



THINKTANK
INDUSTRIELLE
RESSOURCEN-
STRATEGIEN

LITHIUM IN EUROPA



Inhaltsverzeichnis	
Vorwort	4
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung	10
1. Einleitung	11
2. Weltweite Vorkommen und Produktion	12
3. Wirtschaftliche Betrachtung	16
3.1 Weltweiter Markt	16
3.2 Europäischer Markt	20
4. Lithium aus konventionellen Ressourcen in Europa	22
4.1 Geologie	24
4.2 Abbau, Aufbereitung und metallurgische Weiterverarbeitung	26
4.3 Projekte zur Lithiumgewinnung aus magmatischem Festgestein	28
4.4 Projekte zur Lithiumgewinnung aus sedimentären Gesteinen	46
4.5 Umweltaspekte der Lithiumgewinnung aus Festgestein	52
5. Lithium aus unkonventionellen Ressourcen in Europa	53
5.1 Lithium aus Geothermalwasser	54
5.2 Lithium aus Minenwässern	68
5.3 Lithium aus Produktionswässern	69
5.4 Lithium aus Meerwasser	70
5.5 Lithium aus Salzlagerstätten	70
6. Herausforderungen bei der europäischen Lithiumgewinnung	71
6.1 Technisch-wirtschaftliche Herausforderungen	72
6.2 Mangelnde öffentliche Akzeptanz	76
7. Fazit	78
Danksagungen	79
Literatur	80
Abbildungsverzeichnis	96
Tabellenverzeichnis	97
Glossar	98
Impressum	102

Die letzten Monate haben eindrücklich gezeigt, wie abhängig und anfällig ein starkes Industrieland wie Deutschland gegenüber instabilen Lieferketten und einer nicht zuverlässigen Rohstoffversorgung sein kann. Bestehende Rohstoffstrategien – sowohl staatliche als auch unternehmerische – auf den Prüfstand zu stellen, ist dringend notwendig.

Es gibt zahlreiche Ansatzpunkte, die Rohstoffversorgung und Ressourcensicherung resilienter zu gestalten. Die Stärkung der Kreislaufwirtschaft bildet sicher einen wichtigen Baustein, hat aber den Nachteil: Gerade für innovative Techniken und langlebige Güter stehen die Rohstoffe mit erheblichem zeitlichen Versatz – teilweise erst Jahrzehnte später – in ausreichenden Mengen wieder zur Verfügung. Insbesondere für neue Technologien, die für die Transformation der Industrie und der Gesellschaft hin zur Klimaneutralität besteht ein wachsender Bedarf an Rohstoffen, der zunächst überwiegend durch Primärrohstoffe gedeckt werden muss.

Daher sind Lösungen gefordert, die neben der Kreislaufführung auch die Primärrohstoff-Gewinnung wieder stärker in den Blick nehmen. Dazu gehört auch, über Möglichkeiten der Nutzung europäischer und heimischer Vorkommen nachzudenken. Durch neue Technologien lassen sich, neben konventionelle, auch unkonventionelle Vorkommen umweltschonend nutzen.

Lithium ist einer der dreißig von der europäischen Kommission für Europa als kritisch eingestuft Rohstoffe. An diesem Beispiel hat der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien die europäischen Vorkommen untersucht und hinsichtlich ihres Beitrages für die Deckung des wachsenden Bedarfes analysiert. Neben den konventionellen Ressourcen bieten vor allem bisher wenig und nicht genutzte unkonventionelle Ressourcen (auch in Deutschland) Chancen für eine stabilere Rohstoffsicherung. Dazu bedarf es jedoch einer positiven Einstellung der Bevölkerung gegenüber der heimischen Rohstoffgewinnung, akzeptabler Genehmigungsfristen und des Auf- und Ausbaus von wissenschaftlich-technischer Kompetenz in Deutschland. Mit der vorliegenden Broschüre wollen wir die Akteure sensibilisieren und entsprechende Anreize bieten, sich mit den Zusammenhängen auseinanderzusetzen.



Dr. Christian Kuehne

Geschäftsführer

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Der Zugang zu Rohstoffen, deren effiziente Gewinnung, Nutzung und Kreislaufführung sind für eine industriell geprägte Wirtschaft von essentieller Bedeutung. Durch eine wachsende Weltbevölkerung, intensive technologische Weiterentwicklung und voranschreitende Industrialisierung in den Schwellenländern sind die Rohstoffmärkte unter Druck gekommen.

Der Weg zu einer ressourcenschonenden Industriegesellschaft bedarf deshalb einer Entwicklung, die sowohl die materiellen Bedürfnisse der Menschen als auch die ökologischen und sozialen Konsequenzen betrachtet. Dies bedarf gemeinsamer Anstrengungen von Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Politik und Wirtschaft haben dazu 2018 den THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ gegründet und am Karlsruher Institut für Technologie etabliert.

