2019

Roadmap 2.0 des chilenischen Bergbaus

Aktueller Stand und Konsens für einen neuen Blickwinkel

ALTALEY
DE LOS RECURSOS NATURALES AL CONOCIMIENTO

Eine Veröffentlichung der Corporación Alta Ley
Die deutsche Übersetzung wird von der AHK Chile zur Verfügung gestellt

Erstausgabe
Santiago, 2019

Herausgeberkommitee
Corporación Alta Ley

Redaktionsleitung
Mauro Valdés
Javier Ruiz del Solar
Carlos Ladrix

Herausgeberteam
Carolina Aguayo, Jonathan Castillo, Isabel Covarrubias,
Pía Hurtado, Antonia Muzzo, Guillermo Olivares und Juan Pablo Rubilar

Redaktionsteam und Inhaltsentwicklung
Leonel Contreras, Javier Jara, Enrique Jélvez,
Cleve Lighfoot, Miguel Meza, Ángela Oblasser,
Roberto Parra, Víctor Pérez, Juan Carlos Salas,
Agustín Sepúlveda und Alejandra Wood.

Wir danken für die wertvolle Mitarbeit von
Andrés Costa, Fernando Flores, Jaime Henríquez, Diego Hernández,
Leandro Herrera, Gustavo Lagos, Pablo Lira, Isabel Marshall, Alejandra Molina,
Rodrigo Moya, Carlos Urenda, Iván Valenzuela. Pascual Veiga,
María de la Luz Vásquez und Paula Zambrano.

Design und Layout
Joce Quezada / Cristián González / José Covarrubias

Übersetzung ins Deutsche
Sven Olsson

Herausgeber
Patricio Urzúa

ISBN
978-956-09443-0-6

↑ Codelco
División
Ministro Hales

Inhaltsverzeichnis

Kurzvorstellungen

Baldo Prokurica; Bergbauminister 10

Andrés Couve; Minister für Wissenschaft, Technologie, Wissen und Innovation 11

Ricardo Irarrázabal; Bergbau-Vizeminister 12

Pablo Terrazas; Geschäftsführender Vizepräsident von Corfo 13

Diego Hernández; Präsident der Nationalen Bergbaugesellschaft Sonami 14

Joaquín Villarino; Geschäftsführender Präsident des Bergbaurats 15

Andrés Costa; Präsident von Minnovex 16

Pascual Veiga; Präsident von Aprimin 17

Mauro Valdés; Geschäftsführender Präsident der Corporación Alta Ley 18

Cornelia Sonnenberg; Hauptgeschäftsführerin AHK Chile 19

Vorwort 20

Kernthema Explorationen 24

Grundlagen 26

Vision des Kernthemas 44

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 46

Stärkung der Institutionalität in technologischen Aspekten 47

Entwicklung und Technologietransfer in der Sammlung und Speicherung geologischer Information 48

Technische Entwicklung in der Informationsnutzung 49

Entwicklung und Vertiefung assoziativer Modelle 51

Kernthema Bergbaubetrieb und –planung 52

Grundlagen 54

Vision des Kernthemas 64

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 66

Produktivitätssteigerung und Kostenreduzierung 67

Steigerung der Erzreserven 72

Umweltschutz und soziale Verantwortung 73

Mehr Sicherheit und Qualität in den Arbeitsbereichen 75

Kernthema Konzentration 80

Grundlagen 82

Vision des Kernthemas 84

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 86

Produktivitätssteigerung 87

Steigerung der Erzressourcen und –reserven 89

Kernthema Rückstände 91

Grundlagen 93

Vision des Kernthemas 104

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 106

Umgang mit der wachsenden Knappheit von Wasser und Boden 107

Sicherung der chemischen und physischen Stabilität der Rückstandsdepots .. 109

Förderung der Wandlung vom Rückstand zum Asset 113

Förderung von Inklusion und Akzeptanz der Gemeinschaft 116

Kernthema Verhüttung und Raffination 118

Grundlagen 120

Vision des Kernthemas 127

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 129

Effizienzerhöhung der Verhüttungs- und Raffinationsprozesse 130

Verringerung der Umweltbelastungen 133

Verbesserung der Arbeitsbedingungen 135

Kernthema Hydrometallurgie 137

Grundlagen 139

Vision des Kernthemas 143

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 145

Umweltschutz und soziale Verantwortung 146

Produktivitätssteigerung 147

Steigerung der Erzressourcen und –reserven 148

Kernthema Green Mining 149

Grundlagen 151

Vision des Kernthemas 157

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 160

Energie- und Wassernachhaltigkeit und CO^2-Fußabdruck 161

Nachverfolgbarkeit und Nachhaltigkeitsindikatoren 171

Minderung der gasförmigen, flüssigen und festen Emissionen 174

Sicherheit und Umwelthygiene 181

Kreislaufwirtschaft (Kreislauf-Bergbau) 183

Kernthema Kupferverwendung 185

Grundlagen 187

Vision des Kernthemas 194

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien 196

Kupferprodukte mit größerem Mehrwert 197

Forschung und Entwicklung in nicht traditionellen Industrien 198

Inhaltsverzeichnis der Grafiken, Tabellen und Abbildungen

Kernthema Explorationen

Grafik 1_ Die wichtigsten Kupfer produzierenden Länder 26

Grafik 2_ Entwicklung der weltweiten Explorationskosten und Jahresmetallpreisindex .. 29

Grafik 3_ Weltweite Explorationsausgaben für Kupfervorkommen 30

Grafik 4_ Entwicklung der weltweiten Explorationsausgaben und der Anteil Chiles 30

Grafik 5_ Explorationsausgaben in Chile nach Etappe (Millionen US$) 31

Grafik 6_ Prozentuale Verteilung der Explorationsausgaben in Chile nach Rohstoff 32

Grafik 7_ Prozentuale Verteilung des Explorationsbudgets 33

Grafik 8_ Prozentuale Verteilung des Explorationsbudgets in Chile

nach Unternehmenstyp 34

Grafik 9_ Jahr der Entdeckung und Größe der wichtigsten Cu-Au Lagerstätten in Chile

nach Region 35

Grafik 10_ Entwicklung der konzessionierten Hektar (in Millionen Hektar) 36

Abbildung 1_ Verteilung der Bergbaurechte 37

Grafik 11_ Prozentsatz der gehandelten Grundstücke nach Region

im Zeitraum 2006 – 2013 .. 38 Abbildung 2_ Schätzung der Bergbaurechte..... 40

Kernthema Bergbaubetrieb und –planung

Abbildung 1_ Kategorisierung der mineralischen Ressourcen und Reserven 54

Grafik 1_ Gesamte Kupferreserven weltweit, weltweiter Verbrauch und geschätzte

Lebensdauer 55

Grafik 2_ Entwicklung der Kupferreserven in Chile (2001-2017) 56

Grafik 3_ Entwicklung der Kupferreserven und der gemessenen

und angedeuteten Kupferressourcen in Chile (2001-2016) 57

Grafik 4_ Weltweit abgebautes Kupfererz, Zeitraum von 2000-2035 58

Grafik 5_ Projektion für Feinkupfer nach Abbauart bis 2035 59

Grafik 6_ Die größten Minen in Chile (vor allem Tagebau)

mit ihrer Feinkupferproduktion 60

Abbildung 2_ Konversionsphasen und Studienniveaus 61

Kernthema Konzentration

Grafik 1_ Betriebskosten in der Phase der Mahlung 82

Grafik 2_ Metallurgische Rückgewinnung in Funktion der Partikelgröße 83

Grafik 3_ Die Prinzipien der auf Messsensoren basierenden Vorkonzentration der Erzpartikel 88

Kernthema Rückstände

Abbildung 1_ Schema eines Absetzbeckens 93

Grafik 1_ Mineralverarbeitung und Kupferproduktion 94

Tabelle 1_ Jüngste Vorfälle in Absetzdepots weltweit 95

Abbildung 2_ Zukünftige Bergbauressourcen in der Zentralzone 99

Tabelle 2_ Zustand der Rückstandsdepots in Chile nach Region 100

Grafik 2_ Anzahl der Rückstandsdepots nach abgebautem Metall 101

Abbildung 3_ Top 10 der aktiven chilenischen Rückstandsbecken 102

Kernthema Verhüttung und Raffination

Grafik 1_ Weltproduktion von raffiniertem Kupfer nach Land: 2009 vs. 2018 120

Grafik 2_ Geografische Verteilung der Hüttenkupferproduktion 121

Grafik 3_ Kapazitäten und Technologien der chilenischen Kupferhütten 122

Tabelle 1_ Bruttomarge der Verhüttung von Kupferkonzentrat 123

Grafik 4_ Technologie der elektrolytischen Abscheidung (Dauerkathoden) 124

Grafik 5_ Technologie der elektrolytischen Abscheidung (Starterfilm) 124

Tabelle 2_ Bruttomarge der Raffinerien 125

Tabelle 3_ Vergleich der Bruttomargen der Raffinerien 130

Kernthema Hydrometallurgie

Grafik 1_ Kupfergehalt in Funktion der Partikelgrößen 139

Abbildung 1_ Vereinfachtes Flußdiagramm der Laugeprozesse, Lösungsmittelextraktion und elektrolytische Kupfergewinnung..... 140

Grafik 2_ Hydrometallurgische Kupferproduktion über Lösemittelextraktion und elektrolytische Kupfergewinnung..... 140

Grafik 3_ Kupferproduktion in Chile 140

Kernthema Green Mining

Abbildung 1_ PNUD 2016. Der Bergbau und seine Beziehung zu den SDGs 151

Abbildung 2_ Diagramm des Green Mining-Konzepts 153

Abbildung 3_ Hauptindikatoren der Nachhaltigkeit des chilenischen Bergbaus 156

Grafik 1_ Stromverbrauch und Feinkupferproduktion 161

Grafik 2_ Intensität der Energienutzung 162

Grafik 3_ Energieeinsatz in den Prozessen 163

Grafik 4_ Brennstoffverbrauch in den Bergbauprozessen 164

Grafik 5_ Stromverbrauch in den Bergbauprozessen 164

Abbildung 4_ Diagramm der Energie verbrauchenden Prozesse und die Beziehung zu steigender Nachfrage 165

Grafik 6_ Projektion der akkumulierten Nachfrage elektrischer Leistung (MW), die vom Kupferbergbau von 2018-2028 benötigt wird 165

Grafik 7_ Entwicklung des Wasserverbrauchs nach Wasserquellen..... 166

Abbildung 5_ Projektion von Entsalzungsanlagen sowie neuen und im Betrieb befindlichen Bergbauprojekten bis 2029 168

Grafik 8_ Treibhausgasemissionen und Kupfererzproduktion in Chile 175

Grafik 9_ Direkte Treibhausgasemissionen pro Tonne Feinkupfer, 2001 – 2017 176

Grafik 10_ Direkte Treibhausgasemissionen im Bergbau 177

Grafik 11_ Direkte Treibhausgasemissionen des Kupferbergbaus nach Prozess, 2001 – 2017 177

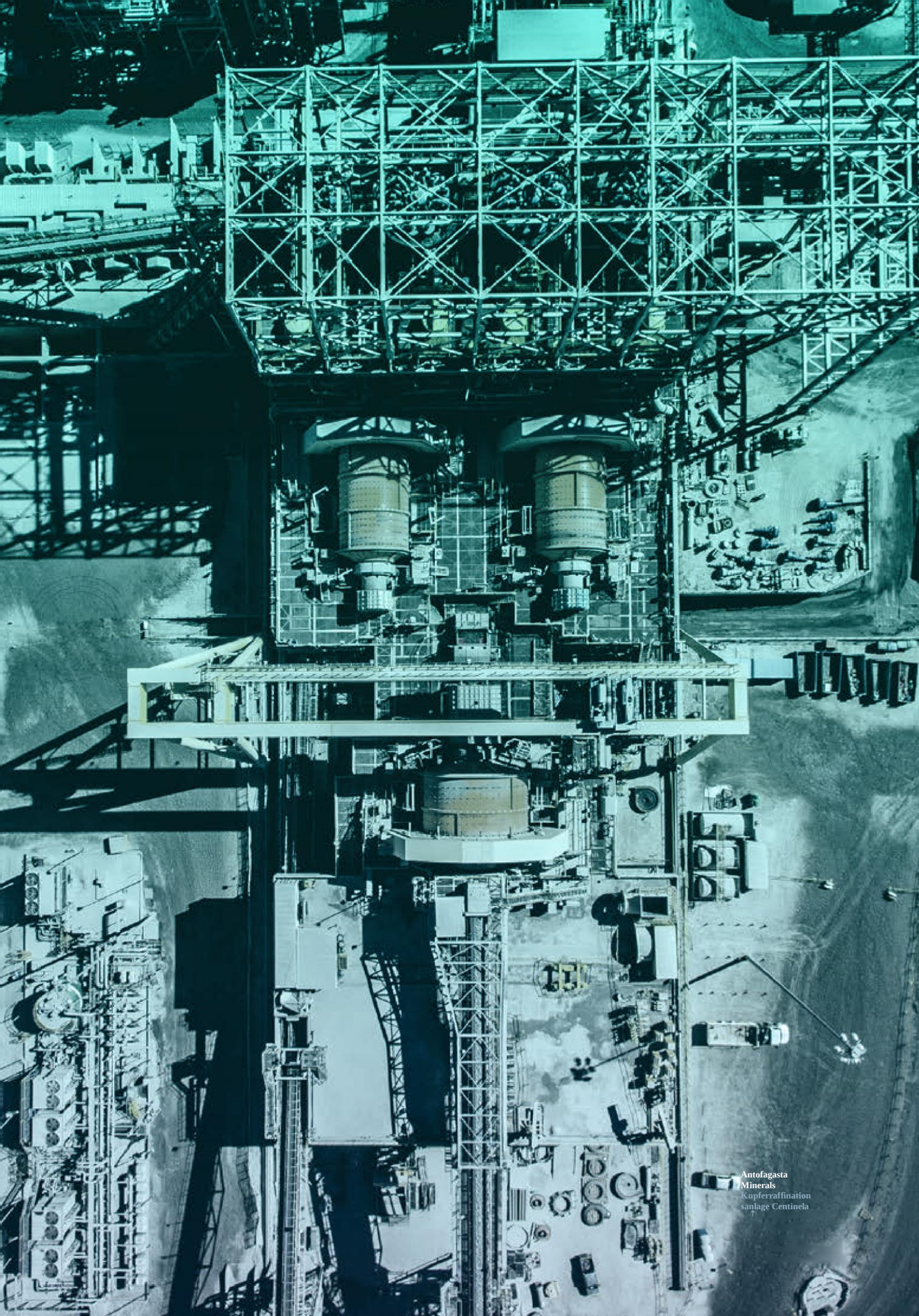
Kernthema Kupferverwendung

Grafik 1_ Die Länder mit dem höchsten Feinkupferverbrauch 2018 188

Grafik 2_ Kupferverwendungen weltweit 2018 189

Grafik 3_ Feinkupferproduktion 2009 -2018 190

Tabelle 1_ Anwendungsart/Industrie je nach 192



Antofagasta Minerals
Kupferraffination
sanlage Centinela

Baldo Prokurica

Bergbauminister

Nach der Regierungsübernahme im März 2018 haben wir uns das Ziel gesetzt, den Bergbau wieder als Motor des Wirtschaftswachstums des Landes zu positionieren, der einen Beitrag zur Entwicklung der chilenischen Familien leistet.

Bei der Arbeit an diesem Thema haben wir gesehen, dass der Bergbau vor neuen Herausforderungen wie Internetsicherheit, Digitalisierung der Minen, Wiederaufbereitung von Rückständen und Sulfidlaugung steht. Außerdem muss der chilenische Bergbau seine Produktivität erhöhen und die Betriebskosten senken.

In diesem Kontext und im Bewusstsein der großen technologischen Transformationen, die uns die Entwicklung des Bergbaus 4.0 abfordert, schätzen wir als Regierung des Präsidenten Sebastián Piñera sehr, dass die Corporación Alta Ley - mit Unterstützung unseres Ministeriums - die Version 2.0 der technologischen Roadmap des Bergbaus vorlegt.

Ebenso möchten wir die Arbeit, den Einsatz und das Engagement von mehr als 100 Personen aus 40 Institutionen hervorheben, die an der Aktualisierung und Überarbeitung der Herausforderungen des nationalen Bergbaus beteiligt gewesen sind, um Prioritäten zu setzen und um über die Aufnahme neuer Themen zu entscheiden.

Wir begrüßen, dass mit den neuen Verwendungen des Kupfers, dem Green Mining und den Explorationen drei neue Themenfelder aufgenommen worden sind, was zeigt, dass die vorliegende Veröffentlichung sich weiterentwickelt und den Bedürfnissen der Industrie gerecht wird. Dazu zählt die Förderung der Kupfergewinnung mit geringerer Umweltbelastung oder die Unterstützung der Exploration, um eine langfristige Projektion für diesen Wirtschaftszweig zu sichern.

Unser Glückwunsch geht an die Corporación Alta Ley, die federführend für die technologische Roadmap verantwortlich ist, die sich einem produktiveren, saubereren und umweltfreundlicheren Bergbau verschrieben hat, der den rechtlichen Rahmen respektiert. Sie können auf dem Weg zum Bergbau der Zukunft auf unsere Unterstützung zählen.

Andrés Couve

Minister für Wissenschaft, Technologie, Wissen und Innovation

Der Rohstoffreichtum Chiles ist eine Säule der Innovation und der weltweiten Technologieentwicklung - vom Kupfer mit seinen vielfältigen Anwendungen als elektrischer Leiter oder in der Bauindustrie bis zum Lithium, dem Schlüsselelement für die Energiespeicherung in Batterien, die mit den neuen sauberen Technologien aufgeladen werden. Dazu ist der Bergbau die Grundlage der chilenischen Wirtschaft und eng mit unserer Geschichte als Nation verbunden.

Aufgrund der Relevanz dieser Ressourcen für Chile und die Welt ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Wachstum des Bergbaus von den technologischen Neuerungen flankiert wird, die eben dieser Industriesektor möglich gemacht hat. Ebenso ist es fundamental, dass der chilenische Bergbau schrittweise mehr nationale Forschung und Innovation einbezieht. Nicht nur um Kapazitäten zu schaffen und zu stärken, die helfen, die Sicherheit und das Wohlergehen der Bergleute zu garantieren, die Prozessabläufe zu optimieren, den Wasserverbrauch zu verringern, die Produktivität zu erhöhen und die Kosten zu senken, sondern auch um einen Beitrag zur Schaffung von Mehrwert für unsere Wirtschaft zu leisten. Mit dem Fortschreiten des Abbauprozesses liegen die Rohstoffe immer tiefer und der Abbau verteuert sich. Um diese Entwicklung zu begleiten, müssen die Werkzeuge immer präziser und komplexer werden. Neue Technologien erlauben die Gewinnung von Rohstoffen, die sonst unwirtschaftlich wäre.

Vor allem muss sich der Bergbau aber in einem Rahmen entwickeln, der vom Respekt vor der Umwelt und dem Umweltschutz geprägt ist. Als Land haben wir uns das Ziel gesteckt, vor 2050 CO^2-neutral zu sein. Die Entwicklung unseres Bergbaus muss dieser ehrgeizigen Verpflichtung gegenüber der Umwelt entsprechen. Im Bereich des *Green Minings* hat Chile vielleicht mehr als jedes andere Land eine einzigartige Chance: In den Wüsten im Norden des Landes vereinen sich Erzvorkommen höchster Qualität mit den größten Flächen zur Produktion von Wind- und Sonnenenergie, mit deren Hilfe der Energiebedarf größtenteils gedeckt werden kann.

Dazu sind aktualisierte und passende Lösungen notwendig, die mit dem Entwicklungsplan des Landes und dem Chile, welches wir mit allen Bürgern errichten wollen, abgestimmt sind. Bedingung hierfür ist die kontinuierliche Überprüfung und Analyse der Herausforderungen, denen sich der Bergbau zu stellen hat. In diesem Rahmen wird mit der Roadmap der Bergbautechnologie ein Werkzeug der dynamischen Diagnose zur Verfügung gestellt, das wesentlich ist, um der Geschwindigkeit gerecht zu werden, mit der sich neue Herausforderungen präsentieren und technologische und soziale Veränderungen vollziehen.

Ricardo Irarrázabal

Bergbau-Vizeminister

Chile ist ein stark vom Bergbau geprägtes Land: Er hat einen Anteil von 10 % des BIP, 55 % der Exporte und 18 % der Auslandsinvestitionen. Dementsprechend stehen wir vor der Herausforderung, unsere Produktivität stetig zu erhöhen. Ein Weg hierzu ist die Innovation, mit deren Hilfe die Produktionsprozesse, das Management von Umweltfaktoren, Arbeitskräften etc. optimiert werden können.

Der Aufbau eines soliden Ökosystems, in dem jeder Akteur eine strategische Rolle spielt, ist der erste Schritt, weil dort die Grundlage und der passende Raum für Innovationsentscheidungen geschaffen werden. Nicht selten präsentieren sich unvorhergesehene Herausforderungen im Verlauf von Änderungsprozessen. Die Robustheit des Ökosystems ermöglicht die Umsetzung eines adäquaten Änderungs- und Innovationsmanagements.

Wie errichtet man dieses Ökosystem für den Bergbau? Dazu gehören mehrere grundlegende Faktoren. Als erstes benötigen wir eine genaue Bestandsaufnahme der Bedürfnisse der Industrie, die in den kleinen, mittleren und Großbergbau unterteilt ist. Als nächstes bedarf es der zeitnahen Schaffung von Räumen und Netzwerken für die Zusammenarbeit zwischen den Anbietern und Entwicklern von Innovationen und den Endnutzern. Angesichts der Tatsache, dass ein Bergmann nach Daten von Datalab pro Jahr nur 0,02 Verbesserungsvorschläge macht, ist es fundamental, dass die Industrie die offenen Innovationsprozesse fördert. Gleichzeitig sind die Universitäten sowie das Personalmanagement der Industrie gefordert, die Ausbildung des Humankapitals an die aktuellen Zeiten anzupassen, wo unter anderem die Prozessautomatisierung und das Internet der Dinge der Produktion ihren Stempel aufsetzen. Nach dem Aufbau des Ökosystems, das sich natürlich in ständiger Wandlung befindet, wird die Entscheidungsfindung vereinfacht und der Änderungsprozess integral und nachhaltig vollzogen.

Auf der Suche nach der Nachhaltigkeit durch Innovationen in allen Prozessen müssen wir mit allen Akteuren des Sektors zusammenarbeiten, um uns einer der wichtigsten aktuellen Herausforderungen des chilenischen Bergbaus zu stellen: dem Übergang vom Rohstoffexport zum Export von Wissen und Erfahrung. Eben diese Kenntnisse müssen die zukünftigen Generationen nutzen, um die Produktivität zu steigern und die Bergbautradition, für die Chile weltweit bekannt ist, fortzuführen.

Pablo Terrazas

Geschäftsführender Vizepräsident von Corfo

Der Bergbau ist einer der wichtigsten Motoren unserer Wirtschaft, der einen Anteil von 10 % des BIP produziert und vielen chilenischen Familien Arbeitsplätze und Entwicklungschancen bietet.

In den letzten Jahren hat er sich jedoch einer Reihe von Herausforderungen stellen müssen, zu denen die im internationalen Vergleich niedrige Produktivität gehört. Die Diagnose ist eindeutig und gleichzeitig Teil der Lösung.

Eine der bedeutendsten Verpflichtungen der Regierung des Präsidenten Sebastián Piñera ist die vollständige digitale Transformation des Staates. Doch dazu muss der Privatsektor die Initiative begleiten. Sowohl im öffentlichen als auch im Privatsektor ist mit der Entwicklung neuer Technologien ein bedeutender kultureller Wandel einhergegangen, der zum Teil komplex, aber absolut notwendig ist.

Sich dieser bedeutenden Herausforderung zu stellen ist somit fundamental, um unsere Wirtschaft zu stärken und dezidiert die Entwicklung innovativer technologischer Lösungen voranzutreiben, die die nationale Wettbewerbsfähigkeit und Produktivität steigern und die Lebensqualität der Chilenen und Chileninnen immer weiter verbessern.

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass eine so wichtige Industrie wie der Bergbau auf den Zug der digitalen Transformation aufspringt. Dazu gilt es, die Herausforderungen und Chancen in Forschung und Entwicklung zu identifizieren und mehr Werkzeuge aus Wissenschaft und Innovation in die Produktionsprozesse zu integrieren, um so technologische Kapazitäten im Land aufzubauen und die Basis unserer Wirtschaft unter Federführung einer immer weiter entwickelten Industrie auszubauen.

Corfo ist überzeugt, dass es viele Gründe gibt, die Revolution 4.0 auf dem Weg zu einem immer nachhaltigeren Bergbau voranzutreiben. Dazu gehören unter anderem positive Umweltauswirkungen, Produktivitätsvorteile, Senkung der Betriebskosten, effizienterer Energieeinsatz, mehr Sicherheit und höhere Qualität der Arbeit auf den Baustellen.

In diesem Rahmen möchten wir ausdrücklich darauf hinweisen, wie wichtig die Bemühungen und die Arbeit von Alta Ley in der Weiterentwicklung von Forschung, Entwicklung und Innovation innerhalb der Wertschöpfungskette im Bergbau sowie in der Stärkung und Förderung der öffentlich-privaten Zusammenarbeit in diesem Bereich gewesen sind.

Zweifelsohne wird die neue Ausgabe der Roadmap für Bergbautechnologie helfen, innovative Lösungen für die aktuellen Probleme des Sektors zu identifizieren und neue Technologien für einen nachhaltigeren und in die Zukunft gerichteten Bergbau zu entwickeln.

SONAMI

Diego Hernández

Präsident der Nationalen Bergbaugesellschaft Sonami

Die Roadmap für Bergbautechnologie 2015-2035 aus dem Jahr 2016 ist zu einem Referenzwerk für die Umsetzung innovativer und unternehmerischer Kooperationsvorhaben im Bergbau geworden. Wie bei allen lebendigen Prozessen ist die nun vorgelegte Aktualisierung von größter Bedeutung für die Entwicklung des Landes.

Die Nationale Bergbaugesellschaft *Sonami* schätzt den öffentlich-privaten Dialog, der sich im Bergbauökosystem im Rahmen der Aktualisierung der Roadmap ergeben hat und welcher ermöglicht, die Forschungs- und Innovationsbemühungen in der Industrie an eine langfristige Perspektive zu koppeln. Dieser Dialog schafft eine authentische soziale Innovation, mittels derer man nicht nur die spezifischen langfristigen Herausforderungen identifiziert, die in ein Forschungs-, Entwicklungs- und Innovations-Portfolio mit hohem Potenzial übersetzt werden können, sondern er orientiert auch die von der Industrie benötigten politischen Maßnahmen.

In der vorliegenden Aktualisierung der Roadmap für den Bergbau möchten wir auf die Aufnahme zweier neuer bergbauspezifischer Kernthemen (Exploration und neue Kupferanwendungen) und eines neuen transversalen Kernthemas (*Green Mining*) hinweisen. Das letzte Kernthema ist eng mit den Bemühungen des Bergbaus zur Minderung der Treibhausgasemissionen unter anderem durch Energieeffizienzmaßnahmen und die Suche nach der Substitution fossiler Brennstoffe verbunden.

In Chile sind alle Bedingungen zur Stärkung des Bergbaus als Hauptantriebskraft der technologischen Innovation und als Generator produktiver Wertschöpfungsketten gegeben. Zur Erreichung dieses Ziels ist die angewandte Forschung im Bergbau zu fördern, die Kapazitäten in Forschung und Entwicklung im Bergbau müssen verstärkt werden, und es sind Anreize für die Entwicklung von wissens- und technologieintensiven Zulieferern zu schaffen. Die Version 2.0 der technologischen Roadmap des Bergbaus ist ein großer Beitrag zur Erreichung dieses Ziels.

Joaquín Villarino

Geschäftsführender Präsident des Bergbaurats

Der Herausforderung der Integration neuer Technologien haben wir als Industrie nicht erst heute angenommen. Seit Jahrzehnten spielt ihr Einsatz eine wichtige Rolle im Wachstum des Bergbaus. Die Bedeutung neuer Technologien zeigt sich sowohl in der Prozessoptimierung, wie in der Erhöhung von Effizienz, Nachhaltigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und in der Förderung der Inklusion. Der technologische Fortschritt hat auch die Einsatzmöglichkeiten der Mineralien erweitert. Das zeigt sich beispielsweise in der Verwendung des Kupfers - dank seiner anti-bakteriellen Eigenschaften - in den Bereichen der Gesundheit und der Textilindustrie und aktuell in der Entwicklung der Elektromobilität und der Energiespeicherung.

Der für die Industrie vorteilhafte Einsatz neuer Technologien hat aber auch eine Diskussion in der Arbeitswelt entfacht, der wir uns nicht entziehen können. Es bestehen gewisse Ängste und Mythen, die die Technologie für den Verlust von Arbeitsplätzen verantwortlich machen, da Menschen durch Maschinen ersetzt werden. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass diese Stimmen nicht aus dem Bergbau kommen. Vielmehr ist deutlich gemacht worden, dass es eine Anpassung und Aktualisierung in der Ausbildung der heutigen und zukünftigen Arbeitskräfte geben wird, und diese Thematik ist im Laufe der letzten 7 Jahre vom Bergbaukompetenzrat (CCM) analysiert worden.

Die Industrie ist diesem Thema gegenüber nie gleichgültig gewesen. Zu Beginn des laufenden Jahres hat der CCM eine vorläufige Studie mit dem Titel *„Auswirkungen der neuen Technologien auf die im Bergbau erforderlichen Kompetenzen"* vorgelegt, in der aufgezeigt wird, wie der Einsatz neuer Technologien die Anforderungen der Industrie an die Fähigkeiten der Arbeitskräfte verändern wird. Das Thema wurde auch in unserem jährlichen Seminar *„Automatisierung und Technologie: Chancen und Herausforderungen"* behandelt, auf dem der Ökonom aus Harvard Geoff Colvin darüber sprach, wie die Unternehmen und die Menschen sich an eine zunehmend technologisierte Welt anzupassen haben. Sowohl die Schlüsse, die wir im CCM gezogen haben, wie auch die in unserem Seminar gewonnenen Erkenntnisse, verweisen darauf, dass eine adäquate und an den Fortschritt der Technologie angepasste Ausbildung wesentlich ist, um den wachsenden Einsatz von Innovationen zu flankieren.

Die Erfahrung hat uns gezeigt, dass man sich allen Herausforderungen für die Industrie gemeinschaftlich und unter Einbeziehung der kurz-, mittel- und langfristigen Perspektive stellen muss. Das genau ist die Tugend, die die Roadmap von Beginn an ausgezeichnet hat. Die erste Ausgabe hat uns vor die Herausforderung gestellt, die Industrie nachhaltiger zu gestalten und bei der Überwindung bestimmter Klüfte partnerschaftlich zu arbeiten. Heute haben wir uns in einer Zusammenarbeit von 100 Personen und 40 verschiedenen Institutionen auf den technologischen Wandel vorzubereiten. Als Bergbaurat schätzen wir die geleistete Arbeit und unterstützen die Initiative, den Inhalt so regelmäßig wie möglich zu aktualisieren. Das ist erforderlich sowohl für die Bergbauindustrie, wie auch für die nachhaltige Entwicklung des Landes.

Andrés Costa

Präsident von Minnovex

Der Aktualisierungsprozess der Roadmap ist von großem Wert, da die Zusammenarbeit ermöglicht hat, die Positionen der verschiedenen Akteure der Industrie angesichts der Herausforderungen für den sich im ständigen Wandel befindlichen Bergbau zusammenzuführen, und weil er vor allem den lokalen Zulieferern die Chance bietet, die realen Problematiken zu erkennen und die Entwicklung ihrer technischen Lösungen darauf abzustimmen. Wir hoffen, dass die Roadmap in naher Zukunft über Finanzierungsmechanismen für die Ausführung von Projekten mit öffentlicher und privater Unterstützung verfügen wird.

Pascual Veiga

Präsident von Aprimin

Aprimin unterstützt über die Logistik und das Kapital von CIMM mit großem Interesse das Programm Alta Ley, das eine bessere Entwicklung der Innovationsfähigkeit ermöglicht. Vor allem die Innovation bei den Bergbauzulieferern stellt die wesentliche Herausforderung für die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Landes und der Nachhaltigkeit des Sektors dar. Daher ist die Technologische Roadmap für den Bergbau ein wichtiges Werkzeug zur Erlangung dieses nationalen Ziels.

Mauro Valdés

Geschäftsführender Präsident der Corporacion Alta Ley

Als wir 2015 das Nationale Bergbauprogramm Alta Ley initiierten, hatten wir eine klare Zielsetzung: Der Wandel Chiles von einem Rohstoffproduzenten zu einem Bergbau exportierenden Land sollte beschleunigt werden. Dazu bedurfte es der Zusammenführung von Akteuren aus dem öffentlichen und privaten Sektor, der Überwindung politischer und ideologischer Barrieren und der Erarbeitung einer von allen geteilten Vision der Dinge, die das Land zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit des Bergbaus benötigt, ihn aber gleichzeitig zu einem Hebel für die nationale Entwicklung macht.

Der Grundstein war die Veröffentlichung der ersten Ausgabe der Technologischen Roadmap des Bergbaus im Jahr 2016, in der ein klarer und einvernehmlicher Strategieplan für den Umgang mit den größten Herausforderungen des Kupferbergbaus aufgestellt wurde. Dahinter stand das Ziel, unsere Position als Weltmarktführer zu bewahren, Technologie, Unternehmen, Innovation und Kooperation zu entwickeln, die unsere Wettbewerbsfähigkeit nicht nur im Bergbau steigern, sondern in allen Dingen, die wir lernen und lösen, einschließlich der auf diesem Weg geschaffenen Produkte.

Heute, wo die neuen Generationen mit aller Kraft umgehende Maßnahmen zur Minderung der Umweltbelastungen aller wirtschaftlichen Aktivitäten fordern, zweifelt niemand mehr an der Richtigkeit dieses Weges und dass man das Handeln beschleunigen und vertiefen muss. Das spiegelt sich in der neuen Ausgabe der Roadmap wieder. Es ist ein lebendiges Dokument, das sich zusammen mit den neuen Herausforderungen, vor die wir als Gesellschaft und Industrie gestellt sind, weiterentwickeln muss. Während in der ersten Version der Roadmap der höchste Strompreis des Kontinents und aller Bergbauländer als größte Herausforderung ausgemacht wurde, eröffnet heute die Erzeugung erneuerbarer Energien einen enormen Raum für Innovationen, um die Kosten dieses für die Industrie so bedeutenden Produktionsfaktors zu senken und die Schnittstelle zwischen Bergbau und Wind- und Sonnenenergie und Geothermie durch Forschung, Entwicklung und Innovation aufzuwerten. Deshalb betont die mit allen Akteuren des Ökosystems partizipativ erarbeitete Roadmap 2019 deutlich die Chancen, die sich dem emissionsarmen Bergbau und im Allgemeinen dem *Green Mining* bieten, wenn wir andere Dimensionen mit einbeziehen, in denen Chile schon heute als weltweit führend anerkannt ist.

Nach vier Jahren an der Spitze dieses Projekts und kurz vor dem Ende meiner Präsidentschaft in Alta Ley verleihe ich meiner Überzeugung Ausdruck, dass die Zukunft des Bergbaus nicht durch die Rivalität zwischen industrieller Investition und der Umwelt oder zwischen Produktivität und Nachhaltigkeit geprägt sein wird. Diese Dimensionen schließen sich gegenseitig nicht aus und sind auch in keiner Weise widersprüchlich. Im modernen Bergbau sind es zwei Seiten derselben Medaille, und so hat es die chilenische Kupferindustrie auch schon häufig zum Ausdruck gebracht. Der gesamte Sektor mit seinen öffentlichen und privaten Akteuren, den Industriellen und Akademikern, Unternehmern und Bürgern, setzt definitiv auf das Zusammenspiel von Nachhaltigkeit, Wissen, Technologie und Innovation, verbunden mit Investitionen, Wachstum und Produktivität, was sich in der vorliegenden Roadmap und den von ihr dargestellten und geförderten Projekten spiegelt. Wie könnte es auch anders sein: In der Ära des „Zwecks“ als Schlüssel jeder unternehmerischen Strategie, versetzt uns die technologische und industrielle Revolution, die wir erleben, in eine überraschend vorteilhafte Lage, um den Fortschritt im Bergbau mit einem übergeordneten Ziel zu vereinen: Nämlich Chile von einer auf Rohstoffen basierenden Wirtschaft in eine Wissensökonomie zu verwandeln.

Ohne Kupfer- und Lithiumbergbau gibt es keine Elektromobilität, ebenso wenig wie es ohne die für die Entwicklung notwendigen Mineralien keinen technischen Fortschritt oder erneuerbare Energien geben kann. In diesem Kontext ist die Innovation nicht nur ein Plus, sondern der Sauerstoff der Industrie. Daher laden wir alle Akteure des Ökosystems der Innovation im Bergbau - und insbesondere die Entwickler neuer Unternehmungen und Technologien - ein, einen Beitrag zu diesem Wandel zu leisten und den von der neuen Ausgabe der Roadmap beschriebenen Weg hin zu einem intelligenten, inklusiven und nachhaltigen Bergbau gemeinsam zu gehen.

Cornelia Sonnenberg

Hauptgeschäftsführerin der AHK Chile

Im Jahr 2013 unterzeichneten Deutschland und Chile eine Vereinbahrung zur engeren Zusammenarbeit im Bereich Bergbau und Rohstoffe Diese stellte erste Weichen für eine langfristige Kooperation. Das Kompetenzzentrum Bergbau und Rohstoffe der AHK Chile schuf in diesem Rahmen über die letzten Jahre hinweg wichtige Grundlagen und baute Netzwerke und Expertise für eine Partnerschaft auf Augenhöhe auf. So agieren Chile und Deutschland auch aus der Gemeinsamkeit heraus, stark vom Bergbau geprägt zu sein. Auch wenn in Deutschland mittlerweile die Rohstoffproduktion im eigenen Lande abnimmt, bleibt das Land Sitz vieler innovativer und internationaler Bergbauzulieferer, die herausragende Lösungen für den Bergbau- und Rohstoffsektor der Zukunft entwickeln.

Diese binationale Partnerschaft bietet dabei in vielen Themenfeldern großes Entwicklungspotenzial und Raum für Synergien. Chile ist auf globaler Ebene eines der bedeutendsten Rohstoffländer und ist aufgrund seiner einzigartigen geographischen Bedingungen nahezu prädestiniert, um eine Vorreiterrolle im Bereich der erneuerbaren Energien einzunehmen und somit auch den die globale Bergbauindustrie grundlegend zu transformieren. Deutschland, Wiege der Industrie 4.0, ist darüber hinaus ein ausgezeichneter technologischer Partner für effiziente und damit ressourcenschonende Prozesse.

In diesem Kontext gründete die AHK Chile Ende 2018 mit der Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie das deutsch-chilenische Netzwerk Eco Mining Concepts. Eco Mining Concepts bietet eine Plattform für deutsche und chilenische Akteure, Unternehmen wie Institutionen, die in engeren Kontakt treten, sich auszutauschen und einen Wissenstransfer ermöglichen wollen und gemeinsame Projekte etablieren möchten.

Mit der Übersetzung der von der Organisation Alta Ley für Chile entwickelten Roadmap 2.0 möchten wir auch für Akteure aus Deutschland einen Zugang zu Informationen über aktuelle Tendenzen im chilenischen Bergbau ermöglichen. Damit hoffen wir nicht nur dabei zu helfen Wissenslücken zwischen beiden Ländern zu schließen, sondern auch konkrete Themenfelder für eine partnerschaftliche Zusammenarbeit aufzuzeigen.

Vorwort

Die Corporación Alta Ley ist eine privatrechtliche, gemeinnützige Institution, die aus der Fusion des Nationalen Bergbau-Programms Alta Ley (eine öffentlich-private Initiative der Wirtschaftsförderungsgesellschaft CORFO, dem Wirtschaftsministerium und dem Bergbauministerium) und dem Bergbau- und Metallurgieforschungszentrum (CIMM) hervorgegangen ist. Die Zielsetzung des Programms ist es, einen auf Wissenschaft und Technologie gegründeten Beitrag zur Entwicklung der Waren- und Dienstleistungsindustrie zu leisten, um sich den Herausforderungen der Produktivität und Nachhaltigkeit im Bergbau zu stellen. Ein deutlicher Schwerpunkt wird dabei auf die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie gelegt.

Gegenwärtig steht der Bergbau in Chile vor Herausforderungen, die sich unter anderem aus dem abnehmenden Erzgehalt, zunehmender Tiefe der Minen, größerer Unreinheiten im Konzentrat und strikteren Umweltrichtlinien ergeben, wodurch die Produktionskosten steigen und die Produktivität sinkt. Allerdings bieten sich auf nationaler und internationaler Ebene immer mehr Gelegenheiten und Technologien für die Dekarbonisierung der Energiematrix, den effizienten Ressourceneinsatz, das Recycling von Industrierückständen und -abfällen und der Sicherheit der Arbeiter.

In diesem Kontext ist vom Nationalen Bergbauprogramm Alta Ley die Technologische Roadmap des chilenischen Bergbaus 2015 - 2035 veröffentlicht worden, um dem Ökosystem der Innovation und seinen Akteuren die wichtigsten Herausforderungen für unseren Wirtschaftssektor aufzuzeigen, um so den Initiativen des Sektors eine Orientierung zu geben; um die Kooperation zwischen den Bergbauunternehmen im Umgang mit denen von ihnen geteilten Herausforderungen zu fördern, und um den Staat bei der Investition öffentlicher Gelder in Innovation und Entwicklung zu unterstützen, damit Forscher, Zulieferer und Unternehmer ihre Bemühungen orientieren können, um so ein Innovationsökosystem der Weltklasse zu schaffen, das die Weltklasseindustrie des chilenischen Bergbaus unterstützt.

Im Rahmen der Roadmap sind eine Reihe von Programmen und Projekten mit der Beteiligung von Zulieferern, der Industrie, den Universitäten und des Staates entwickelt worden, die sich einigen Herausforderungen im Bereich der Produktivität und der Nachhaltigkeit im Bergbau stellen. Die Zielsetzung dieser Programme und Projekte ist die Bearbeitung der für den chilenischen Bergbau dringendsten Herausforderungen sowie die Schaffung technischer, unternehmerischer und kollaborativer Kapazitäten zur Förderung des Zusammenwirkens der beteiligten Akteure.

Zu den bedeutendsten Initiativen im Rahmen der Roadmap zählen: Pilotzentren, Plattform für offene Bergbauinnovation - Expande, Transferplattform für technische Bergbauausbildung - Eleva, Programm Tranque, Projekte für die Verarbeitung und Rückgewinnung von Wertstoffen aus Bergbaurückständen, Programm zur Interoperabilität im Bergbau und Wasserstoffprojekte zur Substitution von Brennstoffen in Förderfahrzeugen und mobilen Bergbaugeräten.

Das neue Szenarium, geprägt von sich weltweit mit Macht ausbreitender Megatendenzen, sowie die Notwendigkeit, den Bergbau in eine nachhaltige Industrie umzuwandeln, haben uns veranlasst, eine tiefgehende Analyse durchzuführen und in der vorliegenden Roadmap die Prioritäten zu verlagern, um neue kollaborative und effiziente Projekte zur Schaffung von mehr Produktivität und Nachhaltigkeit zu entwickeln. So entstand die Idee, an der Roadmap 2.0 zu arbeiten, die als wichtigste Neuerung drei neue Kernthemen aufnimmt: neue Verwendungszwecke für Kupfer, *Green Mining* und Exploration.

Doch zur Entwicklung eines pulsierenden und effizienten Ökosystems gehören unbedingt auf Technologie basierte Bergbauzulieferer, die ihren Beitrag zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der nationalen Industrie leisten und durch die Produktion und den Export von bergbaubezogenen Gütern, Dienstleistungen und Technologien die Bedingungen für die beschleunigte Diversifizierung und Technifizierung unserer Wirtschaft schaffen. Hierbei spielen die Bergbauunternehmen eine wesentliche Rolle, indem sie bei den Zulieferern die notwendige Nachfrage für die Entwicklung von Lösungen erzeugen, mit denen sie ihre Probleme lösen und sich ihren Herausforderungen stellen können. Die Zulieferer ihrerseits kapitalisieren die entwickelten Lernprozesse, Kenntnisse und Fähigkeiten, die ihr Wachstum beschleunigen und den weltweiten Export der Güter, Dienstleistungen und Technologien ermöglichen.

