im Jahr 2010 für den Abbau- und Konzentrationsprozess ein Energiebedarf von 0,4 – 1,1 GJ/t Erz abgeschätzt (umgerechnet aus [13]). Ähnliche Werte können für die Oxid-Sulfid-Mischerz fördernden Kupfer-Kobalt-Bergwerke mit angeschlossener hydrometallurgischer Aufbereitung in der DR Kongo abgeleitet werden. Auf Bergwerken in Kanada, mit angeschlossener Verhüttung und Raffinade, erhöht sich der Energiebedarf auf 1,7 – 2,4 GJ/t Erz. Im Gegensatz dazu entsteht bei Abbau, Verhüttung und Raffinade von lateritischen Erzen ein Energiebedarf von etwa 4 – 8 GJ/t Erz. Aufbereitungsbedingt liegt der Energiebedarf für die Gewinnung von Metallen aus lateritischen Erzen damit deutlich über dem für sulfidische Erze erforderlichen Bedarf. Jedoch haben auch die Bergwerke auf den russischen Taimyr- und Kola-Halbinseln einen erhöhten Energiebedarf von 2 – 9 GJ/t Erz, selbst wenn sie sulfidische Erze fördern [13]. Hintergrund ist hier unter anderem, dass die Förderung untertage stattfindet, was in der Regel energieintensiver ist. Zudem besteht bei vielen der dortigen Anlagen Modernisierungsbedarf.

Die Klimabilanz des Bergbaus wird einerseits durch direkte Emissionen bestimmt. Darüber hinaus beeinflusst der standortspezifische Energiemix die Klimabilanz. Circa 30 – 50 % der im Tagebau entstehenden Treibhausgase werden durch die Fahrzeugflotte des Bergwerks verursacht. Die Optimierung und Elektrifizierung von Teilen des Fuhrparks (zum Beispiel mittels „trolley assist“) ermöglicht eine signifikante Reduzierung der Flottenemissionen. Im Kobaltsektor betrifft dies beispielsweise die Nickel-Kupfer-Grube Kevitsa in Finnland, die auf diese Weise eine Senkung der Emissionen um 80 % plant. Auch einige Fahrzeugflotten der untertägigen Bergwerke im kanadischen Sudbury-Bezirk werden seit dem Jahr 2018 zunehmend elektrifiziert. Vor Beginn dieser Maßnahmen lag der CO₂-Ausstoß für den Abbau und die Aufbereitung kobaltführender Sulfiderze im Bereich von 20 – 170 kg CO₂/t Erz. Für Lateriterze erhöht sich dies, aufgrund der höheren Energieintensität des Aufbereitungsprozesses, auf etwa 360 – 620 kg CO₂/t Erz (umgerechnet aus [13]). Damit erzeugen Abbau und Aufbereitung einer Tonne Erz in etwa so viel CO₂ wie ein Kurzstreckenflug oder ein kurzer Mittelstreckenflug pro Passagier.

Der standortspezifische Energiemix der Bergwerke ist stark variabel. Während der Kupfer-Kobalt-Bergbau in der DR Kongo häufig mit sozialen und ökologischen

Risiken assoziiert wird, so ist der dortige Energiemix relativ klimafreundlich und beruht nahezu komplett auf der Wasserkraft. Dies ist damit begründet, dass fast alle großen Bergwerke über einen direkten Anschluss an das Stromnetz der Provinz verfügen. Allerdings fallen nachfolgend signifikante Emissionen durch den LKW-Transport des Kobalt-Hydroxids in die Häfen des südlichen Afrikas an. Im kanadischen Sudbury-Bezirk stammt der Strom vor allem aus der Wasser- und Kernkraft, aber auch aus fossilen Brennstoffen. Die russischen Bergwerke und Aufbereitungszentren des Nor Nickel-Konzerns sind auf fossile Energieträger angewiesen, verfolgen jedoch eine Strategie der erhöhten Nutzung von Wasserkraft. Im Jahr 2016 wurden 25% des Energiebedarfs des Unternehmens aus erneuerbaren Energien gedeckt. Viele kobaltfördernde Bergwerke sind auf die lokale Herstellung von Schwefelsäure und Schwefeldioxid angewiesen sind (Abb. 4). Dazu werden häufig vor Ort Fabrikationsanlagen errichtet. Die dabei freiwerdende Prozessenergie (Hitze) wird über Turbinen in Strom umgewandelt und trägt ebenfalls zur Energieversorgung der Bergwerke bei.

Von hoher lokaler Relevanz sind die Staubemissionen des Bergbaus. Auch wenn die Bergwerksbetreiber die Pisten in den Tagebauen selbst regelmäßig zur Staubunterdrückung beregnen, so entsteht eine erhöhte Staubbelastung durch unzureichend abgesicherte Halden oder den Erztransport entlang von Straßen und Pisten außerhalb der Konzession. In der für Kobalt essentiell wichtigen Abbauregion des kongolesisch-sambischen Copperbelts liegen viele Siedlungen in den Bergbaubezirken, teils in direkter Nachbarschaft von Tagebauen und Abraumhalden (Abb. 5). Aus der permanenten Staubbelastung resultierende Atemwegserkrankungen bis hin zur Silikose sowie karzinogene oder andere Erkrankungen stellen ernsthafte Gesundheitsrisiken für die lokale Bevölkerung dar.

Eine wesentliche Umweltauswirkung im Umfeld vieler historischer Bergbaudistrikte sind die Schwefeldioxidemissionen, die insbesondere bei der Verhüttung von sulfidischem Erz entstehen. Zudem treten entsprechende Emissionen untergeordnet auch aus nicht adäquat abgesicherten Aufbereitungsabgängen aus. Dieser Aspekt wird in Kapitel 5.1 behandelt.