Der THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ als unabhängiger Vordenker wichtiger Trends und Innovationen von technologisch-strategischen Fragestellungen auf nationaler und internationaler Ebene zur Ressourceneffizienz, -nutzung und -politik befasst sich intensiv mit dem Einsatz neuer Technologien zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs, Steigerung der Ressourceneffizienz und der Resilienz der gesamten Rohstoffkette.

Metallische Rohstoffe spielen eine wichtige Rolle in Zukunftstechnologien wie erneuerbare Energien oder Elektromobilität. Mittlerweile werden 30 Metalle als kritisch eingestuft, weil sie eine wichtige Rolle in der Wertschöpfungskette spielen, nur von wenigen Ländern geliefert werden, schwer zu ersetzen sind, keine signifikante Recyclingrate haben und ihr Bedarf voraussichtlich deutlich steigen wird.

Und Lithium ist eines dieser kritischen Elemente. Als Schlüsselement von Lithium-Ionen-Batterien ist Lithium für die Elektromobilität und mobile elektronische Geräte unverzichtbar, und die Nachfrage wird voraussichtlich steigen. Die größte Wertschöpfung liegt in der Weiterverarbeitung des Lithiumcarbonats und anderer Rohstoffe in Batterien. Der weltwirtschaftliche Wettbewerb um Lithium hat längst begonnen und der Preis hat sich seit Anfang 2021 fast verachtfacht. Die Nachfrage nach Lithium wird in den nächsten 20 Jahren etwa vier- bis sechsmal so hoch sein wie heute. Daher besteht ein großer Bedarf an neuen Technologien zur Rohstoffaufbereitung, insbesondere aus alternativen Quellen wie geothermischem Wasser oder zum Recycling.

Die vorliegende Broschüre gibt aus wissenschaftlicher Sicht einen umfassenden und übergeordneten Überblick zur Gewinnung von Lithium aus konventionellen und unkonventionellen Ressourcen in Europa und geht auf die damit verbundenen Herausforderungen ein.

Damit leistet der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien einen Beitrag zum nationalen wie auch internationalen Rohstoff-Diskurs.



Prof. Dr. Thomas Hirth

Vizepräsident für Transfer und Internationales des
Karlsruher Instituts für Technologie

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung	mg	Milligramm
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	Mg	Magnesium
Bzw.	beziehungsweise	Mio.	Millionen
°C	Grad Celsius	MW	Megawatt
CAPEX	Capital Expenditures	Na₂CO₃	Natriumcarbonat
CO₂	Kohlenstoffdioxid	NPV	Net Present Value
d. h.	das heißt	NaOH	Natriumhydroxid
EnBW AG	Energie BadenWürttemberg Aktiengesellschaft	OPEX	Operating Expenses
g	Gramm	ORG	Oberreingraben
Ga	Gigajahre – Milliarden Jahre	Plc	Public Limited Company
Gew.-%	Gewichtsprozent	PFS	Prefeasibility Study
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung	µg	Mikrogramm
JORC	Joint Ore Reservers Committee Code	Sn	Zinn
km	Kilometer	t	Tonnen
km³	Kubikkilometer	Tab.	Tabelle
kPa	Kilopascal	UBA	Umweltbundesamt
kt	Kilotonnen	USA	United States of America
L	Liter	US\$	United States Dollar
LCE	Lithium Carbonate Equivalent – Lithiumkarbonatäquivalent	UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
Li	Lithium		
LIB	Lithiumionenbatterie		
Li₂CO₃	Lithiumkarbonat		
LiF	Lithiumfluorid		
LiOH	Lithiumhydroxid		
Li₂O	Lithiumoxid		
Li₂SO₄	Lithiumsulfat		
L/s	Liter pro Sekunde		
Ltda	Sociedad limitada, portugiesische Form der Kapitalgesellschaft		
m	Meter		
m²	Quadratmeter		
m³	Kubikmeter		
Ma	Millionen Jahre		

Zusammenfassung Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J.

Aktuell ist die deutsche Industrie vollständig auf den Import von Metallen angewiesen, so auch für das leichteste Metall – Lithium. Die globale Produktion von Lithium ist in den letzten fünf Jahren um 263 % gestiegen, die Bergbauförderung liegt bei ca. 100 kt LCE¹ (Stand 2021). Der Bedarf des Metalls für Batterien könnte 2030 laut der EU allein in Europa bei ca. 325 kt LCE liegen. Um diesen Bedarf des Marktes mit zu decken, werden in Europa derzeit verschiedene Lithiumprojekte entwickelt. Diese sehen eine Förderung von Lithium aus konventionellen, magmatischen oder sedimentären Gesteinen sowie unkonventionellen geothermalen Solen vor. Acht dieser Projekte befinden sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium und könnten 2030 dazu beitragen, dass zwischen 40 % und 55 % des Bedarfs an Lithium aus europäischen Lagerstätten gewonnen werden könnten. Außerdem wird an Fördermethoden und Aufbereitungstechnologien geforscht, wie beispielsweise die Lithiumgewinnung aus Grubenwasser ehemaliger Bergwerke oder Produktionswässern aus Erdgas- oder Erdölförderungen.