Der Bergbau kann einer der Innovationsmotoren des Landes werden und muss dringend die Technologieentwicklung zu einem fundamentalen Bestandteil seiner Aktivitäten machen. Nur so werden wir in der Lage sein, die bis zum Jahr 2035 für den Bergbau hochgesteckten Ziele zu erreichen: Eine durchschnittliche Jahresproduktion von 7,5 Millionen metrischen Tonnen; 80 % der Produktion im ersten Quartil der Produktionskosten auf weltweiter Ebene; 250 Weltklasse-Zulieferer und 4 Milliarden US$ Exporte bergbaubezogener Güter und Dienstleistungen.

Die vorliegende Ausgabe der Roadmap präsentiert die neuesten technischen Entwicklungen, stellt sich den aktuellen Forderungen, die die Gesellschaft infolge der großen Veränderungen des sozialen Kontextes stellt (insbesondere im Zusammenhang mit einer inklusiveren und nachhaltigeren Wirtschaft) und analysiert neue technologische Entwicklungen, in denen sich die wachsende Reife unseres Innovationsökosystems spiegelt. Wir laden Sie ein, Teil dieses Projekts zu sein und weiter gemeinsam und koordiniert den Weg der Konstruktion eines besseren Bergbaus für ein besseres Land zu gehen.

Antofagasta
Minerals
Minera
Los Pelambres

01
Kernthema Explorationen

Codelco
Division Andina

↑

Grundlagen

Chile und die Herausforderung, neue Kupferressourcen und -reserven zu finden

Im Jahr 2018 war Chile mit einem Anteil von 28 % des weltweiten Produktionsvolumens weiterhin der weltweit größte Kupferproduzent, gefolgt von Peru und China, die respektive 12 % und 7 % produzieren.

Bei der Produktion von Feinkupfer ist Codelco mit 1,8 Millionen Tonnen pro Jahr das weltweit größte Bergbauunternehmen.

Grafik 1_ Die wichtigsten Kupfer produzierenden Länder

Quelle: Cochilco (2019)

Die chilenische Produktion ist mit rund 5,5 Millionen Tonnen in den letzten 15 Jahren relativ stabil gewesen. Der Anteil an der weltweiten Produktion hat jedoch seit dem Jahr 2004, als ein Marktanteil von 36,9 % der Weltkupferproduktion erzielt wurde, immer weiter abgenommen. In diesem Kontext hat der peruanische Bergbau im selben Zeitraum seine Marktposition deutlich von 8,1 % auf 12 % verbessert[1].

Aufgrund der Reduzierung neuer Projekte und dem durch die langjährige Ausbeutung der Minen abnehmenden Erzgehalt, hat Chile einen prozentualen Rückgang des Weltmarktanteils in der Kupferproduktion zu verzeichnen.

1 Cochilco - Aktuelles Explorations- und Finanzierungspanorama, 2015.

Exploration

Die Exploration ist eine wirtschaftliche Aktivität zur Entdeckung neuer Erzvorkommen oder zur Erweiterung schon bekannter Lagerstätten. Erstere wird in der Regel als *Greenfield*-Exploration bezeichnet, während letztere *Erweiterungsexploration* genannt wird.

In beiden Fällen handelt es sich um das erste Glied in der Wertschöpfungskette der Industrie, da es um die Identifizierung neuer Ressourcenquellen geht, die von den Produzenten ausgebeutet werden können.

Die Exploration ist eine Hochrisikoaktivität, da die zur Identifizierung neuer Lagerstätten zu tätigende Investition beträchtlich, und die Wahrscheinlichkeit ein für die Ausbeutung rentables Erzvorkommen zu finden, relativ gering ist. Die Literatur verzeichnet für die chilenische Realität eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 1:1.000[2].

Die *Greenfield*-Exploration ist mit deutlich mehr Risiko verbunden als die Erweiterungsexploration, da die Hinweise auf die Existenz einer Lagerstätte sehr viel weniger deutlich sind, als bei schon identifizierten Vorkommen, die erweitert werden sollen.

Die früheste Etappe der Exploration nennt man *Grassroot*. Dabei handelt es sich um eine großflächige Exploration mit sehr wenig Eingriff ins Gelände. Diese Art von Exploration gleicht einem Blindflug ohne jeden Hinweis auf die Existenz einer Lagerstätte. Die weiterführenden Etappen gründen sich auf gewisse geologische Funde, die auf ein Erzvorkommen hindeuten könnten. Je mehr Hinweise es auf die Existenz einer Lagerstätte gibt, desto fortgeschrittener ist das Projekt und desto geringer das Risiko.

Da die Exploration Zugang zu neuen Lagerstätten schafft, ist sie von wesentlicher Bedeutung für die Nachhaltigkeit des Bergbaus in unserem Land. Angesichts der bestehenden Investitionsintensität und des durch die geringen Erfolgsaussichten hohen Risikos, benötigt die Industrie Anreize und die Reduzierung von Eingangsbarrieren, um die Explorationsaktivität zu beleben.

2 Richard Schodde, MinEx Consulting, 2015.

Chile und die Suche neuer Lagerstätten

Nach Daten der US-amerikanischen Geologiebehörde (USGS) besitzt Chile gegenwärtig 21 % der bekannten Kupferreserven. Damit verfügt das Land über einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil als Investitionsempfänger für die Exploration von Kupferlagerstätten. Allerdings müssen die Bedingungen zur Nutzung dieses Vorteils dringend verbessert und modernisiert werden.

Die Verbesserung dieser Bedingungen ist durch die Umsetzung politischer Maßnahmen gegeben, die den Explorationsmarkt insbesondere im Bereich neuer Lagerstätten beleben. Dazu zählen vor allem Initiativen, die die zeitnahe Ausbeutung der Vorkommen, die Beschaffung, Veröffentlichung und Verfügbarkeit geologischer Informationen fördern.

Ein wesentliches Element für die wirtschaftliche Nachhaltigkeit des Bergbaus ist die Fähigkeit der Industrie und des Staates, die ausgebeuteten Ressourcen zurückzuführen. Die Rohstoffe sind zwar nicht erneuerbar, aber es besteht das Potenzial, neue Lagerstätten zu entdecken, die selten offen liegen und es deshalb teurer und komplexer Arbeiten bedarf, um sie zu identifizieren. Somit ist vor allem die Exploration neuer Lagerstätten von fundamentaler Bedeutung für die Sicherung der Nachhaltigkeit des Bergbaus[3].

Explorationsbudgets weltweit und in Chile

Die Explorationskosten reagieren auf die Metallpreise und scheinen eng mit ihren Zyklen verbunden zu sein. Diese Situation ist nicht ideal, da die Explorationsergebnisse langfristig betrachtet werden, und daher sollten sich die zu treffenden Entscheidungen nicht auf einer kurzfristigen Sichtweise gründen, die dem Zyklus der Metalle entspringt. Nach vier Jahren stetiger Reduzierung der globalen Explorationskosten für Buntmetalle[4], gab die Industrie im Jahr 2018 Zeichen der Erholung mit geschätzten Ausgaben von 10,1 Milliarden US$[5], ein Wachstum von 21,6 % im Vergleich zu 2017, wodurch der zyklische Charakter der Explorationsinvestitionen und die tendenzielle Übereinstimmung mit den Metallpreisen aus dem Jahrespreisindex bestätigt werden.

Im Jahr 2018 ist der seit 2011 steigende Anteil der Erweiterungsexplorationen weiter gewachsen und übertrifft die *Greenfield*-Explorationen. Das zeigt die geringe Risikobereitschaft der Explorationsfirmen, denn die Risiken sind in den frühen Projektetappen und bei *Greenfield*-Explorationen höher[6].

---

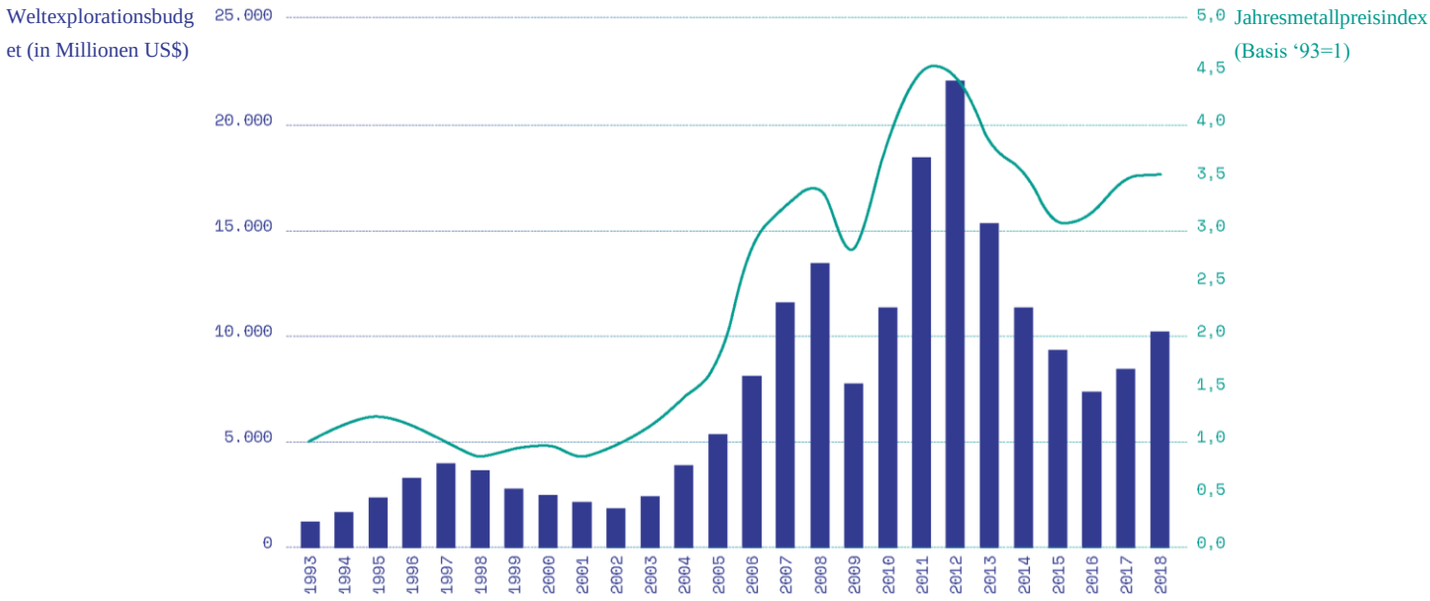
3 Vom Kupfer zur Innovation. Technologische Roadmap 2015 - 2035. Erste Ausgabe 2016.

4 Die von der Studie analysierten Buntmetalle beinhalten die Budgets für Gold, Basismetalle, Metalle der Platingruppe, Diamanten, Uran, seltene Erden, Material für Batterien und Kaliumverbindungen. Diese Schätzungen enthalten keine Daten über Aluminium, Kohl, Eisenerz, Erdöl, Naturgas und Industriemineralien

5 Diese Schätzung (in nominellen US$) entspricht den Gesamtausgaben in Exploration von Buntmetallen, die vom Gesamtbudget für Explorationen von 9,62 Milliarden US$ abweichen (entspricht 95 % der Gesamtsumme).

6 Minería Chilena, März 2017.

Grafik 2_ Entwicklung der weltweiten Explorationskosten und Jahresmetallpreisindex



Quelle: S&P Global Market Intelligence (2019)

Nach Unternehmenstyp fallen 52,0 % des weltweiten Budgets auf die Großbergbauunternehmen, die sogenannten *Majors*, was gleichzeitig für das Jahr 2018 einen Anstieg von 15,9 % im Vergleich zum Vorjahr bedeutet[7].

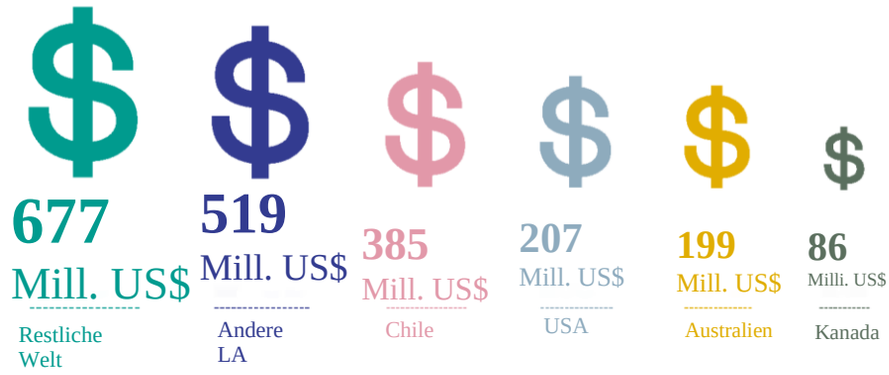
Die *Junior*-Unternehmen erhöhten ihren Anteil von 28,2 % im Jahr 2017 auf 32,0 % 2018 mit einem Budgetanstieg von 37,6 %.

In Kanada und Australien konzentrierten sich 2018 mit respektive 15 % und 14 % weltweit die größten Explorationsbudgets. Lateinamerika ist weiterhin die attraktivste Region mit 28 % der Explorationsbudgets.

Von den insgesamt 2,073 Milliarden US$, die 2018 weltweit in die Exploration von Kupfervorkommen investiert wurden, ist Chile mit 18 % (385 Millionen US$) das Empfängerland Nummer 1, gefolgt von Peru und Australien.

7 Cochilco Verzeichnis der Explorationsfirmen, 2018.

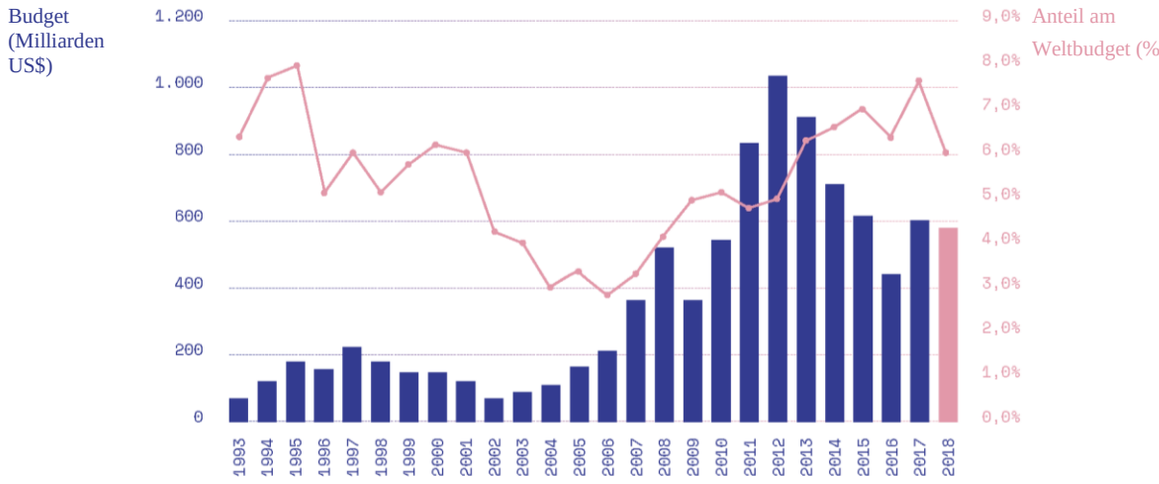
Grafik 3_ Weltweite Explorationsausgaben für Kupfervorkommen



Quelle: Cochilco (2019)

In Chile ist das Explorationsbudget im Jahr 2018 im Vergleich zum Vorjahr um 27 Millionen US$ auf 576,2 Millionen US$ zurückgegangen. Dennoch liegt Chile weltweit auf Platz sechs der Explorationsinvestitionen.

Grafik 4_ Entwicklung der weltweiten Explorationsausgaben und der Anteil Chiles

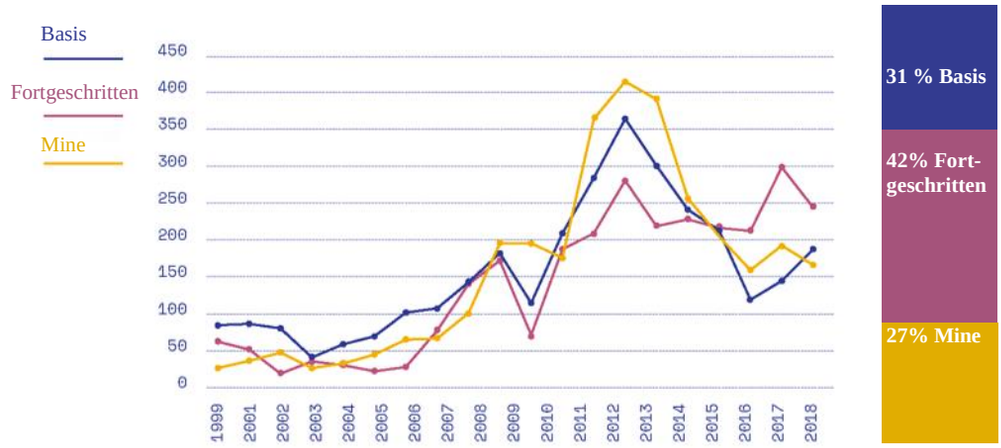


Quelle: Cochilco (2019)

Im Jahr 2018 konzentrierten sich die meisten Investitionen auf die Phase der fortgeschrittenen Exploration (239,4 Millionen US$; 42 %), gefolgt von *Greenfield*-Exploration (178,2 Millionen US$; 31 %) und der Exploration „in der Mine“ (158,6 Millionen; 27 %).

Im Vergleich zu 2017 ist das Budget für Explorationen in frühen Phasen *(Grassroot)* 2018 um 40,7 % gestiegen, wohingegen sich die Investitionen *„in der Mine“* um 15,2 % verringert haben. Auch die fortgeschrittenen Explorationen verzeichnen einen Rückgang von 23,7%.

Grafik 5_ Explorationsausgaben in Chile nach Etappe (Millionen US$)

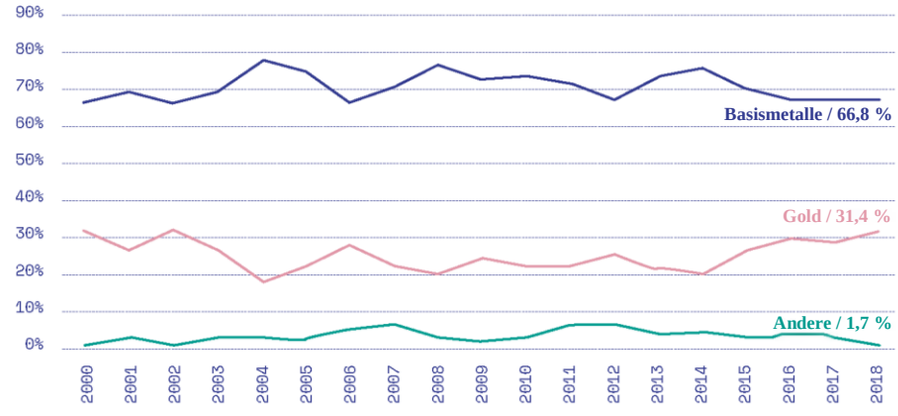


Quelle: Cochilco (2019)

Die Budgets werden nach Explorationsziel analysiert. In Chile sind die Basismetalle mit 66,8 % des Budgets 2018 weiterhin am wichtigsten. Innerhalb dieser Gruppe fließen fast die gesamten Investitionen in die Suche nach Kupfer. Das zweite Metall ist Gold mit einem Anteil von 31,4 %. Ein sehr viel geringerer Anteil wird in Zink investiert, und der Rest geht an eine gemischte Gruppe von Metallen wie Silber, Molybdän, Rutil oder Lithium. Im Jahr 2018 war eine Minderung der Explorationsbudgets für Kupfer (-6,3 %) und ein Anstieg der Budgets für Gold (5,9 %) zu verzeichnen[8].

8 Sernageomin. Propiedad Minera, 2017.

Grafik 6_ Prozentuale Verteilung der Explorationsausgaben in Chile nach Rohstoff



Quelle: Cochilco (2019)

Die Liste der zehn Unternehmen mit den höchsten Explorationsbudgets wird angeführt von der chilenischen Firma Antofagasta Plc (AMSA) mit 18 %, gefolgt von Gold Fields mit 13 %, Anglo American Plc mit 9 %, dem Staatsunternehmen Codelco mit 6 % und der kanadischen Firma Barrick mit 5 %. Hervorzuheben ist, dass die Firma Gold Corp unter den ersten 10 Unternehmen gelandet ist[9].

9 Ebenso

Grafik 7_ Prozentuale Verteilung des Explorationsbudgets

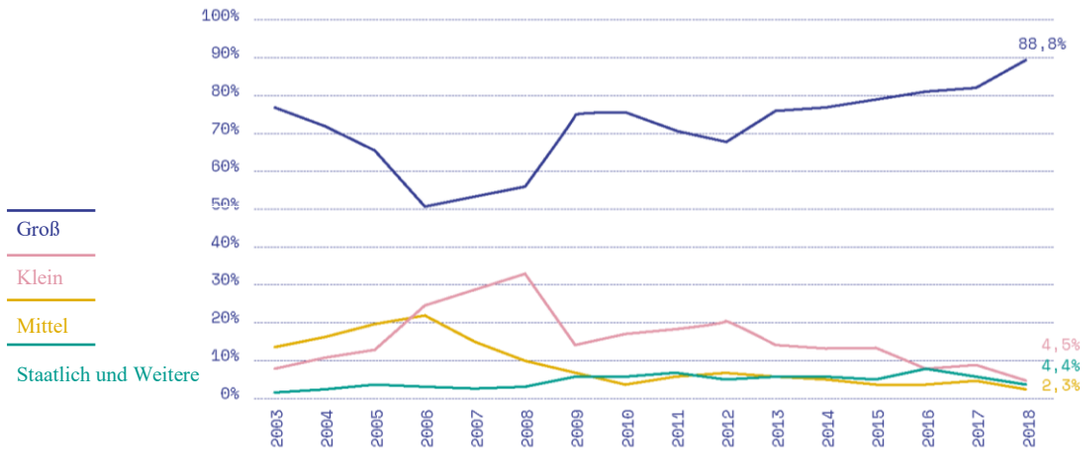
Quelle: Cochilco (2019)

In Chile sind die Großbergbauunternehmen oder *Majors* mit 88,0 % des Budgets die relevantesten Akteure in der Exploration. Die Großunternehmen *(Majors)* haben nicht nur ihre Position gewahrt, sondern ihr Budget 2018 im Vergleich zum Vorjahr um rund 4 % erhöht.

Die *Junior*-Unternehmen reduzierten ihren Anteil 2018 auf 4,5 % 2018 und ihr Budget wurde um 52 % gekürzt. Die staatlichen und anderen Unternehmen sowie die mittelständischen Firmen kamen respektive auf eine Beteiligung von 4,4 % und 2,3 %[10].

10 Ebenso

Grafik 8_ Prozentuale Verteilung des Explorationsbudgets in Chile nach Unternehmenstyp



Quelle: Cochilco (2019)

Wie man aus diesen Zahlen ablesen kann, muss Chile bei der Kupferproduktion auf den Wachstumspfad zurückfinden. Das bezieht sich jedoch nicht nur auf die Perspektive der betrieblichen Verbesserungen, sondern auch auf die Entdeckung neuer Lagerstätten, die zu den schon identifizierten Reserven hinzukommen und unserem Land die Führungsposition sichern, die es seit vielen Jahren innehat.

Deshalb sollte einer der Schwerpunkte der öffentlichen Politik die Exploration in frühen Phasen sein, die von *Junior*-Unternehmen ausgeführt wird.

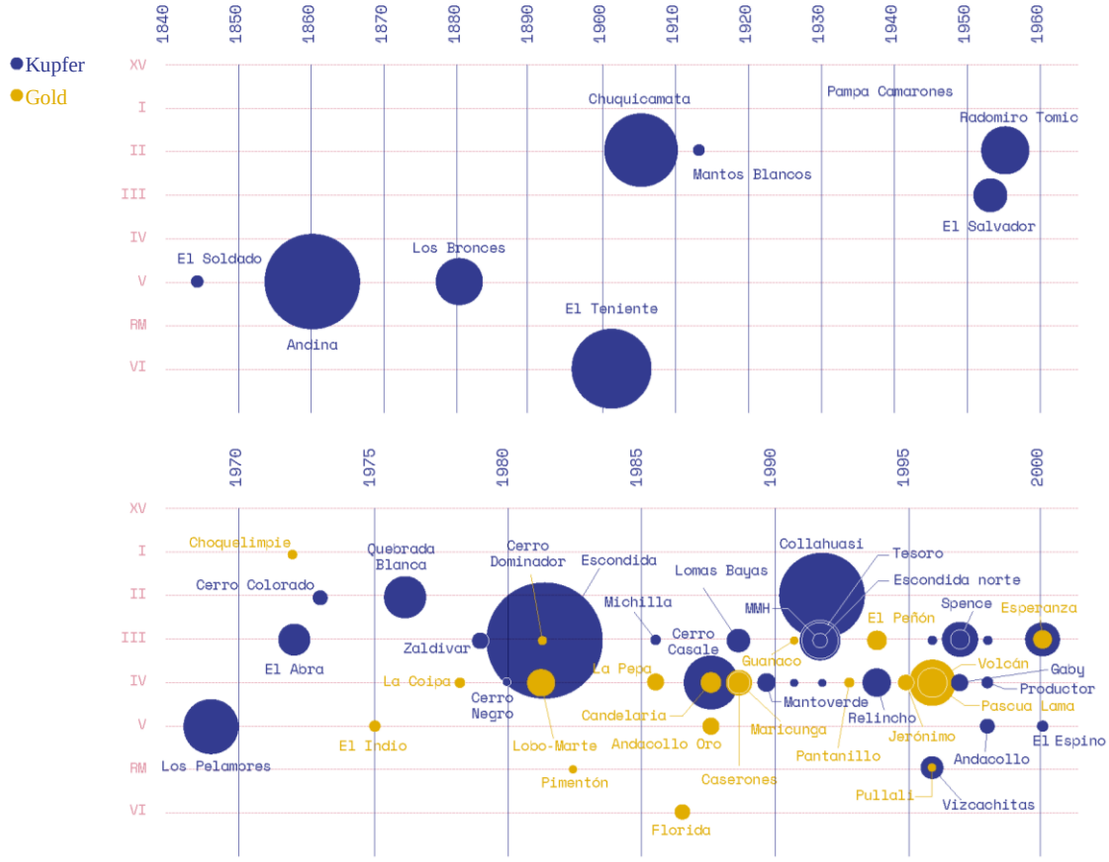
Verwaltung der Bergbaurechte in Chile

In Chile werden die Bergbaurechte als Konzessionen verwaltet, die die Exploration oder den Abbau ermöglichen. Die von der Verfassung der Republik Chile kontrollierte Institutionalität, das Organgesetz der Bergbaukonzessionen (Gesetz Nr. 18097, 1981) und das Bergbaugesetz (1983) definieren gegenwärtig die Grundlagen der nationalen Bergbauaktivitäten.

Das aktuelle System der Bergbaurechte hat eine Schlüsselrolle in der Entwicklung der Industrie gespielt, wie am starken Anstieg der Kupferproduktion in Chile seit den 90er Jahren abzulesen ist. Insbesondere ist es der Tatsache zu danken, dass die nach Verkündung des Gesetzes entdeckten Lagerstätten später zu den ganz großen Bergbaubetrieben geworden sind, die die aktuelle Kupferproduktion aufrechterhalten und Chile den Ruf als Bergbauland sichern.

Die folgende Grafik zeigt die Größe aller Lagerstätten in Tonnen und unterscheidet zwischen Gold- und Kupfervorkommen.

Grafik 9_ Jahr der Entdeckung und Größe der wichtigsten Cu-Au Lagerstätten in Chile nach Region.



Quelle: Eigene Angaben.

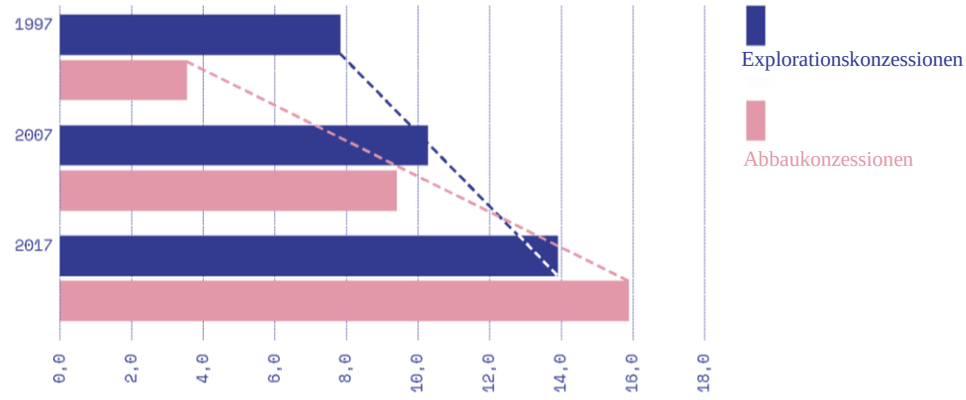
Im Jahr 2003, 20 Jahre nach dem Inkrafttreten des Bergbaugesetzes, hat sich die chilenische Produktion mit dem Faktor 3,9 multipliziert und ist von 1,2 auf 4,9 Millionen metrische Tonnen Feinkupfer gestiegen. Neben diesem deutlichen Produktionsanstieg ist ein weiteres Schlüsselelement der Produktionsanstieg von Privatunternehmen.

Von 1983 bis 2003 haben die privaten Bergbauunternehmen ihre Produktion um den Faktor 13,6 erhöht (von 0,2 auf 3,3 Millionen metrische Tonnen Feinkupfer). In derselben Periode hat Codelco die Produktion um den Faktor 1,5 erhöht (von 1 auf 1,5 Millionen metrische Tonnen Feinkupfer). Es ist davon auszugehen, dass der Anstieg des Kupferpreises die Produktion angekurbelt und Anreize für den Einstieg neuer Akteure in den chilenischen Bergbau geschaffen hat.

Das neue System der Bergbaurechte hat ein verlässliches Modell für die Erteilung von Explorations- und Abbaurechten installiert. Das spiegelt sich im Umfang der Investitionen in den letzten 30 Jahren, die den Ausbau der chilenischen Kupferproduktion ermöglicht haben.

Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung der konzessionierten Flächen für Exploration und Abbau in den letzten 20 Jahren.

Grafik 10_ Entwicklung der konzessionierten Hektar (in Millionen Hektar)



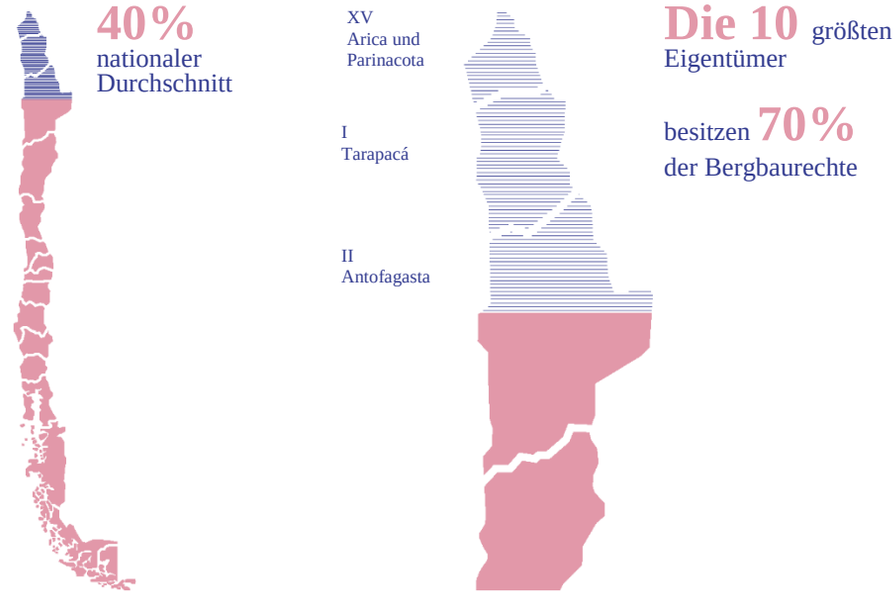
Quelle: Eigene Angaben ausgehend von Daten aus dem Bergbaujahrbuch von Sernageomin (1997, 2007 und 2017)

Dennoch - und trotz der Verbesserungen des eingeführten Systems - gibt es bestimmte Umstände, die aktuell der effizienten Nutzung der Bergbaurechte entgegenstehen und zu Konzentration, Stagnation und mangelhafter Nutzung der Konzessionen führen.

Konzentration des Eigentums

Nach Analysen von Cochilco, die auf Informationen von Sernageomin basieren, besteht eine ausgeprägte Konzentration von Bergbaurechten in den Regionen von Arica und Parinacota (XV), Tarapacá (I) und Antofagasta (II), wo die 10 größten Eigentümer rund 70 % der Konzessionen besitzen, was weit über dem nationalen Durchschnitt liegt. Die Region Atacama (III) liegt dagegen konstant unter dem Landesdurchschnitt. Die Bergbaurechte sind sehr viel weiter gestreut, was die Entwicklung des kleinen und mittleren Bergbaus in der Region stärkt.

Abbildung 1_ Verteilung der Bergbaurechte



Quelle: Eigene Angaben nach Daten von Cochilco

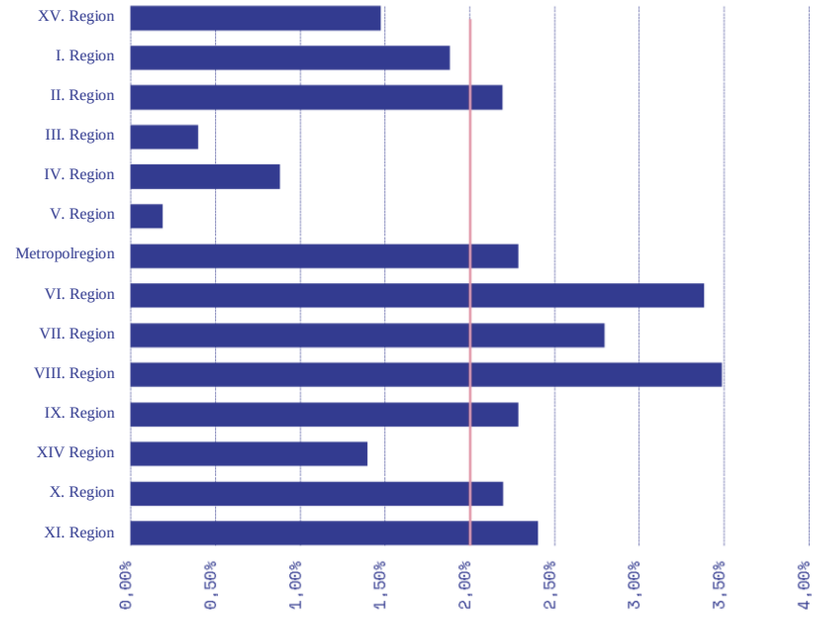
Es ist festgestellt worden, dass sich die Konzentration seit dem Jahr 2000 auf einem gleichbleibendem Niveau gehalten hat. Von den Bergbauregionen ist nur in Antofagasta die Konzentration der Konzessionen deutlich angestiegen.

In den Regionen Arica und Parinacota (XV) sowie Tarapacá (I) nimmt die Konzentration seit 2006 ab. Das Phänomen zeigt sich in geringerer Ausprägung auch in der Region Atacama, die unter dem nationalen Durchschnitt liegt.

Die Konzentration der Bergbaurechte ist allerdings nicht notwendig auf eine Marktineffizienz zurückzuführen, da der Eigentümer eines Bergbauprojekts *a priori* das gesamte Ausmaß einer Lagerstätte nicht kennt. Daher wird die Gesamtfläche gern großzügig beantragt, um sich den Zugang zu wertvollen Ressourcen zu sichern. Zu einem Projekt können auch zusätzliche Konzessionen gehören, die von der aktuellen Baustelle entfernt sind, weil es in die Planung einbezogene Reserven gibt, die mittel- oder langfristig abgebaut werden sollen. Das ist eine gängige Praxis in der Industrie, durch die die betriebliche Kontinuität der Projekte gesichert wird.

Hinsichtlich der Rotation des Eigentums beschreiben Volatilitäts- oder Instabilitätsmessungen des Marktes das Niveau der Aktivitäten und der internen Transaktionen. Die Ergebnisse stehen wiederum in Verbindung mit den Ein- und Ausstiegsbarrieren des Markts.

Grafik 11_ Prozentsatz der gehandelten Grundstücke nach Region im Zeitraum 2006 - 2013



Quelle: Cochilco basierend auf Daten von Sernageomin

Daraus geht hervor, dass die Eigentümer jedes Jahr 95 % der Abbauflächen des Vorjahrs behalten und 2 % verkaufen. Die restlichen nicht behaltenen 3 % werden im nächsten Jahr aufgegeben, und die neu dazugekommenen Grundstücke machen 10 % der gesamten Abbaufläche aus.

Die Regionen weisen ein ähnliches Verhalten auf, sodass man nicht sagen kann, dass es mehr Rotation des Eigentums in den Regionen mit mehr Bergbauaktivität gibt. Nur in den Regionen VII, VIII, IX und XII ist eine deutliche Abnahme zu beobachten. Die 10 größten Eigentümer von Bergbaurechten im Land haben nur 17 % der Abbaukonzessionen verkauft, sodass die Rotation unter ihnen als gering einzustufen ist.

Nutzung des Eigentums

Die Konzentration in geologisch attraktiven Zentren und die Stabilität der Eigentumsverhältnisse der Konzessionen reichen nicht aus, um ein ineffizientes Marktverhalten zu bescheinigen. Beide Faktoren können als rationale Entscheidungen der Eigentümer gewertet werden, die Bergbau in den konzessionierten Zonen betreiben.

Der Verfassung zufolge gibt die Bergbaukonzession dem Eigentümer das Recht, die notwendigen Arbeiten zur Wahrung des öffentlichen Interesses auszuführen, das die Erteilung der Konzession rechtfertigt[11]. Dennoch sind verschiedene Autoren der Meinung, dass das bestehende System die Entwicklung und die bergbauliche Nutzung der Konzessionen nicht fördert, wodurch das Bergbaupotenzial des Landes entweder aus spekulativen Gründen oder zur Verteidigung des Bodens beeinträchtigt wird[12].

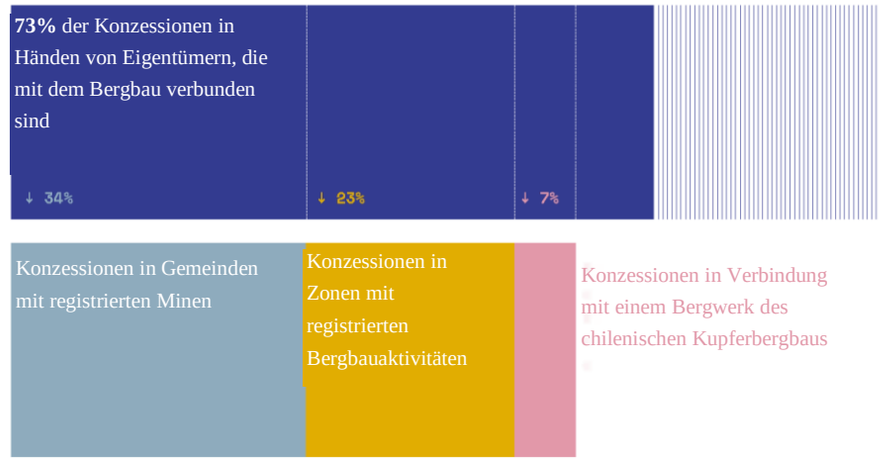
Nach einer Analyse von Cochilco liegt der Nutzungsgrad der gesamten Abbaugebiete bei 23 %. Dieser Wert bezieht sich auf Konzessionen, die einen Eigentümer in der Region haben, wo ein Bergbauprojekt deklariert wird. Die Ergebnisse der Analyse werden wie folgt zusammengefasst.

---

11 Politische Verfassung des chilenischen Staats, 1980.

12 Zur Verteidigung wird angeführt, dass es Eigentümer gibt, die Bergbaukonzessionen erstehen, um die Landnutzung vor Spekulanten zu schützen, die das Recht auf die Ausbeutung des Untergrunds nur zur Erlangung einer wirtschaftlichen Kompensation, und nicht zur Betreibung von Bergbau geltend machen wollen.

Abbildung 2_ Schätzung der Bergbaurechte



Quelle: Cochilco basierend auf Daten von Sernageomin und León (2012)

Mindestens vier allgemeine Situationen können zu einer Mindernutzung von Bergbaukonzessionen führen. Als erstes gibt es die Konzessionen, die noch nicht ausgebeutet werden, die aber analysiert worden sind, über die es geologische Informationen gibt und an denen der Eigentümer interessiert ist. Als zweites kann es sein, dass es auf dem Grundstück noch keine Aktivität gibt oder gegeben hat, da der Eigentümer die Art der Nutzung noch nicht bestimmt hat, oder weil es die äußeren Umstände noch nicht erlauben. Als drittes gibt es Eigentümer, die ohne Interesse am Bergbau die Grundstücke spekulativ nutzen, das heißt sie hoffen, an ein Bergbauunternehmen verkaufen zu können, das an der Exploration und der Ausbeutung interessiert ist. Dann gibt es noch die Fälle von Eigentümern, die mit der Bergbaukonzession andere Bodennutzungen, wie landwirtschaftliche, energiewirtschaftliche oder Immobilienprojekte schützen, da die Bergbaukonzession unter bestimmten Bedingungen die Nutzung des Untergrunds über die Bodennutzung stellt. Für die letzten beiden Fälle gibt es Nachweise mit Daten aus der Literatur (León, 2012). Der dritte Fall steht häufig in Verbindung mit *Grassroot*-Explorationen.

Verfügbarkeit geologischer Information

Der Zugang zu Bergbaurechten ist eine Herausforderung, der sich die Akteure der Industrie und insbesondere die Interessenten an *Greenfield*-Explorationen stellen müssen. Eine weitere bedeutende Herausforderung besteht jedoch im beschränkten Zugang zu geologischer Information der Objekte, die exploriert werden sollen.

Der Artikel 21 des Bergbaugesetzes fordert von den Unternehmen seit 1983 die Herausgabe der geologischen Basisinformationen der Explorationen. Doch die Zuwiderhandlung ist mit keiner Sanktion belegt, weshalb die Bergbaubehörde über kein Mittel der Durchsetzung des Artikels verfügt.

Auch wenn sich das durch den Erlass der Verfügung vom 20. Juni 2016 geändert hat, die die Weitergabe der bei geologischen Basisexplorationen gesammelten allgemeinen Informationen regelt, ist die Verfügbarkeit von Informationen im Bergbau ein noch nicht geklärtes Thema.

Dazu kommt, dass der Staat über die Geologie- und Bergbaubehörde nur sehr wenig bergbaurelevante Informationen liefert. Chile verfügt über keine geophysische Erhebung des gesamten nationalen Territoriums.

Diese Barrieren komplizieren den Eintritt neuer Akteure in die Exploration, und speziell in den Bereich der *Greenfield*-Explorationen, durch die Informationen öffentlich und leicht zugänglich gemacht werden könnten.

Das geologische und technologische Szenarium

Die Lagerstätten können offen oder unter der Oberfläche liegen. Die unterirdischen Vorkommen können nah der Oberfläche oder in der Tiefe liegen. Historisch betrachtet liegen die meisten entdeckten Erzvorkommen offen, das heißt sie sind mit dem menschlichen Auge zu erkennen. Doch diese Lagerstätten sind zum größten schon Teil bekannt, und deshalb konzentriert sich die aktuelle Suche auf unterirdische Erzvorkommen, deren Identifikation sich schwieriger gestaltet, da es den traditionellen Techniken der Geologie, Geochemie und Geophysik in der Regel an Effektivität mangelt.

Allerdings ist das Potenzial der unterirdischen Lagerstätten sehr groß, da die geologischen Eigenschaften der verdeckten Sektoren und der offenliegenden Vorkommen sehr ähnlich sind. Fast die Hälfte des chilenischen Nordens ist mit Kies bedeckt, der Rest ist freiliegender Fels.