4.2 Soziale und ökonomische Aspekte

Arbeitssicherheit

Unter dem Blickwinkel der Arbeitssicherheit ist der artisanale Kleinbergbau in der DR Kongo als besonders kritisch zu bewerten. Vor allem Unfälle durch Verschüttung in unzureichend abgesicherten Stollen haben in

den letzten Jahren viele Opfer gefordert. Generell sind artisanale Abbautätigkeiten untertage mit höheren Risiken behaftet als die Förderung im Tagebau. In beiden Fällen könnten jedoch viele Unfälle durch ein geeignetes Sicherheitsmanagement vermieden werden.

Für industrielle Bergwerksbetreiber stellt die Arbeitssicherheit häufig einen zentralen Punkt ihres Nachhaltigkeitsmanagements dar. Jedoch ist auch die industrielle Kobaltförderung punktuell von Probleme der Arbeitssicherheit betroffen. Der von chinesischen Investoren entwickelte und betriebene Ramu-Tagebau in Papua Neuguinea stand wiederholt in der Kritik und wurde von den Behörden mit Auflagen belegt, die Arbeitsbedingungen, insbesondere die Arbeitssicherheit, zu verbessern. In China selbst berichteten lokale Medien wiederholt über tödliche Arbeitsunfälle in den Nickel, Kupfer und Kobalt fördernden Gruben von Jinchuan. Teils stehen diese mit der hohen tektonisch-geotechnischen Komplexität des untertage stattfindenden Abbaus in Zusammenhang. Im Jahr 2005 stürzte deshalb ein 700 m tiefer Lüftungsschacht ein, im Jahr 2016 war untertage eine Fläche von 11.000 m² von einem Einsturz betroffen.

Von hoher lokaler Relevanz ist die Transportsicherheit von Abbauprodukten und Verbrauchskemikalien außerhalb der Bergbaukonzessionen. So überschritt das in der Aufbereitung der Kamoto-Grube produzierte Kobalt-Hydroxid im Jahr 2019 die zulässigen Transportgrenzwerte im Hinblick auf die Radioaktivität. Der Betreiber integriert daher derzeit einen Prozess zur Reduzierung der Urangehalte in seine Aufbereitung [12]. Im gleichen Jahr kollidierte auf einer öffentlichen Straße ein LKW, der Schwefelsäure für den nahegelegenen Mutanda-Tagebau transportierte, mit entgegenkommenden Fahrzeugen. Dabei trat großflächig Säure aus, 18 Menschen starben. Dies unterstreicht die Wichtigkeit, bei einer Bewertung der Nachhaltigkeitsperformance im Bergbau nicht nur die Betreiber selbst, sondern auch die von diesen beauftragten externen Dienstleister mit zu berücksichtigen.

Kinderarbeit

Als Folge der Armut ist die Kinderarbeit in den Ländern des globalen Südens weit verbreitet. Sie betrifft viele Wirtschaftssektoren, einschließlich des artisanalen Kleinbergbaus. Kritisch zu sehen sind insbesondere die resultierenden Gesundheitsrisiken sowie der Verlust an Bildungsmöglichkeiten, falls die Tätigkeiten zulasten eines Schulbesuchs gehen. Schlimmste Formen der Kinderarbeit gemäß der Definition der internationalen Arbeitsorganisation (ILO) stellen ein explizites Risiko im kongolesischen Kleinbergbau dar. Unter „schlimmste Form“ in diesem Sinne fallen Tätigkeiten, die die Gesundheit, Sicherheit oder Moral der Kinder



Abb. 6: Eindrücke aus dem kongolesischen Copperbelt. A – Der „Big Hill“ Schlackehügel in der Stadt Lubumbashi. B – Der Mutanda-Tagebau (Zentral-Nordwest), im Jahr 2018 größtes (Kupfer-) Kobalt-Bergwerk der Welt. C – Die in der Stadt Kolwezi gelegene Kleinbergbauzone von Kasulo während des Höhepunkts des Kobalt-Preispeaks im April 2018. Fotos: BGR.

schädigen, sowie unter Zwang verrichtete Tätigkeiten. Immer wieder wird das Auftreten dieses Problems beobachtet – allerdings punktuell, nicht generell.

Eine Inspektion von 58 artesischen Kobaltminen im Jahr 2019 ergab, dass auf 29% der Standorte insgesamt etwa 2.500 Kinder anwesend waren, darunter viele junge Kinder unter 10 Jahren [17]. Zumeist verrichteten die Kinder leichte Arbeitstätigkeiten wie die Sortierung von Erz, die nicht zwangsläufig unter die ILO-Definition fallen. Effektiv verbieten lassen sich derartige Formen der Kinderarbeit aufgrund ihres armutsgetriebenen Charakters kaum. Jedoch lassen sich Anreize unterbinden, indem Kindern zum Beispiel der kostenlose Zugang zu Bildung ermöglicht wird (und der Schulbesuch beispielsweise auch eine Mahlzeit beinhaltet) oder alternative, weniger kritische Verdienstmöglichkeiten ge-

schaffen werden. Schlimmste Formen der Kinderarbeit, die von Unternehmen als Risiko im Sinne der Sorgfaltspflicht in der Lieferkette zu werten sind, traf die BGR im Rahmen ihrer Mineninspektionen des Jahres 2019 auf zwei von 58 untersuchten artesischen Kobaltminen in der DR Kongo an.