Die Entwickler der Lithiumprojekte in Europa erfahren neben technischen, wirtschaftlichen und genehmigungsrechtlichen Herausforderungen auch Ablehnung durch Bürgerinitiativen. Das Recycling von Lithium, speziell aus Lithiumionenbatterien wird in Deutschland durch verschiedene Förderprogramme des Bundes unterstützt und dadurch wissenschaftlich und technisch vorangetrieben. Dies soll dazu beitragen, dass die Quotenvorgaben für Rezyklate aus einem zukünftigen Rücklauf von Batterien erfüllt werden können. Ohne den nationalen und internationalen Bergbau unter der Beibehaltung und weiteren Etablierung von Umwelt- und Sozialstandards, die weitere Entwicklung von Bergbautechnologien sowie den Ausbau der Recyclingmöglichkeiten wird der Lithiumbedarf in Europa nicht zu decken sein.

¹ Die unterschiedlichen Lithiumprodukte wie Lithiumoxid (Li₂O), Lithiumhydroxid (LiOH) oder Lithiumfluorid (LiF) werden zum Vergleich als Lithiumcarbonatäquivalente (Lithium Carbonate Equivalent = LCE) dargestellt: 1 LCE = 1 Li₂CO₃; 1 LCE = 5,323 Li; 1 LCE = 2,473 Li₂O; 1 LCE = 0,880 LiOH; 1 LCE = 1,420 LiF (s. z. B. Schmidt 2017).

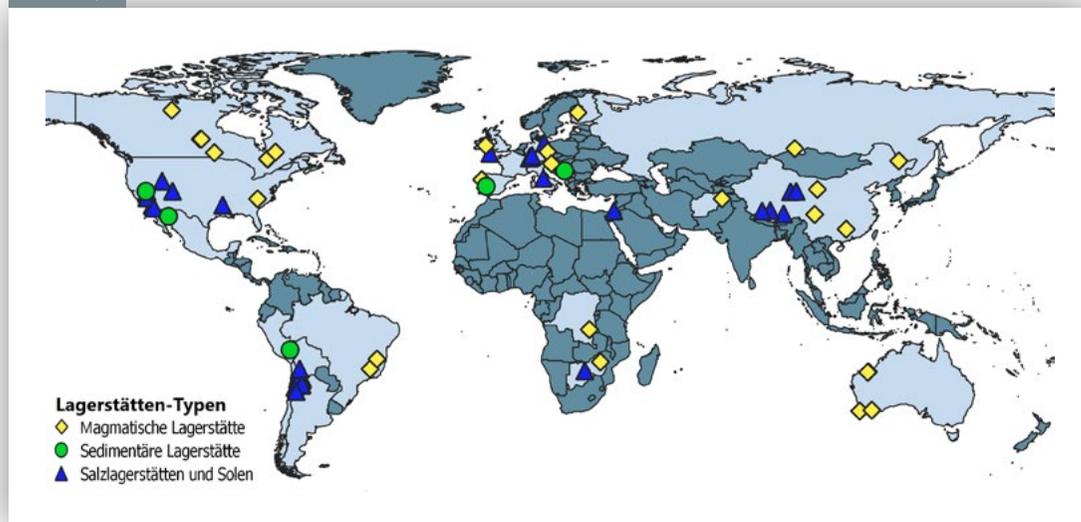
1. Einleitung Reich, R., Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J.

Lithium (Li) ist das leichteste Metall, es kommt mit 0,007 % in der Erdkruste vor und ist einer der entscheidenden Rohstoffe für die Technologien der Zukunft, wie beispielsweise die Elektromobilität und die Digitalisierung (Schmidt, 2017; Marscheider-Weidemann et al., 2021). Insbesondere durch den steigenden Bedarf an Lithiumionenbatterien (LIB) wächst die globale Nachfrage kontinuierlich. Der zweitgrößte Abnehmer für Lithium ist die Keramik- und Glasindustrie. Außerdem findet Lithium Verwendung als Fluss- und Schmiermittel, in der Polymerindustrie, bei der Aufbereitung von Luft, in chemischen Anlagen und Atomkraftwerken. Es wird aber auch in der psychomedizinischen Pharmazie eingesetzt (BGR, 2020b). Der Bedarf wird hauptsächlich durch Primärrohstoffe gedeckt, die größten Lithiumreserven und -ressourcen liegen in Lateinamerika (USGS, 2021). Das Recycling von Lithium spielt bislang eine untergeordnete Rolle, wird allerdings stetig weiterentwickelt (BGR, 2020a). Seit die Europäische Kommission die Liste der potentiell kritischen Rohstoffe für die EU im Jahr 2020 aktualisiert hat, ist auch Lithium aufgeführt (EU Kommission, 2020a). Um einen Anteil des Bedarfs durch heimische Rohstoffe decken zu können, wurden in den vergangenen Jahren Lithiumlagerstätten auch in Europa exploriert. In diesem Dossier werden konventionelle Projekte, die sich in einem fortgeschrittenen Projektstatus befinden, wie auch Pilotprojekte aus unkonventionellen Vorkommen in Europa näher beschrieben.