Die Herausforderung besteht also in der Entwicklung neuer technologischer Werkzeuge, die die Anwendung von Explorationstechniken oberflächennaher oder tiefliegender Zonen ermöglichen.

Raumplanung

Eine weitere Herausforderung für die Exploration in Chile ist die Raumplanung. In diesem Feld bewegen sich verschiedene regionale und lokale Akteure ohne einen politischen Rahmen auf nationaler Ebene.

Diese Situation beeinträchtigt den Bergbau - und speziell die *Greenfield*-Explorationen, die Lagerstätten dort suchen, wo es aktuell noch keinen Bergbau gibt -, weil Unsicherheit besteht, ob ein bestimmtes Gelände für ein Bergbauprojekt genutzt werden kann oder nicht.

Das Thema ist so kritisch, das Chile in der Rangliste der Empfängerländer von Bergbauinvestitionen von Platz 11 im Jahr 2015 auf Platz 39 im Jahr 2016 abgestiegen ist. Einer drei wichtigsten Gründe für dieses Ergebnis war die fehlende Raumplanung und die in den letzten Jahren dadurch entstandene Unsicherheit für Energie- und Bergbauprojekte.

Bedingungen zur Förderung der Exploration in Chile

Der Kupferbergbau ist eine wirtschaftliche Aktivität, die sich dem Abbau nicht erneuerbarer Rohstoffe widmet und so dynamische und komplexe Eigenschaften aufweist, dass es nicht realistisch wäre, ihn nur aus der Perspektive der Exploration zu analysieren.

Nach Schätzungen von Bloomberg wird der zukünftige Kupferbedarf deutlich größer sein, als die heute bekannten Ressourcen und Reserven. Angesichts der großen nationalen Kupfervorkommen und der ausgeprägten Explorationserfahrung, liegt hier eine große Chance für Chile.

Außerdem sichert die Exploration den Bergbau zumindest in den großen Lagerstätten bei gleichbleibender Produktion für die nächsten 50 Jahre. Doch zur Deckung der projizierten Steigerung der Kupfernachfrage ist es notwendig, die nötigen Ressourcen und Reserven zu identifizieren. Chile muss Anreize für die Entdeckung neuer Lagerstätten schaffen, und dazu sind eine Reihe von Bedingungen zu erfüllen, um die Ressourcen auf die beste Weise zu verwenden, die Nutzung der Konzessionen zu optimieren und die Exploration und den darauf folgenden Abbau erleichtern.

Im Bereich der Explorationsförderung sind drei Handlungslinien identifiziert worden.

a. Bereitstellung geologischer Basisinformation

Die Verfügbarkeit vorwettbewerblicher und öffentlicher geologischer Informationen, die zuverlässig und sachdienlich sind, ist heutzutage ein entscheidender Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit der Bergbauregionen. Chile ist wichtige Schritte in diese Richtung gegangen. Beispiele dafür sind die Figur der kompetenten Person und die Verabschiedung der Verfügung zum Artikel 21 des Bergbaugesetzes. Auch die Umsetzung eines nationalen Geologieplans durch Sernageomin ist ein Fortschritt. Doch es fehlt noch an politischen Maßnahmen und Ressourcen, um ein adäquates Informationssystem für geologische und Eigentumsdaten aufzubauen, das der Bedeutung der Explorationsindustrie für Chile angemessen ist.

b. Entwicklung von Instrumenten zur Explorationsförderung

Die Vorteile eines Steueranreizes für die Exploration sind diskutiert worden. Mit einem solchen Instrument können die Explorationskosten steuerlich abgesetzt werden, so wie es in einigen der fortschrittlichsten Wirtschaften, wie Kanada und Australien, der Fall ist. Dort ist die Aktivität der Explorationsfirmen ein Entwicklungsmotor für die Finanzindustrie. Aber das ist nicht die einzige Art der Explorationsförderung, denn man kann bei Knappheit des Risikokapitals, wenn die Explorationsprojekte stagnieren und sich die langfristige Nachhaltigkeit des Bergbaus beeinträchtigt sieht, Mittel über Wettbewerbe oder direkte Zuteilung vergeben, so wie es in Australien oder Kanada geschieht. Das Instrument zur Identifizierung von Erzreserven von ENAMI ist ein Beispiel für bestehende politische Maßnahmen dieser Art, aber es bedarf einer Evaluierung und möglicherweise einer Modernisierung, um sie wirksamer zu gestalten.

c. Schaffung von Basisinfrastruktur

Nur selten wird der Bestand von Basisinfrastruktur für die Exploration als Explorationsanreiz betrachtet. Der Bestand verfügbarer Bergbaukonzessionen, Finanzierung und qualitativ hochwertiger geologischer Information sichert nicht die Durchführung der Exploration, da fehlende Straßeninfrastruktur, Stromversorgung, Wasserversorgung, Klärwerke, Hafeninfrastruktur etc. die Explorationszonen auf die Gegenden beschränken, wo diese Bedingungen gegeben, oder wo die Projekte so groß sind, dass die Finanzierung der Infrastruktur projektintern möglich ist.

Es gibt also noch viel Raum für die Verbesserung der Exploration in Chile, um so den Wert der vorhandenen mineralischen Rohstoffe zu maximieren und mit allen Aktivitäten zu verketten, die aus der Phase der Exploration abzuleiten sind.

Dieser Bereich, zu dem Cochilco für die Industrie wertvolle Informationen und Analysen beigetragen hat, ergänzt die vom Nationalen Bergbauprogramm Alta Ley schon identifizierten Initiativen zur Perfektionierung des Bergbaus.

Vision des Kernthemas

Das Erreichen einer weltweiten technologischen Führungsposition zur Beschaffung, Verarbeitung und Deutung von Informationen für die Suche tiefliegender Erzlagerstätten

Codelco
Division
El Teniente

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklunglinien

Auf Grundlage der evaluierten Informationen und der für das Kernthema Exploration definierten Vision hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe vier Herausforderungen formuliert. Für alle werden mögliche Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien vorgestellt.

Die Exploration im Bergbau ist eine Aktivität der Beschaffung und Speicherung, Verarbeitung und systematischer Deutung der Informationen, die sich in aufeinander folgenden Phasen vollzieht und auf Finanzierung angewiesen ist.

Einfach gesagt ist die Exploration ein in vier Phasen aufgeteilter Prozess: i) Finanzierung; II) Informationsbeschaffung und -speicherung; III) Informationsverarbeitung; IV) Charakterisierung und Deutung. In der folgenden Tabelle wird gezeigt, welche der identifizierten Herausforderungen zu welcher Phase gehören.

Herausforderung 01

Stärkung der Institutionalität in technologischen Aspekten

Diese Initiative soll die Exploration - und insbesondere die *Greenfield*-Exploration – fördern und beleben, um dadurch die Zahl der Projekte und Akteure auf dem Feld der Exploration in Chile zu erhöhen.

Einer der als relevant definierten Aspekte, ist die Vereinfachung des Systems zur Beantragung von Genehmigungen für Arbeiten in der Höhe, mit der Archäologie verbundenen Themen etc.

Von dieser Initiative ausgehend, soll das Koordinatensystem, das gegenwärtig als Referenz für die Scheitelpunkte der in der Mercator-Projektion bestimmten Koordinaten für chilenische Bergbaukonzessionen dient, vom Gemischten Referenzsystem Datum Provisorio Sudamericano La Canoa 1956 und/oder Datum Sudamericano Chua, Brasilien 1969 auf die Koordinaten SIRGAS WGS84 umgestellt werden[13].

Förderung eines institutionellen rechtlichen Rahmens zur Belebung der Exploration

	Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01	Unterstützung der relevanten Aspekte der technologischen Entwicklung	Verbesserungen der Arbeiten in der Höhe Werkzeuge und Minderung der Auswirkungen auf archäologische Fundstätten
02	Änderung des aktuellen Referenzsystems Sammlung Speicherung Verarbeitung	Geomatische Techniken und geografische Informationssysteme, die auf die Änderung des Koordinatensystems angewandt werden

Quelle: Eigene Angaben

13 Sernageomin, Propiedad Minera 2017

Herausforderung 02

Entwicklung und Technologietransfer in der Sammlung und Speicherung geologischer Information

Als globale Tendenz und speziell in Chile wird es immer unwahrscheinlicher, Lagerstätten an der Erdoberfläche zu finden. Dadurch wird es notwendig, logistisch komplexere Exploration in der Tiefe zu betreiben.

Die beschriebene Herausforderung und die dazugehörigen Initiativen sollen Gelegenheit für die Entwicklung und den Einsatz von Technologien zur Informationsbeschaffung und -speicherung für die Entdeckung unterirdischer und tiefliegender Erzvorkommen schaffen.

Die Entwicklung dieser Art von Technologie verspricht bedeutende Auswirkungen auf das damit verbundene System von Forschung, Entwicklung und Innovation zu haben.

Entwicklung und Technologietransfer in der Informationsbeschaffung und -speicherung

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Transfer von Explorationstechnologien	Evaluierung geologischer Gefahren Angewandte Tektonik Geophysische Instrumentierung Virtuelle Bohrungen Einsatz von Drohnen
02 Beschaffung von Informationen mit Schwerpunkt auf Zonen in der Tiefe	Seismische Topographie Paleomagnetismus Geotechnologien für die unterirdische Exploration

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Technische Entwicklung in der Informationsnutzung

Die technischen Fortschritte in verschiedenen Bereichen wie der Entwicklung von Sensoren, Kommunikation, Internet oder Online-Informationsfluss ermöglichen die Produktion gigantischer Datenvolumen. Die Riesenmenge erzeugter Daten erfordert die Entwicklung von Datenverarbeitungs- und Datennutzungstechnologien. Gegenwärtig ist die Analyse und die Auslegung großer Datenvolumen eine Schlüsselherausforderung für die Erzeugung nützlichen Wissens, das die Verarbeitung, Charakterisierung und Deutung der Informationen auf der Suche neuer Lagerstätten unterstützt.

Eine bedeutende Rolle spielt auch die Anwendung der Konzepte des maschinellen Lernens und der Mustererkennung, die vor allem in Prozessen des Engineerings, der Informatik und Mathematik eingesetzt werden, und deren Zweck die Analyse, Organisation und Bündelung von Informationen auf Grundlage großer Datenvolumen ist, um Erkenntnisse zu generieren und Beziehungen zwischen den Daten sichtbar zu machen.

Werkzeuge wie analytische Informationssysteme und die automatischen Lernalgorithmen helfen den Bergbauunternehmen, ausgehend von ihren Daten eine integrale Vision des Unternehmens zu erhalten. Wenn die Algorithmen mit Online-Daten gefüttert und die historischen Register analysiert werden, können ausgehend von Leistungseigenschaften, Erkenntnisse über die Zukunft aller Operationen abgeleitet werden.

Im Bereich des Managements und der Kapitalisierung von Information auf der Suche nach Explorationszielen verfügt man über Daten von Bergbauunternehmen, die das Internet genutzt haben, um geologische Informationen zu veröffentlichen und gegen Zahlung wird die Suche nach Erzvorkommen öffentlich ausgeschrieben. Diese Erfahrung ist als *crowdsourcing* bekannt . Auf diese Weise konnte ein Bergbauunternehmen mehrere Lagerstätten entdecken und innerhalb von kürzester Zeit seine Marktwert erhöhen.

Technische Entwicklung in der Informationsnutzung

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Einbindung von Big Data, analytischen Werkzeugen und künstlicher Intelligenz	Anwendung von Data Mining Einsatz von maschinellem Lernen, Analytik und Lernalgorithmen Geostatistik mit Supercomputern
02 Techniken des Managements und der Kapitalisierung von Informationen	Mit dem *crowdsourcing* verbundene Initiativen Geochemische Charakterisierung für das Management von Umweltbelastungen Geologische und strukturelle Modellierung mit komplexen informatischen Systemen Schaffung genetischer Modelle Gesteinscharakterisierung mittels Bildanalyse zur Entwicklung prädiktiver geometallurgischer Modelle Integration geologischer und geochemischer Information in Hochleistungscomputermodellen

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 04

Entwicklung und Vertiefung assoziativer Modelle

Die Entwicklung kollaborativer Modelle mit den verschiedenen Akteuren, die an den Herausforderungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Exploration in Chile arbeiten, wird immer notwendiger.

Mittels kollaborativer Modelle können Initiativen wie die Entwicklung kostengünstiger Sondierungen oder die Übernahme bohrtechnischer und geophysischer Techniken aus anderen Industrien auf den Weg gebracht werden.

Entwicklung und Vertiefung assoziativer Modelle

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Kollaboratives Modell für die Prototypentwicklung	Entwicklung kostengünstiger Sondierungen Übernahme bohrtechnischer und geophysischer Techniken aus anderen Industriesektoren
02 Verfügbarkeit von Räumen zur Durchführung von Tests	Aufbau von Exzellenzzentren für Geowissenschaften Finanzierungsinitiativen

Quelle: Eigene Angaben

02

Kernthema Bergbaubetrieb und -planung

Codelco
Avacen Abbau in Chuquicamata unterirdisch
↑

Grundlagen

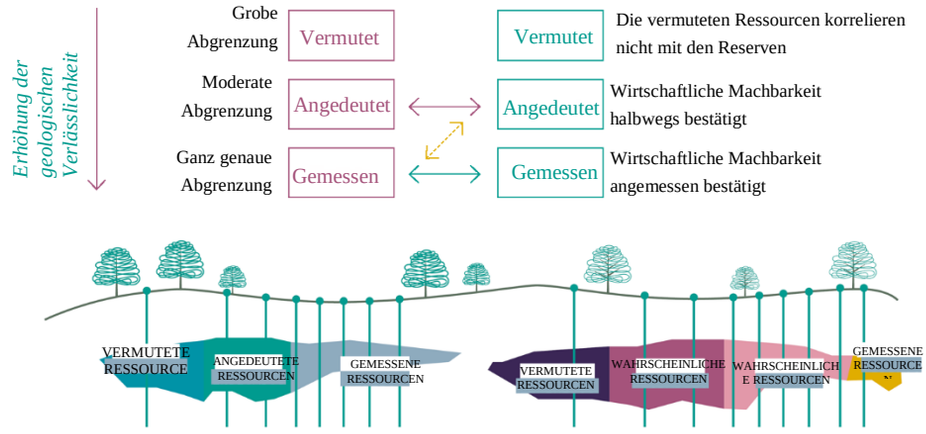
Entwicklung der Ressourcen und Reserven in Chile

Angesichts der deutlichen Erhöhung der Kupfernachfrage sind von Angebotsseite in den letzten Jahrzehnten die Abbaurate und die Explorationsausgaben erhöht worden, wodurch die Entdeckung neuer Lagerstätten und die Identifizierung neuer Ressourcen in bestehenden Vorkommen gefördert worden sind. Der effiziente Abbau der nicht erneuerbaren Rohstoffe impliziert ein gewisses Niveau der Extraktion von Reserven, um die Wertschöpfung in der Periode der Ressourcenverfügbarkeit zu maximieren.

Die Grafik zeigt das grundlegende Schema der Ressourcen- und Reservenkategorien von CRIRSCO (*Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards*), das zwischen geowissenschaftlicher Nachweisbarkeit (Ressource) und wirtschaftlicher Machbarkeit (Reserve) unterscheidet und entsprechend der wachsenden geologischen Sicherheit und der Risiken eine Einteilung in Kategorien vornimmt. Die steigende geologische Zuverlässigkeit spiegelt sich den vermuteten, angedeuteten und gemessenen Ressourcen. Die Wandlung dieser Ressourcen in Reserven (nachgewiesene und mögliche) bedarf der Anwendung modifizierender Faktoren, das heißt jene relevanten technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen, staatlichen und umweltbezogenen Parameter und Faktoren, die ein Bergbauprojekt durchführbar machen.

Abbildung 1_ Kategorisierung der mineralischen Ressourcen und Reserven

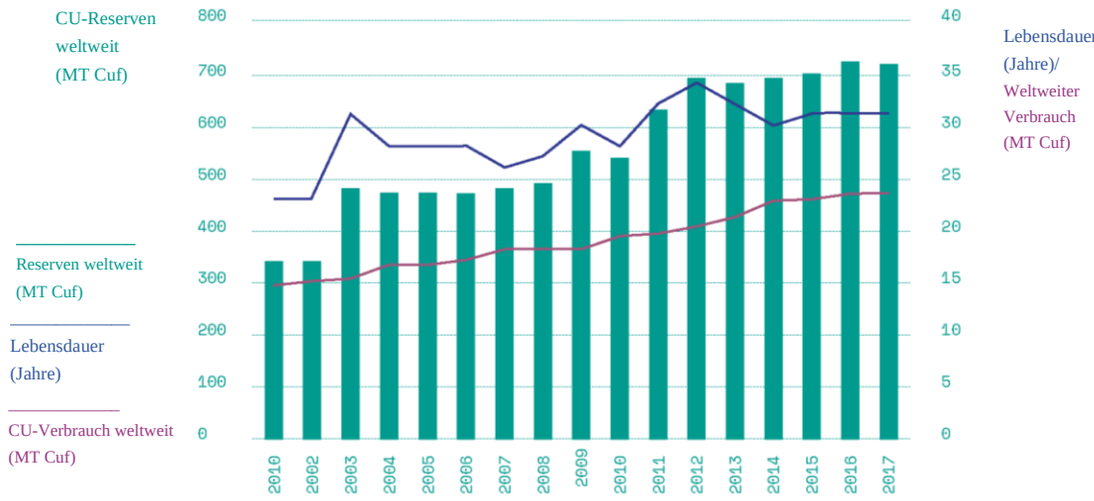
Geowissenschaftliche Abgrenzung Wirtschaftliche Machbarkeit bestätigt



Quelle: González (2015)

Nach den Zahlen der Geologiebehörde der USA (USGS) und den Zahlen zum Verbrauch raffinierten Kupfers von Cochilco sieht man, dass die weltweiten Kupferreserven von 2001 im Jahr 2023 erschöpft sein müssten. Doch die neuen Marktbedingungen des sogenannten „Superzyklus“ des Kupferpreises von Ende 2003 bis 2014 führten zu einem Explorationsboom und zur Reklassifizierung der Ressourcen. Das führte dazu, dass die im Jahr 2017 erkannten Ressourcen, plus das von 2001-2017 abgebaute Kupfer, die im Jahr 2001 identifizierten Reserven verdreifachten.

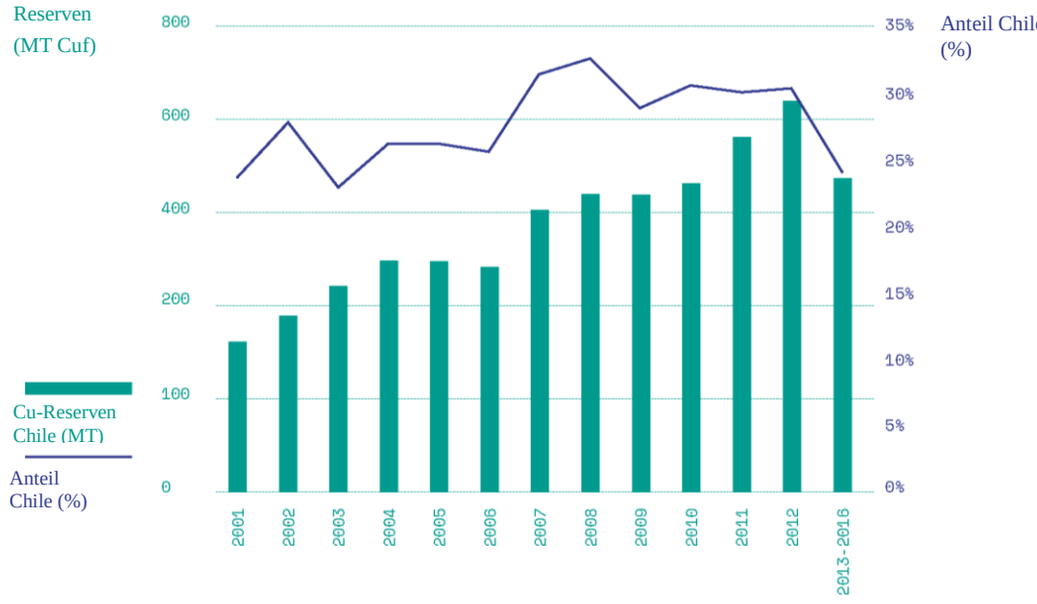
Grafik 1_ Gesamte Kupferreserven weltweit, weltweiter Verbrauch und geschätzte Lebensdauer



Quelle: Eigene Angaben auf Grundlage von USGS und dem Cochilco-Jahrbuch (2001-2017)

Die Abbildung 2, die ausgehend von Daten des Jahrbuchs 2016 der Nationalen Geologie- und Bergbaubehörde erstellt wurde, zeigt dass der Jahresdurchschnitt der Reserven im Zeitraum 2013-2016 bei 167 Millionen Tonnen Kupfer lag. Das entspricht 24 % der von der USGS berichteten Weltreserven, und damit positioniert sich Chile als das Land mit den weltweit größten Kupferreserven.

Grafik 2_ Entwicklung der Kupferreserven in Chile (2001-2017)



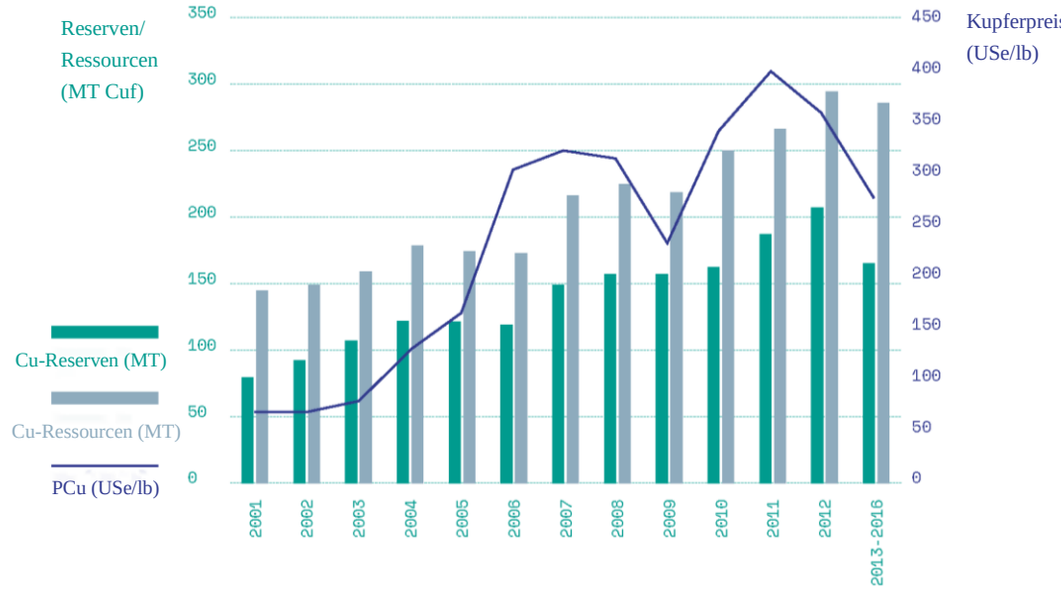
Quelle: Eigene Angaben auf Grundlage der Zahlen von Sernageomin und USGS

Zusammen mit den fast 90 Millionen Tonnen, die in den letzten 17 Jahren abgebaut worden sind, den neuen Lagerstätten und der Änderung in der wirtschaftlichen Klassifizierung der Ressourcen aus Marktgründen, haben sich die Kupferreserven im Vergleich zum Jahr 2001 um den Faktor 3,2 multipliziert.

Die Abbildung 3 von Sernageomin zeigt die Entwicklung der Kupferressourcen (gemessen und angedeutet) und Kupferreserven im Zeitraum von 2001-2016 in Millionen Tonnen enthaltenem Feinkupfer. Die den Reserven zugeschriebene Tonnage ist an die Schwankungen des Kupferpreises gekoppelt. Bemerkenswert ist jedoch, dass die gemessenen und angedeuteten Ressourcen sich in diesem Zeitraum verdoppelt haben.

Die Aufstellung zeigt, dass die Lebensdauer der Lagerstätten sich bei der aktuellen Abbaurate problemlos auf 80 Jahre ausdehnen könnte. Diese Abbildung enthält nicht die rund 350 Millionen Tonnen Feinkupfer aus vermuteten Erzressourcen, die langfristig als gemessene und angedeutete Ressourcen kategorisiert werden könnten, um dann zu Reserven zu werden.

Grafik 3_ Entwicklung der Kupferreserven und der gemessenen + angedeuteten Kupferressourcen in Chile (2001-2016)

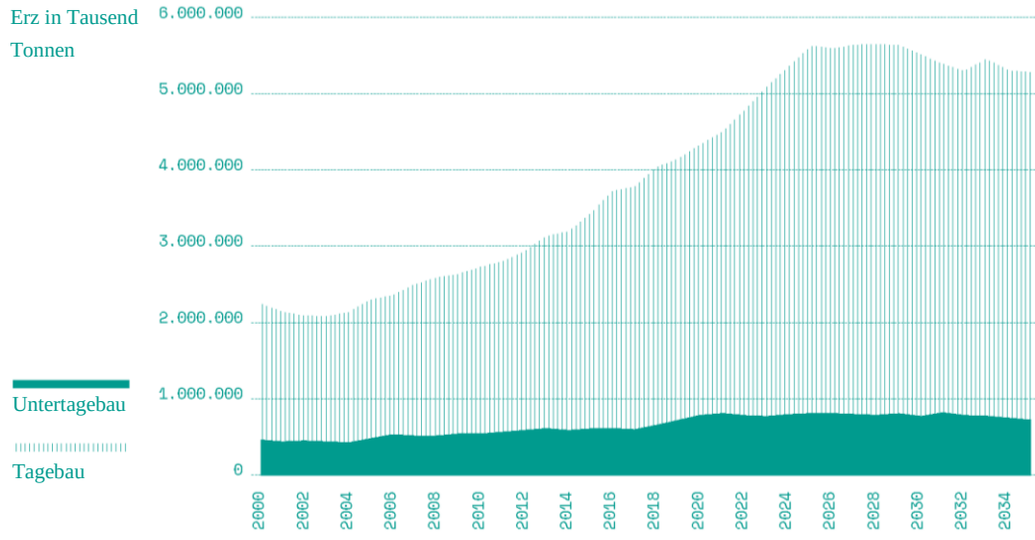


Quelle: Eigene Angaben auf Grundlage der Zahlen von Sernageomin und USGS

Tagebau und Untertagebau

Die folgende Grafik zeigt, dass der Großteil des gegenwärtig in Chile und in der Welt abgebauten Kupfers aus dem Tagebau stammt. 2018 sind weltweit fast 4 Milliarden Tonnen Kupfererz abgebaut worden. Rund 85 % stammen aus dem Tagebau, der Rest aus dem Untertagebau.

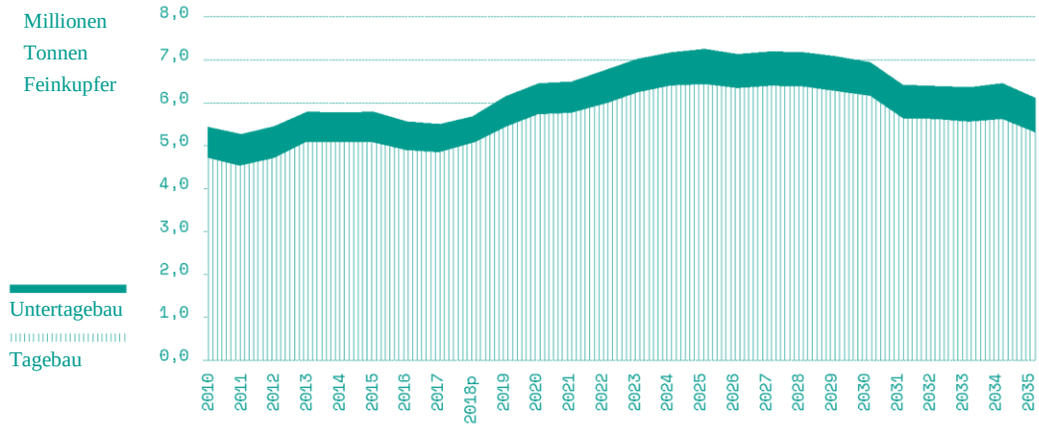
Grafik 4_ Weltweit abgebautes Kupfererz, Zeitraum von 2000-2035



Quelle: Cochilco (2018)

Die Grafik 5 zeigt Cochilcos Projektionen der chilenischen Kupferproduktion, unterteilt in Tagebau und Untertagebau. Es wird geschätzt, dass im Jahr 2035 weiterhin der Großteil der gesamten Kupferproduktion aus dem Tagebau stammen wird. Der Grafik 5 ist auch zu entnehmen, dass der Beitrag des Untertagebaus zur Produktion von Feinkupfer sich bei rund 12 % hält.

Grafik 5_ Projektion für Feinkupfer nach Abbauart bis 2035



Quelle: Cochilco (2018)

Langfristig (nach 2050) wird davon ausgegangen, dass Umweltaspekte und die Erschöpfung der im Tagebau abbaubaren Erze dem Untertagebau Priorität geben werden. Speziell in Chile werden einige der heute im Tagebau betriebenen Minen in den Untertagebau übergehen, wie beispielsweise Chuquicamata.

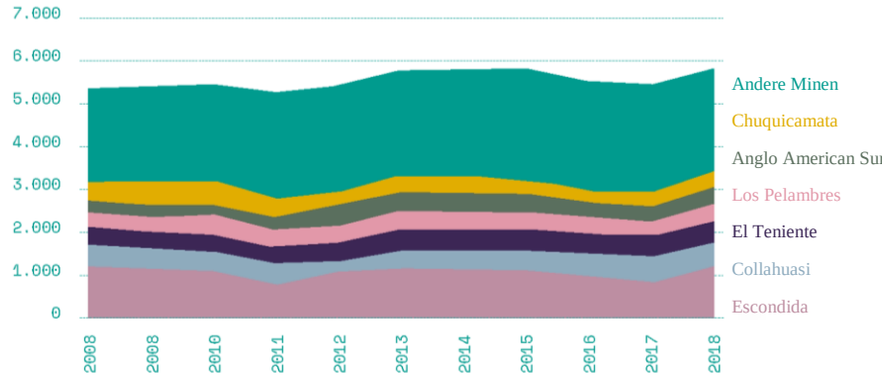
Der Tagebau ist die erste Option bei der Evaluierung der Durchführung eines Bergbauprojekts, da es gewöhnlich kostengünstiger ist, wenn sich der Erzkörper nahe der Oberfläche befindet, eine reguläre Form hat und es keine Umwelteinschränkungen gibt, die den Eingriff in den Boden verhindern.

Je nach Gehalt der kommerzialisierbaren Erze, der möglichen kontaminierenden Substanzen und im Allgemeinen der Geometrie der Erzkörper, kann im Tagebau eine Abbautiefe von 800 Metern weit überschritten werden.

Wenn der Erzkörper sich jedoch in größerer Tiefe befindet, oder wenn der Tagebau nicht mehr rentabel ist, dann wird der Untertagebau gewählt. Der Untertagebau definiert sich dann durch eine Reihe von Faktoren, die von der Form des Erzkörpers, weiteren Eigenschaften der Erze und des vorhandenen Gesteins, Umweltfaktoren, technologischen Faktoren und wirtschaftlichen Betrachtungen abhängig sind, die sich auf die verfügbaren Erzreserven, die erforderliche Abbaurate, die Lebensdauer der Mine, die Produktivität und letztlich die Kosten pro Tonne Erz je nach möglicher Abbaumethode beziehen.

In Chile stammen mehr als 50 % der Feinkupferproduktion in jedem Vermarktungsformat aus den in der folgenden Abbildung aufgeführten sechs Minen.

Grafik 6_ Die größten Minen in Chile (vor allem Tagebau) mit ihrer Feinkupferproduktion



Quelle: Cochilco (2019)

Die Mehrzahl der Minen in Chile wird im Tagebau betrieben.

Die größten Minen im Untertagebau in Chile sind El Teniente und Andina, die zu Codelco gehören. Beide werden aber zum Teil auch im Tagebau betrieben. Zu verweisen ist auf die Aufnahme des Untertagebaus in Chuquicamata im Jahr 2019, wobei es bis zur Aufnahme des regulären Betriebs noch rund zwei Jahre dauern wird. Langfristig ist es möglich, dass Escondida, Los Bronces und andere Minen vom Tagebau zum Untertagebau konvertieren.

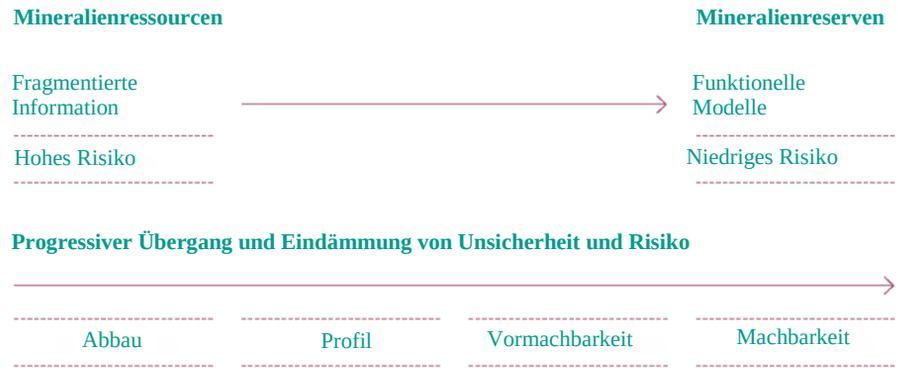
Das Bergbaugeschäft steht unter dem Einfluss eines dynamischen Umfelds, in dem es wesentlich ist, die geologischen Ressourcen zu quantifizieren und zu charakterisieren und diese Ressourcen adäquat in Erzreserven umzuwandeln. In diesem Prozess sind alle geo-bergbaulich-metallurgischen, wirtschaftlichen, finanziellen, rechtlichen, umweltbezogenen, sozialen, staatlichen und infrastrukturellen Aspekte einzubeziehen, die es entsprechend der angesprochenen Dynamik zu aktualisieren gilt.

Die Grundlagen aller Bergbauprojekte sind: Die Formulierung einer klaren Strategie für den Verbrauch der Reserven, die Übertragung der Strategie in einen Geschäftsplan und das Management der Risiken des Plans zur Maximierung der Geschäftsgewinne unter Sicherung der Nachhaltigkeit des Bergbauunternehmens und seines Umfelds.

Nach dem folgenden Schema der Bergbaukommission[1] besteht die Wandlung von Ressourcen in Reserven aus folgenden Phasen: Das der Idee zugrunde liegende Explorationsprojekt; die technisch-wirtschaftliche Analyse der Größenordnung, die zu einer Profilstudie überleitet; die Vormachbarkeitsstudie und Machbarkeitsstudie, die eine Informationsgrundlage für einen Interessenten oder ein Finanzinstitut darstellt, um über die Durchführung des Projekts zu entscheiden.

In den ersten Phasen ist die Information fragmentiert oder unzureichend und impliziert ein hohes Risiko. Daher sind in den folgenden Etappen aller Projekte Aktionen aufzunehmen, die die Information perfektionieren und stabilisieren, um das Risikoniveau stetig zu senken, um dann in die nächste Projektphase einzutreten.

Abbildung 2_ Konversionsphasen und Studienniveaus



Quelle: Tulcanaza (2014)

Die aufeinander folgenden Bergbaustudien müssen den steigenden Sicherheitsgrad der für den Betrieb relevanten Parameter widerspiegeln, und im Falle positiver wirtschaftlicher Ergebnisse muss das Projekt gebaut, in Betrieb genommen und betrieben werden.

Der Betrieb einer Mine basiert auf einer multidisziplinären Zusammenarbeit, die zu koordinieren und auf sichere und wirksame Weise auszuführen ist. Die Arbeitsteams umfassen folgende Bereiche: Geologie, Geotechnik, Planung, Topographie, Minenbetrieb, Wartung, Verwaltung, Service und unterstützende Arbeiten in den Bereichen Sicherheit, Umwelt und Qualität, plus Berater in verschiedenen Themenbereichen.

1 Kommission zur Qualifizierung von Kompetenzen in Ressourcen und Reserven, festgeschrieben im Gesetz 20.235.

Zu den Aufgaben des Geologieteams gehört die Lieferung von Informationen über die physischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften des abzubauenden Materials. Diese Aufgabe steht am Anfang des Extraktionsprozesses. Diese Information wird an die Engineering- oder Planungsgruppe weitergeleitet, die sie mit weiteren Variablen zusammenführt, die sich auf Betrieb, Geotechnik, Metallurgie, Wartung, Produktivität und die Kosten beziehen, um einen Produktionsplan oder einen „Bergbauplan“ aufzustellen. Der Plan beschreibt die Materialbewegungen, die im Rahmen des Betriebs vollzogen werden und die dazu erforderlichen Ressourcen.

Die betriebliche Materialbewegung beinhaltet die Extraktion und die Förderung von Material unterschiedlicher Qualität und unterschiedlichen Erzgehalts. Dabei handelt es sich um Material ohne Wertstoffgehalt (Abraum), Material dessen Wertstoffgehalt die Weiterverarbeitung nicht rechtfertigt, und Material mit unterschiedlichem Erzgehalt. Dieses Material, das allgemein als Erz bekannt ist, wird einer der Prozesslinien oder einem Lager zugeführt.

Die Bergbauplanung wird während des Betriebs ständig ausgeführt, ähnlich wie in den früheren Projektphasen, aber mit einer anderen Informationsgrundlage.

Ein qualifiziertes Team namens Minenbetrieb koordiniert die Extraktion des Materials aus der Mine und folgt dabei den Richtlinien des Projektentwurfs und der Planung. Im Metallbergbau wird dazu die folgende Sequenz von Betriebsschritten vollzogen: Bohrung, Sprengung, Beladung und Förderung.

Alle Betriebsschritte und die hierzu eingesetzten Geräte und Technologien bilden ein Bergbausystem, das eng an die Abbaumethode gekoppelt ist. So kommt gegenwärtig in den meisten großen Tagebauten ein System zum Einsatz, in dem die Extraktion des Materials durch Bohrung (vor allem Rotationsbohrung) und Sprengung und die Materialförderung mit Radladern vollzogen wird.

Wie schon angesprochen ist der chilenische Bergbau durch die abnehmende Qualität der geologischen Reserven beeinträchtigt worden. Der Kupfergehalt sinkt immer weiter, und aufgrund der immer größeren Tiefe der Minen nimmt die Gesteinshärte zu. Außerdem ist in den Erweiterungen der Tagebauten normalerweise ein wachsendes Volumen an Abraum pro Tonne Erz abzutransportieren, und die Transportwege verlängern sich durch die größere Tiefe der Lagerstätten.

Das führt direkt zu einem höheren Energieverbrauch pro Pfund produziertem Feinkupfer und schlägt sich negativ auf die Produktivität des Bergbaugeschäfts nieder. Zur Notwendigkeit, eine größere Menge Abraum aus größerer Tiefe abzutransportieren und mehr Material zerkleinern zu müssen, gesellt sich die Tendenz, auf härteres Gestein zu treffen, was sich ebenfalls deutlich im Energiekonsum niederschlägt.

Ein weiterer Grund für den steigenden Energiebedarf ist die geringe Verfügbarkeit von Grundwasser zur Deckung des Verbrauchs neuer Betriebe und zukünftiger Bergbauprojekte. Daher muss mit den damit verbundenen Energiekosten, Wasser von der Küste aus in die Minen gefördert werden.

Hochpreiszyklen machen die Ausbeutung von Lagerstätten mit weniger Erzgehalt rentabel, doch die Abnahme des Erzgehalts, die Zunahme der Gesteinshärte und der Unreinheiten sowie die längeren Förderwege machen die Produktivität und die Produktionskosten zur Priorität und zur großen Herausforderung für den chilenischen Kupferbergbau. Es sollte nicht vergessen werden, dass der Bergbau ein langfristiges Geschäft mit volatilen Preisen ist. Daher sind die Produktivität und die Kosten Schlüsselelemente zur langfristigen Aufrechterhaltung des Geschäfts.

Vision des Kernthemas

Unter Einhaltung hoher Standards von Betriebseffizienz, Sicherheit, sozialer und Umweltnachhaltigkeit Weltmarktführer in Planung und Betrieb von Minen aus dem Großbergbau sein

Codelco
Division
El Teniente

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

In dieser Phase der Aktualisierung der Roadmap hat die Expertengruppe des Kernthemas die Arbeit der ersten Ausgabe als Grundlage genutzt, um davon ausgehend Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien neu zu definieren, wobei die Herausforderungen der vorherigen Roadmap bestätigt worden sind. Das heißt:

- *Produktivitätssteigerung und Kostenreduzierung*
- *Erhöhung der Erzreserven*
- *Umweltschutz und soziale Verantwortung*
- *Mehr Sicherheit und Qualität in den Arbeitsbereichen*

Die Planung und der Bergbaubetrieb wurden in drei Phasen unterteilt:

- *Bergbauprojekt, Engineering, Steuerung und Bergbauplanung (C&PM)*
- *Tagebau*
- *Untertagebau*

Herausforderung 01

Produktivitätssteigerung und Kostenreduzierung

Produktivität und Kosten sind zentrale Themen, die die Industrie kurz- und langfristig angehen muss. Diese Herausforderung betrifft alle im Rahmen des Kernthemas definierten Phasen. Doch aufgrund der beschriebenen Sachverhalte ist die Produktivität sowohl im Tagebau wie im Untertagebau von besonderer Relevanz im Prozess der Bergbau- und Betriebsplanung.

In der Phase Bergbauprojekt, Engineering, Steuerung und Bergbauplanung sind vor allem Forschungslinien relevant, die mit Methoden stochastischer Optimierung zur Sequenzierung des Abbauprozesses arbeiten und verschiedene Unsicherheitsquellen in ihre Evaluierung einbeziehen, welche auch eine Entwicklung von Simulationswerkzeugen und das integrierte, automatisierte Design der Prozessplanung im Zusammenspiel zwischen Mine und Anlage einbeziehen und dabei den Betrieb aus ferngesteuerten integrierten Steuerzentren vorsehen.

Im Tagebau sind Lösungen zur Verbesserung großer Materialbewegungen über lange Strecken sowie der Entwicklung von Methodologien für das Design von Böschungen mit größerem Gefälle als relevant erachtet worden.

Die Lösungen zur Produktivitätssteigerung im Untertagebau beziehen sich auf die Entwicklung eines Produktionsbetriebs in großer Tiefe und in großem Maßstab. Dazu zählt unter anderem die Entwicklung von Technologien für autonome oder ferngesteuerte Geräte in den verschiedenen Betriebsschritten in der Vorbereitung, Entwicklung und Konstruktion.

Nachfolgend präsentieren wir die wichtigsten Themen, die von der Expertengruppe des Kernthemas behandelt und für den Tagebau und den Untertagebau in Betracht gezogen worden sind. Die wichtigsten Elemente beziehen sich auf die Integration und die Charakterisierung der Prozesse zwischen Mine und Prozessanlage und der Entwicklung neuer Methodologien des Asset-Managements sowie der Wartung und Symptomatisierung der wichtigsten Geräte.