Lokale Gemeinden

Die Präsenz von Kindern auf artesischen Kobaltminen in der DR Kongo ist auch dem Umstand geschuldet, dass die Abbautätigkeiten häufig in oder in unmittelbarer Nähe zu Siedlungen stattfinden. Deutlich wird dies am Beispiel von Kasulo, einer artesischen Abbaustätte auf einer Fläche von 40 Hektar. Diese ist mitten in der lokalen Großstadt Kolwezi gelegen. Aufgrund der reichhaltigen Kobaltvererzung fanden hier seit dem Jahr 2014 zunehmend Schürfarbeiten statt. Diese wurden

von vielen Anwohnern zunächst illegal in den Hinterhöfen und unter den Häusern betrieben. Im Jahr 2017 traf die Provinzregierung die Entscheidung, das Stadtviertel zu räumen und als offizielle Zone für den Kleinbergbau auszuweisen. Die 600 Häuser wurden abgerissen, die Bewohner umgesiedelt oder entschädigt und das Gelände eingezäunt. Über ein lokales Tochterunternehmen engagierte sich der chinesische Konzern Huayou Cobalt als Abnehmer. Zum Höhepunkt des Kobaltpreises im Jahr 2018 waren nach BGR-Schätzungen bis zu 15.000 Kleinbergleute in Kasulo aktiv (Abb. 6).

Mit dem nachfolgend einsetzenden Kobaltpreisverfall im Jahr 2019 verwaisten hingegen weite Teile der Kasulo-Konzession, weniger als 1.000 aktive Bergleute verblieben. Huayou nahm Abstand von der Konzession. Im Rückblick stellt sich damit die Frage, ob die formell erstrebenswerte Ausweisung als offizielle Abbauzone inklusive der Zwangsumsiedlung von 600 Haushalten tatsächlich als nachhaltig zu werten ist. Diese Dynamik verdeutlicht die Schwierigkeit im Umgang mit einem artisanalen „mining rush“, einschließlich der sozialen Verwerfungen, die daraus resultieren können. Wird der artisanale Abbau hingegen über lange Jahre hinweg in einem stabilen sozialen Umfeld betrieben, ohne signifikante Binnenmigration, bestehen deutlich bessere Chancen, verantwortungsvolle Abbaustandards einzuführen und tragfähige Alternativen zu sozialen Problemen wie der Kinderarbeit zu entwickeln.

Hinsichtlich der sozialen Akzeptanz und der Auswirkungen des industriellen Bergbaus ist zu beachten, dass die durch Explorations- und Abbaukonzessionen beanspruchte Fläche wesentlich größer ist als die durch bergbauliche Anlagen und Rückstände tatsächlich belegte Fläche. Allein im kongolesischen Copperbelt sind derzeit rund 70.000 km² Konzessionsfläche ausgewiesen, dies entspricht 28 % der Gesamtfläche der Provinzen Haut-Katanga und Lualaba. Aufgrund dieses Ausmaßes ist absehbar, dass sich vielfältige Kontakte zwischen den Konzessionsinhabern und der lokalen Bevölkerung ergeben. Bereits im Explorationsstadium kann dabei auch ein signifikantes soziales Konfliktpotential entstehen, das in der DR Kongo durch den verbreiteten Kleinbergbau noch weiter akzentuiert wird. Verbände wie die kanadische PDAC-Vereinigung haben im Hinblick auf eine derartige Problematik Prinzipien zu verantwortungsvoller Rohstoffexploration entwickelt [18].

Eine frühzeitige Einbindung und Konsultation lokaler Gemeinden noch im Planungsstadium, vor Beginn der Abbautätigkeit, ist eine wichtige Voraussetzung für die soziale Akzeptanz des Bergbaus unter der lokalen Bevölkerung („social license to operate“). Vorbildlich in

dieser Hinsicht verhielten sich beispielsweise die Betreiber der an der kanadischen Labradorsee gelegenen Nickel-Kobalt-Grube Voisey's Bay.

Wirtschaftliche Bedeutung

Der Abbau von Kupfer und Kobalt stellt eine maßgebliche Quelle für Steuereinnahmen und Exporterlöse des kongolesischen Staates dar. Aus finanzieller Sicht repräsentiert der Kupfer- und Kobaltsektor den mit großem Abstand wichtigsten Zweig des nationalen Bergbausektors. Der informelle Kobalt-Kleinbergbau mit bis zu 200.000 Beschäftigten setzt zudem wichtige Wirtschaftsimpulse auf der lokalen Ebene, die in offiziellen Kennzahlen wie dem BIP nicht abgebildet werden. Momentan ist die Beschäftigung im artisanalen Sektor jedoch rückläufig, derzeit geschätzt auf unter 100.000 Schürfer. Dies ist durch die negative Kobaltpreisentwicklung seit dem Höhepunkt im Jahr 2018 bedingt. In anderen kobaltproduzierenden Ländern ist die wirtschaftliche Relevanz des Sektors deutlich geringer, da die Wirtschaft bzw. der Rohstoffsektor diversifizierter sind.

Unter der Berücksichtigung der Erzgehalte stellt Kobalt im Regelfall ein Nebenprodukt der Kupfer- oder Nickelgewinnung dar. Die Rentabilität großer Bergbauprojekte für Betreiber und Investoren war im vergangenen Jahrzehnt insbesondere im Nickelsektor nicht immer sichergestellt. Dies war einerseits eine Folge der Rohstoffpreisentwicklung, andererseits jedoch von Fehlkalkulationen bei der Planung. Massive Budgetüberschreitungen charakterisierten die Entwicklung großer lateritischer Nickel-Kobalt-Projekte. Beispielhaft wird dies in Abbildung 7 veranschaulicht. Der Kobaltpreisverfall sowie die Entscheidung der kongolesischen Regierung im Dezember 2018, eine von 3,5 % auf 10 % erhöhte Förderabgabe beim Export von Kobalterz bzw. Roh-Hydroxid zu erheben, stellen auch die Profitabilität des kongolesischen Bergbaus teilweise in Frage. Vor diesem Hintergrund traf der Betreiber Glencore unter anderem die Entscheidung, die im globalen Maßstab wichtige Kupfer-Kobalt-Grube Mutanda ab Ende 2019 für zunächst zwei Jahre außer Betrieb zu nehmen.