2. Weltweite Vorkommen und Produktion ^{Reich, R.}

Lithium wird an vielen Orten der Welt aus festen magmatischen Gesteinen, Sedimenten und Sedimentgesteinen sowie aus hochkonzentrierter Salzlösung, der sogenannten Sole, gewonnen [BGR, 2020a]. Die Solen werden in konventionelle Solen aus Salztonebenen und Salzseen und unkonventionelle Solen, den geothermalen Solen und Ölfeldsolen, unterschieden [Abb. 1; Safari et al., 2020]. Insgesamt gibt es derzeit 389 Lithiumlagerstätten weltweit (Stand 2019 nach Sykes, 2019).

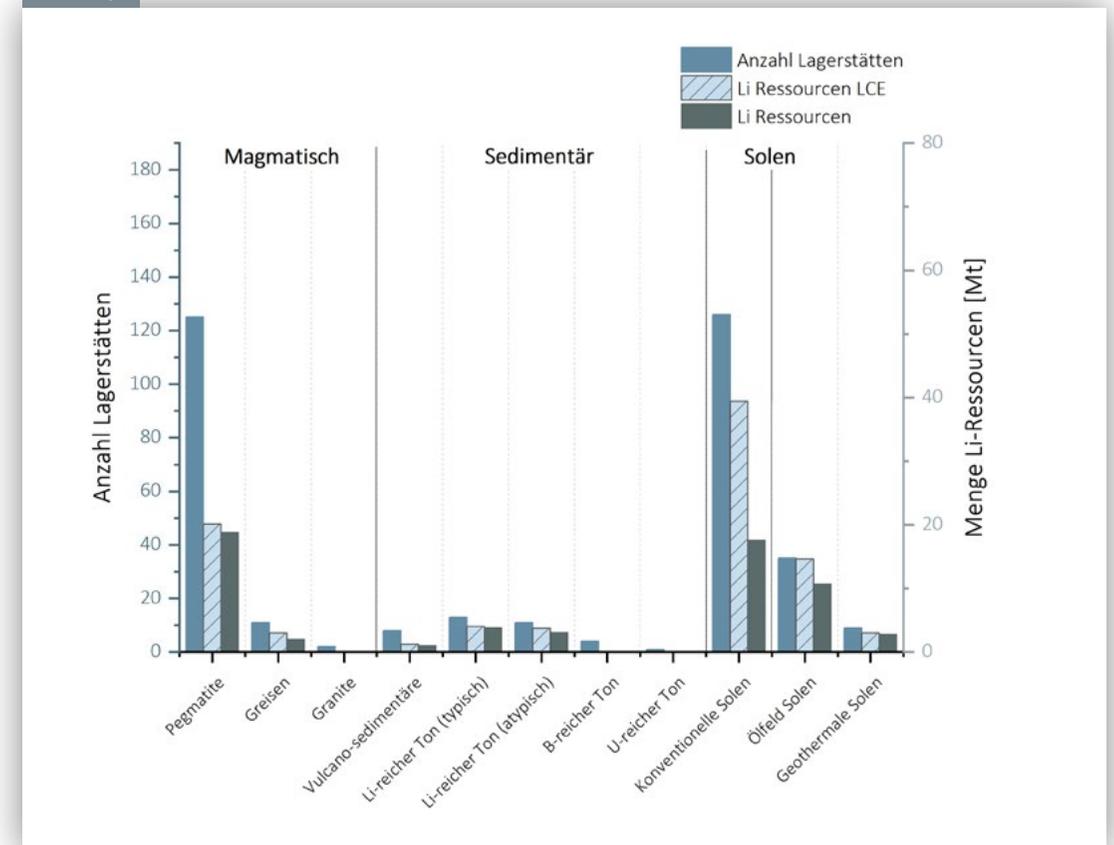
Abbildung 1



Lithiumvorkommen weltweit [Eigene Darstellung R. Reich, vgl. Reich et al., 2022, nach: Pauwels et al., 1993; Houston, 2010; Savannah Resources Plc, 2010-2021; Kesler et al., 2012; Schmidt, 2017; Sykes, 2019; The Mineral Corporation, 2019; Bowell et al., 2020; BGR, 2020b; Rio Tinto, 2020; Mining Data Online, 2021].