Produktivitätssteigerung

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
01 Optimale Strategie des Reserveverbrauchs	Methoden zur stochastischen/robusten Optimierung der Sequenzierung des Abbauprozesses	
	Werkzeuge zur Simulation und integriertem und automatisiertem Design der Planung der Prozesse zwischen Mine und Prozessanlage	
	Integriertes Design von Bohrung und Sprengung in Echtzeit / Kombination von Bohrtechniken (Charakterisierung des Felsmassivs) und Sprengtechniken (Design und Ergebnisvorhersage)	TA UT
02 Effizienzerhöhung bei Bohrungen und Sprengungen	Monitoring und Nachverfolgung des Erzes von der Sprengung an, um die Verarbeitung zu optimieren; insbesondere den Energieeinsatz bei der Sprengung und in der SAG-Mühle	TA
	Automatisierung/Fernsteuerung des Umgangs mit dem Sprengstoff im Sprengprozess	TA UT
	Technologieentwicklung für autonome/ferngesteuerte Geräte in den Betriebsschritten der Phasen Vorbereitung/Entwicklung und Konstruktion	UT

TA Tagebau

UT Untertagebau

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
03 Entwicklung des Untertagebaus in großem Maßstab: Vorbereitung, Entwicklung und Vorkonditionierung	Integrierte Automatisierung der vom GPS unabhängigen Förderfahrzeugflotte	TA UT
04 Verbesserung der Bewegung großer Materialmengen über lange Distanzen: Beladung und Transport	Entwicklung hybrider Systeme zur Bewegung großer Materialvolumen im Tagebau und im Untertagebau	TA UT
	Entwicklung einer synthetischen Vision/3D und haptischer Schnittstellen, die die Fernbedienung der Prozesse und eine immersive Teleoperation der Geräte erleichtern	UT
	Entwicklung von Koordinationssystemen für die synergetische Interaktion zwischen autonomen, teleoperierten und handgesteuerten Geräten, die die Interaktion mit anderen Systemen über Standardschnittstellen ermöglichen (Interoperabilität)	TA UT
	Entwicklung von Technologien zur Automatisierung/Teleoperation von Geräten für die verschiedenen unterstützenden Betriebsschritte wie Sekundärreduktion, Reinigung, Handhabung von sehr feuchtem, kontaminiertem Material (Wasser, Schlamm) etc.	UT

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
05	Erhöhung / Verbesserung der Böschungsstabilität	Methodologie von Böschungen mit größerem Gefälle	TA
		Entwicklung von Sprengtechnologien, die einen besseren Bankwinkel ermöglichen	TA
06	Integration und Charakterisierung der Operationen zwischen Mine und Prozessanlage	Entwicklung von Applikationen mit Online-Informationen zur integrierten Entscheidungsfindung des Prozesses zwischen Mine und Prozessanlage mit Ergebnisvermutung und Modellierung möglicher Szenarien	TA UT
		Monitoring- und Charakterisierungssystem in Echtzeit	TA UT
		Design und Installation integrierter Betriebszentren für Fernsteuerung und Fernbetrieb	TA UT
07	Entwicklung neuer Methodologien für das Asset-Management, Wartung und Symptomatisierung der wichtigsten Geräte	Vollkommen automatisierte, prädiktive Wartung	TA UT
		Automatisierung/Fernsteuerung bestimmter Wartungsprozesse zur Verkürzung der Wartungszeit kritischer Geräte	TA UT
		Immersive Online-Wartung	TA UT
		Entwicklung von Systemen zur Verarbeitung großer Datenmengen unter Einsatz von Big Data/IoT, die erlauben, das Verhalten von Flotten, Geräten, Systemen oder Prozessen abzuleiten	TA UT

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
08	Feststellung von Anomalien	Robuste Erkennung nicht zu brechenden Materials	TA UT
		Steuersysteme zur Online-Vorhersage von Gesteinszerberstung, Überschwemmungen und anderen relevanten Phänomenen unter Einsatz fester und an Geräten installierter Sensoren	UT
09	Neue Abbaumethoden	In situ-Bergbau	TA UT
10	Schulung und Training	Entwicklung neuer Technologien für die Schulung von Bedienern und Wartungspersonal	TA UT
11	Änderungsmanagement	Entwicklung von Werkzeugen, die die definierten Transformationen sichern (digitale Transformation)	TA UT

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Steigerung der Erzreserven

Von der zweiten identifizierten Herausforderung des Kernthemas leiten sich die Themen aus der folgenden Tabelle ab. Diese Themen beziehen sich auf die Entwicklungsphase des Bergbauprojekts, Engineering, Steuerung und Förderungsplanung. Die Erhöhung der Erzreserven in der Engineering- und Planungsphase erfordert die Perfektionierung von Werkzeugen, die unter anderem erlauben, eine optimale Strategie des Reserveverbrauchs, neue Abbaumethoden und eine Technologie zur Modellierung des Felsmassivs, einschließlich der Messungen von Erzgehalt, Beanspruchungen und Feuchtigkeit, zu entwickeln.

Es sind des Weiteren neue Erzabbau- und Verarbeitungsmethoden vorzusehen, die Ressourcen rentabel machen, die es mit den aktuellen Methoden und Technologien nicht sind.

Steigerung der Erzreserven

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
01 Optimale Strategie des Reserveverbrauchs	Methoden zur stochastischen/robusten Optimierung der Sequenzierung des Abbauprozesses	
02 Effizienzerhöhung bei Bohrungen und Sprengungen	Validierung der Fragmentierungskurven, die mit Online-Information und 2D- und 3D-Technologien (Hardware/Software) bestimmt werden.	TA UT
03 Erhöhung / Verbesserung der Böschungsstabilitätskontrolle	Methodologie von Böschungen mit größerem Gefälle	TA
04 Neue Abbaumethoden	In situ-Bergbau	TA UT
	Biolaugung von Rohfördergut mit durch Sprengung kontrollierter Körnung zur Optimierung der Rückgewinnung	TA

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Umweltschutz und soziale Verantwortung

Die sozialen und Umweltaspekte haben für die Entwicklung und die Nachhaltigkeit des Bergbaus der Zukunft eine erhebliche Bedeutung erlangt. Der wichtigste Faktor für die Projekte in der Entwicklungsphase ist die Betriebserlaubnis. In diesem Kontext zeigt die folgende Tabelle die Forschungs- und Entwicklungslinien für jede im Rahmen dieser Herausforderung identifizierte Lösung. Ziele der Forschungs- und Entwicklungslinien sind die Effizienzerhöhung bei Bohrungen und Sprengungen, die Verbesserung der Kontrolle von Schadstoffemissionen, die Minderung der Umweltbelastungen und die Entwicklung von Bergbauprojekten *in situ*. Wir betonen, dass das Verhalten bei den aktuellen Projekten eine Referenz für die *Stakeholder* der Bergbauprojekte ist. Daher ist es von großer Bedeutung, dass das Gesagte mit dem Getanen übereinstimmt, weil das vom Unternehmen projizierte Image dadurch beeinträchtigt werden kann.

Umweltschutz und soziale Verantwortung

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
01 Effizienzerhöhung bei Bohrungen und Sprengungen	Integriertes Design von Bohrung und Sprengung in Echtzeit/Kombination von Bohrtechniken (Charakterisierung des Felsmassivs) und Sprengtechniken (Design und Ergebnisvorhersage), Kontrolle der Umweltbelastungen: Vibrationen, Staub	TA
02 Bessere Kontrolle der Schadstoffemissionen und Minderung der Umweltbelastungen	Technologien zur Minderung der Staubemissionen im Tagebau	TA UT
	Technologien zur Minderung der Staubemissionen an Lade-/Abwurf-/Brecherstationen	TA UT
	Technologische Systeme zur ökologischen Behandlung/Nutzung des im Förderprozesses gebrauchten Wassers	UT
	Entwicklung und Validierung elektrischer Fahrzeuge/Produktionsgeräte zur Beseitigung von Gasen	UT

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
03	Neue Abbaumethoden	In situ-Bergbau	TA UT
04	Machbarkeitsmodell des Projekts und Prävention sozialer und Umweltkonflikte	Neue Methodologien	TA UT

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 04

Mehr Sicherheit und Qualität in den Arbeitsbereichen

Der Bergbaubetrieb ist an sich risikoreich. Die Herausforderung besteht in der Kontrolle des Risikos, wobei es eine Option ist, die Bergleute durch den Einsatz neuer Technologien aus den Risikobereichen fernzuhalten.

Die Arbeitssicherheit ist eine der Prioritäten im Bergbau. Das spiegelt sich darin, dass die meisten Bergbauunternehmen in ihrer Wertecharta die Sicherheit zum wichtigsten Wert deklarieren. Die Unfallrate im Bergbau ist geringer als in allen anderen wirtschaftlichen Aktivitäten des Landes. Bedauerlicherweise ist es bisher nicht möglich gewesen, die tödlichen Unfälle auf null zu reduzieren, doch ihre Zahl ist im Laufe der Zeit immer weiter gesunken. Es ist zu beachten, dass eine geringere Unfallrate in Beziehung zur Produktivitätssteigerung und zur Reduzierung der Betriebskosten steht, da durch Unfälle die Produktion unterbrochen wird.

In der Roadmap wird dieser Aspekt als bedeutende Herausforderung identifiziert, da er mit der Entwicklung folgender Forschungs- und Entwicklungslinien verbunden ist:

/ Monitoring der Vitalzeichen der Arbeiter

/ Entwicklung von Anwendungen mit Drohnen zur Erkennung von Anomalien im territorialen Management der Reserven / Rückstandshalden / Leckagen, um Frühwarnungen geben zu können

/ Steuersysteme unter Einsatz fester und an Geräten installierter Sensoren zur Online-Vorhersage von Erdstößen, die Gesteinszerberstung, Überschwemmungen und andere relevante Phänomene provozieren können

/ Technologien zur Minderung der Staubemissionen im Tagebau und im Untertagebau

/ Technologien zur Minderung der Staubemissionen an Lade-/Abwurf-/Brecherstationen im Tagebau und im Untertagebau

/ Entwicklung und Validierung elektrischer Fahrzeuge und Produktionsgeräte zur Beseitigung von Gasen

/ Entwicklung robuster und kostengünstigerer Technologien für das Monitoring und die Kontrolle der Böschungsstabilität

/ Entwicklung von Systemen zur Sammlung und Nutzung von Informationen in der Phase der Projektentwicklung, die eine Verbesserung der geotechnischen Charakterisierung / Vorkonditionierung des Felsmassivs / dynamische Stützung und Verstärkung ermöglichen

/ Entwicklung neuer Technologien für die Schulung von Bedienern und Wartungspersonal

/ Integrierte Automatisierung der vom GPS unabhängigen Förderfahrzeugflotte

/ Entwicklung massiver Positionierungssysteme in Interaktion mit anderen Sicherheits- und Belüftungssystemen bei Brandnotfällen

Herausforderung 04

/ Koordinationssysteme, die die synergetische Interaktion zwischen autonomen, teleoperierten und manuell gesteuerten Geräten ermöglichen, wobei die Interoprabilität zwischen verschiedenen Herstellern zu ermöglichen ist

/ Entwicklung einer synthetischen Vision/3D und Schnittstellen, die die Fernbedienung der Prozesse und eine immersive Teleoperation der Geräte ermöglichen

/ Automatisierung/Fernsteuerung bestimmter Wartungsprozesse zur Verkürzung der Wartungszeit kritischer Geräte

/ Integrierte Betriebszentren, die die Operationen zwischen Mine und Prozessanlage verwalten, die teleoperierten Geräte fernsteuern und die autonomen Geräte überwachen

/ Entwicklung von Systemen des Änderungsmanagements und Sicherung der Umsetzung

/ In situ-Bergbau

Mehr Sicherheit und Qualität in den Arbeitsbereichen

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
01	Effizienzerhöhung bei Bohrungen und Sprengungen, um die bestehenden Risiken besser kontrollieren zu können	Integriertes Design von Bohrung und Sprengung in Echtzeit / Kombination von Bohrtechniken (Charakterisierung des Felsmassivs) und Sprengtechniken (Design und Ergebnisvorhersage)	TA UT
		Automatisierung/Fernsteuerung des Umgangs mit Sprengstoff im Sprengprozess	TA UT
02	Entwicklung des Untertagebaus in großem Maßstab: Vorbereitung, Entwicklung und Vorkonditionierung	Entwicklung von Technologie für autonome/ferngesteuerte Geräte in den verschiedenen Betriebsschritten in den Phasen Vorbereitung/Entwicklung und Konstruktion	UT
		Entwicklung von Systemen zur Sammlung und Nutzung von Informationen in der Phase der Projektentwicklung, die eine Verbesserung der geotechnischen Charakterisierung/ Vorkonditionierung des Felsmassivs/dynamische Stützung und Verstärkung ermöglichen	UT

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
03	Verbesserung der Bewegung großer Materialmengen über lange Distanzen: Beladung und Transport	Integrierte Automatisierung der vom GPS unabhängigen Förderfahrzeugflotte	TA
		Koordinationssysteme, die die synergetische Interaktion zwischen autonomen, teleoperierten und manuell gesteuerten Geräten ermöglichen	TA
		Entwicklung hybrider Systeme zur Bewegung großer Materialvolumen im Tagebau	TA
		Entwicklung einer synthetischen Vision/3D und haptischer Schnittstellen, die die Fernbedienung der Prozesse und immersive Teleoperation der Geräte ermöglichen	UT
		Entwicklung massiver Positionierungssysteme in Interaktion mit anderen Sicherheitssystemen	UT
		Entwicklung von Technologien für die Automatisierung/Teleoperation von Geräten für die verschiedenen unterstützenden Betriebsschritte wie Sekundärreduktion, Reinigung, Handhabung von sehr feuchtem, kontaminiertem Material (Wasser, Schlamm) etc.	UT
04	Erhöhung / Verbesserung der Böschungsstabilitätskontrolle	Entwicklung robuster und kostengünstiger Technologien für das Monitoring und die Kontrolle der Böschungsstabilität	TA
		Methodologie von Böschungen mit größerem Gefälle	TA
		Design von Sprengungen und Einsatz von Sprengstoffen zur Kontrolle von Schäden an den Böschungswänden	TA

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
05 Integration und Charakterisierung der Operationen zwischen Mine und Prozessanlage	Monitoring- und Charakterisierungssystem in Echtzeit	TA UT
06 Entwicklung neuer Methodologien für das Asset-Management, Wartung und Symptomatisierung der wichtigsten Geräte	Vollkommen automatisierte prädiktive Wartung	TA UT
	Automatisierung/Fernsteuerung bestimmter Wartungsprozesse zur Verkürzung der Wartungszeit kritischer Geräte	TA UT
	Monitoring der Vitalzeichen der Hauptkomponenten der Großgeräte zur Optimierung der prädiktiven Wartung	TA UT
	Immersive Online-Wartung	TA UT
07 Feststellung von Anomalien	Monitoring der Vitalzeichen der Arbeiter	TA UT
	Entwicklung von Anwendungen mit Drohnen zur Erkennung von Anomalien im territorialen Management der Reserven/Rückstandshalden/ Leckagen, um Frühwarnungen geben zu können	TA
	Prädiktive Systeme unter Einsatz fester und an Geräten installierter Sensoren zur Online-Vorhersage von Erdstößen, die Gesteinszerberstung, Überschwemmungen und andere relevante Phänomene provozieren können	UT

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien	Betrieb
08	Bessere Kontrolle der Schadstoffemissionen und Minderung der Umweltbelastungen	Technologien zur Minderung der Staubemissionen im Tagebau	TA UT
		Technologien zur Minderung der Staubemissionen an Lade-/Abwurf-/Brecherstationen	UT
		Entwicklung und Validierung elektrischer Fahrzeuge/Produktionsgeräte zur Eliminierung von Gasen	UT
09	Neue Abbaumethoden	In situ-Bergbau	TA UT
10	Schulung und Training	Entwicklung neuer Technologien für die Schulung von Bedienern und Wartungspersonal	TA UT
11	Verbesserung der Kontrollmaßnahmen zur Minderung der Betriebsrisiken basierend auf den Erfahrungen in allen Betriebsschritten	Entwicklung von vorhersehenden Systemen, die unter Einbeziehung der berichteten Vorfälle erlauben, die Präventivmaßnahmen zu verbessern	TA UT

Quelle: Eigene Angaben

03
Kernthema Konzentration

Codelco
División
Ministro Hales

Grundlagen

Die Produktivität des nationalen Bergbaus ist vor allem aufgrund der Qualitätsabnahme der geologischen Ressourcen gesunken, die über das Verhältnis zwischen Abraum und Erzanteil gemessen wird. Dazu kommt der gestiegene Energieverbrauch durch einen höheren Verarbeitungsgrad in der Erzkonzentration.

Die Erzkonzentration findet nach der Extraktion des Sulfiderzes statt und ist ein sehr relevanter Prozess für die Produktivität der Industrie. Der Konzentrationsprozess besteht aus mehreren aufeinander folgenden Etappen: Brechen, Mahlen, Flotation, Eindickung und Rückstandsentsorgung.

Die Konzentration beginnt mit der Verkleinerung, die sich in die Etappen des Brechens und der Nassvermahlung aufteilt. Diese beiden Phasen sind durch den hohen Energieverbrauch beim Mahlen und den großen Einsatz von Strom, Stahl und Wasser für einen bedeutenden Teil der Kosten des Konzentrationsprozesses verantwortlich.

Nach der Mahlung wird das Kupfersulfid im Flotationsprozess weiter konzentriert, indem es von anderen weniger wertvollen oder wertlosen Mineralien getrennt wird. So erhält man ein vor allem aus Kupfersulfid gebildetes Konzentrat. In der darauf folgenden Eindickungsphase soll Wasser rückgewonnen werden, und die Flotationsrückstände werden in Absetzbecken entsorgt.

Der Mahlungsprozess verursacht aufgrund des hohen Energieverbrauchs im Konzentrationsprozess die höchsten Kosten. Insgesamt entfällt mehr als ein Drittel des Stromverbrauchs im Metallbergbau auf die Mahlung. Die folgende Grafik zeigt die Kostenverteilung des Konzentrationsprozesses in den wichtigsten Phasen. Von den 49 % der gesamten Konzentrationskosten, die im nationalen Bergbau durchschnittlich auf den Mahlungsprozess entfallen, sind 52 % Stromkosten, 24 % Wartungs- und Reparaturkosten und 22 % Stahlkosten für die Mahlkugeln. Es wird geschätzt, dass der Stahlverbrauch im Jahr 2025 auf mehr als eine Million Tonnen steigen wird. Das entspricht einem Anstieg von 127 % im Vergleich zum Jahr 2014 (Cochilco, 2014e).

Grafik 1_ Betriebskosten in der Phase der Mahlung

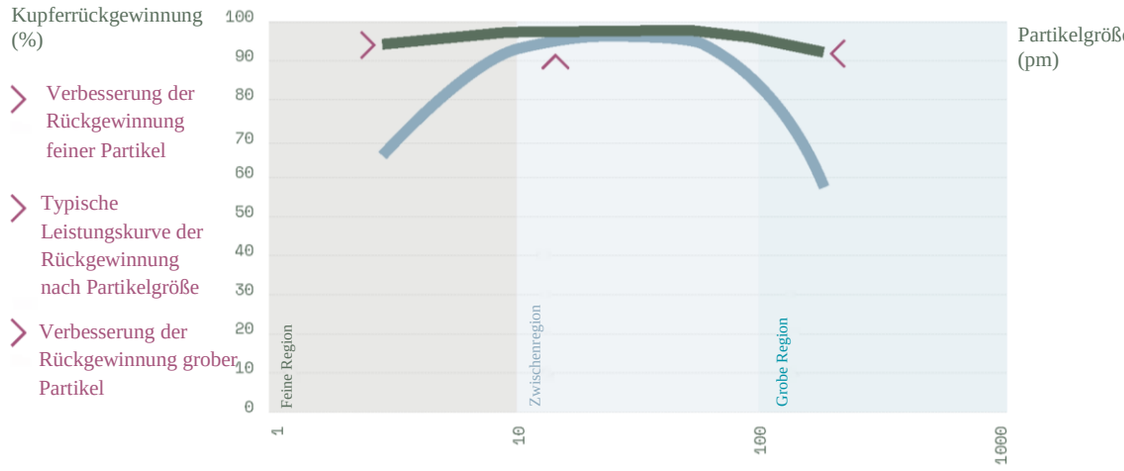
Quelle: Cochilco (2014e)

Wasser ist ein bedeutender Produktionsfaktor im Konzentrationsprozess von der Mahlung über die Flotation bis zum Transport der Flotationsrückstände. Traditionell hat man Grundwasser eingesetzt, doch seit Jahren wird schrittweise mehr Meerwasser verwendet, was mit einem ansteigenden Energieverbrauch einhergeht.

In den Mahlungs- und Flotationsprozessen gibt es einige Herausforderungen aufgrund der Präsenz feiner und grober Partikel in den primären Flotationszellen (*rougher*), die das Fließmuster des Materials durch rheologische Veränderung (feine Partikel) und Materialakkumulation (grobe Partikel) beeinträchtigen und die Leistung des Flotationsprozesses einschränken. Dadurch erhöhen sich die Wartungskosten und die Produktivität nimmt ab. Daher müssen für den Flotationsprozess Strategien zur effizienten Rückgewinnung der werthaltigen feinen und groben Partikel identifiziert werden.

Die Grafik 2 zeigt die typische Leistungskurve der metallurgischen Kupferrückgewinnung in Funktion der Partikelgröße. Man sieht, dass die Regionen des feinen und groben Materials in diesem Diagramm verbessert werden können, um so die Leistung zu erhöhen.

Grafik 2_ Metallurgische Rückgewinnung in Funktion der Partikelgröße



Quelle: Trahar (1981) angepasst

Es ist zu beachten, dass die erforderlichen Investitionen für die Erzkonzentration hoch sind, weshalb das Asset-Management in Konzentrationsanlagen besonders relevant ist.

Die Steuerungstechnologien erscheinen als Mittel zur Optimierung der Assets und zur Verbesserung der Prozesseffizienz. Sie schaffen nicht nur Sicherheit für das Personal, sondern ermöglichen die Prozessstabilisierung (weniger Variabilität), Kostenreduzierung, Produktivitätssteigerung und Qualitätsverbesserung der Zwischen- und Endprodukte.

Zum anderen sind im Bereich der Wartung neueste Methodologien und Technologien aus der Industrie eingebunden worden, die die prädiktive Wartung der Geräte und Produktionsinstallationen ermöglichen.

Vision des Kernthemas

Unter Einhaltung hoher Standards von Betriebseffizienz, Sicherheit, sozialer und Umweltnachhaltigkeit Weltmarktführer im Betrieb von Konzentrationsanlagen sein

Antofagasta
Minerals
Mine Centinela

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

In Funktion der bekannten Informationen und der zu diesem Kernthema formulierten Vision hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe folgende Herausforderungen mit Lösungsansätzen und Forschungs- und Entwicklungslinien definiert.

Herausforderung 01

Produktivitätssteigerung

Im dargelegten Kontext erscheint es wesentlich, zur Produktivitätssteigerung in der Phase der Erzkonzentration das Asset-Management zu verbessern, den Energie- und Stahlverbrauch zu senken und die Wassernutzung und -förderung effizienter zu gestalten.

In der folgenden Tabelle werden die Forschungs- und Entwicklungslinien dargestellt, die den Lösungsvorschlägen für die Herausforderungen zugeordnet sind.

Produktivitätssteigerung

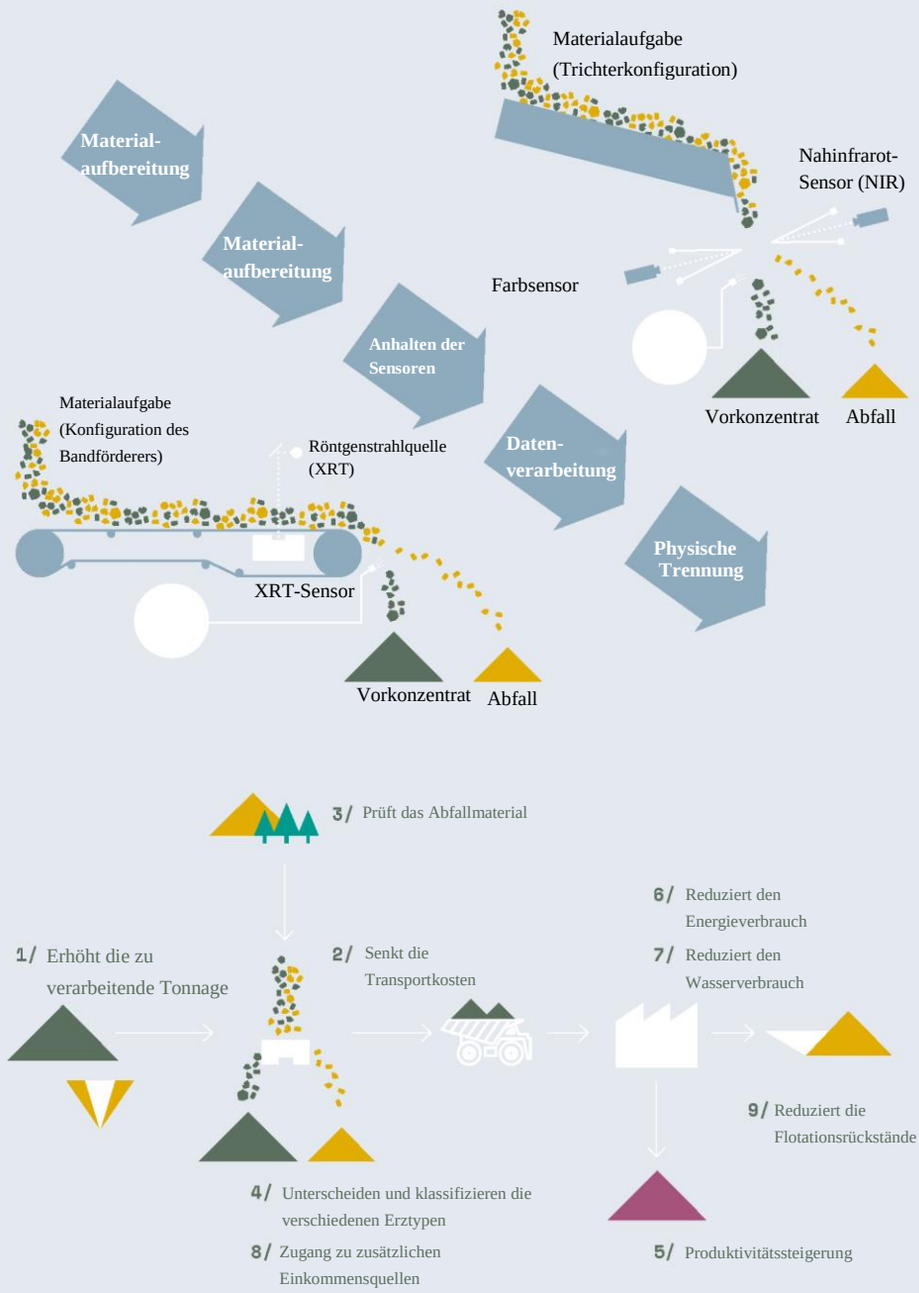
Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Asset-Management	Monitoring der wichtigsten Geräte Management nicht zu brechenden Material Wartbarkeit der Instrumentierung Robotisierung und autonomer Betrieb Auswirkungen des Meerwassereinsatzes
02 Senkung des Energie- und Stahlverbrauchs	Fragmentierung Vorklassifizierung Vorkonzentration Entwicklung neuer Geräte und Anpassung bestehender Technologien Klassifizierungseffizienz Entwicklung automatischer Sensoren und Steuerungen/Prozessoptimierung Auswirkungen des Meerwassereinsatzes Mahlungsmittel und Beschichtungen Auswirkung der Präsenz von Lehmerden im Fließverhalten des Flotationsmaterials
03 Effiziente Wassernutzung und -förderung	Einsatz von entsalztem oder Meereswasser Reduzierung der Wassernachspeisung Höhere Pumpeffizienz

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 01

Die Gewichtung der Herausforderungen und Lösungen dieses Kernthemas hat gezeigt, dass der Bereich der Vorkonzentration und Klassifizierung prioritär für die Optimierung der Produktionsmittel ist und den Zugang zu in der Vergangenheit unberücksichtigten Reserven eröffnen kann. Die Grafik 3 zeigt den Vorkonzentrationsprozess (*sorting*), seine Nutzungskonzepte und die Vorteile der Umsetzung.

Grafik 3_ Die Prinzipien der auf Messsensoren basierenden Vorkonzentration der Erzpartikel



Quelle: Die Grafik stammt von der Website:
https://www.outotec.com/company/newsletters/minerva/minerva-issue-2--2017/ore-sorting-the-road-to-optimizing-your-operation/

Herausforderung 02

Steigerung der Erzressourcen und -reserven

Zur Erhöhung der Basiserzressourcen und -reserven bedarf es der Verbesserung der metallurgischen Leistung der Prozesse, der Kontrolle der Unreinheiten und der Entwicklung der neuen Technologien.

In folgender Tabelle werden die Forschungs- und Entwicklungslinien dargestellt, die den Lösungsvorschlägen für die Herausforderungen zugeordnet sind.

Steigerung der Erzressourcen und -reserven

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien
01	Steigerung des Erzgehalts in Konzentraten und Rückgewinnung relevanter Elemente	Selektive Flotation von Subprodukten Entwicklung automatischer Sensoren und Steuerungen/Prozessoptimierung Pyritdrückung Flotation von feinen und groben Partikeln und Sänden Erforschung der Verwendung von Nanopartikeln in der Flotation Auswirkungen des Meerwassereinsatzes
02	Kontrolle der Unreinheiten	Entwicklung von Technologien zur Sicherung der Konzentratsqualität
03	Entwicklung neuer Technologien	Entwicklung neuer Konzentrationsmethoden

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Die Priorisierung dieses Kernthemas unterstreicht die Bedeutung, Wert aus den feinen und groben Partikeln zu gewinnen. Die Betriebspraxis zeigt, dass die aktuellen Prozesse in der Rückgewinnung der feinen und groben Partikel ineffizient sind (siehe Grafik 4).

Gewichtung der Lösungen des Kernthemas

Auf Grundlage der Evaluierung der Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien, sind folgende Forschungs- und Entwicklungslinien priorisiert worden:

Vorklassifizierung und Vorkonzentration der Erze

Die Entwicklung der Forschungslinie der Vorklassifizierung und Vorkonzentration der Erze ist aus folgenden Gründen von Interesse:

Der Erzgehalt des Prozessmaterials nimmt ab, sodass zur Aufrechterhaltung der Produktion mehr Tonnen verarbeitet werden müssen. Daher ist die Vorklassifizierung oder Vorauswahl des werthaltigen Materials wesentlich für den effizienten Einsatz von Energie und Produktionsmitteln.

Die Mineralogie der Lagerstätten ist komplex, und es werden zahlreiche Etappen der Verkleinerung benötigt. Idealerweise sollten die Fraktionen mit werthaltigen Komponenten zerkleinert werden, um keine Energie zu verschwenden.

Die Vorkonzentrationsprozesse können auch auf Prozesse des Sekundärbergbaus ausgeweitet werden, wie beispielsweise die Wiederaufbereitung von Flotationsrückständen, die sehr nützlich ist, um große Volumen zu verarbeiten.

Verbesserung der Flotation von feinen und groben Partikeln und Sänden.

Die Verbesserung der Flotation von feinen und groben Partikeln und Sänden ist aus folgenden Gründen relevant:

Die Erzverarbeitung mit immer komplexerer Mineralogie verlangt Etappen der feinen und superfeinen Mahlung. Diese Prozesse stellen große Herausforderungen an die Trennung der feinen Partikel durch die Flotation. Daher sind Innovationen und Technologien, die sich dieser Aspekte annehmen, von herausragender Bedeutung für die Effizienz der Trennungsprozesse im chilenischen Bergbau.

Zur Optimierung der Trennungsprozesse (sowohl für den Energie- und Wasserverbrauch wie für die Residenzzeit) müssen die werthaltigen groben Partikel, die die Freisetzungsanforderungen erfüllen und hydrophobe Eigenschaften aufweisen, früh abgetrennt werden. Deshalb sind Strategien zur Abtrennung der groben Partikel zu identifizieren und umzusetzen.

04
Kernthema Rückstände

Codelco
Rückstandsbecken
Pampa Austral
↑

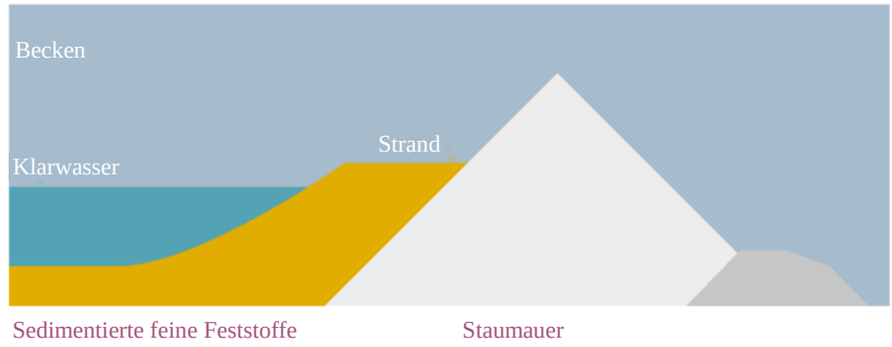
Grundlagen

Im Kupferbergbau werden große Materialmengen abgebaut, von denen nur ein kleiner Anteil Elemente von wirtschaftlichem Interesse enthält, die extrahiert werden sollen. Nach der Verarbeitung des Materials und der Extraktion des Kupfers - und eventuell weiterer Wertstoffe - verbleiben Abfälle (bestehend aus gemahlenem Gestein, mit Chemikalien versetztem Wasser und verbleibende Reagenzien), die als Rückstände bezeichnet werden und 97-99 % der verarbeiteten Mineralien ausmachen.

Die Rückstände werden über Rinnen zu speziell präparierten Endlagerstätten gefördert, die je nach Methode des Staumauerbaus Absetzdepots, Absetzdämme oder Absetzbecken genannt werden.

Die Staumauer eines Absetzdamms wird mit Prozessmaterial (aus Steinbrüchen oder Minenabraum) gebaut und ist an der Dammkrone und in der inneren Böschung imprägniert. Die Staumauer eines Absetzbeckens dagegen wird mit den gröbsten Fraktionen der Rückstände gebaut und verfügt über Trennmauern, deren innere Böschungen imprägniert sind, und im Boden des Absetzbeckens sind Entwässerungsleitungen installiert. Im Becken sedimentieren die feinen Feststoffe, und es bildet sich ein Klarwassersee (Sernageomin, 2013).

Abbildung 1_ Schema eines Absetzbeckens

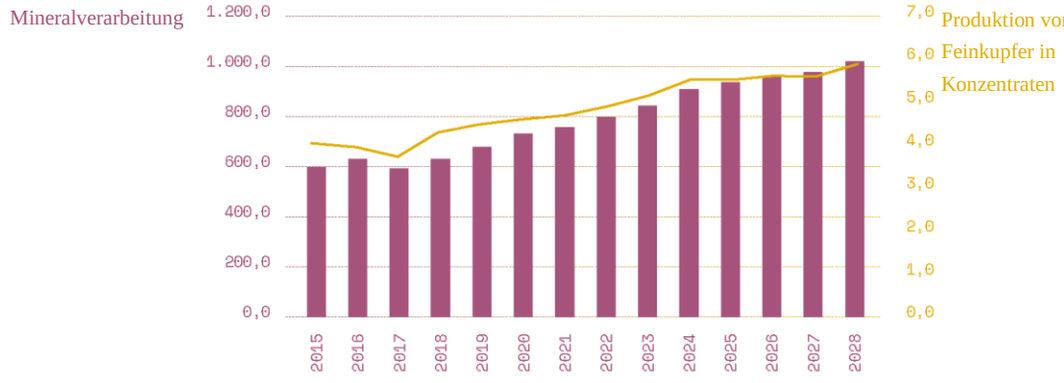


Quelle: Eigene Angaben.

Aufgrund des sinkenden Erzgehalts in den aktuell ausgebeuteten Lagerstätten und in den bestehenden Entwicklungsprojekten der Bergbauunternehmen, müssen die Betreiber immer größere Tonnagen Material abbauen, um das Produktionsniveau aufrecht zu erhalten oder um der Marktnachfrage entsprechend zu wachsen. Damit erhöht sich proportional die Menge an Rückständen, die entweder als Abraum oder als Flotationsrückstände entsorgt werden müssen. Nach Schätzungen könnte sich die Rückstandsproduktion bis zum Jahr 2035 verdoppeln. Die folgende Grafik zeigt eine Projektion des Verhältnisses zwischen verarbeitetem Material und Feinkupfer in im produzierten Konzentrat bis 2028.

Bei einer jährlichen Wachstumsrate des im Konzentrat enthaltenen Feinkupfer von 3,1 % wächst die Mineralverarbeitungsrate um jährlich 3,6 % und erhöht sich von 631 Millionen Tonnen im Jahr 2016 auf 1000 Tonnen im Jahr 2028 (Cochilco, 2018)

Grafik 1_ Mineralverarbeitung und Kupferproduktion



Quelle: Cochilco (2018)

Außerdem sind die Absetzbecken heute eine bedeutende und immer häufigere Konfliktquelle zwischen den Unternehmen und der lokalen Bevölkerung. Gegen 47 % der Rückstandsproduktion des Landes bestehen Beschwerden oder es gibt irgendeine Art Disput mit der Bevölkerung (JRI, 2015). Es handelt sich also um eine nicht zu unterschätzende Herausforderung, die mit der Beteiligung aller Akteure anzugehen ist (Bergbauunternehmen, lokale Gemeinden und öffentlicher Sektor).

In unserem Land hat es in letzter Zeit keine größeren Vorfälle in den aktiven Rückstandsdepots gegeben. Der letzte Vorfall mit weltweitem Echo war in den 60er Jahren der Bruch des Beckens Nummer 2 der Minera Disputada. Die jüngste internationale Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass eines der Hauptrisiken der Absetzbecken der Bruch der Staumauer und die daraus resultierende Überschwemmung der umliegenden Gebiete ist, die eine große Gefahr für die lokale Bevölkerung darstellt. Ursachen sind - insbesondere mit dem weltweiten Klimawandel verbundene - Naturereignisse wie Erdbeben oder extreme Unwetter oder fehlerhafte Betriebs- oder Planungsentscheidungen.

Von 2015 bis März 2019 sind Dammbrüche von Absetzbecken registriert worden, die zum Teil gesamte Täler zerstört haben. Das größte Ereignis geschah in der New Wales Plant in Mulberry, Polk County in Florida in den USA im September 2016: der Dammbruch in einer Phosphatanlage setzte 840.000 m^3 Rückstände frei und kontaminierte den Grundwasserleiter von Florida, der wichtigsten Trinkwasserquelle der Region. Im Jahr 2018 brach der Damm der Mine Cieneguita, Urique in Chihuahua in Mexiko und setzte 249.000 m^3 Rückstände und 190.000 m^3 weiteren Materials frei, die 29 km des Flussufers überschwemmten und den Tod von sieben Arbeitern verursachten.

Diese Art von Ereignissen in Absetzbecken auf der ganzen Welt ist beim Betrieb, in der Planung und im Monitoring der Rückstandsbecken in Chile in Betracht zu ziehen.

Des Weiteren sind die Versickerungen aus aktiven und inaktiven Absetzbecken für die Umweltverträglichkeitsstudien relevant geworden. Hierin besteht eine langfristige Herausforderung für den Bergbaubetrieb, da Jahre nach dem aktiven Betrieb des Rückstandsdepots Umweltschäden verursacht werden können. Mangelnde Kontrolle und fehlende Kontrollmaßnahmen der Versickerungen können die Gesundheit und Lebensqualität der lokalen Bevölkerung beeinträchtigen, Wasserläufe und Böden verschmutzen und negative Wirkungen für andere Wirtschaftsaktivitäten wie Landwirtschaft und Viehzucht nach sich ziehen.

Tabelle 1_ Jüngste Vorfälle in Absetzdepots weltweit

Datum	Ort	Unternehmen
25/01/2019	Staudamm Brumadinho Minas Gerais, Brasilien	Minera Vale
04/06/2018	Mine Cieneguita Urique Chihuahua, Mexiko	Minera Rio Tinto (Cluster Minero de Chihuahua A.C.)
09/03/2018	Cadia New South Wales, Australien	Newcrest Mining Ltd.
03/03/2018	Huancapatí, Provinz Recuay, Peru	Compañía Minera Lincuna S.A. (Grupo Picasso)
17/02/2018	Barcarena Pará, Brasilien	Hydro Alunorte/ Norsk Hydro ASA
17/09/2017	Kokoya Gold Mine Bong County, Lybien	MNG Gold Liberia (Redwood Global Inc.)

Datum	Ort	Unternehmen
30/06/2017	Mishor Rotem Israel	Rotem Amfert Negev Ltd. Israel Chemicals (ICL)
12/03/2017	Tonglvshan Mine Provinz Hubei, China	China Daye Non-Ferrous Metals Mining Limited
27/10/2016	Mine Antamok (inaktiv) Itogon, Philippinen	Benguet Corp.
27/08/2016	Anlage New Wales Florida, EE.UU.	Mosaic Co
25/01/2019	Staudamm Brumadinho Minas Gerais, Brasilien	Minera Vale
04/06/2018	Mine Cieneguita Chihuahua, Mexiko	Minera Rio Tinto (Cluster Minero de Chihuahua A.C.)
09/03/2018	Cadia New South Wales, Australien	Newcrest Mining Ltd
03/03/2018	Huancapatí Provinz Recuay, Peru	Compañía Minera Lincuna SA (Grupo Picasso)
17/02/2018	Barcarena Pará, Brasilien	Hydro Alunorte/ Norsk Hydro ASA
17/09/2017	Kokoya Gold Mine Bong County, Lybien	MNG Gold Liberia (Redwood Global Inc.)
30/06/2017	Mishor Rotem Israel	Rotem Amfert Negev Ltd. Israel Chemicals (ICL)
12/03/2017	Tonglvshan Mine Provinz Hubei, China	China Daye Non-Ferrous Metals Mining Limited
27/10/2016	Mine Antamok (inaktiv), Provinz Benguet, Philippinen	Benguet Corp.

Datum	Ort	Unternehmen
27/08/2016	Anlage New Wales Florida, EE.UU.	Mosaic Co.
08/08/2016	Villa Dahegou Provincia Henan, China	Luoyang Xiangjiang Wanji Aluminium Co. Ltd.
21/11/2015	Hpakant Kachin State, Myanmar	Hlan Shan Myonwesu
05/11/2015	Mine Germano Minas Gerais, Brasilien	Samarco Mineração S.A. (50% BHP Billiton, 50% Vale)
10/09/2014	Mine Herculano Minas Gerais, Brasilien	Herculano Mineração Ltda.
07/08/2014	Mine Buenavista del Cobre Sonora, Mexiko	Southern Copper Corp. Grupo México
04/08/2014	Mine Mount Polley British Columbia, Kanada	Imperial Metals Corp.
02/02/2014	Dan River Steam Station North Carolina, EE.UU.	Duke Energy
15/11/2013	Zangezur Copper Molybdenum Combine Provinz Syunik, Armenien	Cronimet Mining AG
31/10/2013	Kohlengrube Obed Mountain Alberta, Kanada	Sherritt International
4/11/2012	Sotkamo Provinz Kainuu, Finnland	Talvivaara Mining Company Plc
01/08/2012	Miea Padcal Provinz Benguet, Philippinen	Philex Mining Corp.

Datum	Ort	Unternehmen
21/07/2011	Mianyang Provinz Henan, China	Xichuan Minjiang Elektrolytische Mangan-Anlage
04/10/2010	Kolontár Ungarn	MAL Magyar Alumínium
25/06/2010	Huancavelica Peru	Unidad Minera Caudalosa Chica
29/08/2009	Karamken, Region Magadan, Russland	Karamken Minerals Processing Plant
27/04/2009	Barcarena Pará, Brasilien	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA
22/12/2008	Fossilanlage Kingston Tennessee, USA	Tennessee Valley Authority
08/09/2008	Taoshi Provinz Shanxi, China	Tashan Mining Company
10/01/2007	Miraí Minas Gerais, Brasilien	Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda.
06/11/2006	Nchanga Chingola, Sambia	Vedanta Resources plc
30/04/2006	Zhen'an County Gold Mining Provincia Shaanxi, China	Zhen'an County Gold Mining Co. Ltd.
14/04/2005	Lago Bangs Mississippi, USA	Mississippi Phosphates Corp.

Dazu ist die wachsende Knappheit von Wasser und landwirtschaftlich nutzbarer Fläche in Betracht zu ziehen: Ein speziell kritischer Punkt, wenn wir an das projizierte Wachstum des Rückstandsvolumens denken. Für die Zukunft wird erwartet, dass sich ein bedeutender Teil der Bergbauproduktion in die Zentralzone, das heißt in die IV.-VI. Region, verlagern wird. Dort gibt es eine größere Bevölkerungsdichte und damit mehr Wettbewerb und Kampf um die Nutzung und die Auswirkungen auf Boden und Wasser.

Abbildung 2_ Zukünftige Bergbauressourcen in der Zentralzone

In der Zentralzone Chile von der IV. bis zur VI. Region liegen aktuell mehr als 50 % der zukünftigen Kupferressourcen des Landes.