4.3 Governance

Korruptionsrisiken

Nur drei der großen kobaltfördernden Länder – Australien und Kanada sowie das zu Frankreich gehörende Neukaledonien – werden unter den Aspekten Governance und Korruptionsrisiken als vorteilhaft bewertet. Sämtliche weiteren Produzentenländer schneiden ten-

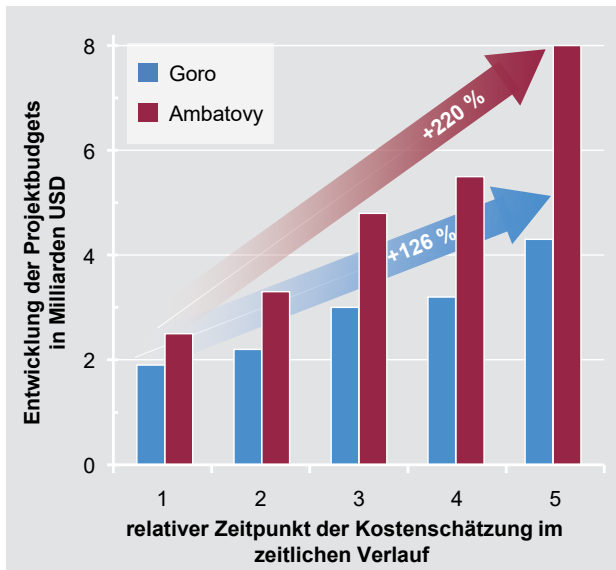


Abb. 7: Entwicklung der Projektbudgets für die Errichtung der Nickel-Kobalt-Bergwerke Goro (Neukaledonien) und Ambatovy (Madagaskar). Die Kostenschätzungen beziehen sich auf verschiedene Zeitpunkte im Verlauf der Jahre 2005 – 2010 (Goro) und 2007 – 2012 (Madagaskar), basierend auf Angaben aus [5].

denziell schwach in den entsprechenden Rankings der Weltbank und weiterer Organisationen ab. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der DR Kongo. Zwar ist das Land Teilnehmer der internationalen Transparenzinitiative im Rohstoffsektor (EITI) und hat zu diesem Zweck einen nationalen Umsetzungsprozess etabliert. Jedoch wurde der nationale Koordinator des Prozesses im April 2020 wegen der Veruntreuung von 217.000 USD verhaftet. Dieses Beispiel verdeutlicht das Ausmaß der Korruptionsprobleme im Land.

Betroffen ist zudem Glencore, einer der weltweit führenden Bergbaukonzerne und indirekter Kobalt-Lieferant vieler Automobilhersteller. Für die Übernahme der kongolesischen Konzessionen Kamoto und Mutanda ging Glencore beziehungsweise dessen Tochtergesellschaft Vereinbarungen mit Unternehmen ein, die von dem israelischen Geschäftsmann Dan Gertler kontrolliert werden. Dieser steht dem ehemaligen kongolesischen Präsidenten Kabila nahe und leitete die aus seinen Geschäften erhaltenen Gelder mutmaßlich zum Teil an Kabilas Umfeld weiter. Im Gegenzug erhielt er finanzielle Vorteile beim ursprünglichen (Teil-) Erwerb von Bergbaukonzessionen in der DR Kongo. Aus diesem Grund wurde Gertler von den USA zum „specially designated national“ erklärt. Als solcher sind mit ihm Geschäfte machende Unternehmen von möglichen Sanktionen betroffen. Allein im Jahr 2015 wurde beispielsweise ein Vorschuss an Lizenzgebühren in Höhe von 58 Millionen USD fällig. Dieser wurde von einem Tochterunternehmen von Glencore an das von Gertler kontrollierte Un-

ternehmen Africa Horizons Investment Ltd. entrichtet. Auch das parastaatliche Unternehmen Gécamines ist in die undurchsichtigen Finanztransaktionen involviert. Um mögliche US-Sanktionen zu vermeiden, entrichtet Glencore die fälligen Zahlungen in EURO, anstatt in USD [12].

Risiken der Sorgfaltspflicht

Risiken der Sorgfaltspflicht im Sinne der OECD umfassen unter anderem die Konfliktfinanzierung, Menschenrechtsverletzungen, Zwangsarbeit, schlimmste Formen der Kinderarbeit sowie Korruption und Betrug zur Verschleierung der Herkunft der Rohstoffe. Bis auf die Konfliktfinanzierung sind sämtliche der genannten Risiken im Kobaltsektor der DR Kongo relevant [17]. Dies betrifft auch, aber nicht nur die Kinderarbeit im artisanalen Sektor. Menschenrechtsverletzungen können beispielsweise aus dem Verhalten der Sicherheitskräfte der Bergwerksbetreiber gegenüber den Kleinbergleuten resultieren. Ähnliches gilt für den im Jahr 2019 veranlassten Einsatz der kongolesischen Armee auf industriellen Abbaukonzessionen, der mit dem Ziel erfolgte, den dortigen illegalen Kleinbergbau zu unterbinden.