Der Anteil der magmatischen, sedimentären und Solen-Lagerstätten an den weltweiten Ressourcen beträgt gegenwärtig 25 % - 35 %, 8 % - 13 % und 52 % - 66 % [Abb. 2; Gruber et al., 2011; Mohr et al., 2012; Swain, 2017; Meng et al., 2021].

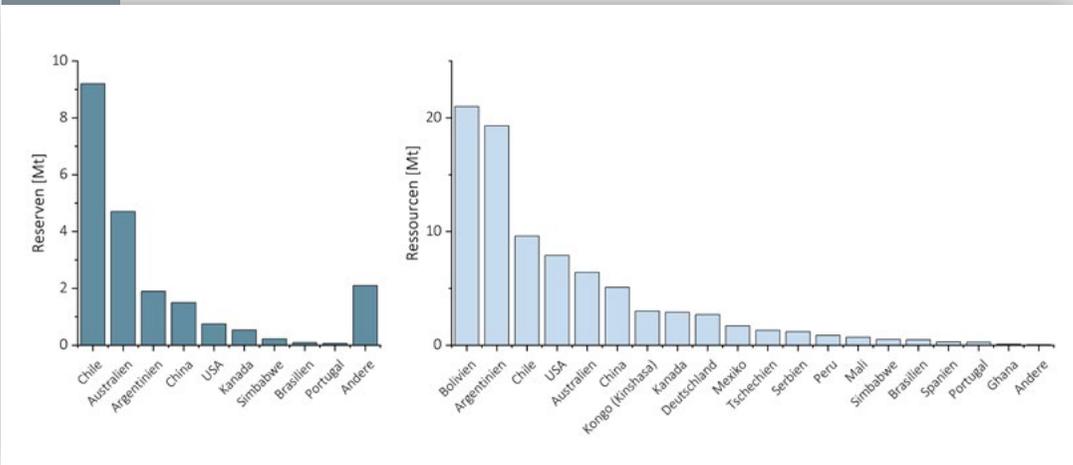
Abbildung 2



Unterschiedliche lithiumführende Lagerstättentypen, Vorkommen und Ressourcenverteilung [Eigene Darstellung R. Reich, vgl. Reich et al., 2022, nach Sykes, 2019].

Die globalen Lithiumressourcen werden auf rund 86 Mio. t Lithium geschätzt, wovon sich der größte Anteil in Bolivien, Argentinien, Chile, den USA und Australien befindet (Stand 2020, Abb. 3; USGS, 2021). Ressourcen sind die gegenwärtig bekannten, noch nicht ökonomisch abbaubaren Lagerstätten. Die globalen Lithiumressourcen aus konventionellen Lagerstätten wurden 2019 mit 46,2 Mio. t angegeben, wohingegen unkonventionelle Lagerstätten 13,6 Mio. t Lithium enthalten sollen (Abb. 2, Sykes, 2019). Deutschlands Lithiumressourcen werden auf rund 2,7 Mio. t geschätzt, was die weltweit neuntgrößte Ressource darstellt (Abb. 3; USGS, 2021). Die globalen Lithiumreserven betragen im Jahr 2020 insgesamt rund 21 Mio. t (USGS, 2021). Reserven sind die bekannten und derzeit technisch und ökonomisch abbaubaren Lagerstätten. Chile besitzt mit 9,2 Mio. t die größten Lithiumreserven, gefolgt von Australien, Argentinien und China mit 4,7 Mio. t, 1,9 Mio. t und 1,5 Mio. t (Abb. 3; USGS, 2021).

Abbildung 3



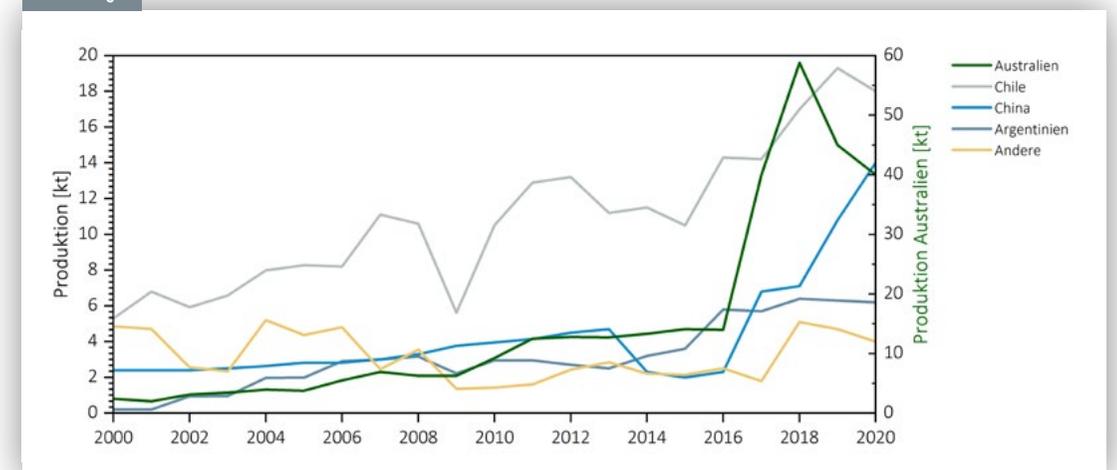
Lithiumreserven und -ressourcen unterschiedlicher Länder weltweit (Eigene Darstellung R. Reich, nach: DERA, o. D.; Mohr et al., 2012; Schmidt, 2017; USGS, 1996-2021).