Region Coquimbo

Region Valparaíso

Metropolregion von Santiago

Region Libertador General Bernardo O'Higgins

• Minen

Quelle: Iniciativa Scenario Planning (2014)

Obwohl es auf rechtlicher Ebene Fortschritte zum Schutz der Bevölkerung gegeben hat, gibt es Themen wie die chemische Stabilität der Rückstände und die Versickerungen, die zusammen mit den Behörden noch zu bearbeiten sind.

Der erwartete Produktionsanstieg, zusammen mit der Knappheit von Standorten für die Depots und die Kritik vonseiten der Bevölkerung erfordern die Überprüfung der aktuellen Entsorgungsverfahren, die Evaluierung der Planungsmethodologie neuer Depots und der Abbaumethodologien, die ohne externe Rückstandsdepots auskommen, sowie die Suche nach Alternativen zur Minderung der Umweltbelastungen durch die aktuell betriebenen Rückstandsdepots.

Nationale Rückstands-Politik

Das Bergbauministerium hat im September 2018 die Nationale Rückstands-Politik verkündet, mit der das Thema der aktiven, inaktiven und verlassenen Rückstandsdepots auf integrale Weise behandelt werden soll. Spezifisch sieht diese Politik für die 101 aktiven Absetzbecken ein permanentes Monitoring mit Echtzeitzugang für die lokale Bevölkerung vor, ebenso wie den detaillierten und technischen Zugang für Sernageomin zur Fernüberwachung. Für die inaktiven und verlassenen Absetzbecken sind Maßnahmen zur besseren Erkennung der aktuellen Situation (Fernmonitoring und partizipatives Monitoring durch die lokale Bevölkerung), der rechtlichen Situation (Besitztitelstudien), der Risiken (Aktualisierung der Methodologien der risikobasierten Prioritätensetzung) sowie Maßnahmen zur Schließung, Wiederaufbereitung oder neuen Nutzungen vorgesehen.

Kataster der Absetzbecken in Chile

Sernageomin aktualisiert regelmäßig das Kataster der nationalen Absetzbecken. Nach dieser Information gab es im Jahr 2018 740 Depots im ganzen Land, von denen 101 aktiv, 469 inaktiv und 170 verlassen waren.

Die folgende Tabelle zeigt den Zustand der registrierten Depots und ihre Verteilung auf die Regionen des Landes.

Tabelle 2_ Zustand der Rückstandsdepots in Chile nach Region

Region	Verlassen	Aktiv	Inaktiv	Gesamt
I	6	1	-	7
II	14	13	20	47
III	23	30	108	161
IV	106	30	250	386
MR	6	6	14	26
V	11	13	57	81
VI	-	3	15	18
VII	-	2	2	4
XI	4	2	3	9
XV	-	1	-	1
Gesamt	**170**	**101**	**469**	**740**

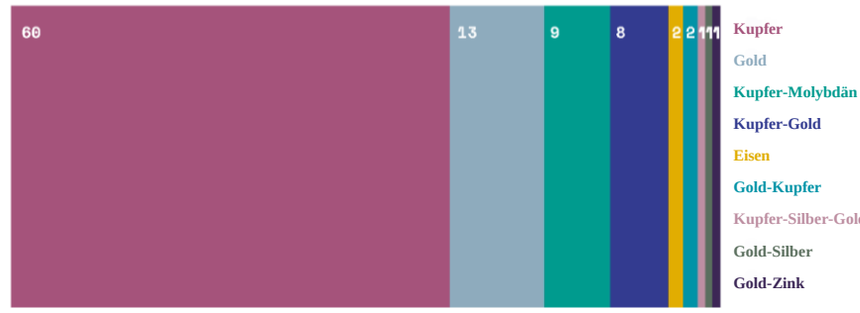
Quelle: Sernageomin (2018)

Das Kataster registriert 170 als verlassen klassifizierte Depots. Laut Definition sind das alle Depots ohne bekannten Besitzer oder Herkunftsnachweis oder es gibt offizielle oder glaubwürdige Informationen, nach denen keine Schließungsmaßnahme durchgeführt wurde.

Diese Situation verpflichtet den Staat zur Evaluierung des strukturellen Risikoniveaus (Stabilität), um den Zustand zu verbessern und die Wasserversickerungen festzustellen sowie die Wasseraufnahme und -behandlung zu definieren. In den Regionen III und IV konzentrieren sich mit jeweils 30 Anlagen die meisten aktiven Depots.

Die Mehrzahl der aktiven Rückstandsdepots stammt aus der Produktion von Kupfer, Kupfer-Gold und Kupfer-Molybdän. Insgesamt werden in 78 genehmigten Depots 14 Millionen Kubikmeter gelagert.

Grafik 2_ Anzahl der Rückstandsdepots nach abgebautem Metall



Quelle: Sernageomin (2018)

Die Bergbaubetriebe, die am meisten Rückstände produzieren, stammen aus dem Großbergbau. Codelco ist mit einem Anteil von 28 % des nationalen Rückstandsaufkommens der größte Produzent. Darauf folgen die Unternehmen Antofagasta Minerals (AMSA) mit 16 % und BHP Billiton mit 13 % (JRI, 2015).

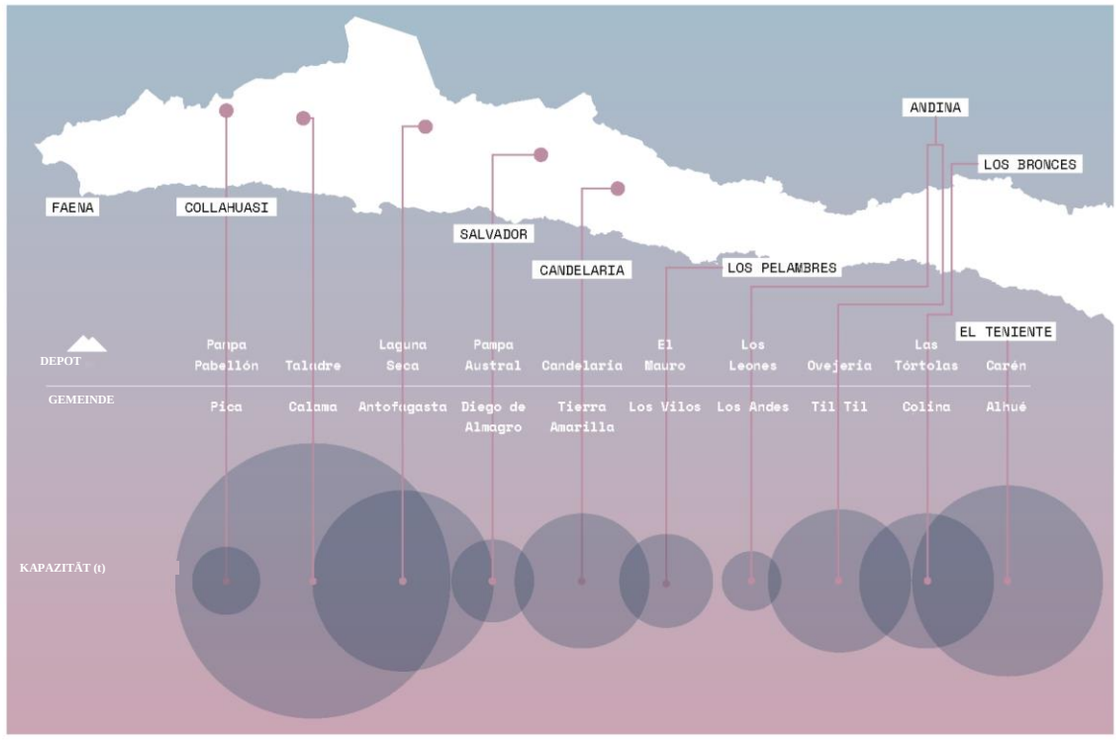
Die aktuelle Produktion von Bergbaurückständen konzentriert sich mit 62 % der Gesamtmenge vor allem im Norden. Die Zentralzone produziert 37 % der Bergbaurückstände, während das Aufkommen im Süden gegen null tendiert (1 %).

Die wichtigsten Minen für die Rückstandsproduktion im Norden Chiles sind Escondida, Chuquicamata, Collahuasi, Caserones, Centinela, Candelaria, Ministro Hales und Salvador. In Zentralchile sind die größten Rückstandsproduzenten Los Pelambres, El Teniente, Andina, Los Bronces und El Soldado.

Die größten aktiven Rückstandsdepots in Chile sind El Mauro der Minera Los Pelambres, Las Tórtolas von Los Bronces, Talabre von Chuquicamata und Ministro Hales, Pampa Pabellón von Collahuasi und Ovejería von Andina, Carén von El Teniente und Laguna Seca von Escondida.

Im Allgemeinen haben alle großen aktiven Absetzbecken ein adäquates Design, um die Stabilität im Falle von seismischen und/oder hydrologischen Ereignissen zu garantieren, vorausgesetzt sie werden mit bewährten Verfahren betrieben.

Abbildung 3_ Top 10 der aktiven chilenischen Rückstandsbecken



Quelle: Eigene Quelle mit Daten von Sernageomin.

In Verbindung mit dem Kataster der Rückstandsdepots verfügt Sernageomin aktuell über ein Programm zur geochemischen Charakterisierung der Rückstandsdepots in Chile. Die Stichproben hierfür werden von der Beckenoberfläche, den Wänden und den Sedimenten, die dem Depot nachgelagert sind, gezogen. Zum Datum der letzten Aktualisierung im Juni 2018 sind 1.543 Stichproben aus 538 von 644 besuchten Rückstandsdepots analysiert worden. Diese Information ist sehr nützlich zur Bestimmung möglicher potenziell umweltgefährdender Elemente, sowie um Bergbaurückstände zu erkennen, die über einen aktuell nicht genutzten kommerziellen Wert verfügen.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Rückstände

Der Internationale Rat der Bergbau- und Metallindustrie (ICMM in der englischen Abkürzung) veröffentlichte 2013 einen Bericht, in dem er detailliert die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bergbau beschreibt. Nach diesem Dokument gibt es in Chile zwei Regionen, in denen die Bergbauoperationen Risiken ausgesetzt sind. Zum einen wird sich die schon jetzt extreme Wasserknappheit in der Regionen von Antofagasta und Atacama verdoppeln; zum anderen ist es wahrscheinlich, dass die Zentralzone Chiles in der Zukunft sehr viel feuchter wird und zu bestimmten Zeiten starke Regenfälle, Schnee- und Gletscherschmelze zu Überschwemmungen führen. Besonders in dieser Region bestehen die größten Risiken für die Installationen durch extreme Ereignisse, die Änderungen in der Lagerkapazität der Rückstandsdepots erforderlich machen und die Stabilität der Böschungen und Absetzbecken beeinträchtigen, die von Faktoren wie der Gefällegeometrie, den Kräften am Mauerfuß, den Materialeigenschaften und dem Grundwasserspiegel abhängen.

In der Phase der Minenschließung und danach sind die Unternehmen verpflichtet, die Rückstands- und Abraumdepots zu warten, weshalb diese Strukturen so zu planen sind, dass sie Ereignisse überstehen, die möglicherweise nur einmal in mehreren tausend Jahren vorkommen und die vielleicht dem zukünftigen Szenarium des Klimawandels nicht entsprechen.

Der Bericht analysiert die Optionen, über die die Unternehmen zur Anpassung an den Klimawandel verfügen. Die beschriebenen Aktionen zur Eliminierung oder Verhinderung der Risiken sind:

Stärkung der Installationen, um den zukünftigen Klimabedingungen widerstehen zu können (zum Beispiel sehr hohe Temperaturen, starke Niederschläge).

Änderung der Normen des Engineeringdesigns, der Designkriterien und der Spezifikationen der Verträge, um der Klimaänderung gerecht zu werden (zum Beispiel größere Kapazitäten zur Wasserspeicherung und Rückstandslagerung).

- Verlegung oder Höherlegung der Installationen und Operationen außerhalb der Hochrisikozonen (zum Beispiel Überschwemmungsgebiete).
- Intensivierung der Wartung und des Monitorings klimasensibler Komponenten.

Vision des Kernthemas

Erreichen einer weltweiten technologischen Führungsrolle, die beim Rückstandsmanagement die physische und chemische Stabilität der Depots sichert und den Erhalt einer sozialen Betriebsgenehmigung ermöglicht und damit die Weiterentwicklung des Bergbaus sichert

↑ Codelco
Luftansicht des
Absetzbeckens
Los Leones

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

Ausgehend von den evaluierten Informationen und der für das Kernthema Rückstände definierten Vision, hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe vier Herausforderungen formuliert. Für alle werden mögliche Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien präsentiert.

Herausforderung 01

Umgang mit der wachsenden Knappheit von Wasser und Boden

Der Bergbau hat durch den Einsatz von Technologien, die die Entsorgung eingedickter, gefilterter oder pastenförmiger Rückstände ermöglicht, den Wasserverbrauch schrittweise immer weiter gesenkt. Doch diese Techniken werden noch nicht in der ganzen Industrie umgesetzt, da zusätzliche Bedingungen gegeben sein müssen, um eine größere Skalierung dieser Anwendungen zu erreichen. In der Zukunft wird die Abnahme der Oxidressourcen, zusammen mit dem Ansteigen der Sulfidressourcen, den Anteil der Verarbeitung durch Konzentration - und damit auch den Wasserverbrauch - signifikant steigen lassen.

Gegenwärtig liegt der Nettofrischwasserverbrauch zwischen 0,5 und 0,7 Kubikmetern pro verarbeiteter Tonne Erz. Dabei gehören die Wasserbindung in den Flotationsrückständen und die darauffolgende Verdampfung oder Versickerung zu den wichtigsten Ursachen des Verbrauchs.

Zusätzlich erfordern die Konflikte, die besonders in der Zentralzone durch die Bodenknappheit hervorgerufen werden, die Entwicklung neuer Methoden und Technologien, die dem Bergbau ermöglichen, die von den Rückstandsdepots benötigte Fläche drastisch zu senken oder idealerweise auf die Depots und die Erzeugung von Rückständen zu verzichten.

Umgang mit der wachsenden Knappheit von Wasser und Boden

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Effiziente Bodennutzung	Maximierung der Nutzung von Flächen in schon gefluteten Becken für die Entsorgung von Rückständen durch die Eindickung des Materials und/oder durch den Einsatz von Fließmitteln Perfektionierung der Methoden zur Entsorgung gefilterter oder eingedickter Rückstände in bestehenden konventionellen Depots Entwicklung eines Bergbaukonzepts ohne Rückstandsdepots: Entwicklung neuer Methoden, die ohne Rückstandsdepots auskommen (Rückstände, die in die Mine zurückgeführt werden oder rückstandsfreier Bergbau) Erzeugung verschiedener Methodologien für die Produktion, den Transport und die Entsorgung, die die Rückführung der Rückstände in die Mine privilegieren

Herausforderung 01

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
02 Effiziente Wassernutzung	Entwicklung und Perfektionierung kosteneffizienter Methoden der Trennung von Flüssigkeiten und Feststoffen in großem Maßstab: Filtrierung und Eindickungsprozesse Einsatz von Meerwasser oder Wasser geringerer Qualität im Flotationsprozess und die Auswirkungen auf die Wasser- und Rückstandsförderung und auf den Depotbetrieb Rückgewinnung von Prozesswasser vor der Rückstandsentsorgung Entwicklung und Perfektionierung neuer trockener Methoden oder Prozesse zur Rückgewinnung werthaltiger Mineralien Perfektionierung und Entwicklung von Methoden des Wassermanagements im Depot basierend auf der Verfügbarkeit und Nutzung im Wassereinzugsgebiet Studien zur Evaluierung der Auswirkungen des Einsatzes von Meerwasser im Betrieb (Prozesse und Förderung) des Depots und seine kurz-, mittel- und langfristige Stabilität Einsatz von Rückständen in der Polymererzeugung

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Sicherung der chemischen und physischen Stabilität der Rückstandsdepots

Die physische Stabilität der Depots wird zu einem zentralen Thema. Eine aktuelle Überprüfung katastrophaler Versagen auf internationaler Ebene in großen Rückstandsdepots zeigt, dass es sich vor allem um Erosion (*overtopping*), Instabilität der Mauern und die Auswirkungen starker Erdstöße handelt. Normalerweise sind die Versagen auf eine Kombination von Ursachen zurückzuführen. Dazu zählen schlechte Entwürfe, mangelhafter Bau, Betrieb mit wenigen Kontrollmaßnahmen und fehlerhafte Berechnungsgrundlagen.

Dazu ist die geochemische Stabilität der Depots in der Regel mit der möglichen Mobilisierung von Schadstoffen und der Säureerzeugung durch die chemische Reaktion der Rückstände mit Wasser und dem Sauerstoff aus der Atmosphäre verbunden. Diesbezüglich ist zwischen stillgelegten, in Betrieb befindlichen und zukünftigen Depots zu unterscheiden, um so die passenden Kontroll- und Neutralisierungsstrategien für alle beschriebenen Situationen zu entwickeln.

Die Versickerungen und ihre Auswirkung auf die Umwelt und die Menschen stellen eine ständige Herausforderung für den Betrieb der Depots und die zukünftige Nachhaltigkeit des Bergbaus dar. In diesem Sinne ist es unbedingt notwendig, Technologien zu entwickeln und zu perfektionieren, die Rückstände vor ihrer Entsorgung zu inertisieren, die Depotstandorte zu charakterisieren und den Kontakt mit dem Grundwasser zu verhindern. Ergänzend muss das bestehende Recht verschärft werden, damit zukünftige Depots nach dem Konzept „kein effektiver Schadstoffausstoß“ sowohl während des Betriebs wie während der Stilllegung geplant und betrieben werden.

Sicherung der chemischen und physischen Stabilität von Rückstandsdepots

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Monitoring und Sicherung der chemischen Stabilität in der Planung, im Betrieb, während und nach der Schließung	Perfektionierung der Technologien zur Kontrolle von Versickerungen durch den Depotboden vor der Entsorgung der Rückstände Perfektionierung und Entwicklung kosteneffizienter und skalierbarer Technologien für die Inertisierung der Rückstände vor der Entsorgung (Pyrit, Arsen und andere) Perfektionierung kostengünstiger und wirksamer Technologien zur Lokalisierung und Nachverfolgung der Versickerungen

Herausforderung 02

Forschungs- und Entwicklungslinien

Perfektionierung kosteneffizienter Technologien zur Kontrolle von Versickerungen und Kontaktwasser während des Betriebs und nach der Stilllegung (aktive, passive und kombinierte Methoden)

Perfektionierung von Technologien zur Verhinderung von Versickerungen nach der Stilllegung, einschließlich des Oberflächenwassermanagements und der Interaktion mit dem Depot sowie die Imprägnierung (Beschichtung oder Versiegelung) der Depots

Perfektionierung der Zuverlässigkeit der Vorhersagemodelle der physisch-chemischen Qualität der Versickerungen der Rückstandsdepots

Entwicklung von Technologien zur Prüfung des Entwurfs der chemischen Stabilität mit Information aus dem Depotbetrieb

02 Monitoring und Sicherung der physischen Stabilität in der Planung, im Betrieb, während und nach der Schließung

Entwicklung neuer Methodologien zur Einbindung der Konzepte Risiko und physische Vulnerabilität (Stabilität) in die Entwicklungskriterien, die auf alle Arten von Rückstandsdepots angewandt werden

Evaluierung, Abstimmung und Standardisierung von Methoden zur zuverlässigen Vorhersage der Auswirkungen der Zerstörung eines Rückstandsdepots

Perfektionierung und Entwicklung kostengünstiger, hochzuverlässiger Technologien zur Charakterisierung der Standorte für Rückstandsdepots

Herausforderung 02

Forschungs- und Entwicklungslinien

Entwicklung von Technologien zur Unterstützung der sicheren Durchführung von Arbeiten im Behälterinneren

Perfektionierung und Entwicklung von Technologien zur Steigerung der Wasserrückgewinnung aus dem Depot (sowie die Steigerung der Rückstandslagerkapazität des Depots)

Evaluierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die physische Stabilität der bestehenden Rückstandsdepots, einschließlich der damit verbundenen Installationen

Perfektionierung der Technologien zur Verhinderung von Problemen der physischen Stabilität und Kontrolle von Feinstoffteilchen, die durch Winderosion speziell nach der Stilllegung aus den Mauern gelöst werden

Perfektionierung von Technologien zur Erkennung und Kontrolle von Mikroorganismen, die die Wirksamkeit des Entwässerungssystems einschränken können

Studie physisch-chemischer Modelle, die die chemische und physische Stabilität der Rückstandsdepots miteinander verbinden

03	Kontrolle der Feinstoffteilchen	Perfektionierung der bestehenden und Entwicklung neuer Technologien zur Kontrolle der Feinstoffteilchen, um Emissionen auf null zu senken

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Das Programm Tranque, das im Rahmen der technologischen Roadmap des Programms Alta Ley entwickelt wurde und sich noch in der Durchführung befindet, ist ein standardisiertes Monitoring- und Frühwarnsystem für Rückstandsdepots, das über eine Informationsmanagementplattform den beteiligten Akteuren (Behörden, Bergbauunternehmen und lokalen Gemeinschaften) qualitativ hochwertige, verlässliche und zeitnahe Informationen über die physische und chemische Stabilität der Depots liefert. Das Endziel ist die Stärkung des präventiven Betriebsmanagements, die Verbesserung der Kommunikation und der Reaktionen zwischen den Beteiligten in eventuellen Notsituationen.

Das Programm soll einen Beitrag zum sicheren Betrieb der Rückstandsdepots in Chile leisten und über ein fortgeschrittenes Monitoringsystem langfristig die Koordination und das Vertrauen unter den beteiligten Akteuren verbessern.

Zur Entwicklung der von der Fundación Chile geleiteten Initiative hat sich eine öffentlich-private Allianz gebildet, an der aktiv mehr als 22 Organisationen und Unternehmen beteiligt sind. Zu den Beteiligten aus dem öffentlichen Sektor zählen das Bergbauministerium, die Geologie- und Bergbaubehörde (Sernageomin), die Umweltaufsichtsbehörde, die Generaldirektion für Wasserversorgung und die Nationale Behörde für Notfälle des Ministeriums für Inneres und öffentliche Sicherheit. Aus dem Privatsektor beteiligen sich Antofagasta Minerals, BHP, Codelco, ENAMI und die Nationale Bergbaugesellschaft (Sonami), Technologiezentren (INRIA Chile, AMTC und Dictuc) und Beraterfirmen (Arcadis, BGC Ingenieros, Valor Compartido).

Die Gestaltung des Systems, die Auswahl der Instrumentierung und die Konfiguration für die Umsetzung vor Ort im Absetzbecken Mauro von Antofagasta Minerals ist schon abgeschlossen. Aktuell wird die Instrumentierung geliefert, die dann implementiert werden muss.

Herausforderung 03

Förderung der Wandlung vom Rückstand zum Asset

Das Konzept der Umweltaltlasten (PAM in der spanischen Abkürzung) kann verstanden werden als „jene verlassenen oder stillgelegten Minen einschließlich ihrer Rückstände, die ein bedeutendes Risiko für das Leben oder die Gesundheit der Menschen oder Umwelt darstellen“ (Sernageomin, 2008). Diese Definition schließt die verlassenen oder stillgelegten Depots mit ein.

Ziel der Konversion von Rückstandsdepots in Assets ist die Nutzung der Rückstände oder eines Teils davon als Wertschöpfungsquelle. Auch wenn die Rückgewinnung werthaltiger Elemente einen Beitrag leistet, wird dadurch das Problem nicht vollständig gelöst. Es muss nach alternativen Nutzungen gesucht werden, die einen Großteil der Rückstände einbeziehen, nicht nur Elemente wie Kupfer, Gold, Molybdän, Eisen und andere, die man wiederaufbereiten kann. Ein angemessenes Management der Umweltaltlasten hätte direkte positive Auswirkungen auf die Lokalbevölkerung und würde einen Beitrag zur zukünftigen Nachhaltigkeit des Bergbaus leisten.

Dazu wird geschätzt, dass in allen Rückständen Chiles rund 60 Millionen Pfund Feinkupfer existieren, und wenn eine eventuelle Abscheidung und Wiederaufbereitung die Rückgewinnung von 80 % des Volumens ermöglicht, würde das 5 Jahren der aktuellen Gesamtkupferproduktion in Chile entsprechen.

Es muss also analysiert werden, wie man dieses enorme geologisch-bergbauliche Potenzial der sogenannten künstlichen Lagerstätten ausschöpfen kann, vorausgesetzt, dass es sich dabei um eine sichere und umweltfreundliche Operation handelt.

Die Hauptanforderung der Ausbeutung eines werthaltigen Rückstandsdepots besteht in der Frage, wie die wiederaufbereiteten Rückstände sicher und kostengünstig zu entsorgen sind.

Förderung der Wandlung vom Rückstand zum Asset

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Suche nach industriellen Nutzungen der Rückstände	Definition der technischen und rechtlichen Kriterien, die bestimmen ob und wann man die massiven Bergbauabfälle und insbesondere die Flotationsrückstände in der Bauindustrie und in anderen Bereichen nutzen kann Entwicklung industrieller Nutzungen der Rückstände Imprägnierung und Verfüllung von Grabungen im Bergbau zum Abbau von Reserven und zur Rückführung der Rückstände

Herausforderung 03

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
02 Rückgewinnung wertvoller Elemente	Perfektionierung und Entwicklung kostengünstiger Technologien zur Charakterisierung der Rückstände zur Rückgewinnung wertvoller Elemente Perfektionierung und Entwicklung sicherer und kosteneffizienter Techniken zur Stichprobenziehung in Rückständen Analytische Verarbeitung seltener Erden und anderer relevanter Elemente Perfektionierung und Entwicklung von Technologien zur Rückgewinnung relevanter Elemente (Wiederverarbeitung und Rückgewinnung von Wasser und Flächen)
03 Nutzung der Depotflächen für andere Zwecke	Entwicklung von Geschäftsmodellen zur alternativen Nutzung der Depots beispielsweise für industrielle Zwecke, Freizeitgestaltung, Sonnenenergie etc.

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Gegenwärtig gibt es zwei laufende Initiativen für die Rückgewinnung von werthaltigen Elementen aus Bergbaurückständen. Eine wird vom Konsortium JRI und Ecometales geleitet, die andere von CodelcoTech.

Zielsetzungen des Projekts von JRI und Ecometales sind die Schließung der verschiedenen Lücken in der Depotcharakterisierung, die repräsentative Charakterisierung der Rückstände, die Durchführung experimenteller Tests zur Rückgewinnung wertvoller Elemente sowie die Validierung des Prototyps zur Rückgewinnung wertvoller Elemente aus Rückständen.

Mit der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung der repräsentativen Charakterisierung der Rückstände ist die erste Phase schon abgeschlossen, und das Konsortium hat ein erklärendes Handbuch zur öffentlichen Nutzung über die Methodologie zur Charakterisierung der Rückstände veröffentlicht. Die Methodologie ist in drei Absetzbecken angewandt worden, und dabei konnte eine effiziente Korrelation zwischen der Präsenz der wichtigen Oxide und der wertvollen Elemente nachgewiesen werden. Die zweite Etappe der experimentellen Tests zur Rückgewinnung der wertvollen Elemente und der Charakterisierung der Produkte und Rückstände befindet sich in der Durchführung.

Das von CodelcoTech geleitete Projekt mit dem Titel Identifizierung, Quantifizierung und (bio-)technologische Extraktion wertvoller Mineralien/Elemente aus Rückstandsdepots sieht die Identifizierung, Quantifizierung und Priorisierung der hochwertigen Elemente in aktiven und inaktiven Rückständen von Codelco und anderen Bergbauunternehmen vor, um Technologien vorzuschlagen und zu entwickeln, die die Entwicklung eines Geschäftsmodells ermöglichen, um dieses als Teil einer Strategie zur Ausbeutung und finalen, physisch und chemisch sicheren Entsorgung diese Umweltaltlasten aus dem Bergbau in Assets zu verwandeln.

Die Studie über den aktuellen Stand der wertvollen Elemente in den chilenischen Rückständen, die Studie über die Nachfrage, Produktion und den Weltmarkt der Mineralien und der identifizierten strategischen Elemente sowie die Bestandsaufnahme der Technologien und Zulieferer zur Verarbeitung und Extraktion wertvoller Mineralien und Elemente sind heute abgeschlossen. Die zweite Phase widmet sich dem Vergleich der Technologien zur Realisierung von Sondierungen in Rückstandsdepots, der Auswahl der Rückstände für die Stichproben, der Studie der Technologien zur Extraktion von Wertstoffen und der Studie der Stabilisierungsstrategien.

Herausforderung 04

Förderung von Inklusion und Akzeptanz der Gemeinschaft

Wie schon angedeutet bestehen bei einer bedeutenden Zahl von aktuell betriebenen Rückstandsdepots Konflikte mit den lokalen Gemeinschaften, was zu Beschwerden gegenüber Behörden und Autoritäten und zu gerichtlichen Klagen der Lokalbevölkerung führt.

Die Grundbedingung für die Lösung des Problems ist, dass die Gemeinschaften über klare und verständliche Informationen über die umliegenden Rückstandsdepots verfügen. Hierzu können spezielle Technologien entwickelt werden.

Ergänzend hierzu müssen Räume für die Partizipation geschaffen werden, um die Gemeinschaften einzubinden und effektiv die Fortschritte im Betrieb und in der Behandlung der Rückstände zu kommunizieren.

Förderung der Wandlung vom Rückstand zum Asset

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Monitoring und opportune Kommunikation des Betriebsverhaltens der Rückstandsdepots an alle Akteure	Definition sicherer Standards für die Umsetzung lokaler/betrieblicher Netzwerke Entwicklung der Kommunikationsschnittstelle Betreiber - Gemeinschaft - Prozess Perfektionierung und Entwicklung phänomenologischer Modelle Entwicklung von Sensoren zur Online-Messung kritischer Variablen
02 Entwicklung von Produkten geteilten Werts	Energienutzung und neue Bodennutzung Wasser für verschiedene Einsatzzwecke je nach Qualität Schaffung von Kapazitäten in den lokalen Gemeinschaften zur Entwicklung von Geschäftsmodellen für die Phase nach der Schließung der Rückstandsdepots

Herausforderung 04

Lösung		Forschungs- und Entwicklungslinien
03	Schulung aller Akteure zur Nivellierung der Kenntnisse über die Rückstandsdepots, die Bergbaukultur und das Risikomanagement	Schulungen auf nationaler Ebene über Rückstandsdepots und Bergbaukultur Schulung auf lokaler Ebene über die Rückstandsdepots, die Bergbaukultur und technische Aspekte der Sicherheit
04	Verbesserung und Einbindung aller Akteure im Management von Risiken und Notfällen	Einbindung der lokalen Gemeinschaften und Akteure in die Formulierung der Notfallpläne Standardisierung der Kriterien der Notfallpläne für die Rückstandsdepots Vorbereitung der lokalen Akteure zur Implementierung der Notfallpläne

Quelle: Eigene Angaben

05
Verhüttung und Raffination

Codelco
Division Ventanas
↑

Grundlagen

Das Kernthema Verhüttung und Raffination behandelt die Prozesse der pyrometallurgischen Behandlung zur Umwandlung der Konzentrate in metallisches Kupfer.

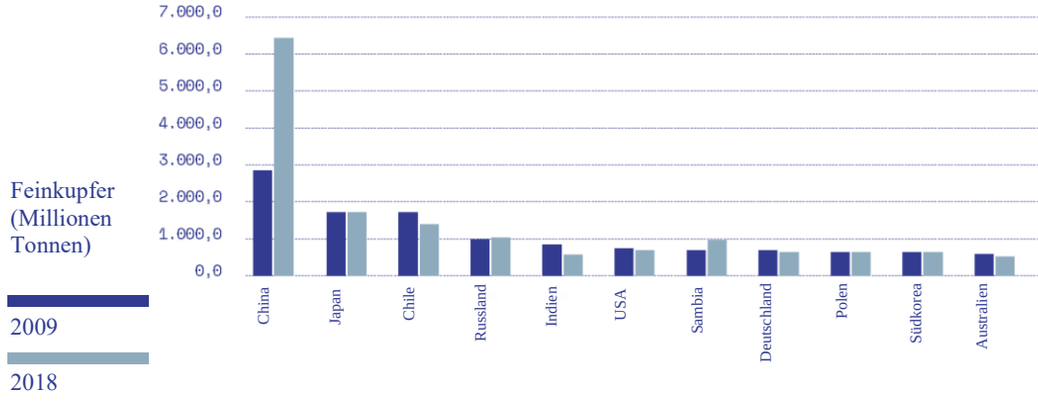
Die Verhüttung umfasst die Behandlung des Kupferkonzentrats über Prozesse der Fusion, Umwandlung und Raffination. Ziel ist es, das Mineral von anderen Elementen, besonders Eisen und Schwefel, zu trennen. Dies erreicht man über eine Reihe von Phasen, aus denen die kommerziellen Produkte Blisterkupfer und Kupferanoden hervorgehen, die einen höheren Anteil an Unreinheiten aufweisen als Kupferkathoden. Der Markt für Blisterkupfer ist beschränkt und konzentriert sich auf die Produktion von Sekundärkupfer, das im Rahmen des Recycling verschiedener Produkte raffiniert wird. Diese Option ist aber nicht Teil der Wertschöpfungskette der Kupferindustrie in Chile. Die Anoden werden in einer späteren Etappe gereinigt, die elektrolytische Raffination heißt. Dabei handelt es sich um einen elektrochemischen Prozess zur Produktion von hochreinen Kupferkathoden aus den Anoden, die für den Verhüttungsprozess vorgesehen sind.

Auf internationaler Ebene gibt es umfangreiche Kapazitäten für die Konzentratbehandlung in Kupferhütten und Raffinerien, wodurch langfristige Verträge zwischen Konzentratproduzenten und Verarbeitungsbetrieben geschlossen worden sind, die außerdem die Spotbehandlung des Konzentratüberschusses der Kupferindustrie übernehmen. Die Bearbeitungsgebühren für die Verhüttung und die elektrolytische Raffination werden respektive TC (*treatment charges*) und RC (*refining charges*) genannt.

Im Verhüttungs- und Raffinationsgeschäft stammen die Einnahmen vor allem aus der Bearbeitung und der Raffination, dem Verkauf von Schwefelsäure und den Prämien für die Rückgewinnung wertvoller Elemente. Die wichtigsten Produktionskosten entfallen auf Energie, Arbeitskraft, Wartung und Vorleistungen.

Seit Jahren ist China einer der Hauptakteure in der Kupferproduktion in Kupferhütten und Raffinerien. Im Jahr 2018 hat die Produktion raffinierten Kupfers 8,95 Millionen Tonnen Kupfer erreicht, gefolgt von Chile mit 2,46 Millionen und Japan mit rund 1,59 Millionen. Die beherrschende Marktposition hat es China ermöglicht, die Bearbeitungsgebühren zu bestimmen. Die folgende Grafik zeigt in aller Deutlichkeit die Entwicklung der Produktion von raffiniertem Kupfer in den letzten 10 Jahren. Von einer Jahresproduktion von 18,2 Millionen Tonnen im Jahr 2008 hat es einen Anstieg auf 23,7 Millionen Tonnen im Jahr 2018 gegeben.

Grafik 1_ Weltproduktion von raffiniertem Kupfer nach Land: 2009 vs. 2018

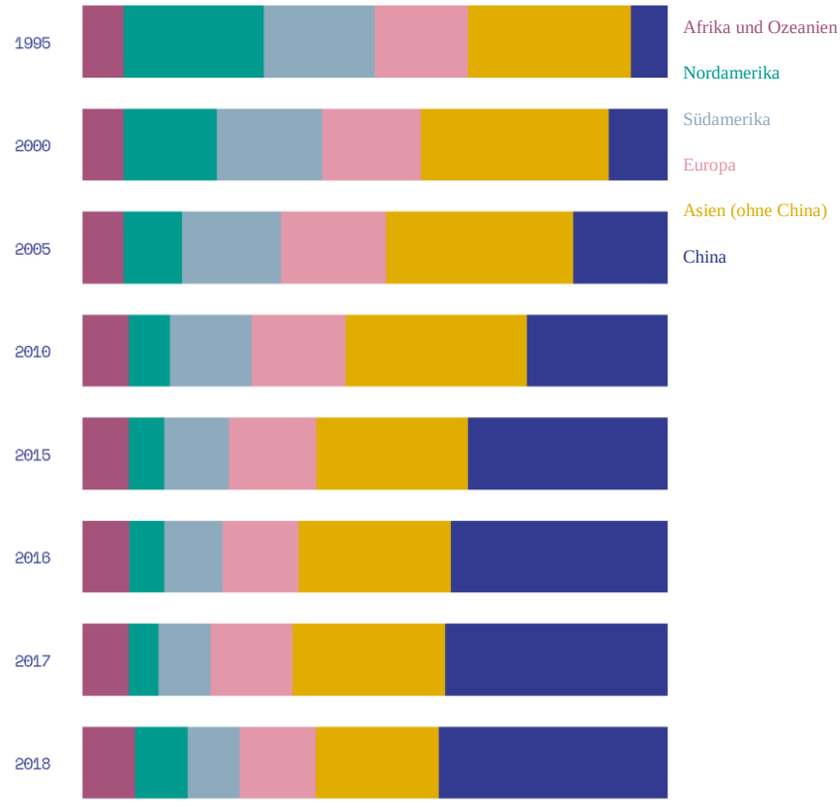


Quelle: Cochilco (2018)

Es wird prognostiziert, dass China in einigen Jahren eine Marktbeteiligung von rund 40 % der weltweiten Konzentratverarbeitung erreichen wird, was die schon beherrschende Position für die Preisfestlegung auf internationaler Ebene noch weiter stärken würde und das Risiko für die chilenische Verhüttungsindustrie erhöht. China hat 2018 35,7 % des weltweiten Hüttenkupfers produziert, gefolgt von Japan mit 9,8 % und Chile mit 7 %.

Hinsichtlich der geografischen Verteilung der Kupferproduktion ist auf das starke Wachstum in Asien (mit China) von 33 % auf 64 % der Gesamtproduktion von 1995 bis 2018 zu verweisen. Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung von 1995 bis 2018.

Grafik 2_ Geografische Verteilung der Hüttenkupferproduktion



Quelle: Cochilco (2018)

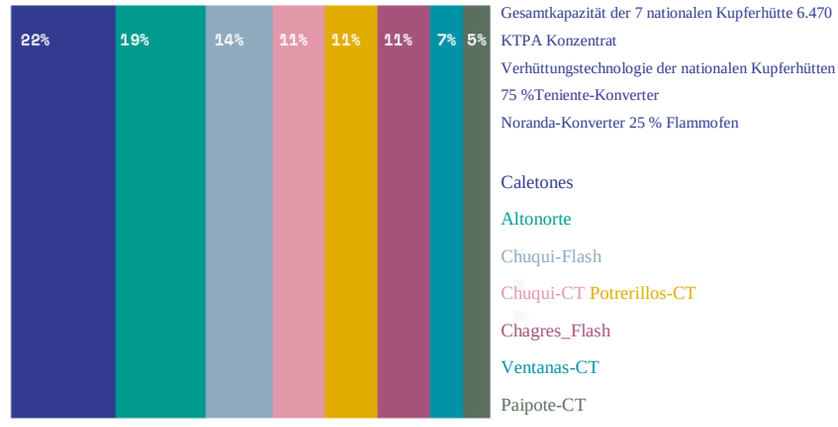
Zur projizierten Erhöhung der chilenischen Kupferkonzentratsproduktion kommen die Schwierigkeiten, die aufgrund der enthaltenen Unreinheiten auf den Kupferkonzentratshandel zukommen könnten, da das Produkt vor allem durch die Arsenpräsenz sogar als Gefahrstoff eingestuft werden könnte.

Aktuelle Situation der Kupferhütten und Raffinierien in Chile

In Chile existieren aktuell sieben Kupferhütten, von denen fünf staatlich sind (Caletones, Potrerillos, Hernán Videla Lira, Chuquicamata und Ventanas) und zwei privat (Chagres und Altonorte). Zur Verhüttung setzen sie Flash-Technologien ein (instantanes Schmelzen), Teniente-Konverter (CT) und Noranda-Konverter (CN), die letzten beiden mit Schmelzbad.

Für den Umwandlungsprozess setzen alle Anlagen seit Betriebsaufnahme Pierce Smith-Konverter ein. Die Verhüttungskapazität mit Flammofen-Technologie zur Konzentratschmelzung entspricht der Kapazität des erweiterten Flammofens von Chuquicamata und dem der Kupferhütte Chagres. Die restlichen nationalen Hütten arbeiten mit der Technologie CT oder Noranda. Das wird in der folgenden Grafik dargestellt.

Grafik 3_ Kapazitäten und Technologien der chilenischen Kupferhütten



Quelle: Amec Foster Wheeler (2015)

Die Hüttenleistung kann über die direkten Betriebskosten, den Abscheidungsgrad metallurgischer Gase und die Bindung von Schadstoffen evaluiert werden. Einige chilenische Kupferhütten befinden sich aufgrund ihrer überalterten Installationen in einer komplexen Situation, die zu höheren Kosten, einer unter dem internationalen Standard liegende Verfügbarkeit und geringen Rückgewinnungsgraden führt.

Durch die Marktbedingungen beeinträchtigen die Arbeits- und Energiekosten das Betriebsergebnis. Dazu kommt, dass die Arbeits- und Energiekosten an den Bergbau und nicht an die herstellende Industrie gekoppelt sind, die niedriger liegen. Die Analyse der Bruttomarge des Geschäfts zeigt, dass vier von sieben Kupferhütten sich mit negativen Margen im letzten Dezil der globalen Verteilung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen befinden.

Der Export im Jahr 2018 liegt bei 3,3 Tonnen Kupferkonzentrat, 2,38 Millionen Tonnen elektrolytisch raffinierter Kathoden und 221.000 Tonnen Blisterkupfer. Es ist anzumerken, dass der Verkauf etwaiger Konzentratsüberschüsse durch den hohen Arsengehalt beeinträchtigt werden könnte. Daher ist es fundamental, die Risiken auf dem Konzentratmarkt vorherzusehen und auf nationaler Ebene die Position auf dem Kathodenmarkt zu stärken.

Tabelle 1_ Bruttomarge der Verhüttung von Kupferkonzentrat

c/lb Cuf	Kosten	Einkommen	Marge
Chile	38,5	29,3	-2,88
China	11,6	34,8	4,03
Welt	20,4	31,1	3,76

Quelle: Cochilco (2018)

Die Bruttomarge ist ein wirtschaftlicher Parameter, der das Niveau der Wettbewerbsfähigkeit eines Geschäfts misst und definiert sich durch die Gesamteinnahmen, abzüglich der Nettokassenkosten (unter Ausschluss des Standortfaktors, da sie nicht aus Effizienzfaktoren abgeleitet wird, sondern aus dem spezifischen Standort).

Zur niedrigen Wettbewerbsfähigkeit der in Chile bestehenden Kupferhütten kommt der Druck durch die neue Definition der Höchstgrenzen für den Schwefelausstoß (Schwefeldioxid, SO^2 und Arsen, As). Diese Norm entspringt der Empfehlung der OECD, Normen zur Reduzierung des Schwefeldioxids und giftiger Schadstoffe zu entwickeln.