Außerhalb der DR Kongo sind derartige Risiken deutlich geringer ausgeprägt, jedoch ebenfalls vorhanden. Proteste lokaler Gemeinden gegen Bergbauprojekte und deren Auswirkungen können gewalttätig enden. Ein Beispiel dafür stellt der Konflikt um den Taganito-Tagebau auf den Philippinen dar. Teile der dortigen indigenen Bevölkerung zeigten sich unzufrieden mit der aus dem Nickel-Kobalt-Bergbau resultierenden Einnahmenverteilung und Umsiedelung. Eine lokale militarisierete Gruppe, die New People’s Army, attackierte im Jahr 2011 das Bergwerk, zerstörte das dortige Equipment, nahm Geiseln und tötete vier Wachleute. Daraufhin gründete der Betreiber zum Schutz eine private Miliz, die von der philippinischen Armee ausgebildet wurde. Im Sinne einer verantwortungsvollen Lieferkette stellt sich in dieser Konstellation die Frage, ob derartige Milizen zum Schutz der lokalen Bevölkerung beitragen oder ob Risiken bestehen, dass sie ihrerseits in Menschenrechtsverletzungen involviert sind.

5 NACHHALTIGKEITSASPEKTE DER WEITERVERARBEITUNG

5.1 Umwelt

Emissionen

Die wichtigste historische Umweltauswirkung in der Weiterverarbeitung von kobalthaltigen Kupfer- und Nickelerzen bezieht sich auf die Emission von Schwe-

feldioxid. Dieses entsteht während der oxidierenden Verhüttung von Sulfiderzen sowie bei der teilweise praktizierten Röstung von Konzentraten für eine folgende hydrometallurgische Aufbereitung. Als Säurenebel ins Freie verflüchtigt trägt Schwefeldioxid in Niederschlägen zur Versauerung von Böden und Oberflächengewässern bei. Durch das resultierende saure Milieu erhöht sich die Mobilität von Schwermetallen, die – so wie Schwefeldioxid selbst – in erhöhten Konzentrationen toxisch für Flora und Fauna sind. Die historischen Schäden durch Schwefeldioxid-Emissionen sind beträchtlich. So wurden beispielsweise im kanadischen Sudbury-Bezirk aufgrund der Versauerung 7.000 Seen biologisch massiv geschädigt [19]. Drastische Umweltschäden finden sich auch im Einzugsgebiet der russischen Aufbereitungszentren Taimyr (Norilsk) und Kola, sowie im kongolesischen und sambischen Copperbelt. Zudem verursachte saurer Regen in den Bergbauzentren Korrosion und strukturelle Schäden an Gebäuden.

Heutzutage sind die Schwefeldioxidemissionen der meisten Hütten wesentlich reduziert. Im Regelfall werden pro Tonne Metall mehr als 90 % des erzeugten Schwefeldioxids durch Filter aufgefangen. Regulative Auflagen spielen die Schlüsselrolle in dieser Entwicklung. Das gesetzliche Limit der zulässigen Schwefeldioxid-Gesamtemissionen für die Anlagen des INO-Komplexes (Integrated Nickel Operations) im kanadischen Sudbury wurde sukzessive von gut 150.000 t SO₂ in den 1980er Jahren auf derzeit unter 30.000 t SO₂ gesenkt – bei gleichzeitiger Verdopplung der Menge an verhüttetem Nickel [20]. Zudem stehen die dortigen Betreiber in der Pflicht, öffentlich über ihre Emissionen zu berichten. In der EU lagen die Emissionslimits in der primären Kupferverhüttung im Jahr 2016 bei 500 mg SO₂/Nm³ (Normkubikmeter), in China bei 600 mg SO₂/Nm³ [21]. In der Praxis besteht zwischen verschiedenen Hütten eine große Schwankungsbreite. Einzelne Unternehmen liegen mit ihren Emissionen wesentlich unterhalb der gesetzlich vorgegebenen Limits. Neben regulativen Auflagen sowie Fragen der sozialen Akzeptanz sowie der Unternehmensreputation, hat dies auch wirtschaftliche Gründe. Das in Filtern aufgefangene Schwefeldioxid kann zur Herstellung von Schwefelsäure genutzt werden. Dabei wird zudem Prozesswärme für die Energieerzeugung frei.

Weiterhin problematisch sind die hohen Emissionen in den Aufbereitungszentren des russischen Norinickel-Konzerns. Dies betrifft einerseits Schwefeldioxid, andererseits die im Staub enthaltenen Schwermetallkonzentrationen. Norinickel hat in den letzten Jahren, insbesondere seit dem Jahr 2015, mit der Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen begonnen. Erwähnenswert ist dabei die finanzielle Unterstützung Nor-

wegens zur Verbesserung des Emissionsprofils der Verhüttungsanlagen auf der Kola-Halbinsel. Die dort verursachten Emissionen betreffen auch Skandinavien und führten zu Protesten der norwegischen Anwohner. Neben der politischen Ansprache des Themas stellte die norwegische Regierung dem Norinickel-Konzern finanzielle Unterstützung als Beitrag für die Modernisierung der Anlagen in Aussicht. Auch wenn die SO₂-Emissionen auf der Kola-Halbinsel weiterhin signifikant sind, so konnten diese im Jahr 2016, im Vergleich zum Vorjahr, um 21 % auf 132.900 t gesenkt werden [22].