Die Festgesteinslagerstätten Australiens, Chinas, Kanadas, der USA, Namibias, Südamerikas und Europas enthalten lithiumführende Minerale wie Spodumen, Petalit, Lepidolit, Amblygonit, Triphylin, Eukryptit, Montebrasit, Zinnwaldit, Jadarit und Hectorit (Aral und Vecchio-Sadus, 2008; Gruber et al., 2011; Swain, 2017; Bowell et al., 2020; Schmidt 2017). Diese Minerale haben variable Lithiumoxidgehalte (Li_2O) von $< 1,0\%$ – $9,7\%$ Gew.-% (vgl. die kontinentale Kruste enthält ca. $0,007\%$ Gew.-% Li; Swain, 2017). Die konventionellen Solen von Südbolivien, Nordchile und Nordwestargentinien befinden sich im sogenannten südamerikanischen Lithiumdreieck und zeichnen sich durch Lithiumgehalte von wenigen 100 mg/L bis einigen 1000 mg/L aus (Kudryavtsev, 2016; Y. Zhang et al., 2019, BGR,

2020a; Meng et al., 2021), was verglichen mit der kontinentalen Kruste eine Anreicherung um den Faktor 12 bis 120 ist. China, Mexiko und die USA haben ebenfalls einige Solevorkommen (Kudryavtsev, 2016; Bowell et al., 2020). Lithium in geothermalen Solen ist bisher in Europa und den USA nachgewiesen (bspw., Dini et al., 2021; Stringfellow und Dobson, 2021).

In Chile und Australien werden zusammen rund 70 % des Lithiums der globalen Produktion gefördert (Drobe, 2020a; Abb. 4). In Chile wird Lithium aus hochsalinaren Solen, in Australien dagegen aus Festgestein gewonnen (Abb. 1; Drobe, 2020a). Die Firmen Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Albemarle, Chemical and Mining Co. of Chile, FMC Corp und Talison Lithium sind die größten Lithiumproduzenten Südamerikas und Australiens (Mărgulescu, 2014). Die Kapazität ihrer Produktion wird auf ca. 48.000 t Lithiumkarbonat (Li_2CO_3) pro Jahr geschätzt (Sykes, 2019). Der starke Anstieg der Lithiumproduktionsmengen in Australien, China und Chile von weltweit rund 39.000 t Lithium im Jahr 2016 auf rund 95.000 t Lithium im Jahr 2018 ist auf die steigende Nachfrage auf dem Weltmarkt zurückzuführen (USGS, 2020, 2018; DERA, o.D.). 2018 fingen vor allem Australien und Brasilien an, ihre Produktionsmengen zu steigern (Abb. 4). Die resultierende Lithiumüberproduktion 2018 führte zu einem Preisverfall. Australiens Produktionsmenge stieg zwischen 2016 und 2018 um 420 % von 14.000 t auf 58.800 t/Jahr (Abb. 4; USGS, 2018, 2020). In den letzten zehn Jahren ist ein genereller Trend von steigenden Lithiumproduktionsmengen von rund 28.100 t Lithium im Jahr 2010 auf 82.000 t Lithium im Jahr 2020 ersichtlich (USGS, 2012, 2021).

Abbildung 4



Lithiumproduktion der vier führenden Produktionsländer und der weiteren Länder kumuliert, zwischen den Jahren 2000 und 2020 in Tonnen pro Jahr (Eigene Darstellung R. Reich, nach: USGS, 1996-2021; Mohr et al., 2012; Schmidt, 2017; BGR, 2020b).