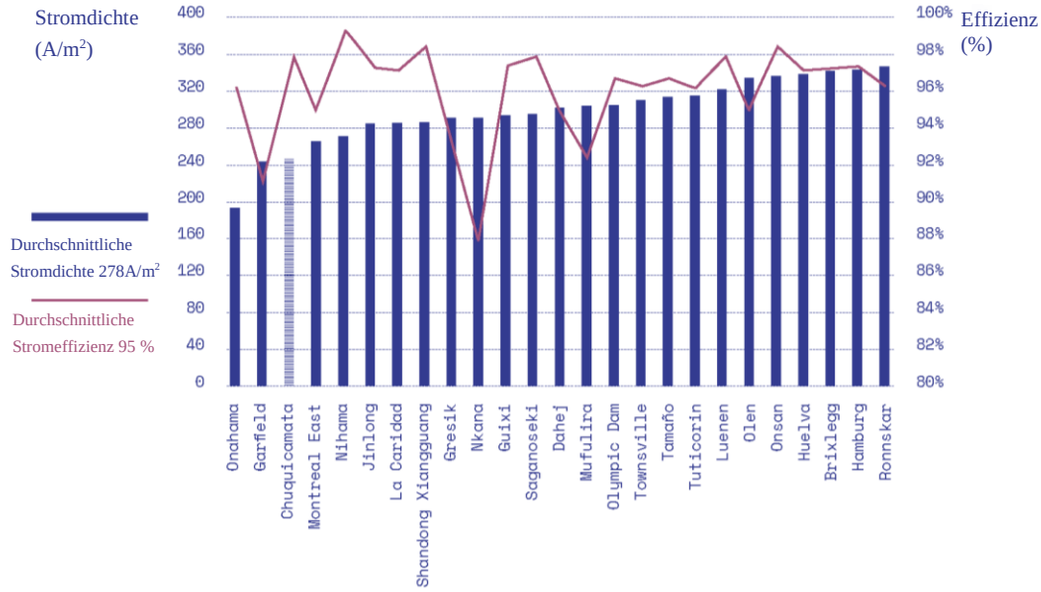
Die Norm fordert von bestehenden Kupferhütten eine Höchstgrenze der SO^2 und As-Emissionen (in Tonnen pro Jahr), die bei 95 % Abscheidung und Bindung liegt, und die maximale Frist für die Normerfüllung liegt bei 5 Jahren. Für die neuen Hütten wird eine striktere Emissionsgrenze von 98 % SO^2-Abscheidung und 99,976 % der As-Emissionen festgelegt.

Elektrolytische Raffinerien

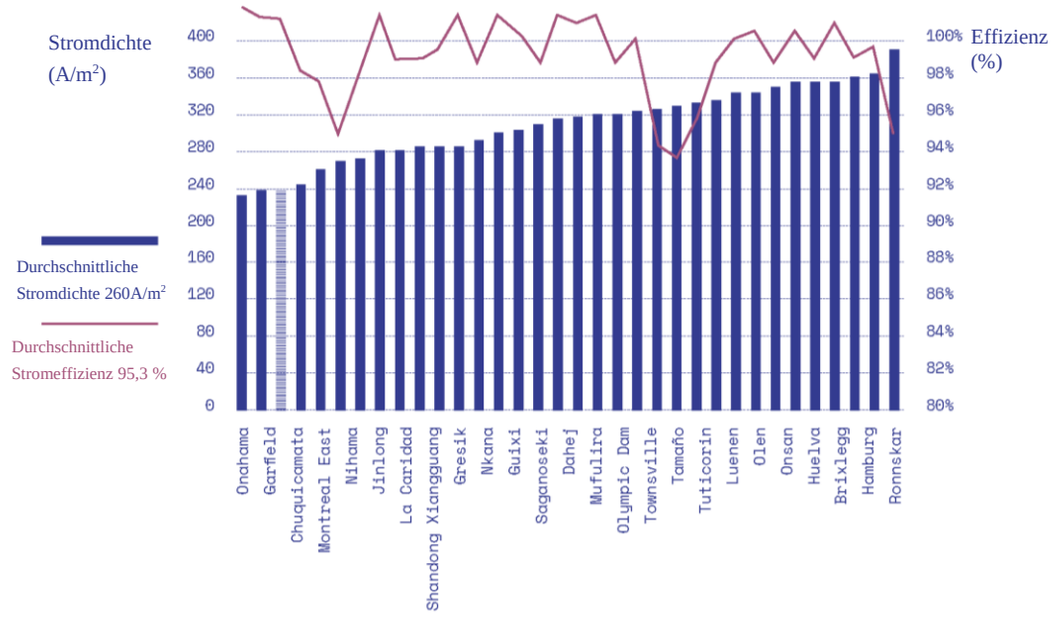
Die chilenischen Raffinerien Chuquicamata, Potrerillos und Ventanas haben 6,5 % der weltweit installierten Kapazität und produzieren 7,9 % der elektrolytisch raffinierten Kupferkathoden weltweit.

Als Technologien der elektrolytischen Abscheidung werden aktuell die Dauerkathode und der Starterfilm eingesetzt. Die Dauerkathodentechnologie benötigt eine höhere durchschnittliche Stromdichte als der Starterfilm (respektive 278 und 260 A/m^2). Ein wichtiger Betriebsparameter ist die Stromeffizienz, und wie man in den folgenden Abbildungen sehen kann, besteht keine Korrelation zwischen der eingesetzten Stromdichte und der Stromeffizienz. Zum anderen bestehen keine relevanten Unterschiede zwischen den Durchschnittswerten der Stromeffizienz beider Technologien.

Grafik 4_ Technologie der elektrolytischen Abscheidung (Dauerkathoden)



Grafik 5_ Technologie der elektrolytischen Abscheidung (Starterfilm)



Man sieht, dass die Produktivität der Dauerkathodentechnologie höher ist als die des Starterfilms (siehe obige Abbildungen). Dennoch gibt es eine bedeutende Anzahl von Raffinerien und modernen Starterfilmen mit sehr hoher Produktivität aufgrund der Mechanisierung und Automatisierung des Betriebs (mittlere Produktivität von 1,4 Mannstunden/t Kathode)

Die Wettbewerbsfähigkeit der chilenischen Raffinerien ist gering. In den Jahren 2013 bis 2018 haben sie mit negativen Margen im letzten Dezil gelegen.

Tabelle 2_ Bruttomarge der Raffinerien

Raffinerien	Direktkosten	Gesamteinnahmen	Kassenmarge
	Durchschnitt (c/lb Cu)	Durchschnitt (c/lb Cu)	Durchschnitt (c/lb Cu)
China	3,32	18,50	15,17
Welt	4,85	13,37	8,52
Chile	9,95	9,36	-0,59

Quelle: Cochilco

In dieser Situation muss Chile als weltgrößter Produzent von raffiniertem Kupfer seine Position im globalen Markt durch den Verkauf von Elektrolytkupfer verteidigen, da es folgende Vorteile gegenüber dem Verkauf von Konzentrat hat:

- Potenzielle Exportbeschränkungen für Konzentrate, die per Seefracht transportiert werden.
- Mögliche Erhöhungen der Bearbeitungs- und Raffinationspreise aufgrund der Verhandlungsmacht der asiatischen Kupferhütten.
- Erhalt von Prämienzahlungen für die hohe Kathodenqualität statt Abzügen und Zusatzkosten für die Konzentratverfrachtung.
- Zusätzliche Einnahmen durch die Rückgewinnung und den Verkauf vorhandener wertvoller Metalle.

Es ist darauf zu verweisen, dass die Geschäftsstruktur der chinesischen Kupferhütten den Vertrieb verschiedener werthaltiger Elemente, die aus den Konzentraten rückgewonnen werden, vorsieht. Die Rückgewinnung und die damit verbundenen Prozesse machen bis zu 20 % der Gewinne aus (NERIN, Hüttenseminar IIMCh 2018).

Um sich in die beschriebene Richtung zu entwickeln, muss die veraltete Technologie der laufenden Anlagen durch Anpassungen oder Austausch der Installationen modernisiert werden, um einen Betrieb der Weltklasse mit niedrigen Produktionskosten und einem hohem Abscheidungsgrad zu ermöglichen, der die aktuellen und zukünftigen Umweltnormen erfüllt.

Insbesondere sollte das Ziel sein, dass alle Kupferhütten über elektrolytische Raffinerien verfügen, was auf globaler Ebene eine normale und wünschenswerte Situation darstellt, die ermöglicht, die Betriebssynergien besser auszunutzen (Weiterverarbeitung von Anodenschrott und Subprodukten) und Frachtkosten zu sparen.

Im Norden des Landes, speziell in der zweiten Region, ist die Industrie auf komplexe Konzentrate mit Vertriebseinschränkungen angewiesen, mit denen sie umgehen muss. Das betrifft vor allem die großen Volumen, die aus dem Untertagebau in Chuquicamata kommen werden. Dieses Szenarium bietet die Gelegenheit, die Kupferhütten in spezialisierte Zentren zur Verarbeitung dieser Konzentrate umzuwandeln.

Abschließend ist anzumerken, dass Chile mit einer Anodenjahresproduktion von 1,488 Millionen Tonnen 100 % der Betriebskapazität der Raffinerien nutzen kann, die bei 1,224 Millionen Tonnen Kathoden liegt.

Vision des Kernthemas

Erreichen der technologischen Führungsposition auf weltweiter Ebene, die in Anwendung auf die industrielle Entwicklung und den Betrieb von der Lokalbevölkerung akzeptiert wird, um mit hohem Leistungsstandard zu produzieren und eine Gewinnmarge zu sichern, die mindestens im zweiten Quartil liegt.

Codelco
Division
↑ El Teniente

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

Ausgehend von den evaluierten Informationen und der für das Kernthema Verhüttung und Raffination definierten Vision, hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe drei Herausforderungen formuliert. Alle identifizierten Lösungen mit ihren jeweiligen Forschungs- und Entwicklungslinien sind auf mehr als eine Herausforderung anwendbar. Es gibt Fälle, in denen angesichts der entsprechenden Herausforderung zusätzliche Forschungs- und Entwicklungslinien hinzugefügt werden. Als Beispiel: Die Lösung „Hoher Abscheidungsgrad und Behandlung komplexer Konzentrate“ ist auf die Herausforderungen 1, 2 und 3 anzuwenden.

Für diese Lösung gibt es drei Forschungs- und Entwicklungslinien für die Herausforderung Nr. 1, zu der eine Forschungs- und Entwicklungslinie hinzugefügt wird, wenn die Lösung für die Herausforderung Nr. 2 vorgeschlagen wird, und es kommen zwei Forschungs- und Entwicklungslinien hinzu, wenn die Lösung sich auf die Herausforderung Nr. 3 bezieht.

Nachfolgend werden die Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien für alle identifizierten Herausforderungen detailliert beschrieben.

Herausforderung 01

Effizienzerhöhung der Verhüttungs- und Raffinationsprozesse

Die chilenischen Kupferhütten weisen bedeutende Produktivitätslücken auf, die sich durch eine geringe Verhüttungskapazität im Verhältnis zum produzierten Konzentrat, niedrige Kupferrückgewinnung und irrelevante Rückgewinnung von Subprodukten und Energie. Zusammen mit den hohen Stückkosten konfiguriert sich ein Szenarium, in dem eine der wichtigsten Herausforderungen die Effizienzsteigerung des Kupferhütten ist. Die folgende Tabelle vergleicht die Parameter der chilenischen Kupferhütten mit denen anderer Länder, um die Produktivitätslücken zu identifizieren.

Tabelle 3_ Vergleich der Bruttomargen der Raffinerien

Parameter	Einheit	Chines. Hütten	Japanische Hütten	Deutsche Hütten	Chilenische Hütten
Verhüttungskapaz.	KTS/Jahr	1.000 - 1.500	1.200	1.200	320 - 1.000
Schwefelabschei-dung	%	98	99	98,5	95
Stückkosten	cUS$/lb	13	18	19	22-40
Kupferrückgewin-nung	%	98 - 98.5	98 - 99.5	98	95 - 97.3
Energierückge-winnung	Ja/Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Rückgewinnung anderer Metalle	Ja/Nein	Ja	Ja	Ja	Nein

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 01

Effizienzerhöhung der Verhüttungs- und Raffinationsprozesse

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Minimale Verluste von Kupfer und anderen wertvollen Metallen	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Schlackenreinigung Automatisierung Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerie Rückgewinnung der wertvollen Metalle (Mo, Re, U Ge) Rückgewinnung aus Verhüttungsstaub und Anodenschlamm Einsatz von Hochdruckdüsen in den Badschmelzöfen Schmelzabdeckungstechnologie
02 Geräte mit hoher Kapazität	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall
03 Minimale Stückprozesse und -operationen	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen Neuer Prozess kontinuierlicher Elektroraffination Ofen direkt an Blister
04 Hoher Grad an Abscheidung und Verarbeitung komplexer Konzentrate	Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen Festbetttechnologie

Herausforderung 01

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
05 Intensive Mechanisierung, Automatisierung, Robotisierung	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Basismetall Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien
02 Kontinuierliche Prozesse	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen Ofen direkt an Blister Neuer Prozess kontinuierlicher Elektroraffination
03 Minimale Rückstände und Erhalt anderer Subprodukte	Schlackensäuberung Rückgewinnung der wertvollen Metalle (Mo, Re, U Ge) Rückgewinnung aus Verhüttungsstaub und Anodenschlamm Kontrolle der Unreinheiten Kontrolle von Sb und Bi in der Raffinerie
04 Gute Arbeitsbedingungen und gut ausgebildetes Humankapital	Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Kontrolle der Unreinheiten Kontrolle von Sb und Bi in der Raffinerie

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Verringerung der Umweltbelastungen

Die deutlich zu niedrige Schwefel- und Arsenabscheidung stellt eine bedeutende Umweltherausforderung für die chilenischen Kupferhütten dar. Die Notwendigkeit, die Abscheidung an die in anderen Ländern erreichten Werte anzupassen, ist in einer neuen Verordnung festgelegt worden (Dekret Nr. 28, 2013), die einen Abscheidungsgrad von 98 % (SO2 und As) für zukünftige Anlagen vorschreibt.

Verringerung der Umweltbelastungen

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Minimale Verluste von Kupfer und anderen wertvollen Metallen	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Rückgewinnung der wertvollen Metalle (Mo, Re, U Ge) Rückgewinnung aus Verhüttungsstaub und Anodenschlamm Schlackenreinigung Automatisierung Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerie Schmelzabdeckungstechnologie Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen
02 Geräte mit hoher Verarbeitungskapazität und langer Betriebskontinuität	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall.
03 Hoher Grad an Abscheidung und Verarbeitung komplexer Konzentrate	Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Festbetttechnologie Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen Verarbeitung von Konzentraten mit hohen AS-Anteilen in einer Filterung mit Breitbett-System und Furchen

Herausforderung 02

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
04 Minimale Rückstände und Erhalt anderer Subprodukte	Rückgewinnung der wertvollen Metalle (Mo, Re, U Ge) Rückgewinnung aus Verhüttungsstaub und Anodenschlamm Schlackensäuberung Kontrolle der Unreinheiten Kontrolle von Sb und Bi in der Raffinerie
05 Gute Arbeitsbedingungen und gut ausgebildetes Humankapital	Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Kontrolle der Unreinheiten Kontrolle von Sb und Bi in der Raffinerie

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Verbesserung der Arbeitsbedingungen

Die Einbindung neuer Technologien in die Verhüttungs- und Raffinationsprozesse hat direkte Auswirkungen auf die vorstehend dargelegten Herausforderungen und trägt zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen der Arbeiter im Betrieb bei. Der Umgang mit dem geschmolzenen Material stellt ein Risiko für die in den Prozess eingebundenen Arbeiter dar, weshalb die aktuelle Unfallhäufigkeit, die sich vor allem durch die Existenz zahlreicher diskontinuierlicher Prozesse im Betrieb erklärt, eine bedeutende Herausforderung darstellt.

Verbesserung der Arbeitsbedingungen

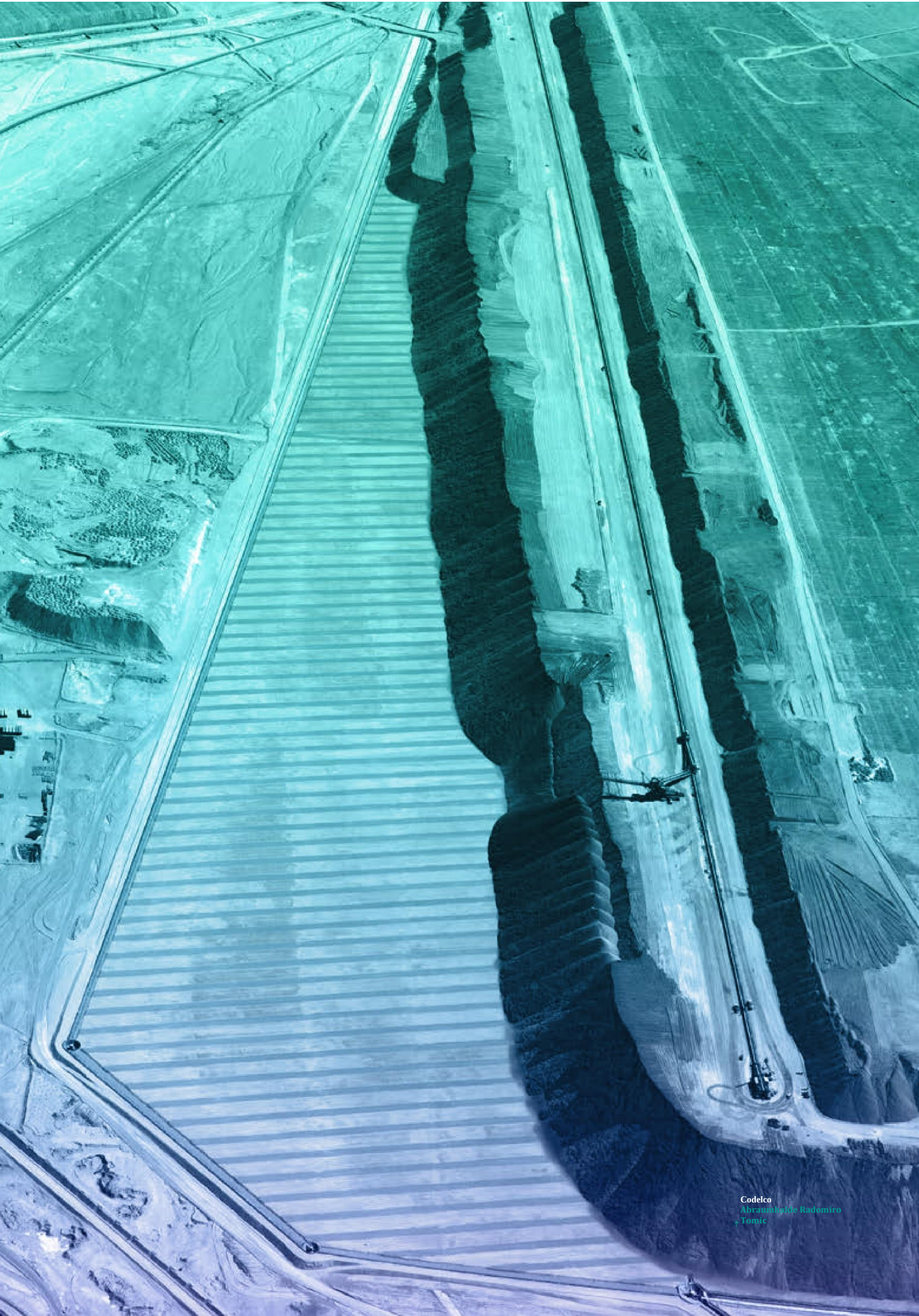
Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Minimale Stückprozesse und -operationen	Rückgewinnung der wertvollen Metalle (Mo, Re, U Ge) Rückgewinnung aus Verhüttungsstaub und Anodenschlamm Schlackensäuberung Kontrolle der Unreinheiten Kontrolle von Sb und Bi in der Raffinerie
02 Intensive Mechanisierung, Automatisierung, Robotisierung	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien
03 Hoher Grad an Abscheidung und Verarbeitung komplexer Konzentrate	Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Festbetttechnologie Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen Behandlung von Konzentraten mit hohem As-Anteil in einer Filterung mit Breitbett-System und Furchen

Herausforderung 03

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
04 Gute Arbeitsbedingungen und gut ausgebildetes Humankapital	Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Kontrolle der Unreinheiten Kontrolle von Sb und Bi in der Raffinerie
05 Minimale Verluste von Kupfer und anderen wertvollen Metallen	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall Instrumentierung und Steuersystem mit Expertise in Badschmelzöfen Rückgewinnung der wertvollen Metalle (Mo, Re, U Ge) Rückgewinnung aus Verhüttungsstaub und Anodenschlamm Schlackensäuberung Automatisierung, Mechanisierung, Robotisierung der Raffinerien Schmelzabdeckungstechnologie Einsatz von Hochdruckdüsen in Badschmelzöfen
06 Geräte mit hoher Verarbeitungskapazität und langer Betriebskontinuität	Kontinuierliche Umwandlung mit solidem Weißmetall

Quelle: Eigene Angaben

06
Kernthema Hydrometallurgie



Codelco
Abraumbalde Radomiro
Tomic

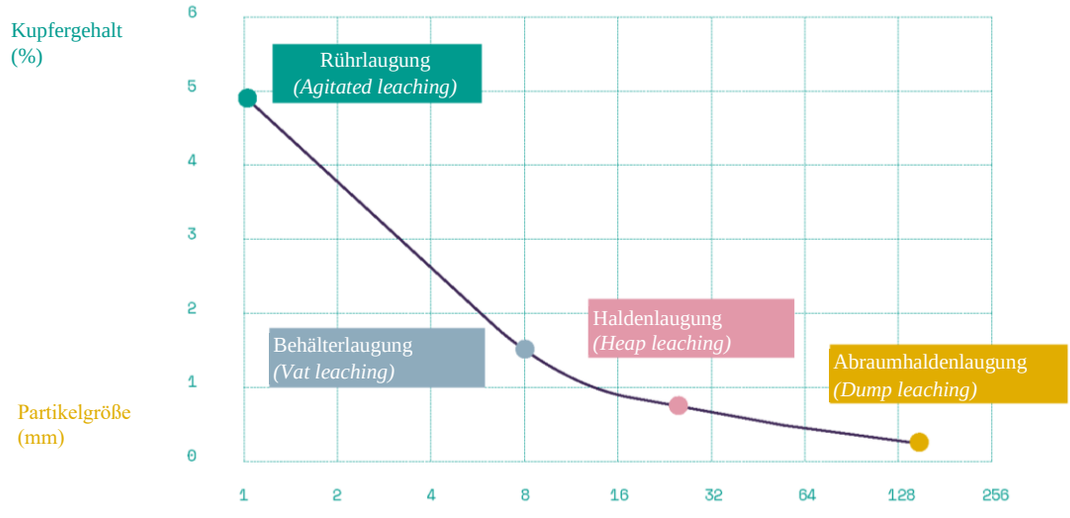
Grundlagen

Die Hydrometallurgie des Kupfers ist die Rückgewinnung des Kupfers aus Oxid- und Sulfiderzen mit Prozessen in der wässrigen Phase. Die Kupferextraktionsmethoden haben sich sowohl in der Form der Behandlung wie im Aggregatszustand weiterentwickelt. Die Extraktion in der wässrigen Phase begann mit der Behälterlaugung, der Rührlaugung und Haldenlaugung. Neuerdings geht die Entwicklung in Richtung Vor-Ort-Laugung. Die Aufbereitungs- und Reduktionsprozesse des Metalls, die Lösungsmittelextraktion und die elektrolytische Kupfergewinnung sind auch auf dem Weg der konstanten Verbesserung, speziell hinsichtlich der technologischen Verfügbarkeit zur Erhöhung der Rückgewinnung.

Ein anderer Aspekt ist die jüngste Umsetzung von Laugprozessen mit stark chloridhaltigen Lösungen, die in einigen Fällen im Bergbau mit dem Einsatz von Meerwasser gekoppelt werden. Der Einsatz von Meerwasser hat die Laugung sekundärer Sulfide ermöglicht, und es wird weiter an der Lösung der Probleme der Laugung der Primärsulfide gearbeitet.

Die Grafik 1 zeigt schematisch die angewandten Technologien in Funktion des gesamten Erzgehalts und der durchschnittlichen Körnung des Erzes:

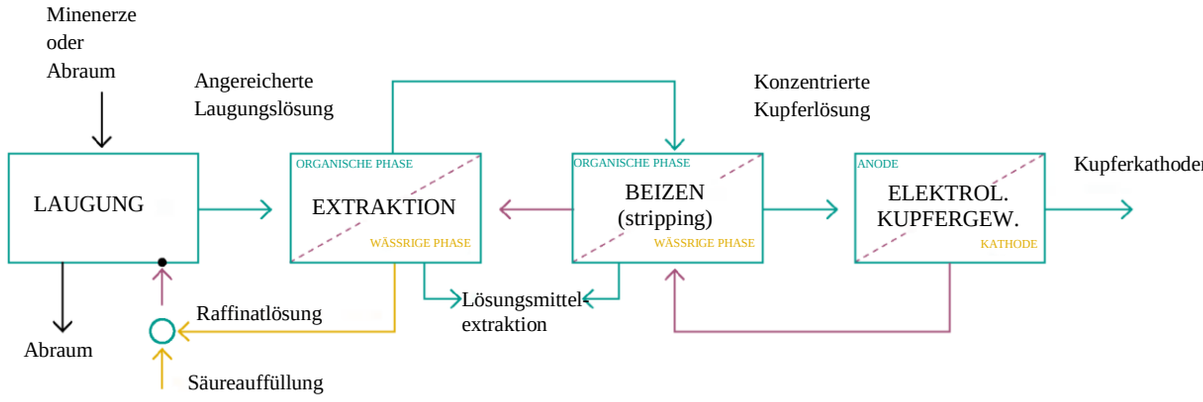
Grafik 1_ Kupfergehalt in Funktion der Partikelgrößen



Quelle: Eigene Angaben.

Aus der vorstehenden Abbildung ist zu entnehmen, dass die Auswahl des anzuwendenden Laugungsprozesses vom Kupfergehalt und der Partikelkörnung abhängig ist. Es ist zu beachten, dass die Halden- und Abraumhaldenlaugung mit sehr geringem Kupfergehalt arbeiten.

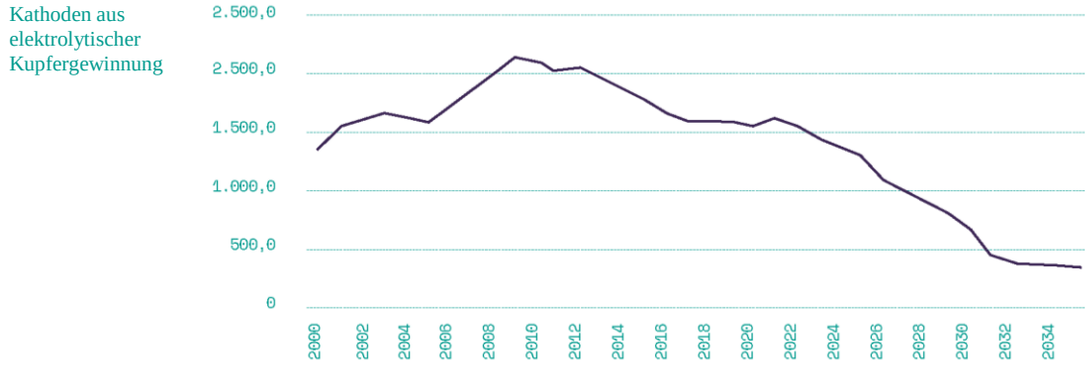
Abbildung 1_ Vereinfachtes Flußdiagramm der Laugeprozesse, Lösungsmittelextraktion und elektrolytische Kupfergewinnung.



Quelle: Eigene Angaben.

Die Oxide bilden sich nahe der Oberfläche, da sie aus dem Oxidierungsprozess einer Lagerstätte entstehen. Daher werden sie als erste abgebaut. In Chile stehen diese Ressourcen vor der Erschöpfung, weshalb langfristige Projektionen besagen, dass sich Entwicklung des nationalen Bergbaus zur Wertschöpfung auf Sulfidreserven mit geringem Kupferanteil basieren wird. In der Grafik 2 ist die Abnahme der elektrolytischen Kupfergewinnung in Chile ab dem Jahr 2009 abgebildet.

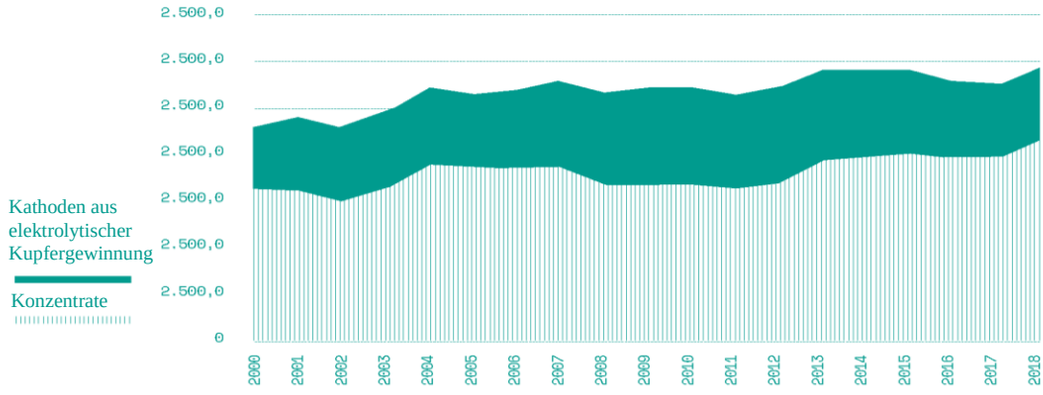
Grafik 2_ Hydrometallurgische Kupferproduktion über Lösemittelextraktion und elektrolytische Kupfergewinnung



Quelle: Eigene Angaben.

.
Das Projektportfolio und die zukünftigen Entwicklungspläne der Bergbauunternehmen basieren stark auf der Ausbeutung schon im Betrieb befindlicher Minen (*Brownfield-Projekte*). An vielen Standorten geht die Ausbeutung immer tieferer Lagerstätten mit der Notwendigkeit einher, Sulfidressourcen zu verarbeiten, die zum Teil einen sehr geringen Kupferanteil haben. Das führt zu einem marginalen Beitrag des Sulfidabbaus. Die Qualitätsabnahme des Minerals, sowohl hinsichtlich des Kupfergehalts, wie auch der Laugungsfähigkeit, führt zu Schätzungen, dass nur 12 % der erwarteten Kupferproduktion im Jahr 2025 Kathoden aus der elektrolytischen Kupfergewinnung stammen werden, was bedeutende Leerkapazitäten in den Elektrolyseanlagen nach sich ziehen wird.

Grafik 3_ Kupferproduktion in Chile



Quelle: Cochilco (2018)

Im Vergleich zu den normalerweise für Sulfiderze angewandten Mahl- und Konzentrationsprozessen, steht die Hydrometallurgie vor einigen noch zu lösenden technologischen Herausforderungen, wie die Kupferrückgewinnung, die Rückgewinnung anderer wertvoller Elemente, wie Edelmetalle und Molybdän, und die Prozesskinetik, da die Verarbeitung Monate dauern kann.

Wenn man die Aspekte betrachtet, die die Hydrometallurgie auszeichnen, wie beispielsweise die wirtschaftlichen Indikatoren, die den Abbau von Lagerstätten mit immer geringerem Kupfergehalt ermöglichen, ist es notwendig, diese Produktionslinie weiter zu entwickeln, um sich den vorstehend benannten Herausforderungen stellen zu können. In diesem Sinn sind für die Hydrometallurgie Technologien wesentlich, die den Prozess der Kupferrückgewinnung verkürzen.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Energie der kostenintensivste Produktionsfaktor im hydrometallurgischen Prozess ist. Je nach Einkaufspreis macht die Energie 25-30 % der Gesamtkosten aus, und 80-90 % fallen auf die elektrolytische Kupfergewinnung. Der Wasserverbrauch ist in der Hydrometallurgie hingegen relativ gering (0,11 m^3 pro Tonne Erz), im Vergleich mit der Mahlung und Flotation, die auf 0,45 m^3 pro Tonne Erz kommen.

Deutliche Produktivitätsverbesserungen könnten die Ausbeutung einiger marginaler Ressourcen rentabel gestalten, die heute nicht zum Ressourceninventar gerechnet werden. Anders ausgedrückt könnte ein technologischer Durchbruch die Umwandlung dieser Altlasten in Assets ermöglichen.

Außerdem ist die Hydrometallurgie ein gangbarer Weg zur Behandlung speziell komplexer Kupferkonzentrate. Heutzutage gibt es Industrieanlagen, in denen diese Prozesse realisiert werden, doch normalerweise stehen sie in Verbindung mit den spezifischen Eigenschaften einer Lagerstätte, wie der SX/EW-Leerkapazität oder der Neutralisierung der produzierten Säure. Auf jeden Fall ist die Hydrometallurgie der Konzentrate heute als technologisch weniger ausgereifte Alternative zur Pyrometallurgie anerkannt, deren Prozesse sich konsolidieren. Mittelfristig wird erwartet, dass sich die synergetischen Aspekte zwischen beiden Verfahrenslinien beispielsweise in den Bereichen der Behandlung arsenhaltiger Rückstände oder der Abwässer und des Prozesswassers intensivieren

Vision des Kernthemas

Unter Einhaltung hoher Standards von Betriebseffizienz, Sicherheit, sozialer und Umweltnachhaltigkeit Weltmarktführer im Betrieb hydrometallurgischer Anlagen sein

Antonagas
Minerals
Minera Michilla

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

In Funktion der evaluierten Informationen und der zu diesem Kernthema formulierten Vision hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe folgende Herausforderungen mit Lösungsansätzen und Forschungs- und Entwicklungslinien definiert.

Herausforderung 01

Umweltschutz und soziale Verantwortung

Es wird immer wichtiger, über eine „soziale Betriebslizenz“ zu verfügen, das heißt, dass die lokalen Gemeinschaften die Projekte akzeptieren, und das geht nur mittels der strikten Erfüllung der Umweltvorschriften. Daher ist das adäquate Management der hydrometallurgischen Rückstände eine fundamentale Praxis für die Industrie.

Umweltschutz und soziale Verantwortung	
Lösung	**Forschungs- und Entwicklungslinien**
01 Management fester, flüssiger und gasförmiger industrieller Rückstände	Nachhaltiges Abfallmanagement Einsatz biologischer Prozesse

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Produktivitätssteigerung

Die Verbesserung der Prozesseffizienz hinsichtlich der Kinetik der Kupferabscheidung und des Säure- und Energieverbrauchs ist und wird weiterhin ein sehr relevanter Aspekt im Umgang mit dem abnehmenden Erzgehalt und der Präsenz säurekonsumierender Elemente sein.

Produktivitätssteigerung

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Senkung des Energie- und Wasserverbrauchs	Senkung des Energiekonsums in der elektrolytischen Kupfergewinnung und des Wasserverbrauchs im globalen Prozess
02 Entwicklung neuer Technologien	Neue Laugungsprozesse, Lösemittelextraktion und elektrolytische Kupfergewinnung Temperaturkontrolle der hydrometallurgischen Prozesse

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Steigerung der Erzressourcen und -reserven

Die Existenz alterierter Elemente mit geringer Präsenz im löslichen Kupfer, die Präsenz von Lehm, die die Perkolation der Laugungsbetten und beständiger Kupfererze (Primärsulfide vom Typ Chalkopyrit) beeinträchtigt, sind relevante im Produktionsbetrieb zu beachtende Aspekte.

In diesem Kontext wird die Basis der Erzressourcen und -reserven weiterhin stark die Produktivität und die Projektion des Geschäfts bestimmen. Daher sind effizientere, flexiblere Verarbeitungsmethoden notwendig, die der Variabilität der Erze gerecht werden.

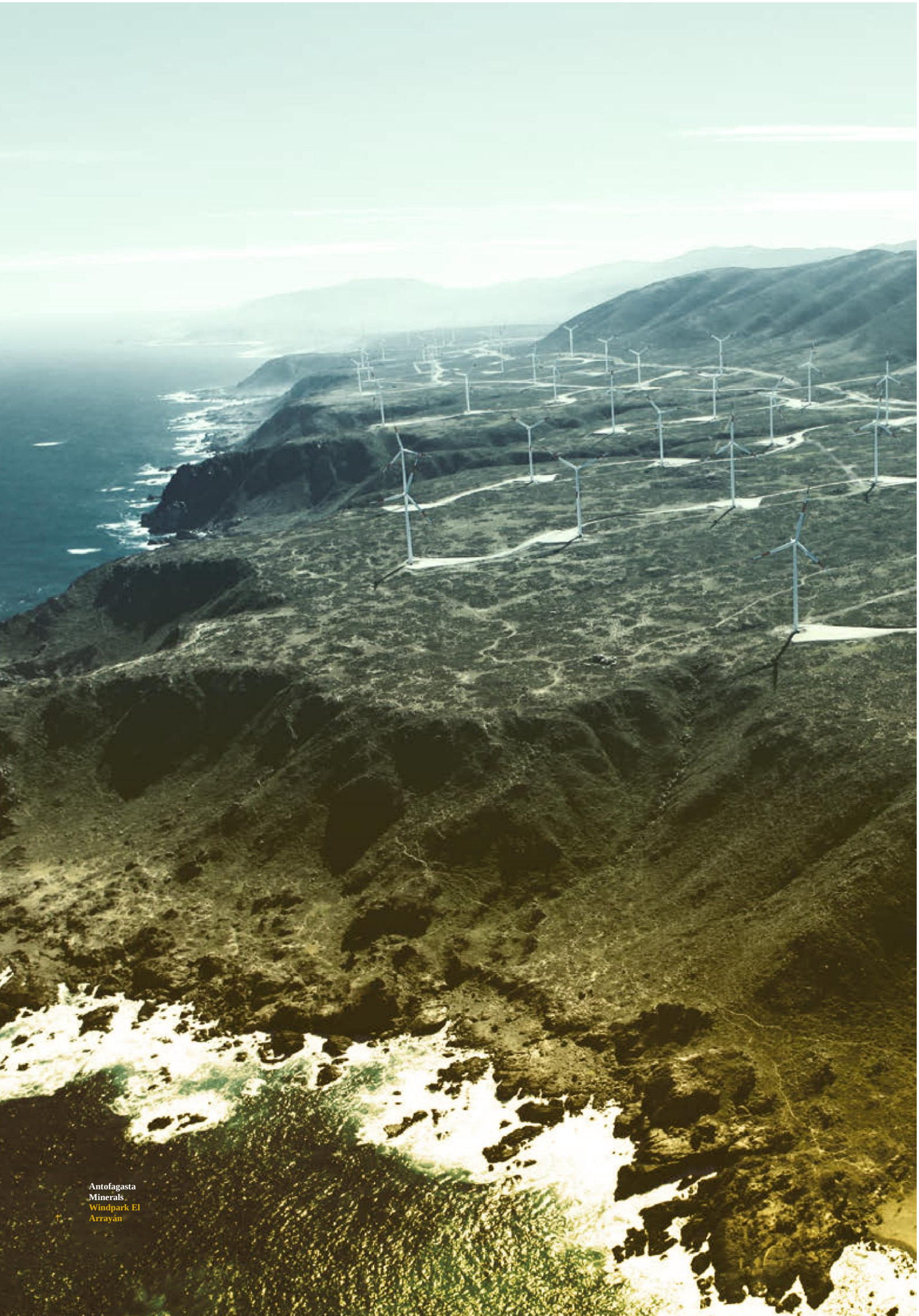
Steigerung der Erzressourcen und -reserven

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Nutzung der zukünftigen Leerkapazitäten	Laugung von Erzen mit niedrigem Kupfergehalt und Abraum Konzentratlaugung Laugung von weißem Metall und Verhüttungsstäube Laugung alterierter, lehmhaltiger und Feinstoffe generierender Erze Vor Ort-Laugung
02 Rückgewinnung von Kupfer und Edelmetallen	Rückgewinnung von Edelmetallen
03 Entwicklung neuer Technologien	Neue Laugungsprozesse, Lösemittelextraktion und elektrolytische Kupfergewinnung

Quelle: Eigene Angaben

Die Priorisierung der Herausforderungen und Lösungen dieses Kernthemas hat gezeigt, dass der Schwerpunkt der Entwicklung auf die Bereiche der Laugung von Erzen mit geringem Kupfergehalt und der Kupferkonzentratlaugung gelegt werden müssen.

07
Kernthema Green Mining



Antofagasta Minerals
Windpark El Arrayán

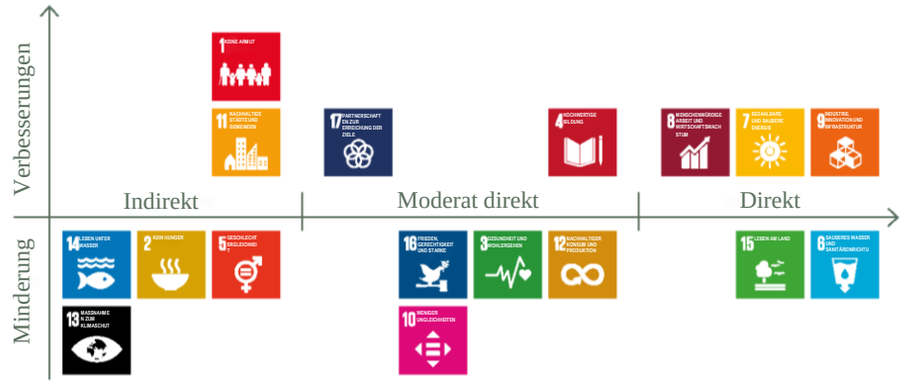
Grundlagen

Im Jahr 2015 genehmigte die UNO die Agenda 2030 für Nachhaltige Entwicklung, eine Gelegenheit für alle Länder und Gesellschaften, einen neuen Weg einzuschlagen und das Leben aller Menschen zu verbessern und niemanden zurückzulassen. Die Agenda umfasst 17 Ziele nachhaltiger Entwicklung (SDG) von der Armutsbeseitigung bis zur Bekämpfung des Klimawandels, Bildung, Gleichheit der Frauen, Verteidigung der Umwelt und die Gestaltung unserer Städte[1].

Der Bergbau verfügt über ein reales Potenzial, um über die Beteiligung öffentlicher und privater Unternehmen mit wachsender Partizipation der lokalen Gemeinschaften an den Projektstandorten, einen Beitrag zu den meisten der SDGs zu leisten. Mittlerweile haben alle Unternehmen die SDGs in ihre Nachhaltigkeitsberichte aufgenommen und große Fortschritte in der Identifizierung und Gewichtung der SDGs gemacht. Aufgrund der multisektoriellen Auswirkungen der produktiven Aktivitäten des Bergbaus auf die lokalen Gemeinschaften, Ökosysteme und Ökonomien, besteht hier ein relevantes Potenzial, um einen Beitrag zu verschiedenen SDGs zu leisten.

Abbildung 1_ PNUD 2016. Der Bergbau und seine Beziehung zu den SDGs

Der Bergbau und seine Beziehung zu den SDGs



Quelle: PNUD (2016)

1 Umweltbericht SDG (2018).

Die Umweltnachhaltigkeit der Bergbauaktivitäten hat Konsequenzen für Boden, Wasser, Klima, Flora und Fauna, sowie für alle Akteure, die von diesen Ressourcen abhängen. Die Bergbauaktivitäten erfordern einen sehr hohen Energieeinsatz und erzeugen große Emissionsvolumen. Daher besteht eine Chance zur Effizienzerhöhung und zur Erweiterung des Zugangs zu Energie, so wie es im SDG 6 (Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen) und im SDG 15 (Leben am Land) formuliert wird. Die Bauprojekte und der Bergbaubetrieb erfordern den Zugang zum Boden und den Wasserressourcen. Daher müssen die Auswirkungen gemindert oder verhindert werden, die im SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie) und Im SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) beschrieben sind.

Die direkten Vorteile der Umsetzung der SDGs und der von ihnen vorgesehenen Nachhaltigkeitsstandards finden sich unter anderem in den Systemen der Energiespeicherung, Rückgewinnung von Ressourcen (Recycling), Energieeffizienz, Minensanierung, geteilter Infrastruktur und Elektromobilität.

Die aktuelle Tendenz der Metallmärkte ist die Errichtung eines konzeptionellen Rahmens für die verantwortliche Lieferung von Erzen und Metallen, damit die Bergbauunternehmen, die entlang der Wertschöpfungskette arbeiten, nachweisen dass die vermarkteten Produkte unter Einsatz der besten Praktiken und Standards unternehmerischer Verantwortlichkeit in konfliktfreien Regionen produziert worden sind[2].

Im internationalen Kontext wird die Umstellung auf emissionsarme Energien zur Erfüllung der Klimaziele und zur Beschränkung der Klimaerwärmung um 1,5 Grad vor 2030[3] die Nachfrage nach leitfähigen Metallen wie Kupfer erhöhen und zu niedrigeren Emissionen in den Ländern führen. Die sauberen Energien, wie Wind- und Sonnenenergie, benötigen für ihre Produktion eine gesicherte Lieferung von Rohstoffen.