Unter Einbeziehung der Ebenen von Bergbau, Aufbereitung und Raffinade sind sogenannte Cradle-to-Gate-Bewertungen der Emissionsprofile von Rohstoffen möglich. Mithilfe von Ökobilanzen können dabei die theoretisch auf Kobalt entfallenden Emissionsanteile hergeleitet und von Nickel oder Kupfer getrennt ausgewiesen werden. Basierend auf Daten aus dem Jahr 2012 wurden demnach für die Produktion von 1 kg Kobaltmetall insgesamt 38 kg CO₂-Äquivalent sowie 0,62 kg SO₂-Äquivalent erzeugt [23]. Das Cobalt Institute plant die Beauftragung einer Studie, um vergleichbare Werte auch für Kobaltchemikalien, als Hauptanwendungsprodukt in der Elektromobilität, zu errechnen.

5.2 Soziale und ökonomische Aspekte

Soziale Akzeptanz

Ein kritischer Punkt für die soziale Akzeptanz der Aufbereitungs- und Raffinadeprozesse von Kobaltprojekten ist häufig der Einsatz von Pipelines. Diese dienen entweder der Überbrückung der Distanz zwischen Tagebau und Verhüttungs- bzw. Raffinadestandorten oder dem Transport bestimmter Prozesschemikalien und Abwässer. Im Fall mehrerer großer lateritischer Nickel-Kobalt-Projekte kommen Pipelines zum Einsatz, in denen Erzschlamm an weit entfernte Aufbereitungsstandorte gepumpt wird. Im Fall des Ramu-Tagebaus in Papua Neuguinea hat die Pipeline eine Länge von 135 km, im Fall des madagassischen Ambatovy-Tagebaus beträgt die Länge 220 km.

In beiden Fällen bestanden und bestehen weiterhin starke lokale Vorbehalte gegen die Pipelines. Diese basieren auf Befürchtungen der Anwohner, dass Lecks oder anderweitige Defekte zu Emissionen führen und die Gesundheit der Menschen oder lokale Ökosysteme schädigen. Nach Prüfung derartiger Vorwürfe stellte die Europäische Investmentbank, als einer der Kreditgeber des Ambatovy-Projekts, fest, dass Lecks in einer durch ein Wohngebiet verlaufenden Versorgungspipeline tatsächlich von Zeit zu Zeit zu Schwefeldioxidemissionen oberhalb der zugelassenen Standards führten. Auch

wenn die Gutachter der Bank daraus keine schwerwiegende Gefährdung für die menschliche Gesundheit ableiteten, so bemängelten sie die Notfallvorsorgepläne des Betreibers [24].

Ein positives Beispiel in dieser Hinsicht ist das Vorgehen des damaligen Betreibers INCO im Zusammenhang mit der Konstruktion eines Hüttenwerks für die kanadische Nickel-Kobalt-Grube Voisey's Bay. Im Jahr 2006 plante INCO zunächst, die Anlage in Argentinia zu errichten, änderte die Pläne jedoch und wählte Long Harbour als neuen Standort aus. Grund dafür war, dass eine Abwasser-Pipeline damit nicht mehr durch ein für die Trinkwasserversorgung sensibles Wasserschutzgebiet geführt werden musste.

Wertschöpfung

Die Wertschöpfung entlang der einzelnen Lieferketten-segmente zur Fertigung von Lithiumionen-Akkus – von den Kathodenherstellern über die Kobaltchemikalien bis zurück zum Bergwerk – lässt sich kaum verlässlich aufschlüsseln. Zwar existieren auf kommerziellen Plattformen veröffentlichte Preisnotationen für einzelne Produkte sowie Modelle zur Wertverteilung der verschiedenen in den Kathoden enthaltenen Rohstoffe. Allerdings lassen sich diese Werte schwer generalisieren, da die Lieferkettenkonstellationen individuell unterschiedlich ausgebildet sind. Die Preise von Rohstoffen und Chemikalien entwickeln sich dynamisch, jedoch können in Lieferverträgen davon abweichende Vereinbarungen getroffen werden. Relativ sicher belegt ist, dass das aus der DR Kongo exportierte, in Roh-Hydroxid enthaltene Kobalt 60 – 80 % des Metallwerts Erlöst. Daneben wird ein Teil des kongolesischen Kobalts nach wie vor in Form von Konzentraten exportiert. Der Anteil an exportiertem Raffinadekobalt ist minimal. In der Summe ist Kobalt damit hinter Kupfer das zweitwichtigste Exportprodukt der DR Kongo, mit einem typischen Jahresexportwert von 1 – 2 Milliarden USD.

Ein eindeutiger Trend ist die im Wesentlichen kostenbegründete Substitution von Kobalt als Komponente in den Kathoden von Lithiumionen-Akkus. Im Jahr 2019 entfielen etwa ein Viertel der Produktionskosten eines Akkus auf das Kathodenmaterial, für das Kobalt neben weiteren „Batteriemetallen“ in variablen Anteilen verbaut wird. Vor dem Hintergrund der derzeitigen Rohstoffpreisentwicklung lassen sich diese Kosten senken, indem der Nickelanteil in der Kathode gesteigert und der Kobaltanteil reduziert werden. Auch kobaltfreie Kathodenzusammensetzungen sind möglich. Der Industriedienstleister Roskill berechnete modellhaft, dass die Produktionskosten eines Elektrofahrzeugs (in diesem Fall ein Tesla Model 3 mit 55 bzw. 54 kWh Energieumsatz) beim Einsatz eines nicht kobalthaltigen Akkus

deutlich niedriger ausfallen – gut 20.000 USD anstatt 25.000 USD [25]. Dieser Unterschied ist nicht nur, aber auch mit dem Verbau eines kobaltfreien LFP-Akkus anstatt eines kobalthaltigen NCA-Akkus verbunden und ermöglicht dem Hersteller eine deutlich erhöhte Gewinnmarge. Allerdings soll an dieser Stelle der einleitende Hinweis in Erinnerung gerufen werden, dass ein Nachvollziehen der einzelnen Wertschöpfungsschritte für verschiedene Komponenten schwierig ist. Derartige Modellrechnungen sind daher stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