3. Wirtschaftliche Betrachtung

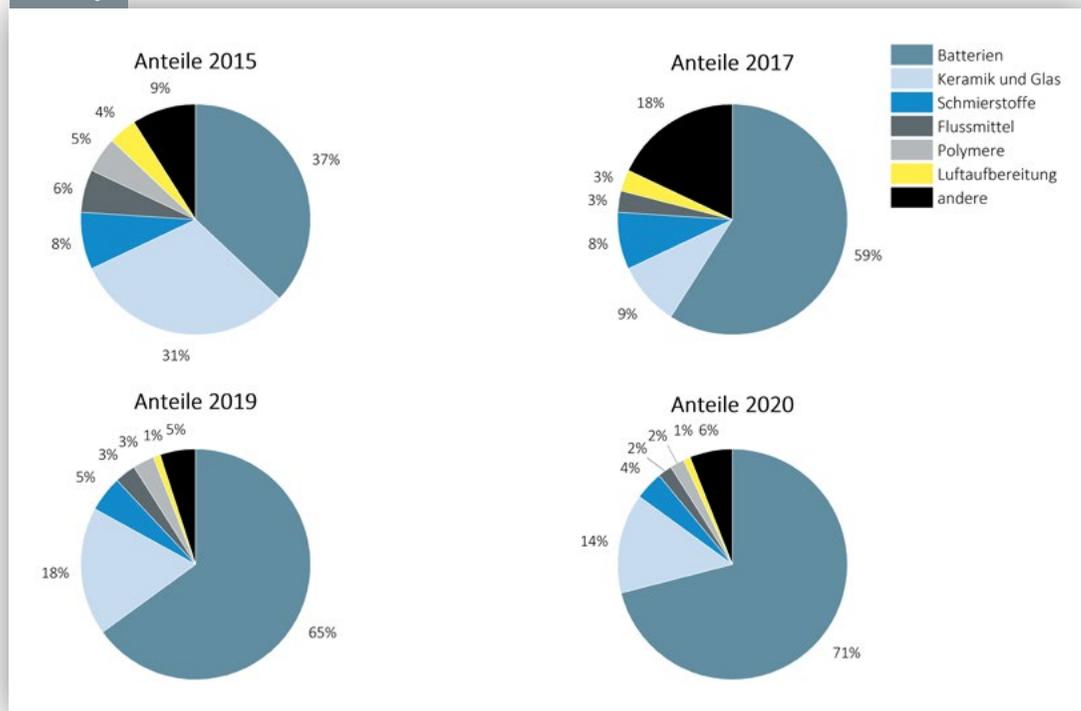
3.1 Weltweiter Markt^{Reich, R.}

Lithium wird als Bestandteil unterschiedlicher Produkte vermarktet. Zum einen als Lithiumhydroxid oder als Lithiumkarbonat, zum anderen als Spodumenkonzentrat [DERA, 2021c]. Lithiumhydroxid und Lithiumkarbonat werden in Batteriequalität (battery grade, > 99,5 % Reinheit) und in technischer Qualität (technical/industrial grade, 99,0 % – 99,5 % Reinheit) verkauft [DERA, 2021c]. Spodumenkonzentrate hingegen werden mit Konzentrationen von 5 % – 6 % Lithiumoxid vermarktet [DERA, 2021c]. Lithium wird heute hauptsächlich in Lithiumionenbatterien verbaut [BGR, 2020b]. Von 2015 bis 2020 stieg der Anteil von Lithiumionenbatterien bei der globalen Endnutzung von Lithium von 37 % im Jahr 2015 auf 71 % im Jahr 2020 kontinuierlich an. Die relative prozentuale Endnutzung der globalen Produktion sank dagegen in den anderen Sektoren, z. B. Keramik und Glas von 31 % in 2015 auf 14 % in 2020 oder in Flussmitteln von 6 % in 2015 auf 2 % in 2020 (Abb. 5).

Aufgrund der COVID-19 Pandemie ist es zu Beginn 2020 zu einem Rückgang der Verbrauchernachfrage nach Lithium gekommen, was zum Teil durch die wieder steigende Nachfrage an Lithiumionenbatterien Ende 2020 kompensiert wurde [USGS, 2021]. Der US Geological Survey [2022] schätzt den globalen Lithiumkonsum für das Jahr 2021 auf ca. 93.000 t, was einen Anstieg von ca. 33 % i.V.z. 2020 (ca. 70.000 t) bedeutet. Da zukünftig Lithiumionenbatterien im Zuge der Energiewende und dem Umstieg zur Elektromobilität weiter nachgefragt werden, ist ein steigender globaler Lithiumbedarf zu erwarten. Modellbasierte Prognosen schätzen in den Jahren 2040 bis 2050 den Jahresbedarf auf rund 300.000 t bis 560.000 t Lithium weltweit (ca. 1,6 t – 3 Mio. t LCE) [Mohr et al., 2012; BGR, 2021].

Derzeit wird der globale Lithiumbedarf durch die Rohstofflieferanten noch gedeckt. Da alle Prognosen einen zunehmenden Lithiumbedarf für die Zukunft erwarten [vgl. Marscheider-Weidemann et al., 2021], wäre es sinnvoll, weitere Lithiumlagerstätten zu explorieren und neue Extraktionsmethoden zu entwickeln. Auch das Recycling wird zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Jedoch wird es noch einige Jahre dauern, bis aus Lithiumionenbatterien aus Elektrofahrzeugen signifikante Mengen an recyceltem Lithium gewonnen werden könnten [Bernhart, 2019; Kap. 7]. Ein entscheidender Nachteil ist, dass mit derzeitigen Methoden das recycelte Lithium aus verbrauchten Lithiumionenbatterien nicht den Reinheitsanforderungen für diese entspricht und dadurch nur noch in anderen Anwendungen Verwendung finden kann [BGR 2020a]. Weiterhin kann Lithium in manchen Anwendungsbereichen durch andere Rohstoffe ersetzt werden. Als Anodenmaterial in nicht wieder aufladbaren, sogenannten primären Batterien, können Kalzium, Magnesium, Quecksilber und Zink verwendet werden. In Schmierstoffen kann Lithium durch Kalzium und Aluminium und in der Keramik- und Glasindustrie durch Natrium und Kalium substituiert werden [USGS, 2021].