Auf nationaler Ebene verfügen wir über strategische Vorteile, wie den Zugang zu den Ressourcen Wasser und Energie und die Verfügbarkeit geologischer Ressourcen wie Kupfer, Silber und Lithium, um die für die Entwicklung der sauberen Energien erforderliche[4] Nachfrage zu decken.

Im Bergbau gibt es den Konsens, dass man sich in Richtung „Green Mining“ entwickelt, indem die Energie- und Wassereffizienz des Bergbaubetriebs und die Minderung des ökologischen Fußabdrucks der Produkte entlang ihres Lebenszyklus vorangetrieben und die sozialen Auswirkungen minimiert werden. Gleichzeitig muss der grüne Bergbau Kontroll- und Messmethoden entwickeln, die die speziellen Eigenschaften der Aktivitäten berücksichtigen, Prozesse automatisieren, Arbeitsbedingungen verbessern, die Sicherheit der Arbeiter garantieren und die Praktiken einer Kreislaufwirtschaft in der Kultur der Organisationen etablieren.

---

2 London Metall Exchange (LME). Oktober 2018. Responsible Sourcing: LME position paper

3 IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C, The Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP, WMO 2018 https:// www.ipcc.ch/

4 International Bank for Reconstruction and Development/Die Weltbank. 2017. The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future.

Für eine verantwortliche Liefer- oder Versorgungskette sind Methodologien für die Nachverfolgbarkeit der relevanten Variablen und Leistungsindikatoren aus dem Nachhaltigkeitsbereich unverzichtbar, damit die Bergbauunternehmen die verantwortliche Produktion nachweisen können.

In diesem Kontext sind im Kernthema Green Mining 5 aktuelle und mittelfristige Herausforderungen für den chilenischen Bergbau identifiziert worden:

- Effiziente Energienutzung und Nutzung sauberer Energien im Bergbau
- Effiziente Nutzung der Wasserressourcen im Bergbaubetrieb
- Anwendung der Kreislaufwirtschaft im Betrieb entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Verbesserung der Arbeitsbedingungen (Arbeitssicherheit und -gesundheit)
- Minimierung der Umweltbelastungen in den lokalen Gemeinschaften

Der grüne Bergbau berücksichtigt nur den Teil der nachhaltigen Entwicklung, der mit kurz- und mittelfristigen Initiativen gefördert werden kann, um mittelbare Ziele zu erreichen, die eine schrittweise und permanente Änderung und Verbesserungen in den angeführten Bereichen ermöglichen.

Die Abbildung 2 zeigt die beschriebenen Konzepte unter Einbeziehung der notwendigen methodologischen Standards der Nachverfolgung, des Monitorings und der Planerfüllung anhand der Nachverfolgbarkeit der Bergbauaktivitäten und -prozesse.

Abbildung 2_ Diagramm des Green Mining-Konzepts

Quelle: Eigene Angaben.

Effiziente Energienutzung und Nutzung sauberer Energien im Bergbau

Die Energie ist für den Bergbau ein wichtiger Produktionsfaktor, der je nach Bergwerk zwischen 18 und 25 % der Produktionskosten ausmacht. Der Bergbau setzt fossile Brennstoffe und Strom ein, und daher besteht die Notwendigkeit der effizienten Ressourcennutzung, die zum einen die direkten Kosten senkt und zum anderen den CO^2-Fußabdruck reduziert. Der Großbergbau unternimmt Anstrengungen, die Intensität des Energieverbrauchs im Betrieb zu mindern und erneuerbare Energiequellen zu integrieren.

Effiziente Nutzung der Wasserressourcen im Bergbaubetrieb

Das Wasser ist ein strategischer und kritischer Produktionsfaktor im Kupferbergbau im Betrieb und in der Weiterverarbeitung der Sulfide und Oxide aus den Lagerstätten. Der Bergbau nutzt kontinentale Wasserressourcen und Meerwasser, dessen Nutzung aufgrund der Knappheit der kontinentalen Wasserressourcen und der immer strikteren Nutzungseinschränkungen stetig steigt.

Kreislaufwirtschaft im Betrieb

Der Kupferbergbau produziert entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Extraktion bis zur Fabrikation der Produkte große Volumen von Rückständen und Abfällen. Es gibt voluminöse flüssige, feste und gasförmige Bergbaurückstände, wie den Abraum, Flotationsrückstände, Schlacke, metallurgische Gase und Raffinatslösungen. Ein Teil dieser Rückstände und Abfälle hat Verwertungspotenzial und einige könnte man im Betrieb selbst oder in anderen Industrien verwenden. Dazu gehören die Reifen von Bergbau- und Straßenfahrzeugen, Öle und Fette und mehr als 100 weitere Abfälle.

Verbesserung der Arbeitsbedingungen (Arbeitssicherheit und -gesundheit)

Auch wenn der Bergbau die Unfallhäufigkeit und die Todesfälle in den letzten Jahrzehnten wesentlich reduziert hat, so gibt es noch immer Raum zur Verbesserung, um das Ziel von null Unfällen zu erreichen. Zum anderen ist auch das Arbeitsumfeld durch die Reduzierung negativer Auswirkungen auf die Gesundheit und den physischen Zustand der Bergleute verbessert worden. Dennoch gibt es Berufskrankheiten, die durch neue Technologien und kulturellen Wandel in den Organisationen zu beseitigen sind.

Minimierung der Umweltbelastungen in den lokalen Gemeinschaften

Die Behörden, die Bergbauindustrie und die Gemeinschaften haben gemeinsam Fortschritte bei der Verringerung oder Beseitigung der Umweltbelastungen in der Nähe besiedelter Gebiete oder Städte gemacht. In diesem Kontext hat es auch Fortschritte bei der nachhaltigen Entwicklung des Bergbaubetriebs und der lokalen Gemeinschaften gegeben, indem in einem kollaborativen Ambiente vorteilhafte Bedingungen für beide Seiten geschaffen worden sind. Es bedarf jedoch spezieller Vorsicht in der Zusammenarbeit, um bestimmte Konflikte auszuräumen, die das Zusammenleben beeinträchtigen und zu unerwünschten Umweltbelastungen führen könnten.

Grüner Kupferbergbau in Chile

Chile ist der wichtigste Kupferproduzent der Welt, und im nationalen Territorium befinden sich einige der größten Reserven des Metalls[5]. Diese Führungsposition beinhaltet die Anwendung der höchsten Standards in den verschiedenen Bereichen des Bergbaus, um die soziale und Umweltlizenz zu behalten, die der Industrie einen privilegierten Rang auf nationaler und internationaler Ebene verliehen hat.

Heute ist das nachhaltige und sozialverträgliche Wachstum des Bergbaus, der seine Gewinne gerecht verteilt, ein Gebot; ein Bergbau, der den Umweltbelastungen vorbeugt, sie mindert und kompensiert und mit vollem Respekt und Verantwortlichkeit die Rechte der lokalen Gemeinschaften wahrt. Zum besseren Verständnis des Kupferbergbauprozesses werden die verschiedenen Betriebsbereiche mit eingeschlossen, die in ihren Phasen und Prozessen Energie benutzen[6].

Unser Land erfüllt die notwendigen Bedingungen für die Umsetzung des Green Mining, das die Umweltbelastungen reduziert, saubere Energien für mehr Energieeffizienz im Produktionsprozess fördert (Wertschöpfungskette), die Nutzung der Wasserresourcen optimiert, werthaltige Elemente rückgewinnt und recycelt und Technologien zur Reduzierung des Umweltfußabdrucks des Kupferbergbaus integriert.

Die wichtigsten Umweltindikatoren des chilenischen Bergbaus im Rahmen des *Green Mining* werden in der folgenden Grafik aufgeführt. Das sind einige der nachzuverfolgenden Variablen zur Verbesserung der Effizienz, Emissionen, Wassernutzung, Rezirkulation etc.

---

5 Bergbaujahrbuch von Sernageomin 2016

6 Bericht von Cochilco zum Energieverbrauch und Wasserressourcen im Kupferbergbau 2017

Abbildung 3_ Hauptindikatoren der Nachhaltigkeit des chilenischen Bergbaus

Der **Stromverbrauch** des Kupferbergbaus entspricht 94.153 TJ ist bei etwa 33% der nationalen Gesamtzahl geblieben.

Der Abbau in den Minen verzeichnet mit 294 Tausend Tonnen die höchste **Erzeugung von gefährlichen Abfällen** und erreicht 46% des gesamten erzeugten Abfalls im Land.

Die gesamten direkten THG-Emissionen aus dem Kupferbergbau betragen 5.491 Kt CO2 EQ, das entspricht 4,9% der nationalen Gesamtmenge.

Der **Wasserverbrauch** in der Bergbauindustrie entspricht 3% des nationalen Gesamtverbrauchs (2018) und erreicht 16,1 m3/s (20% im Meer und 80% im Binnenland).

Auf nationaler Ebene liegt die **Rezirkulationsrate** in den Konzentratoranlagen bei 76%.

Quelle: Cochilco (2018) / Umweltministerium (2018)

Vision des Kernthemas

Schaffung der Grundlagen, um den chilenischen Bergbau auf der Weltkarte als Weltmarktführer im Green Mining zu positionieren

Förderung eines Ansatzes, der die Zielsetzungen der nachhaltigen Entwicklung berücksichtigt, Anreize für Innovation, Energie- und Wassereffizienz schafft und gleichzeitig die Nutzung erneuerbarer Energien, die Prozessexzellenz und den Wertzuwachs in der Produktionskette fördert und die Rückstandsbehandlung einbezieht, um eine Kreislaufwirtschaft zu installieren

Antofagasta Minerals Solarthermische Anlage

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

Ausgehend von den evaluierten Informationen und der für das Kernthema Green Mining definierten Vision, hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe vier Herausforderungen formuliert. Für alle werden mögliche Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien präsentiert.

Herausforderung 01

Energie- und Wassernachhaltigkeit und CO^2-Fußabdruck

Da Kupfer eine der großen Treibkräfte für die Energieentwicklung der Zukunft ist, muss die Kupferproduktion sowohl beim Rohstoffverbrauch (fossile Brennstoffe, Wasserressourcen und Erze), wie auch bei den Gasemissionen, einschließlich der Treibhausgase und flüssiger und fester Emissionen, verantwortungsvoll und nachhaltig sein.

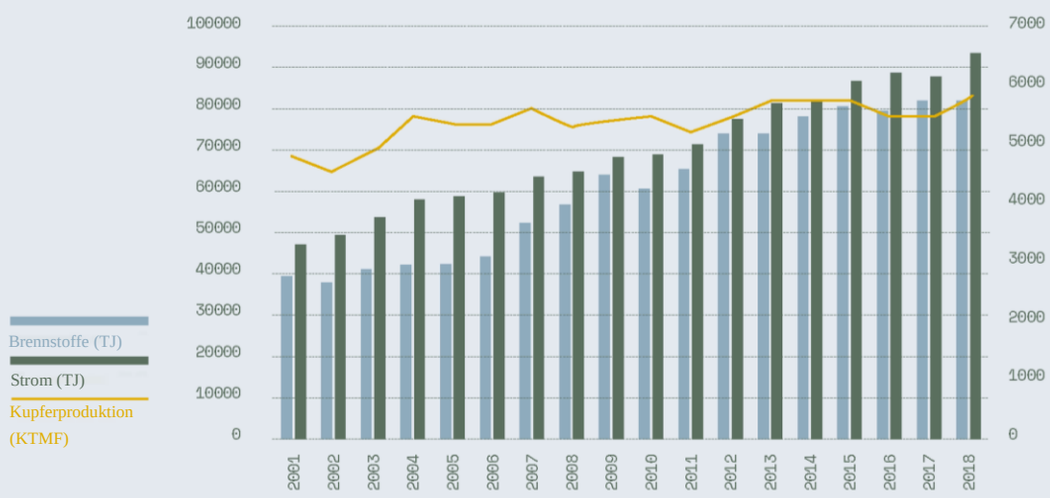
Im Energiebereich ist für die nächsten 10 Jahre die Tendenz eines steigenden Verbrauchs entsalzten Wassers und Meerwassers, sowie eine höhere Energienachfrage der Konzentrationsanlagen zu erwarten, die von den aktuellen 50 % des Gesamtenergieverbrauchs auf 70 % ansteigen werden. Beide Situationen führen zu deutlichen Steigerungen des Energieverbrauchs. Die nächstliegende Antwort des Bergbaus liegt im Einsatz erneuerbarer Energien und in der Umsetzung von Maßnahmen der Energieeffizienz. Als Energie verbrauchender Sektor liegt der größte Beitrag und die größte Chance zur Innovation in der Förderung nachhaltiger Versorgungsquellen, der Einführung erneuerbarer Energien in die Produktionsprozesse und der optimalen Energienutzung zur Minderung der negativen Auswirkungen.

Energieverbrauch im Bergbau

Der Energieverbrauch im Kupferbergbau hat 2018 176,7 PJ erreicht und ist damit im Vergleich zu 2017 um 4 % gestiegen. Der Verbrauch teilt sich auf in 82,59 PJ von Energie aus Brennstoffen und 94,15 PJ Stromverbrauch. Der Brennstoffverbrauch ist 2018 im Vergleich zum Vorjahr um 0,9 % gestiegen und der Stromverbrauch um 6,9 %.

Die folgende Grafik zeigt den Brennstoff- und Stromverbrauch im Kupferbergbau von 2001 bis 2018.

Grafik 1_ Stromverbrauch und Feinkupferproduktion



Quelle: Cochilco (2018)

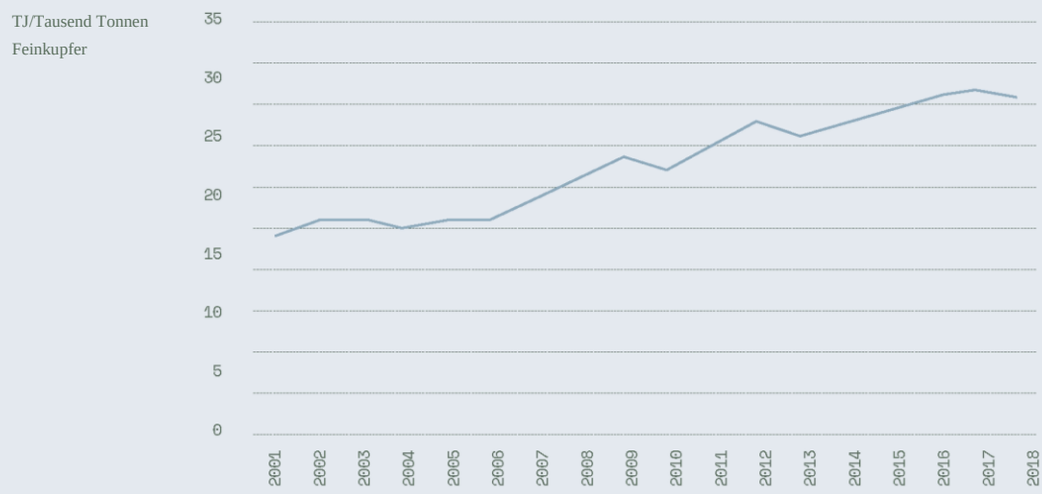
Wie die Grafik zeigt, wächst der Brennstoff- und Stromverbrauch stetig. Die mittlere Wachstumsrate des Brennstoffverbrauchs liegt bei 6,22 % in einem Zeitraum von 18 Jahren. Der Anstieg des Stromverbrauchs lag aber bei 5,51 % jährlich in derselben Periode. Zum anderen ist die entsprechende Feinkupferproduktion im selben Zeitraum jährlich nur um 1,28 % gestiegen.

Der Anstieg des Brennstoffverbrauchs erklärt sich zum großen Teil durch die größeren Förderwege des Abraums, die wachsenden Distanzen zu den Primärbrechern und die größere Tiefe der Tagebauten. Das Zusammenspiel dieser Faktoren erfordert mehr Energie für die Erz- und Materialförderung, sodass der Tagebau 80 % der gesamten Brennstoffe verbraucht, gefolgt von der Verhüttung mit 8 %.

Zum anderen führt die Abnahme des Erzgehalts und die größere Härte des Gesteins aus den Primärlagerstätten zu einem höheren Stromverbrauch in den Brechern und Mühlen, was den Verbrauch insgesamt ansteigen lässt. Der Konzentrationsprozess verbraucht rund 57 % des Stroms.

Dabei ist anzumerken, dass die globale Intensität der Energienutzung in all ihren Formen, gemessen als die notwendige Energie zur Produktion einer äquivalenten Einheit Feinkupfer, von 2001 bis 2018 signifikant um eine mittlere Rate von 3,7 % jährlich gestiegen ist, wie die Abbildung zeigt.

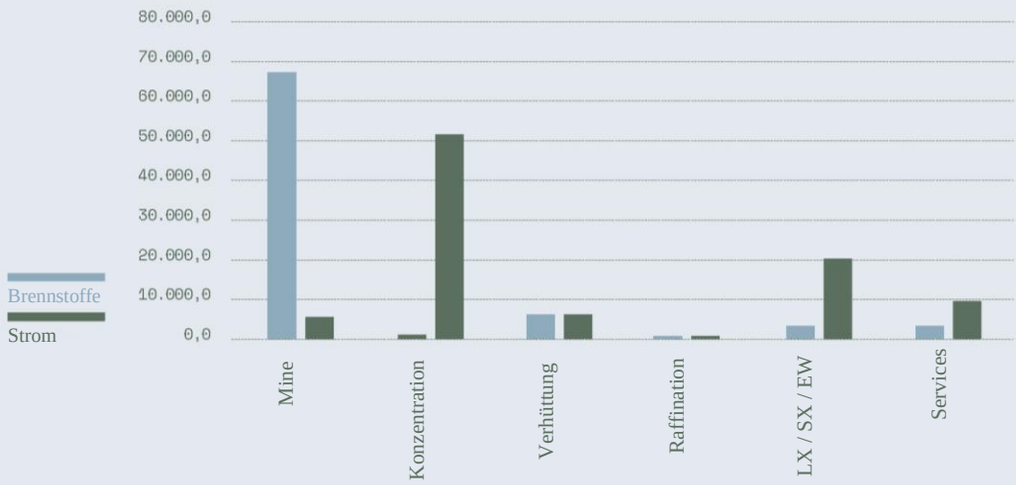
Grafik 2_ Intensität der Energienutzung



Quelle: Eigene Quelle mit Daten von Cochilco.

Wie man in der Grafik 3 sieht, verbrauchen die Arbeiten in der Mine den größten Teil der Brennstoffe für die Abraum- und Erzförderung, gefolgt von der Konzentratverhüttung und der hydrometallurgischen Produktionslinie. Der Strom hingegen wird vor allem in den Konzentrationsprozessen und in der elektrolytischen Kupfergewinnung verbraucht.

Grafik 3_ Energieeinsatz in den Prozessen



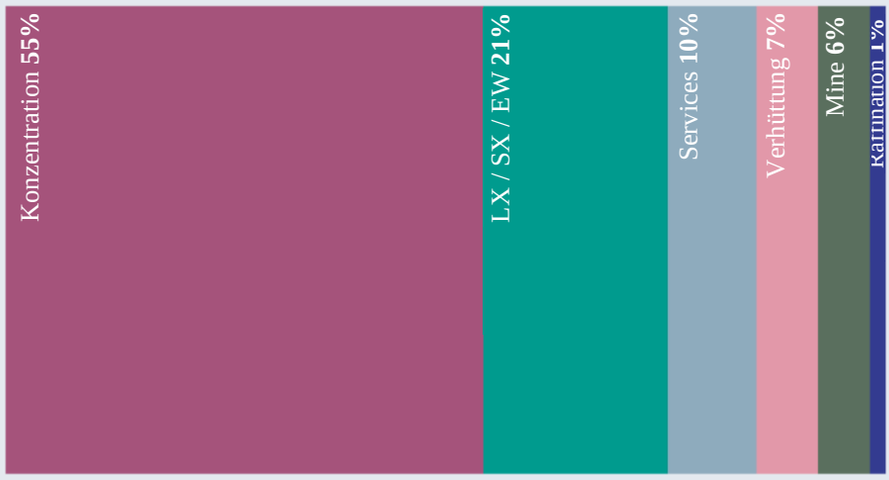
Quelle: Eigene Quelle mit Daten von Cochilco.

Die Grafiken 4 und 5 zeigen, dass 2018 von den in der Industrie eingesetzten 82,6 PJ Energie aus Brennstoffen 80 % in der Mine eingesetzt wurden und 8 % in der Konzentratverhüttung. 55 % des Stroms wird in der Erzkonzentration verbraucht und 21 % in der Hydrometallurgie.

Grafik 4_ Brennstoffverbrauch in den Bergbauprozessen

Quelle: Cochilco (2018)

Grafik 5_ Stromverbrauch in den Bergbauprozessen



Quelle: Cochilco (2018)

Die Abbildung 4 beschreibt die Ursachen des wachsenden Energieverbrauchs im Verhältnis zur Feinkupferproduktion in Chile.

Abbildung 4_ Diagramm der Energie verbrauchenden Prozesse und die Beziehung zu steigender Nachfrage

Der Energieverbrauch wächst stärker als die Produktion

Quelle: Keine Quellenangabe

Die Grafik 6 zeigt die akkumulierte Nachfrage erforderlicher elektrischer Leistung, um den erwarteten Verbrauch des Kupferbergbaus von 2019 bis 2029 zu decken. Die Nachfrage wird sich aus nachfolgend erklärten Gründen in diesem Zeitraum vervierfachen.

Grafik 6_ Projektion der akkumulierten Nachfrage elektrischer Leistung (MW), die vom Kupferbergbau von 2018-2028 benötigt wird.

Quelle: Cochilco (2019)

Der Verbrauchsanstieg in der Industrie wird bestimmt durch:

- Den steigenden Anteil der Konzentrate auf 67 % der Gesamtproduktion im Jahr 2029, zusammen mit der Abnahme der Kathodenproduktion.
- Den Anstieg der Energienachfrage für die Prozesse der Entsalzung und das Pumpen von Salzwasser von 4 auf 10 % im Jahr 2029, womit dieser Prozess die zweitgrößte Energienachfrage haben wird.

Im Rahmen der Energienachhaltigkeit ist auf zwei laufende Projekte zu verweisen:

- Duales Verbrennungssystem mit Wasserstoff und Diesel in Minenlastern
- Elektromobilität im Bergbau durch Brennstoffzellen

Wassernutzung im Bergbau

Aufgrund wachsender Nutzungseinschränkungen, geringerer Verfügbarkeit und dadurch steigender Kosten, wird das Wasser im Kupferbergbau als strategisches Element betrachtet.

Nach Daten von Cochilco (2018) wird der Wassergesamtverbrauch von 2018 bis 2029 um fast 50% auf 25,35 m^3/Sek. steigen. Es wird allerdings ein anhaltendes Wachstum des Meerwasserverbrauchs bis 10,82 m^3/Sek. im Jahr 2029 projiziert, was einem Wachstum von 230 % im Vergleich zum Verbrauch von 3,28 m^3/Sek im Jahr 2018 entspricht. Für den Verbrauch kontinentaler Wasserressourcen wird ein Wachstum von 13,81 m3/Sek im Jahr 2018 auf 14,53 m^3/Sek im Jahr 2029 angenommen, was einem Wachstum von 5,2 % entspricht.

Die Grafik 7 zeigt die Entwicklung des projizierten Süß- und Meerwasserverbrauchs im Kupferbergbau im Zeitraum von 2018-2029.

Grafik 7_ Entwicklung des Wasserverbrauchs nach Wasserquellen

Quelle: Cochilco (2018)

Die Region, die den Verbrauch von Meerwasser und kontinentalen Wasserressourcen am meisten verändert hat, ist Antofagasta, indem der Süßwasserverbrauch um 55 % reduziert wurde. Die Region O'Higgins verzeichnet einen Rückgang von 13,4 %[7].

Es wird geschätzt, dass der Meerwassereinsatz deutlich steigen wird, was sich vor allem durch Initiativen in der Region Antofagasta erklärt. In diesem Zeitraum laufen die Inbetriebnahmen oder Erweiterungen mehrerer Entsalzungsanlagen, wie die von Escondida und Spence von BHP, Norddistrikt von Codelco, die Anlage Centinela zur Versorgung des Projekts Distrito Centinela von Antofagasta Minerals und die Meerwasserextraktion für die mögliche Expansion der Mine Sierra Gorda von KGHM. Für diese Region wird eine Erhöhung des Meerwasserverbrauchs von 248 % mit einem jährlichen Wachstum von 11,7 % vorhergesehen[8].

Der Meerwasserverbrauch in Antofagasta wird bis 2029 auf 7,8 m^3/Sek steigen, das heißt 248,5 % mehr als im Jahr 2018. Auf dem zweiten Platz liegt die Region Atacama, die bis 2029 1,7 m^3/Sekunde undamit 230 % mehr als 2018 verbrauchen wird[9].

Die Konzentration wird weiterhin der Prozess mit dem höchsten Verbrauch sein und bis 2029 einen Anstieg von fast 75 % verzeichnen, während der Hydrometallurgieprozess den Konsum senken wird. Es ist zu berücksichtigen, dass sich für die Zukunft aufgrund der Erschöpfung der laugbaren Erze eine geringere Anzahl hydrometallurgischer Projekte abzeichnet.

Allerdings handelt es sich bei fast der Hälfte der Projekte, die für den Anstieg des Meerwasserverbrauchs bis 2029 verantwortlich sind, um wahrscheinliche, potenzielle oder mögliche Projekte, das heißt, ihre Umsetzung ist mit einem gewissen Unsicherheitsgrad verbunden. Etwas Ähnliches geschieht mit dem Meerwasserverbrauch in der Projektentwicklungsphase, da nur 45 % des Verbrauchs bis 2029 auf im Betrieb befindliche Projekte zurückzuführen ist. Es ist davon auszugehen, dass bis 2029 63 % des Wassers in Projekten verbraucht wird, die über gültige Umweltgenehmigungen verfügen[10].

Der Einsatz von entsalztem oder direkt verwendetem Meerwasser in metallurgischen und Bergbauprozessen ersetzt die Nutzung kontinentaler Wasserressourcen aus unterschiedlichen Quellen und verbessert die Bedingungen für eine nachhaltige Beziehung der Industrie zu ihrem Umfeld und der lokalen Bevölkerung. Wichtig ist vor allem bei neuen Projekten, wie in der Minera Centinela, statt der Entsalzung, die Nutzung des partiell behandelten oder unbehandelten Meerwassers zu fördern. Schon im Betrieb befindliche Projekte erfordern viele Anpassungen, die möglicherweise viel zu aufwendig sind[11].

Unter Einbeziehung von Erweiterungen und dem Austausch bestehender Systeme sind für die Zukunft mindestens 12 Projekte mit Meerwassereinsatz vorgesehen. Die meisten Projekte befinden sich in den Regionen Antofagasta und Atacama und sind an die 24 Bergbauprojekte gekoppelt, die in der Abbildung 5 aufgeführt sind.

---

7 Cochilco: Projektion des Wasserbrauchs im chilenischen Kupferbergbau im Zeitraum 2017-2028

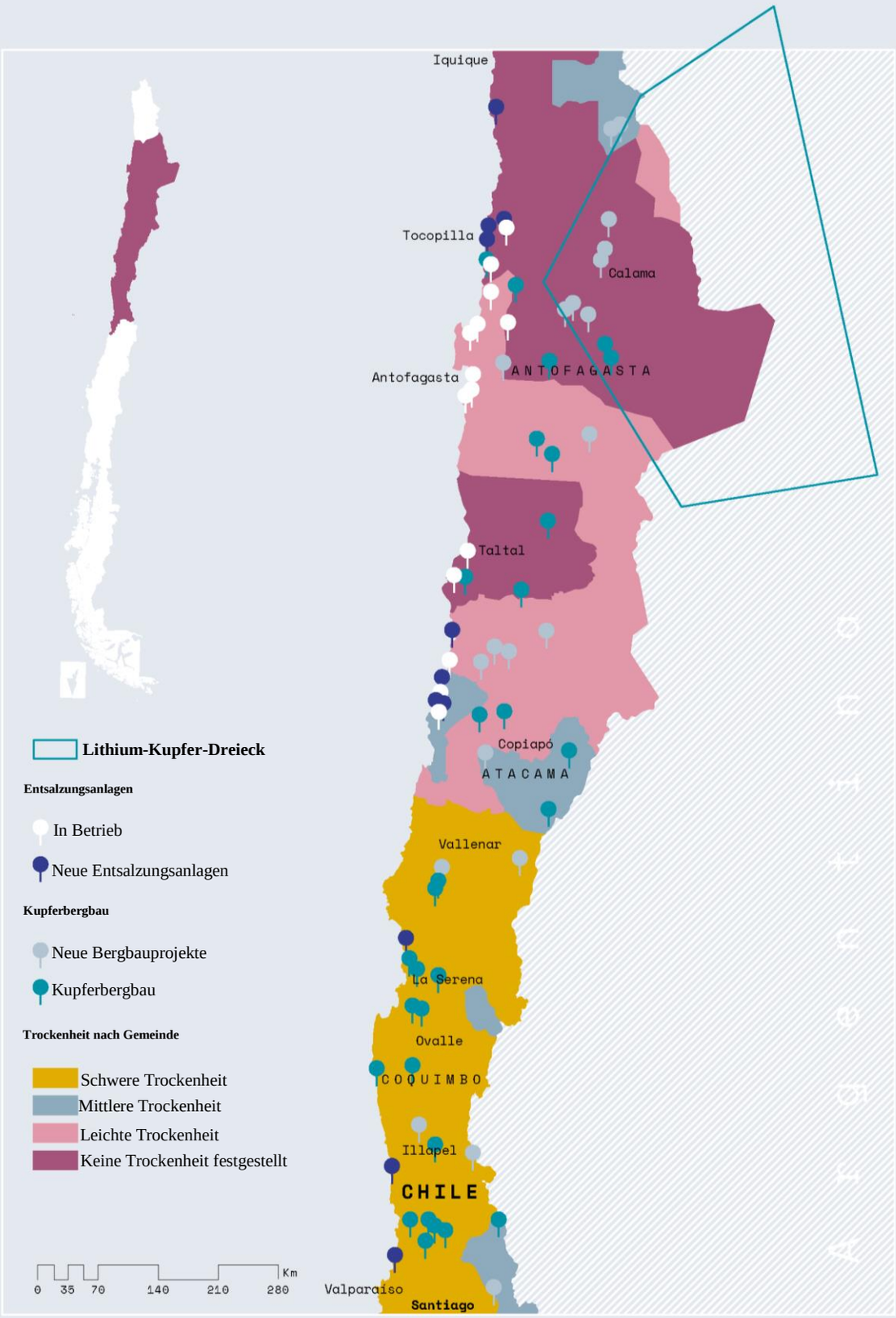
8 ibidem

9 ibidem

10 ibidem

11 Agua de Mar Atacama: oportunidades y avances para el uso sostenible de agua de mar en minería Luis Cisternas, Edelmira Gálvez, Yanett Leyton und José Valderrama

Abbildung 5_ Projektion von Entsalzungsanlagen sowie neuen und in Betrieb befindlichen Bergbauprojekten bis 2029



Bei der Analyse der aktuell betriebenen und zukünftigen Meerwasserprojekte ist auf die enge Beziehung zwischen dem Meerwassereinsatz und dem Energieverbrauch zu achten, denn in gewisser Weise wird die Wasserknappheit in ein Energieproblem verwandelt. Die Wasserkosten werden unumgänglich zu Energiekosten. Das zeigt deutlich die Bedeutung einer größeren Integration von Wasser und erneuerbarer Energien, bei der die Wiederverwendung des Wassers, kombiniert mit einem integrierten Management der Wassereinzugsgebiete, eine Lösung für die bestehende Wasserknappheit in den hochempfindlichen Einzugsgebieten in trockenen Gegenden liefern könnte[12].

Gleichzeitig ist es wichtig, für die Definition der Wasserversorgung die Besonderheiten jedes Projekts mit seinem Umfeld zu berücksichtigen. Der Meerwassereinsatz ist nicht immer technisch, wirtschaftlich oder sozial umsetzbar. Die Projektstandorte sind wesentlich für die Analyse, denn nicht alle können mit Meerwasser versorgt werden. Die Lösungen für diese Herausforderung werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Energetische und Wassernachhaltigkeit und CO2-Fußabdruck

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Effizienz in der Produktion von Kupfer und Subprodukten mit minimalem CO^2- und Wasserfußabdruck	Perfektionierung der Technologien für die Emissionskontrolle der Treibhausgase Optimierung der Transportrouten für Material und Vorleistungen für die Produkte entlang der Wertschöpfungskette Perfektionierung der kosteneffizienten und nachhaltigen Technologien zur Energieerzeugung und zur Kontrolle und Rückgewinnung/Rezirkulation des Wassers im Betrieb

12 ibidem

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
02 Energieeffizienz und Ersatz fossiler Brennstoffe	Energieeffizienz und Ersatz fossiler Brennstoffe in der Erzförderung (Laster und Bandförderer) Perfektionierung der Verlässlichkeit der Vorhersagemodelle in verschiedenen Betriebsszenarien von Mühlen und Konzentrationsanlagen Perfektionierung der Entwicklung von Technologien zur Einbindung neuer Energiequellen (Wasserstoff, Sonne, Wind und andere) in den Betrieb der Konzentrationsanlagen Perfektionierung und Entwicklung von Technologien zur Energieerzeugung, Erhöhung der Lagerkapazität und Reduzierung der ungenutzten Geräte in Produktionszyklen Entwicklung von Technologien zur Selbsterzeugung von Energie mit Bandförderern und anderen potenziellen Energiequellen

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Nachverfolgbarkeit und Nachhaltigkeitsindikatoren

Ziel der Nachverfolgbarkeit ist das Verfolgen der Aktivitäten, der Durchführungsveranwortlichen, der eingesetzten Geräte, der Rohstoffe (Inputs), der Emissionen, der Abfälle und der erzeugten und benutzten Informationen in allen Prozessschritten der Produktherstellung oder Dienstleistung, um die Betriebsdatensammlung zu stärken, sie miteinander zu vergleichen und außerdem die Umweltbelastungen der Prozesse und die Gelegenheiten zur Prozessverbesserung zu identifizieren.

Die nachverfolgbaren Standards bieten eine Reihe von Vorteilen, die im Unternehmen, in der Lieferkette und in der Industrie umgesetzt werden können.

Der Einsatz der Standards kann zu Verbesserungen im Betrieb, Einkauf, Verkauf und Marketing, in der Einbindung interessierter Parteien, Einsparungen und wirtschaftlichen Vorteilen und Änderungen in der Industrie führen. Auf diese Weise können die frühen Vorteile des Einsatzes geteilter und validierter Normen und Methodologien den Geschäftswert und die Nachhaltigkeitsauswirkungen deutlich stärken. Letztere stützen auch das Geschäftsszenario entlang der gesamten Lieferkette.

Die Umsetzung dieser Werkzeuge stärkt auch die Berichtssysteme und die Transparenz in der Informationserzeugung und wird speziell relevant in der Darstellung der ökologischen, sozialen und produktiven Leistung der Unternehmen.

Die nachverfolgbaren Nachhaltigkeitsschemata werden in 53 % des Großbergbaus, aber nur zu 16 % im kleinen und mittleren Bergbau umgesetzt, was 31 % für die gesamte Industrie ergibt. Auch wenn der kleine und mittlere Bergbau nur einen kleinen Beitrag zur weltweiten Erzproduktion leistet, würde die Umsetzung der Initiative in diesen Segmenten relevante Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit haben.

Für eine größere Harmonisierung der Schemata des kleinen, mittleren und Großbergbaus bedarf es einer neuen Definition bestehender Konzepte wie die Mechanisierungs-, Investitions- und Produktionsniveaus, sowie der umzusetzenden Methodologien und der Nachverfolgbarkeit. Die Schemata für alle Unternehmenstypen, wie sie seit kurzem für Zink, Tantal, Tungsten und Gold (3TG) zum Einsatz kommen, und in denen unabhängig von der Firmengröße und -kapazität umzusetzende Mindeststandards definiert werden, sind ein gutes Beispiel für Nachverfolgbarkeit und Zertifizierung. Auf diese Weise kann ein Schema weiter ausgerollt werden, allerdings mit weniger Auswirkungen auf das Handeln der Großunternehmen.

Die wichtigste Herausforderung ist, dass die Nachhaltigkeitsstrategien und ihre Indikatoren sich an die Managementpraxis und die Umwelt- und Sicherheitsnormen wie ISO 14001 oder OHSAS 18001 anpassen, um eine Liste spezifischer Managementschritte für die Kupferindustrie zu entwickeln. Somit sollte die Industrie sich in Richtung eines vereinheitlichten, nachhaltigen und nachverfolgbaren Managementsystems entwickeln, das den Vergleich zwischen den Kupferunternehmen ermöglicht und freiwillige Berichte (wie GRI, ICMM, MAC, SGDs), sowie die obligatorischen chilenischen Anwendungsberichte der Minderungsmaßnahmen und Umweltverträglichkeitsprüfungen, sowie die Zyanidverodnung, das Emissions- und Schadstofftransferregister (RETC), Erfüllungsberichte der Umweltverträglichkeitsverordnungen RCA-SMA, die spezifischen Anforderungen an Lagerstätten in Konfliktzonen, wie zum Beispiel RED-FLAG und OECD und die Nachverfolgbarkeitsanforderungen an die Endprodukte (ECO LEVEL und LEDD -Zertifizierung) einbeziehen[13]. Außerdem ist die Nachverfolgbarkeit die Grundlage für die Quantifizierung und Festlegung von Zielen, um eine *Green Mining*-Strategie voranzutreiben.

Eine kritische Analyse der Indikatoren, des Produktionsschemas und der Ähnlichkeit der Industrie, sowie der Umfang der Akkreditierung der Wertschöpfungskette zeigen, dass es im Gegensatz zu anderen Metallen keinen spezifischen Standard für den Kupferbergbau gibt.

In der rechtlichen Regelung der Nachverfolgbarkeit sind in Chile durch den Entwurf des Klimawandelgesetzes 2019 Fortschritte zu verzeichnen[14]. Die Gesetzesvorlage sieht sowohl die Einrichtung des Nationalen Systems eines Treibhausgasinventars zur Aktualisierung des Nationalen Treibhausgasinventars und anderer kurzlebiger Klimaschadstoffe (PM10 und PM 2,5) vor, um die Kohärenz der berichteten Emissionen zu überwachen und die Qualität der Schätzungen zu sichern, sowie das System zur Zertifizierung der Treibhausgase, das Zertifikate, Label oder Etiketten ausgibt, die über die Quantifizierung, das Management und das Berichtswesen der Treibhausgasemissionen informieren, sowie über die Absorption dieser Gase, damit die festgelegten Kriterien, Methodologien und Anforderungen erfüllt werden. Beide Instrumente sollen die bestehende Lücke schließen, da es bisher keine nachverfolgbare und unabhängige Methode gegeben hat, die erlaubt, die Emissionen der Treibhausgase[15] und den mit ihnen verbundenen hydrologischen Komponenten zu überwachen, zu melden, zu überprüfen und zu zertifizieren.

Die Lösungen für diese Herausforderung werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

---

13 Sustainability Schemes for Mineral Resources: A Comparative Overview. BGR. Karoline Kickler, Dr. Gudrun Franke, 2017

14 Entwurf für ein Klimawandelrahmengesetz 2019.

15 Ein Beispiel: Gegenwärtig stellen die Stromversorger den von ihnen belieferten Kunden ihre eigenen Zertifikate aus, die je nach der für die Erzeugung genutzten Energiequelle auf unterschiedlichen Methodologien basieren.

Nachverfolgbarkeit und Nachhaltigkeitsindikatoren

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Vereinheitlichung der Messmethodologien und der kritischen Variablen	Definition der technischen Kriterien für die Messungen und Berichterstattung und Regulierung dessen, was, wann und wie im Rahmen der Nachhaltigkeit und in Übereinstimmung mit dem internationalen Kontext im Land gemessen wird.
02 Festlegung von Indikatoren und Zielen	Definition der technischen und regulatorischen Kriterien zur Festlegung nationaler Indikatoren und Zielsetzungen im Bereich Nachhaltigkeit
03 Nachverfolgung, Berichterstattung, Überprüfung und Zertifizierung	Definition der technischen und regulatorischen Kriterien der Audits und der Zertifizierung der Nachhaltigkeit des nationalen Bergbausektors

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Minderung der gasförmigen, flüssigen und festen Emissionen

Der Bergbau muss die Treibhausgasemissionen, und speziell die Emissionen von Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Stickstoffoxid (NO_2) und Ozon (O_3) senken. 97 % der Treibhausgase in der Atmosphäre sind anthropogenen Ursprungs, und die Konzentration hat schrittweise zugenommen. Während der letzten 15 Jahre sind die Treibhausgasemissionen des chilenischen Bergbaus durch den wachsenden Strom- und Brennstoffverbrauch jährlich um circa 5,3 % gestiegen, weshalb sich im Rahmen der sogenannten Dekarbonisierung der Wirtschaft die Sorge um den Umwelt- und Gesundheitsschutz in Verpflichtungen niederschlagen, die signifikante Änderungen im Produktionsprozess des Bergbaus erfordern. Dazu bedarf es einem Eingriff mit Maßnahmen, die die erneuerbaren Energien, die Energieeffizienz, den Einsatz emissionsarmer Technologien, die Energierückgewinnung, ihren potenziellen Einsatz in der Energieerzeugung sowie die Umsetzung CO^2-armer Technologien fördern.

Die Bergbauaktivitäten produzieren vom Gesetz regulierte flüssige Industrieabfälle, die von den Unternehmen selbst behandelt werden, um die Umweltbelastungen zu verringern. In diesem Kontext und aufgrund der Wasserknappheit, sind die Abfälle im Betrieb durch die Rezirkulation in den Prozessen verringert worden, was mit einer Verbesserung und Optimierung der Wassernutzung einhergeht.

Es gibt Technologien mit verschiedenen Anwendungen für die Abwasserbehandlung, die die Bindung, Entfernung und Einkapselung der Metalle erlauben, ebenso wie das Abscheiden der Sulfide und anderer Elemente wie Chloride. In diesem Bereich besteht allerdings die Herausforderung, kostengünstigere Technologien einzusetzen.

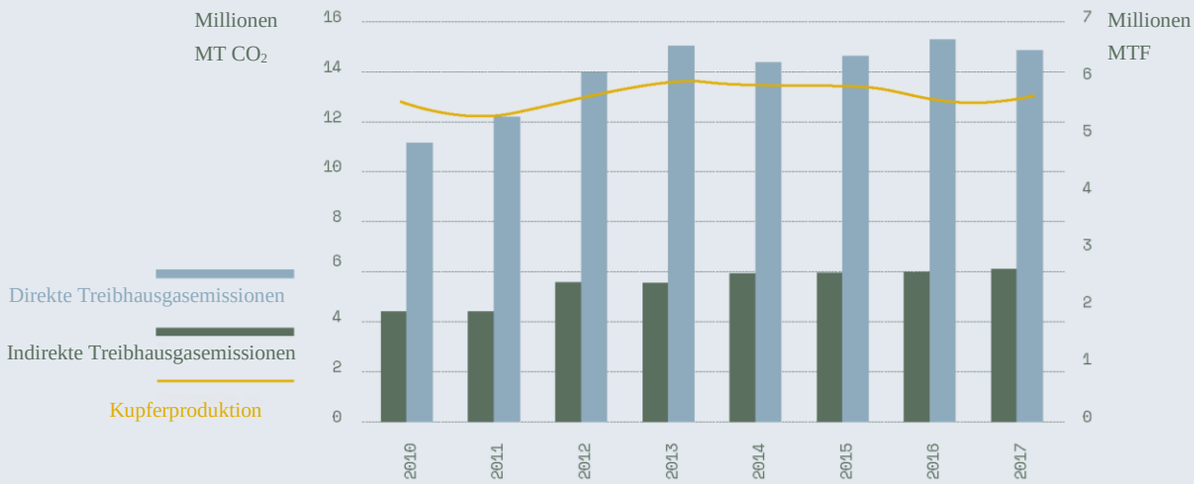
Treibhausgasemissionen

Im Jahr 2016 sind in Chile insgesamt 111,7 Millionen Tonnen CO^2 ausgestoßen worden, was einem Anstieg von 114,7 % seit 1990 und von 7,1 % seit 2013 entspricht. Das relevanteste Treibhausgas ist CO^2 (78,7 %), gefolgt von CH^4 (12,5 %), N^2O (6,0 %) und Fluorgasen (2,8 %). Im Kupferbergbau ist im Jahr 2016 ein Direktausstoß von Treibhausgasen von insgesamt 5,9 Tonnen CO^2 registriert worden, was 4,9 % der gesamten chilenischen Emissionen ausmacht[16].