5.3 Governance

Verantwortungsvolle Lieferketten

In den letzten Jahren wurden im Kobaltsektor eine Reihe von Initiativen gegründet, die auf ein verbessertes Risikomanagement in der Lieferkette abzielen. Zweifellos wurde diese Entwicklung katalysiert durch die intensive öffentliche Diskussion von Risiken der Kinderarbeit in der artisanalen Kobaltförderung in der DR Kongo. Das Cobalt Institute, als Vereinigung der Kobaltindustrie, schuf mit CIRAF (Cobalt Industry Responsible Assessment Framework) einen Referenzrahmen für Berichterstattung und Risikomanagement. Weitere Initiativen wurden als Diskussionsplattformen etabliert.

Ein zentraler Punkt für die Stärkung der Lieferkettentransparenz und -kontrolle ist die Überprüfung der Hütten und Raffinerien. Diese stellen das Bindeglied zwischen vor- und nachgelagerter Lieferkette dar. Zugleich ist die Anzahl der global aktiven Hütten und Raffinerien im Kobaltsektor begrenzt. Derzeit hat die Responsible Minerals Initiative (RMI) 92 Standorte identifiziert. Von diesen haben bislang elf erfolgreich ein Audit gemäß dem RMI-Qualitätssicherungsprozess durchlaufen; 23 weitere Standorte befinden sich im Prozess der Auditvorbereitung beziehungsweise der Umsetzung von Korrekturmaßnahmen [26]. Der Prozess prüft die Konformität der Managementsysteme im Hinblick auf die Empfehlungen der OECD zur Sorgfaltspflicht in der Lieferkette. Bereits seit dem Jahr 2010 setzt die RMI-Initiative einen vergleichbaren Standard im Rahmen der Auditierung von Hütten und Raffinerien der sogenannten Konfliktminerale Zinn, Tantal, Wolfram und Gold ein. Für diese Rohstoffe fordert eine EU-Verordnung ab dem Jahr 2021 den Nachweis der Sorgfaltspflicht, falls die betroffenen Minerale oder Metalle ab einer bestimmten Mengenschwelle in die EU eingeführt werden. Im Gegensatz zu den Konfliktmineralen wird die Teilnahme an dem dafür notwendigen Auditprozess für Kobalt bislang nicht regulativ eingefordert, sondern erfolgt freiwillig.

Im Jahr 2019 verklagte in den USA eine internationale Anwaltsorganisation im Namen von 14 kongolesischen Eltern und Kindern US-Großkonzerne wie Apple, Google und Tesla, die in ihren Produkten Kobalt einsetzen. Der Vorwurf lautet, dass diese Unternehmen Bergbaukonzerne unterstützt hätten, die von der Kinderarbeit im kongolesischen Kobaltsektor mutmaßlich profitierten. Das Ergebnis des Prozesses steht noch aus. Es ist nicht auszuschließen, dass dieser Vorgang dazu führt, dass internationale Konzerne und deren Zulieferer auf den Bezug von Kobalt aus dem kongolesischen Kleinbergbau bewusst verzichten, um sich keinen weiteren rechtlichen Risiken auszusetzen. Mit einer derartigen Strategie würde die grundlegende Dynamik der Kinderarbeit vor Ort jedoch nicht außer Kraft gesetzt. Zudem würde sich dadurch das Risiko erhöhen, dass die moderaten Transparenzfortschritte im artisanalen Kobaltsektor der letzten Jahre wieder in Frage gestellt werden.

6 FAZIT

Die Nachhaltigkeit in Kobaltlieferketten, besonders mit Bezug zur Elektromobilität, wird häufig auf Fragen im Zusammenhang mit Risiken der Kinderarbeit im artisanalen Kleinbergbau in der DR Kongo verengt. Die hier dargestellten Betrachtungen zeigen, dass ein derartiger Ansatz der Komplexität des Sektors nicht gerecht wird. Zwar sind Risiken der Kinderarbeit im Kleinbergbau unbestritten. Die Nachhaltigkeit im Kupfer- und Nickelbergbau und die damit verknüpfte Nachhaltigkeit in der Kobaltgewinnung ist jedoch seit langem mit verschiedensten Herausforderungen auf globaler Ebene verbunden.

Die Erfahrung der vergangenen Jahrzehnte und insbesondere der letzten Jahre hat gezeigt, dass vielen Herausforderungen der Nachhaltigkeit erfolgreich begegnet werden konnte, während andere Aspekte weiterhin kritisch zu sehen sind. Eine Schlüsselrolle spielen dabei regulative Auflage sowie die Anforderungen von Investoren, Kreditgebern und Verbrauchern. Erfahrungen aus dem Sektor der sogenannten Konfliktminerale belegen zudem, dass auf Basis des Engagements der Rohstoffabnehmer auch im artisanalen Kleinbergbau Fortschritte hin zu einer legalen, verantwortungsvollen Lieferkette möglich sind. Diese Lernerfahrungen sind auf den Kobaltsektor übertragbar und sollten dort genutzt werden.

7 QUELLENACHWEIS

[1] ROSKILL (2019): Cobalt: Outlook to 2029. 15th Edition, Roskill, London.

[2] ROSKILL (2020): Nickel sulphate: Outlook to 2029. 3rd Edition, Roskill, London.

[3] MBEINGI DILUZOLELE, G. (2019): Supply and demand analysis of cobalt. MSc thesis, University of Geneva. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:124753> [Stand: 7.7.2020].

[4] AL BARAZI, S. (2018): Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. DERA Rohstoffinformationen 36. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, ISBN 978-3-943566-49-9.

[5] S&P GLOBAL (2020): S&P Global Market Intelligence, New York. <https://www.spglobal.com/en/> [Stand: 7.7.2020].

[6] CRUNDWELL, F.K., MOATS, M.S., RAMACHANDRAN, V., ROBINSON, T.G., DAVENPORT, W.G. (2011): Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. Elsevier, Oxford/Amsterdam, ISBN 978-0-08-096809-4.

[7] SMM NEWS (2020): China will continue to be the global battery production center in the next few years. <https://news.metal.com/> [Stand: 29.5.2020].

[8] WORLD ECONOMIC FORUM (2019): A new circular vision for electronics: Time for a global reboot. World Economic Forum, Geneva. http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf [Stand: 7.7.2020].

[9] NAKAJIMA, K., NANSAI, K., MATSUBAE, K. ET AL. (2017): Global land-use change hidden behind nickel consumption. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.049>.

[10] TOST, M., BAYER, B., HITCH, M. ET AL. (2018): Metal mining's environmental pressures: A review and updated estimates on CO₂ emissions, water use, and land requirements. <https://doi.org/10.3390/su10082881>.

[11] TSHAMALA KANIKI, A. & TUMBA, K. (2019): Management of mineral processing tailings and metallurgical slags of the Congolese copperbelt: Environmental stakes and perspectives. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.131>.

[12] KAMOTO COPPER COMPANY S.A. (2019): Katanga Mining Limited – NI 43-101 technical report on the material assets of Katanga Mining Limited, Lualaba

Province, Democratic Republic of Congo, 7.11.2019. www.sedar.com [Stand: 7.7.2020].

[13] MUDD, G.M. (2010): Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.003>.

[14] KPMG (2014): Democratic Republic of Congo – Country mining guide. KPMG Global Mining Institute. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/pdf/2014/09/democratic-republic-congo-mining-guide.pdf> [Stand: 7.7.2020].

[15] ATIBU, E.K., LAXROIX, P., SIVALINGAM, P. ET AL. (2018): High contamination in the areas surrounding abandoned mines and mining activities: An impact assessment of the Dilala, Lulu and Mpingiri Rivers, Democratic Republic of the Congo. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.052>.

[16] BBC (2020): Arctic circle oil spill prompts Putin to declare state of emergency. BBC, 4.6.2020. <https://www.bbc.com/news/world-europe-52915807> [Stand: 7.7.2020].

[17] BGR (2019): Mapping of the artisanal copper-cobalt mining sector in the provinces of Haut-Katanga and Lualaba in the Democratic Republic of the Congo. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, ISBN 978-3-943566-68-9.

[18] PDAC (2014): e3 plus: A framework for responsible exploration – principles and guidance notes. Prospectors & Developers Association of Canada. <https://www.pdac.ca/priorities/responsible-exploration/e3-plus/principles> [Stand: 7.7.2020].

[19] KELLER, W., HENEBERRY, J.H., GUNN, J.M. (1998): Effects of emission reductions from the Sudbury smelters on the recovery of acid- and metal-damaged lakes. <https://doi.org/10.1023/A:1009975116685>.

[20] SUDBURY INTEGRATED NICKEL OPERATIONS (2020): Environmental management system & community engagement report 2019. <https://www.sudburyino.ca/en/environment/EnvironmentalPerformance/2019%20Annual%20EMT%20Report.pdf> [Stand: 7.7.2020].

[21] INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP (2017): Regulatory trends affecting the processing, transport and disposal of copper industry impurities. https://www.ecometales.cl/ecometales/site/docs/20191113/20191113154836/1_don_smale_presentation.pdf [Stand: 7.7.2020].

[22] BELLONA (2018): Nor nickel and the Kola peninsulas. <https://www.nornickel.com/files/en/investors/cmd/Nornickel-on-The-Kola-Peninsula.pdf> [Stand: 7.7.2020].

[23] ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT LTD. (2016): The environmental performance of refined cobalt: Life cycle inventory and life cycle assessment of refined cobalt – summary report. Cobalt Development Institute, Guildford.

[24] EUROPEAN INVESTMENT BANK (2018): Ambatovy nickel project, Madagascar. Conclusions report, complaint SG/E/2012/04. <https://www.eib.org/attachments/complaints/2018-03-19-sg-e-2012-04-ambatovy-conclusions-report-en.pdf> [Stand: 7.7.2020].

[25] ROSKILL (2020): White paper – the resurgence of LFP cathodes. Roskill, London.

[26] RESPONSIBLE MINERALS INITIATIVE (2020): Cobalt refiners list. <http://www.responsiblemineralsinitiative.org/cobalt-refiners-list/> [Stand: 25.12.2020].

[27] DEHAINE, Q., TIJSSELING, L.T., GLASS, H.J. et al. (2021): Geometallurgy of cobalt ores: a review. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106656>. [Stand: 25.12.2020].

IMPRESSUM

Herausgeber:

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
B 1.2 Geologie der mineralischen Rohstoffe
Arbeitsbereich Bergbau und Nachhaltigkeit
Stilleweg 2
30655 Hannover

E-Mail: mineralische-rohstoffe@bgr.de
www.bgr.bund.de

Autor:

Philip Schütte

Unter Mitarbeit von:

Sebastian Vetter, Siyamend al Barazi, Gudrun Franken

Layout:

Jolante Duba

Titelfoto:

© Wellnhofer Designs – stock.adobe.com

Stand:

Januar 2021