Die folgende Grafik verzeichnet die direkten (Umfang 1) und indirekten Treibhausgasemissionen (Umfang 2) und die Produktion des Kupferbergbaus von 2010-2017.

16 Dritter zweijähriger Bericht der Aktualisierung des Klimawandels in Chile 2018.

Grafik 8_ Treibhausgasemissionen und Kupfererzproduktion in Chile



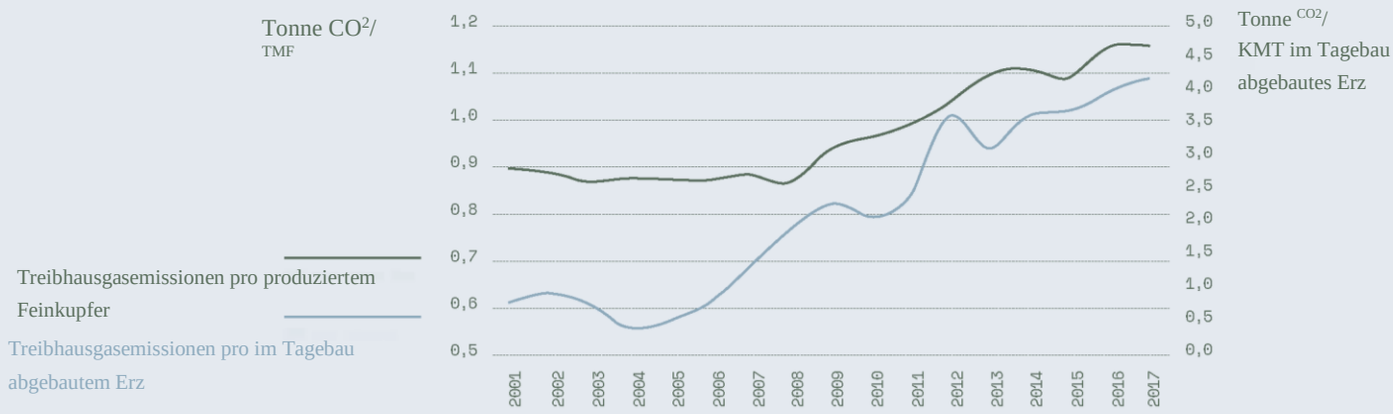
Quelle: Cochilco (2018)

Im Jahr 2017 lagen die Gesamtemissionen 1,4 % unter dem Wert von 2016, was einer Verringerung von 286 Millionen Tonnen CO^2 entspricht. Das erklärt sich vor allem durch die Minderung von 2,7 % der indirekten Emissionen, was wiederum auf den Anstieg der installierten Kapazität nicht konventioneller erneuerbarer Energien im Verbundnetz (SIC) zu erklären ist.

Der Brennstoff Diesel ist unter den direkten Treibhausgasemissionen für 89,8 % des Gesamtausstoßes verantwortlich, was sich durch die steigende Nutzung erklärt. Im nationalen Kupferbergbau wird zu 88,7 % Diesel als Brennstoff eingesetzt.

Der Prozess, der am meisten direkte Treibhausemissionen produziert, ist der Abbau im Tagebau, der sich 2017 auf 4,6 Millionen Tonnen CO^2 belief: Das entspricht 77,6 % der Gesamtmenge und liegt 20,5 % über dem Wert von 2012. Während es seit 2012 in der Erzextraktion im Tagebau positive und negative Schwankung gegeben hat, ist der Brennstoffverbrauch von Jahr zu Jahr permanent gestiegen, was die These begründet, dass der höhere Energieverbrauch auf die längeren Förderwege vom Ort der Extraktion bis zur Prozessanlage zurückzuführen ist. Die Stückkoeffizienten der direkten Treibhausgasemissionen[17], anhand derer man die Emissionsintensität unabhängig vom Erz oder der Produktion evaluiert, zeigen, dass es in den letzten 17 Jahren aufgrund des gestiegenen Brennstoffverbrauchs einen konstanten Anstieg gegeben hat, sowohl durch die größere Kupferproduktion, als auch durch strukturellen Änderungen im chilenischen Bergbau, vor allem aufgrund der Veralterung der Minen. Trotz des nominalen Produktionsrückgangs von Feinkupfer in Chile im Jahr 2016, sind 1,06 Tonnen CO^2 pro produzierte Tonne Feinkupfer registriert worden. Das sind 4,9 % mehr als im Jahr 2015. Zurückzuführen ist das auf die gestiegene Dieselnachfrage im Tagebau aufgrund der längeren Förderwege und dem während der Evaluierungsperiode gesunkenen durchschnittlichem Erzgehalt (Cochilco 2017).

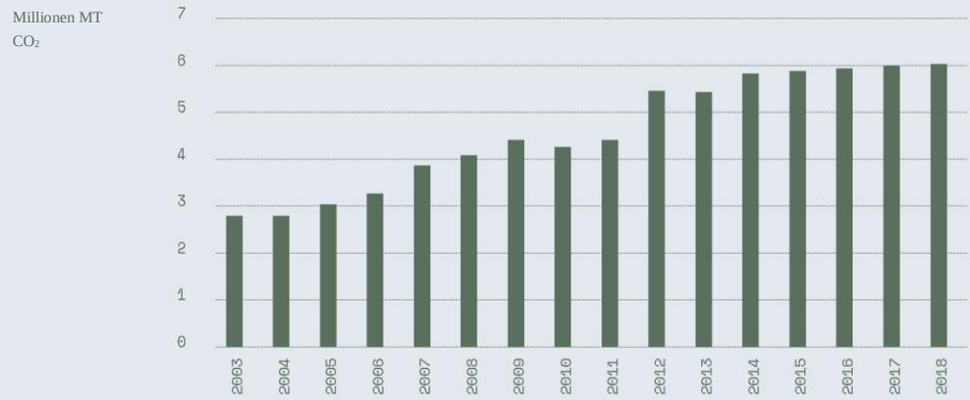
Grafik 9_ Direkte Treibhausgasemissionen pro Tonne Feinkupfer, 2001 - 2017



Quelle: Cochilco (2018)

17 Volumen der direkten Treibhausgasemissionen pro Tonne Feinkupfer.

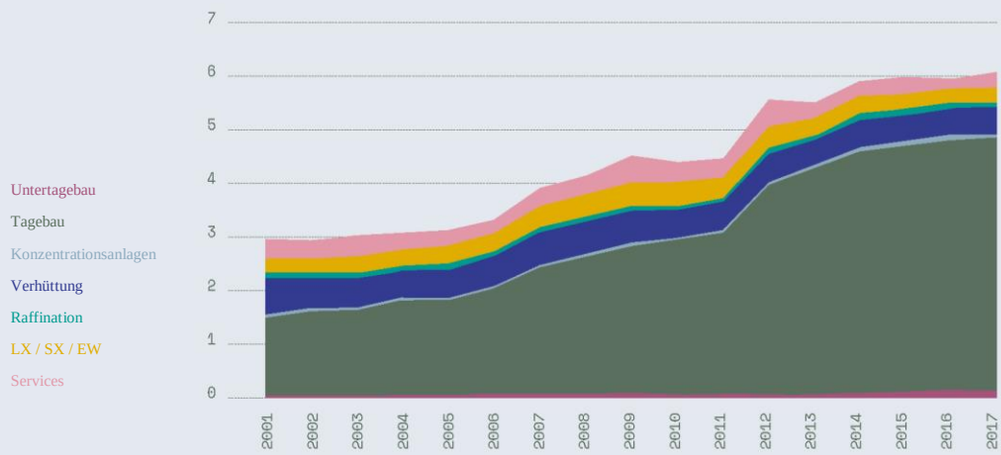
Grafik 10_ Direkte Treibhausgasemissionen im Bergbau



Quelle: Cochilco (2018)

In der folgenden G wird der aggregierte Energieverbrauch auf Grundlage der Brennstoffe nach Bergbauprozess von 2001 bis 2017 dargestellt.

Grafik 11_ Direkte Treibhausgasemissionen des Kupferbergbaus nach Prozess, 2001 - 2017



Quelle: Cochilco (2018)

Der Extraktionsprozess im Tagebau produziert 77,6 % der direkten Treibhausgasemissionen (Umfang 1). Der wichtigste Brennstoff in diesem Prozess ist Diesel, mit dem die Erzlaster betankt werden, die 88,2 % der Emissionen verursachen. Falls keine Maßnahmen getroffen werden, um den Diesel als Primärbrennstoff zu ersetzen oder technologische Verbesserungen einzuführen, wird diese Tendenz Bestand haben oder sich noch verschärfen.

Rückstände

Im Jahr 2016 sind in Chile rund 21,2 Millionen Tonnen Abfälle produziert worden. 97 % davon sind ungefährliche Abfälle und 3 % sind Gefahrstoffe. Zur ersten Gruppe gehören Industrieabfälle (59,8 %), städtische feste Abfälle (35,3 %) und Klärschlämme (1,9 %).

Von den ungefährlichen Abfällen sind 76 % entsorgt und 24 % verwertet worden. Die Abfälle werden hauptsächlich in Mülldeponien entsorgt. Auch wenn die Mülldeponien die offiziellen Hygiene- und Umweltanforderungen erfüllen, ist das aus der Umweltperspektive nicht genug, denn eine finale Abfallentsorgung in Mülldeponien sollte verhindert werden. Die Anzahl der Müllhalden muss verringert werden, und dazu ist das Recycling ein Schlüsselelement.

Außerdem produziert das Land 642.000 Tonnen Gefahrstoffe. Am meisten Gefahrstoffe werden mit 293.600 Tonnen beim Abbau in Minen und Steinbrüchen erzeugt, was 45,7 % der Gesamtmenge in Chile entspricht[18]. Das zeigt deutlich, wie wichtig es ist, in diesen Bereichen Technologien zur Reduzierung des Volumens und der Risiken einzusetzen. Da die Gefahrstoffentsorgung in Sondermülldeponien zu erfolgen hat, entstehen hohe Kosten pro Tonne, sodass die Einbindung von Technologien im Rückstandsmanagement sich in einem abzusehenden Zeitraum amortisiert. Dadurch bieten sich Gelegenheiten für innovative Geschäfte mit Renditen in klar zu bestimmenden Zeiträumen mit bekannten alternativen Kosten.

Aktuell werden im Rahmen der Roadmap Alta Ley zwei Projekte für den Brennstoffwechsel für Minenlaster und mobile Geräte durchgeführt. Die Initiative von ALSET Ingeniería SpA arbeitet mit dualer Wasserstoff-Diesel-Verbrennung in den Lastern und das Projekt der Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) beschäftigt sich mit der Umrüstung der mobilen Bergbaugeräte von Diesel auf Wasserstoff unter Einsatz von Brennzellen.

Das ALSET-Projekt sieht vor, die Bergbaulaster auf Diesel und Wasserstoff umzurüsten, damit durch einen Austausch der Motoren vor allem Wasserstoff zum Einsatz kommt. Das Projekt entwickelt einen Prototyp zur Durchführung von Tests, deren Ergebnisse dann auf industrieller Ebene skalierbar sein sollen. Diese Initiative beruht auf einer Kooperation der Universidad de Santiago, der Päpstlich-Katholischen Universität, NTT, CAP, BHP, Anglo American Sur und Engie.

Vorgesehen sind die Simulation von Parametern für Prüfstandversuche, die Auslegung und das Layout eines Wasserstofflagersystems und die Entwicklung eines Geschäftsmodells für die Brennstoffversorgung.

Das von der UTFSM entwickelte Elektromobilitätsprojekt mit Brennstoffzellen konzentriert sich auf die Entwicklung von Lösungen, die die technische und operative Umrüstung der Förderfahrzeuge im Bergbau vom Diesel- auf Brennzellenbetrieb möglich machen.

---

18 Sinader y Sidrep, 2018 MMA

In dem von der UTFSM geleiteten Projekt ist die Beteiligung von CNH2 aus Spanien, Ballard Power Systems aus Kanada, ACHEE, Linde, Aurus, Acera, Sonami, Metalpar, Bozzo Energy, Siemens, Collahuasi und Codelco vorgesehen.

Die Lösungen für diese Herausforderung werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Nachverfolgbarkeit und Nachhaltigkeitsindikatoren

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Minderung der Gasemissionen, insbesondere die Reduzierung von Schwefel, Arsen und CO2 (FURE)	Entwicklung und Perfektionierung von Technologien für den Umgang mit Gasemissionen im Untertagebau Förderung von Strategien zur CO2-Bindung in Naturschutzgebieten und Verbesserung der Methoden zur Wiederherstellung bestehender Wälder und Aufforstung Optimierung des Materialtransports Optimierung der Prozesse zur Bindung und Behandlung der erzeugten Gase Technologische Verbesserungen, die den effizienteren Einsatz der Gasfilteranlagen ermöglichen
02 Minderung/Behandlung flüssiger Industrieabfälle und Sondermüll	Perfektionierung und Entwicklung von Technologien zur Beseitigung verschiedener Schadstoffe aus dem Prozesswasser der Bergbauproduktion, sowie die Wiederverwendung des Wassers aus Rückständen Entwicklung biotechnologischer Prozesse zur Behandlung von Bergbauabfällen und Abwässern Erzeugung von Mechanismen zur Wiederverwendung industrieller Flüssigabfälle im Bergbauprozess Technologische Verbesserungen zur Gasreinigung (Kalkmilch) und Säurelösungen

	Entwicklung neuer Technologien zur Abscheidung von Schwermetallen, Beseitigung von Feststoffen oder pH-Korrektur zur Behandlung bestimmter hochlöslicher gelöster Salze wie Sulfat, Chlorid und Natrium Technologische Verbesserungen zur Steuerung und Überwachung von Prozessen mit Filtertechniken, Flotation mit Luftinduktion und Behandlung mit Pressen Produktion synthetischer Nanopartikel, die Metalle in einem kontaminierten Ambiente absorbieren und binden
02 Reduzierung / Behandlung industrieller Festabfälle	Förderung von Wiederverwendung, Recycling, energetischer Verwertung, Behandlung und Entsorgung zum Schutz der Umwelt Entwicklung von Technologien zur besseren Entsorgung und Beseitigung von Festabfällen Entwicklung von Technologien zur Inertisierung zur Abfallbehandlung, die erlauben, ihre Gefährlichkeit und ihr Volumen zu reduzieren Optimierung und Entwicklung von Software zur Registrierung der Nachverfolgbarkeit der Abfälle, von der Erzeugung bis zur Entsorgung Entwicklung von Technologien zur Charakterisierung der Herkunft der Abfälle, ihres Gefährlichkeitsgrads, die anzuwendende Behandlung und die Präventionsmaßnahmen zur Vermeidung von Notfällen Verbesserung der Prozesse der Stabilisierung-Verfestigung der Festabfälle mit chemischen Reagenzien

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 04

Sicherheit und Umwelthygiene

Der Bergbau ist eine der risikoreichsten industriellen Aktivitäten, da mit Sprengstoffen, brennbaren und giftigen Elemente sowie mit sehr großen mobilen und stationären Geräten gearbeitet wird.

In der Produktion sind die Bergleute durch Lärm, Partikelmaterial, Säurenebel, extreme Wärme, Gase etc. permanent physikalisch-chemischer Kontamination ausgesetzt.

Nach einem Bericht von Sernageomin hat es 2015 und 2016 respektive 16 und 18 Todesfälle gegeben. Im Jahr 2017 gab es 12 tödliche Unfälle, was einem Rückgang um 23 % entspricht. 2017 war das Jahr mit der geringsten Zahl tödlicher Unfälle in der Bergbaugeschichte des Landes. Auch die Anzahl der schweren Unfälle ist im Vergleich zum Vorjahr um 9,6 % gesunken. Es muss jedoch weiter gearbeitet werden, um das Ziel von null tödlichen Unfällen zu erreichen.

Die Lösungen für diese Herausforderung werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

Sicherheit und Umwelthygiene

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Reduzierung der kritischen Risikoexposition	Substitution hochgiftiger Produkte Fortgeschrittene persönliche Sicherheitsausrüstungen Befeuchtungsanlagen in Risikobereichen Optimierung der Produktionsprozesse oder Änderung der Betriebsmethoden zur Minderung/Beseitigung der Risiken
02 Reduzierung der Berufskrankheiten	Entwicklung und Umsetzung adäquater Infrastruktur und Elemente für die Arbeit im Büro und auf der Baustelle Entwicklung passender mechanischer Medien zum Heben schwerer Lasten

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
03 Reduzierung der Gasexposition in geschlossenen Räumen	Entwicklung von allgemeinen und lokalen Belüftungsmechanismen Optimierung der Verdünnung und Evakuierung von Schadstoffen
04 Verbesserung der Bedingungen für Arbeiten in geografischer Höhe	Verbesserung der Infrastruktur zur Reduzierung des Absturzrisikos Ausstattung spezieller persönlicher Schutzausrüstung

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 05

Kreislaufwirtschaft (Kreislauf-Bergbau)

Der Kreislauf-Bergbau mit dem Schwerpunkt auf der Rückgewinnung wertvoller Elemente bietet eine Reihe von Vorteilen, von denen die meisten mit wirtschaftlichem und produktivem Mehrwert, der Rentabilität und dem Umweltbeitrag durch die Weiterverwendung der Abfälle verbunden sind. Es geht darum, Fortschritte in der Umwandlung und in der Wiederaufbereitung der Rückstandsdepots, Abraumhalden, Schlacken und Schotter zu machen und Abfallkonzepte zu entwickeln, um wirtschaftliche Vorteile aus der Rückgewinnung und dem Recycling von Bergbaumaterial zu ziehen, wie beispielsweise durch das Recycling der Reifen von Bergbaulastern. Auch wenn die Rückgewinnung wertvoller Elemente einen Beitrag leistet, wird dadurch das Problem nicht vollständig gelöst. Für das Material mit geringem kommerziellem Wert mit hohem Abfallanteil müssen alternative Nutzungen gesucht werden. Eine Priorität ist auch die Rückgewinnung wertvoller Elemente, die in den Bergbauprozessen als Produktionsfaktor oder Energiequelle dienen können.

Ein angemessenes Management der Umweltaltlasten hätte direkte positive Auswirkungen auf die Lokalbevölkerung und würde einen Beitrag zur zukünftigen Nachhaltigkeit des Bergbaus leisten.

Die Lösungen für diese Herausforderung werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

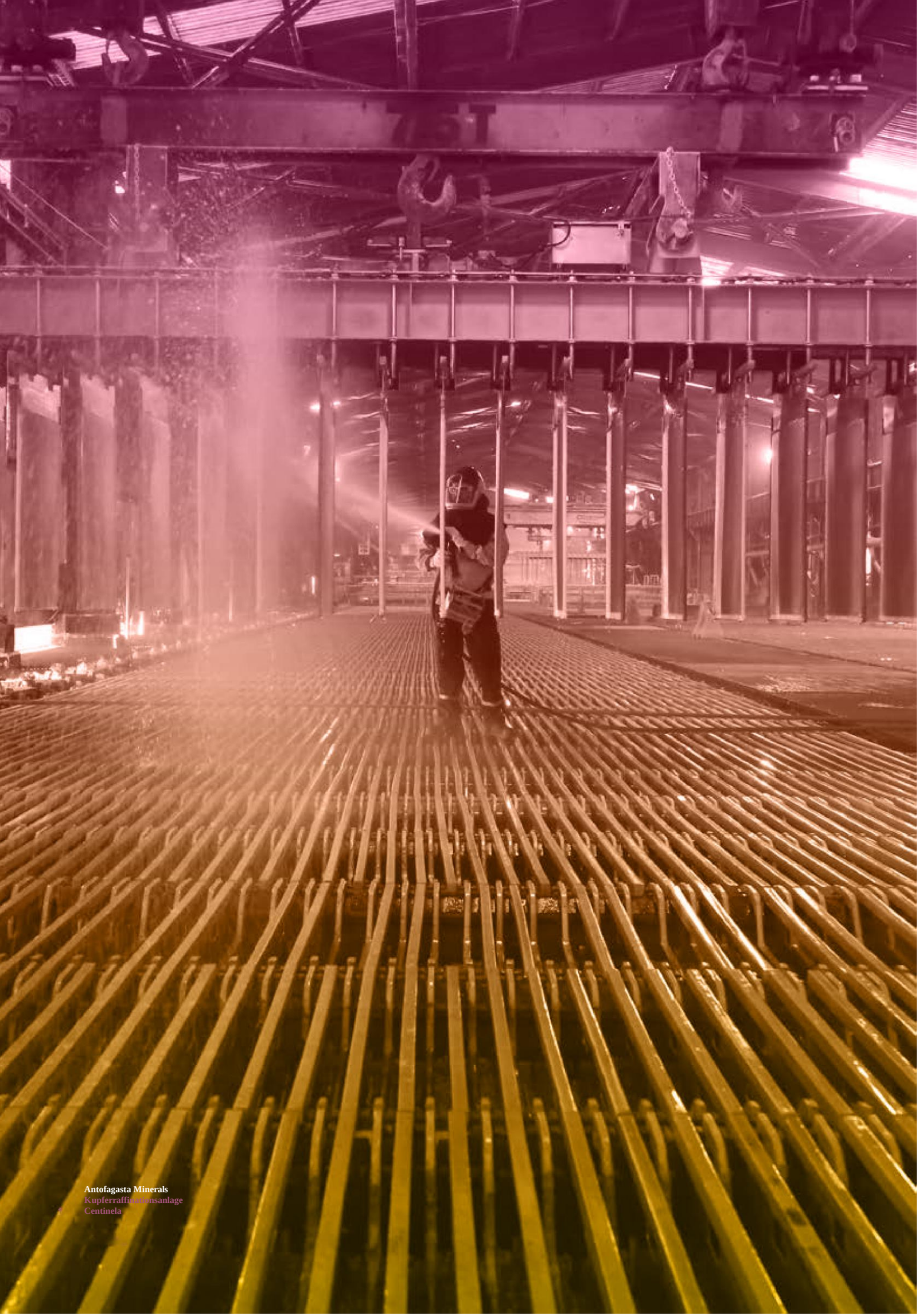
Kreislaufwirtschaft (Kreislauf-Bergbau)	
Lösung	**Forschungs- und Entwicklungslinien**
01 Rückgewinnung wertvoller Elemente	Perfektionierung und Entwicklung der geologischen Methoden und Modellierungen und des Umgangs mit neuen Festabfällen mit kommerziellen Wert
	Einbindung von Technologien in die Konzentrations- und Raffinationsprozesse
	Betriebsmodelle mit technischen und regulatorischen Kriterien zur Entwicklung des urbanen Bergbaus

02	Erweiterte Verantwortung des Produzenten	Perfektionierung und Entwicklung von Technologien für das Batterierecycling
		Perfektionierung und Entwicklung von Technologien für das Recycling von Reifen von Bergbaufahrzeugen
		Perfektionierung und Entwicklung von Technologien für das Ölrecycling
		Perfektionierung und Entwicklung von Technologien für das Recycling elektrischer Geräte
		Perfektionierung und Entwicklung von Technologien für die Rückgewinnung von wertvollen Elementen aus den Rückständen
		Entwicklung besserer und kosteneffizienter Alternativen zum aktuellen Betrieb feuchter Rückstandsbecken
		Erzeugung von Material und Produkten aus Rückstandsdepots

Quelle: Eigene Angaben

08

Kernthema Kupferverwendung



Antofagasta Minerals
Kupferraffinationsanlage
Centinela

Grundlagen

Kupfer ist eins der ersten vom Menschen abgebauten und genutzten Metalle. Die ersten Verwendungen waren Münzen und Schmuck im Jahr 8.000 v.Chr. Rund um das Jahr 5.500 v. Chr. sind Werkzeuge aus Kupfer gefertigt worden, die der Zivilisation halfen, die Steinzeit zu überwinden und gegen 3.000 v. Chr. wurde entdeckt, dass die Zinnlegierung von Kupfer Bronze ergibt, womit eine neue Ära der Menschheitsentwicklung eingeläutet wurde.

Kupfer dehnt sich, kann gegossen und leicht geformt werden, und es ist ein wirksamer Wärme- und Stromleiter. Dadurch ist das Kupfer für die Menschen schon früh bedeutend geworden und ist bis heute das favorisierte Material für eine Vielzahl häuslicher, industrieller und hochtechnologischer Anwendungen.

Heutzutage ist Kupfer eine Schlüsselkomponente vieler Basistechnologien in Verbindung mit der Emissionsminderung, Elektromobilität, Entwicklung intelligenter Städte, Entwicklung und Integration des Sonnenenergienetzwerks und die Entwicklung neuer Heizungs-, Belüftungs- und Klimatisierungssysteme, die natürliche Kühlmittel und intelligente Netzwerke verwenden, um nur einige zu nennen. Dazu hat die positive Wirkung der bakteriziden Eigenschaften den Einsatz von Kupfer in den Bereichen Hygiene und Gesundheit, in der Verlängerung der Verfallsdauer von Lebensmitteln, der Säuberung von Oberflächen und der Verwendung in Kleidungsstücken multipliziert.

Kupfer spielt heute eine wesentliche Rolle in der Energieeffizienz, der Luft- und Wasserqualität, der Reduzierung der Lebenszykluskosten und der Lebensqualität von Milliarden Menschen in aller Welt.

Kupferkonsum

Die Eigenschaften des Kupfers haben es zum favorisierten Material für eine Vielzahl häuslicher, industrieller und hochtechnologischer Anwendungen gemacht und das konstante Wachstum des weltweiten Kupferverbrauchs nach sich gezogen. USGS-Studien des Kupferverbrauchs zeigen einige interessante Tendenzen für den Zeitraum von 1990 bis 2012. Der Kupferverbrauch in aufstrebenden Ökonomien wie China und Indien ist deutlich gestiegen, während er in den USA leicht gesunken ist. Bis 2002 waren die USA der größte Kupferverbraucher mit einem jährlichen Konsum von rund 16 Prozent des weltweit raffinierten Feinkupfers (circa 2,4 Millionen Tonnen). Im Jahr 2002 wurden die USA von China als weltweit größter Kupferkonsument überholt. Die blühende chinesische Wirtschaft hat federführend zur Vervierfachung des Jahresverbrauchs von Feinkupfer in den letzten 12 Jahren beigetragen.

Nach Informationen von Cochilco[1] sind die Länder mit dem höchsten Kupferkonsum im Jahr 2018 China, USA, Deutschland, Japan, Südkorea, Italien, Indien, Türkei, Mexiko, Taiwan, Spanien, Thailand und Russland. Die folgende Abbildung vergleicht den Feinkupferverbrauch des Jahres 2009 mit 2018 und zeigt das rasante Wachstum Chinas, das den Konsum fast verdoppelt hat.

1 Corporación Chilena del Cobre www.cochilco.cl

Grafik 1_ Die Länder mit dem höchsten Feinkupferverbrauch 2018

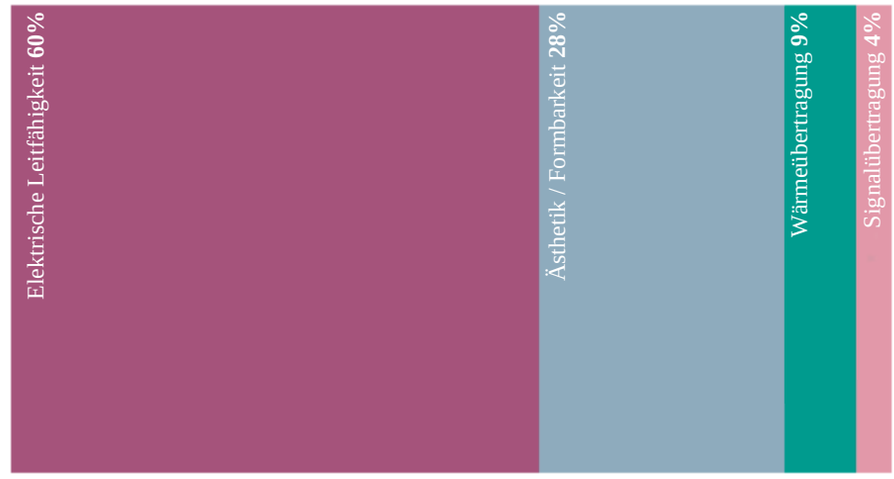
Quelle: World Metal Statistics (2017)

Der weltweite Kupferverbrauch nach Marktsegment konzentriert sich vor allem auf die Bauindustrie, allgemeiner Verbrauch, Stromnetz, Transport und Industriemaschinen. Der Einsatz ist außerdem konditioniert durch die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften, wobei unter anderem die gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, die Verbindungsfähigkeit, die Korrosionsresistenz, die Formbarkeit und Dehnbarkeit, die Verbindungsfähigkeit mit anderen Metallen, die Wiederwendbarkeit, die dekorativen und antibakteriellen Eigenschaften und die Charakteristik, ein nicht magnetisches Metall zu sein, hervorzuheben sind.

Grafik 2_ Kupferverwendungen weltweit 2018

Einsatz nach Marktsegment

Verwendung nach Eigenschaften



Quelle: Cochilco (2018)

Globale Produktion und Evaluierung der Kupfervorkommen

Die USGS[2] hat die nicht entdeckten Kupfervorkommen, die rund 80 % der weltweiten Kupferversorgung ausmachen, in zwei Arten der Lagerstätten unterteilt. Die Porphyr-Kupfer-Vorkommen machen rund 60 % des weltweiten Kupfers aus. In den Porphyr-Kupfer-Vorkommen sind die Erze in Intrusionen in magmatischem Gestein verteilt. Die sedimentierten stratifizierten Kupferlagerstätten, in denen sich das Metall in Schichten im sedimentierten Gestein befindet, machen rund 20 % der weltweit entdeckten Kupfervorkommen aus. Die nicht entdeckten Gesamtressourcen in Porphyr-Vorkommen liegen bei einem mittleren Wert von 3,1 Milliarden Tonnen und die nicht entdeckten Gesamtressourcen der stratifizierten Sedimentvorkommen liegen bei einem mittleren Wert von 400 Millionen Tonnen, was sich zu einem Gesamtvolumen von 3,5 Milliarden Tonnen addiert. Der Bereich, in dem sich die Ressourcenschätzung bewegt (in den Perzentilen 90 und 10) spiegelt die geologische Ungewissheit im Evaluierungsprozess. Rund 50 Prozent der Gesamtmenge weltweit befindet sich in Südamerika, die andere Hälfte in Süd- und Zentralasien und Indochina und in Nordamerika zusammen.

Die Feinkupferproduktion 2018 ist im Vergleich zum Vorjahr um circa 1,44 % auf 23,73 Millionen Tonnen gestiegen. In Chile ist die Produktion im Vergleich zu 2017 um 1,3 % gestiegen.

Die Grafik zeigt die wichtigsten Feinkupferproduzenten, von denen vor allem das chinesische Wachstum von 2009 bis 2018 hervorsticht.

Grafik 3_ Feinkupferproduktion 2009-2018

Quelle: Cochilco (2018)

2 United States Geological Survey https://www.usgs.gov

Aktuelle Kupferverwendungen

Kupfer wird in den verschiedensten Bereichen und Industrien eingesetzt: vom Hochbau zur Energieerzeugung und -übertragung, Herstellung elektronischer Produkte und Produktion industrieller Maschinen und Förderfahrzeugen. Kupferkabel und Kupferleitungen sind integraler Bestandteil aller Apparate, Heiz- und Kühlsysteme und der täglich in Haushalten und Firmen genutzten Telekommunikationsschnittstellen. Kupfer ist eine wesentliche Komponente von Motoren, Verkabelungen, Kühlern, Anschlüssen, Bremsen und Lagern in Kraftfahrzeugen und Lastern. Ein Kfz enthält durchschnittlich 1,5 Kilometer Kupferkabel, und die Kupfermenge variiert zwischen 20 Kilo in kleinen Fahrzeugen und bis zu 45 Kilo in Luxus- und Hybridautos. Nach einer von der ICA (*International Copper Association*) bei IDTechEX 2017 in Auftrag gegebenen Studie[3] kann in einem Elektroauto je nach Technologie und Fahrzeug zwischen 40 und 369 Kg Kupfer verbaut sein.

Eine der jüngsten Kupferanwendungen ist der Einsatz in Oberflächen, die häufig berührt werden, da die antibakteriellen Eigenschaften des Metalls die Übertragung von Keimen und Krankheiten reduzieren. Die Halbleiterhersteller haben auch mit dem Einsatz von Kupfer für Siliziumchips begonnen, um die Mikroprozessoren zu beschleunigen und den Energieverbrauch zu senken. Kürzlich hat man entdeckt, dass Kupferrotoren die Effizienz von Elektromotoren erhöhen, die die größten Energieverbraucher sind.

Des Weiteren verfügen Kupfer und seine Legierungen über eine Vielzahl von Eigenschaften, die es für eine große Zahl von Anwendungen extrem wertvoll machen. Die gute Strom- und Wärmeleitfähigkeit kombiniert sich mit der Widerstandsfähigkeit, Formbarkeit und Korrosionsfestigkeit, um nur einige der Eigenschaften zu nennen, die Kupfer und seine Legierungen zu bieten haben.

Die folgende Tabelle zählt einige der Gründe auf, weshalb Kupfer und seine Legierungen für essentielle Anwendungen, die von den beschriebenen Attributen profitieren, unverzichtbar sind.

3 Copper Intensity in the Electrification of Transport and the Integration of Energy Storage. IDTechEX , 2017

Tabelle 1: Anwendungsart/Industrie je nach

Eigenschaft	Industrie / Anwendungsart
Ästhetik	Architektur, Bildhauerei, Schmuckmacherei, Uhren, Bestecke
Bakterizid	Türbeschläge, Schiffsverbrennungsmotoren, Pflanzenbehandlungen, Kleidungsstücke, Oberflächen
Biofoulingresistenz	Allgemeines Engineering, Hydraulik und Schiffsbau, Metallmechanik, Raumfahrt, Energieerzeugung, Schiffswerften, Erdöl- und Erdgasplattformen offshore
Korrosionsfest	Rohre und Sanitärkomponenten, Dächer, allgemeines und Schiffsengineering, Schiffsbau; Chemieindustrie, industrielle Prozesse, einschließlich Beizen, Gravur und Destillation; Haushaltsklempnerei, Architektur, Entsalzung, Textilindustrie, Papierherstellung
Einfach in der Herstellung	Alle vorherigen Punkte plus Druck
Elektrische Leitfähigkeit	Stromerzeugung, Stromübertragung und -verteilung, Kommunikation, Widerstandsschweißen, Elektronik
Respekt vor der Umwelt	Fundamental für die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen
Fungizid	Landwirtschaft, Konservierung von Lebensmitteln und Holz
Niedrigtemperatur	Kyrotechnik, Umgang mit Flüssiggasen, Superkonduktoren
Mechanik Kraft/Formbarkeit	Allgemeines Engineering, Schiffsengineering, Verteidigung, Raumfahrt

Eigenschaft	Industrie / Anwendungsart
Nicht magnetisch	Instrumentierung, Geräte für geologische Studien, Minenräumer, Offshore-Bohrungen
Funkenfrei	Bergbau und andere Sicherheitswerkzeuge, Sauerstoffverteilung
Elastizität	Federn und elektrische Kontakte, Sicherheitsbolzen, Federn von Instrumenten, elektronische Verpackungen
Thermische Leitfähigkeit	Wärmetauscher und Klimaanlagen, Kühlanlagen, Autokühler, Verbrennungsmotoren, Bergbau

Vision des Kernthemas

Eine Führungsrolle bei neuen Kupferanwendungen in verschiedenen Industrien spielen, um die sozialen und die Umweltbedingungen zu verbessern

Codelco
Kupfer in U-Bahn-
Haltstellen in Santiago

Herausforderungen, Lösungen und Forschungs- und Entwicklungslinien

In Funktion der evaluierten Informationen und der zu dem Kernthema Verwendungszwecke des Kupfers formulierten Vision hat die an den technischen Workshops beteiligte Expertengruppe drei Herausforderungen als prioritär definiert und Lösungsansätze und Forschungs- und Entwicklungslinien identifiziert.

Herausforderung 01

Kupferprodukte mit größerem Mehrwert

Chile ist der weltweit größte Kupferproduzent, und das rote Metall ist aktuell unser wichtigstes Exportprodukt, das jedoch vor allem als Rohstoff vertrieben wird. Dadurch geht die Chance verloren, unsere Exporte zu diversifizieren und den Produkten durch Weiterverarbeitung einen größeren Mehrwert zu geben.

Kupferfolie (Kapazitätsentwicklung in der lokalen Manufaktur)

Auf dem Weltmarkt für *Kupferfolie* (sehr dünnes Blatt aus formbarem Metall, gewöhnlich Aluminium, Zinn und Kupfer, das als elektrischer und thermischer Leiter und mit verschiedenen Legierungen eingesetzt wird) gibt es große und marktbeherrschende Akteure, doch dieser Markt ist sehr wettbewerbsintensiv. Im Jahr 2016 absorbierte er 2,5 % der weltweiten Kupferproduktion mit insgesamt rund 486.000 Tonnen und einer projizierten jährlichen Wachstumsrate von 8% von 2018 bis 2025 (*Transparency Market Research 2017*).

Die zwei relevantesten Anwendungen für die *Kupferfolie*, die sich abzeichnen, sind Leiterplatten (PCB o *Printed Circuit Board*) und Lithiumbatterien (Li-ion). Obwohl die Folie aktuell deutlich mehr in Leiterplatten eingesetzt wird, ist zu erwarten, dass die Batterieanwendungen durch die stärkere Marktpenetration effizienterer und umweltfreundlicher Technologien und besonders durch die Elektromobilität sehr viel stärker wachsen werden.

Die größten Herausforderungen in Forschung, Entwicklung und Innovation für die *Kupferfolie* bestehen vor allem in der Einführung von Verbesserungen in der Produktion und der Qualität, was für Chile eine Gelegenheit bietet, Kapazitäten für die lokale Manufaktur aufzubauen, die Nanotechnologie einschließt.

Kupferprodukte mit größeren Mehrwert

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Kupferprodukte mit größerem Mehrwert	Herstellung von *Kupferfolie*

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 02

Forschung und Entwicklung in traditionellen Industrien

Ein Großteil der weltweiten Kupferversorgung fließt in die Elektronik und in Elektrokabel. Die Elektrizität ist eine vom modernen Alltag untrennbare Komponente, von Computern und Smartphones bis zu Klimaanlagen und Batterien, und Kupfer ist weiterhin das bevorzugte Metall für die Leitung elektrischer Ströme. Daher verfügen fast alle Technologien zumindest über einen kleinen Anteil Kupfer.

Kupfer ist außerdem eins der wichtigsten Metalle auf der Suche nach nachhaltigen Energiequellen. Als effizienter Wärme- und Stromleiter werden die einzigartigen Eigenschaften des Kupfers häufig in Solarpanelen und Windturbinen eingesetzt. Viele von LEED zertifizierte nachhaltige Gebäude nutzen eine bedeutende Menge Kupfer. Außerdem wird das Kupfer als das letzte „grüne“ Metall betrachtet, das es zu 100 % recyclebar ist.

Energie (nicht konventionelle erneuerbare Energien / Elektromobilität / Heizung, Belüftung und Klimaanlagen)

Da Kupfer ein hochwirksamer Leiter ist, wird er in Systemen erneuerbarer Energien eingesetzt, um Sonnenenergie, Wasserkraft, thermische und Windenergie in der ganzen Welt zu erzeugen und hilft, die CO^2-Emissionen zu senken und die notwendige Energie für die Stromproduktion zu erzeugen. Die erneuerbaren Energiequellen liefern fast ein Viertel der Energie weltweit, und die Tendenz ist steigend[4]. Kupfer spielt eine wichtige Rolle, um technische Geräte so wirksam und umweltfreundlich wie möglich zu machen. Durch eine steigende Verwendung in Elektrofahrzeugen und Kühlsystemen ist ein bedeutendes Wachstum im Kupferverbrauch zu erwarten.

Einige der weltweiten Tendenzen, die positive Auswirkungen auf den Einsatz von Kupfer haben werden, sind:

- Steigender Energiekonsum mit Schwerpunkt auf einer effizienteren und sauberen Erzeugung.
- Wachsende Nachfrage und Forderung nach schnelleren Informationstechnologien.
- Wachsendes Bedürfnis für ein massives, effizientes und sauberes, umweltschonendes Transportwesen.
- Verbesserungen in der Lebensqualität im Bauwesen, im Wohlergehen und in der Sicherheit der Menschen, wozu die Energieeffizienz und der Einsatz nachhaltiger Materialien einen Beitrag leistet.
- Die größten Herausforderungen für Forschung, Entwicklung und Innovation für den Einsatz von Kupfer im Energiesektor liegen in seinem Potenzial, andere Elemente zu substituieren; in dem Nutzen, den der Einsatz von Nanopartikeln haben kann; und in der besseren Nutzung seiner thermischen und leitenden Fähigkeiten, sei es allein oder in Kombination mit anderen Elementen, sowohl für die Elektromobilität, wie auch für die Kühlung und die Stromübertragung.

4 Copper Alliance 2018. www.copperalliance.org

Kupferprodukte mit größerem Mehrwert

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Anwendungsintensität in traditionellen Industrien	Anwendung in nicht konventionellen erneuerbaren Energien Elektromobilität Heizung und Belüftung Klimaanlagen

Quelle: Eigene Angaben

Herausforderung 03

Forschung und Entwicklung in nicht traditionellen Industrien

Im Jahr 2008 hat die US-amerikanische *Environmental Protection Agency* (EPA) Kupfer als das einzige Metall anerkannt, das anti-mikrobielle Eigenschaften hat, indem ein Register von mehr als 270 Metalllegierungen genehmigt wurde, die das Leben von Bakterien und anderen Mikroorganismen wie Pilzen und Viren verhindern.

Davor haben eine Reihe von Studien die Wirkung von Kupfer und seiner Legierungen gegen fünf Bakterienstämme in Übereinstimmung mit den EPA-Protokollen nachgewiesen. Die Registrierung erlaubt den Vertrieb unter Anführung des Arguments, dass Kupfer „99,9 % der Bakterien innerhalb von 2 Stunden eliminiert“. Der Einsatz von Kupfer ist für die Herstellung von Produkten im kommerziellen, häuslichen und im Gesundheitsbereich genehmigt worden. EPA erklärt, dass die Kupferlegierungen als Ergänzung zu nutzen sind, nicht als Ersatz für die Standardpraktiken der Säuberung und Desinfizierung der Oberflächen. Es wird hinzugefügt, dass diese Produkte kein Risiko für die öffentliche Gesundheit darstellen.

Diese neue, auf der bakteriziden Eigenschaft basierende Nutzung, zeigt dass obwohl das Kupfer vor so langer Zeit entdeckt und genutzt wurde, seine Eigenschaften nur wenig erforscht, und seine Anwendungen bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

Lösung: Gesundheit und Hygiene (Anwendungen und Verwendungen in Verbindung mit den bakteriellen Eigenschaften)

Die weltweite Kupfernachfrage könnte durch das kommerzielle Interesse an der Ausnutzung seiner in verschiedenen Industrien angewandten anti-mikrobiellen Eigenschaften in den nächsten Jahren unter anderem durch die Entwicklung von Schutzfilmen, Stoffen, Materialien etc. deutlich steigen. Nur durch den Einsatz in Gesundheitsanwendungen könnte die Nachfrage in den nächsten 20 Jahren um bis zu eine Million Tonnen steigen (Bloomberg 2018).

Einige der Herausforderungen für Forschung, Entwicklung und Innovation beziehen sich unter anderem auf die Methoden der Kupferproduktion und -verarbeitung zur Erzeugung von Nanopartikeln und/oder Legierungen, der Manufaktur der Legierungen und die angewandte Nanotechnologie.

Forschung und Entwicklung in nicht traditionellen Industrien

Lösung	Forschungs- und Entwicklungslinien
01 Anwendungsintensität in nicht traditionellen Industrien	Anwendungen in Gesundheit und Hygiene

Quelle: Eigene Angaben

ALTALEY

DE LOS RECURSOS NATURALES
AL CONOCIMIENTO