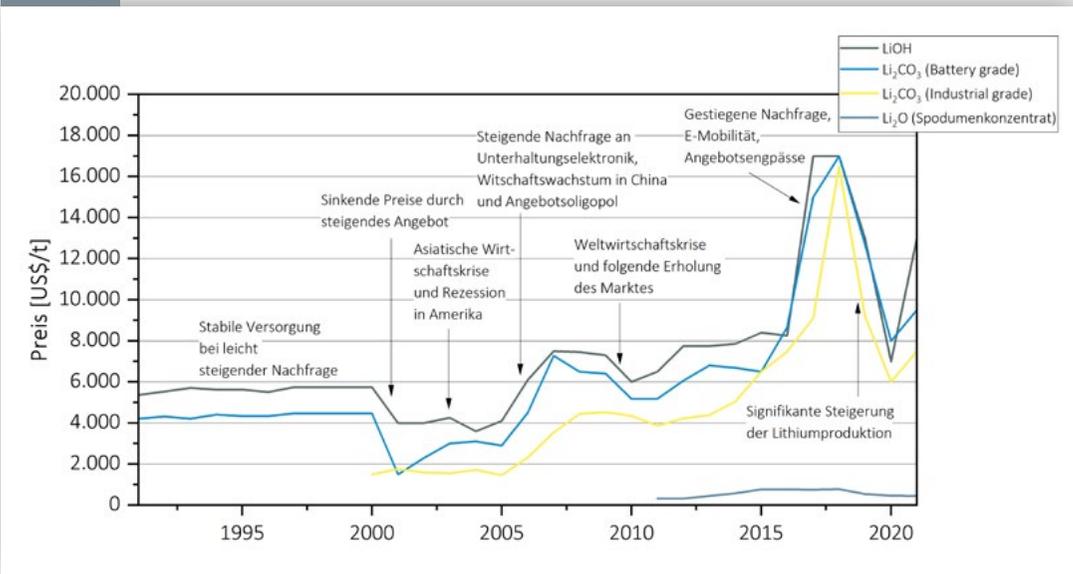
Abbildung 5



Prozentuale Anteile globaler Endnutzung der Gesamtproduktion der Jahre 2015 bis 2020 [Eigene Darstellung R. Reich, nach: BGR, 2020a; Meng et al., 2021; USGS, 2021].

Die Preisentwicklung für Lithium ist seit dem Jahr 2000 sehr dynamisch (Abb. 6, nicht inflationsbereinigt). Diese Dynamik ist auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen (Abb. 6): [1] Diskrepanz zwischen Angebot (Über- bzw. Unterproduktion) und Nachfrage (v.a. Unterhaltungselektronik, E-Mobilität), [2] Schwankung in der Finanzstabilität einzelner Länder, [3] global starke Abhängigkeit des Marktes von wenigen Anbietern (Angebotsoligopol). Bis 2018 stieg der Preis für „battery grade“-Lithiumkarbonat auf rund 17.000 US\$/t mit dem stärksten Preisanstieg zwischen 2016 und 2017 (Abb. 6). Nach diesem Preispeak ist der Lithiumkarbonatpreis bis ins Jahr 2020 auf 11.000 US\$/t gesunken, was auf ein Überangebot auf dem globalen Markt zurückzuführen ist (BGR, 2020b). Aufgrund dessen sank die globale Lithiumproduktionsmenge auf 82.000 t (-5 %) im Jahr 2020 (DERA, 2021a; USGS, 2021). Seit 2021 steigen die Lithiumpreise erneut an. Zwischen Februar und März 2021 stieg der Preis für Spodumenkonzentrat um 29 % bzw. 150 US\$/t, der Preis für Lithiumkarbonat als „battery grade“ um 23 % bzw. 2.500 US\$/t und als „technical and industrial grade“ um 22 % bzw. 2.000 US\$/t (DERA, 2021c). Durchschnittlich lagen die Preise in diesen beiden Monaten bei 434,58 US\$/t für Spodumenkonzentrat, bzw. 7.590 US\$/t für „battery grade“ Lithiumkarbonat und 7.770 US\$/t für „technical and industrial grade“ Lithiumkarbonat (DERA, 2021c).

Abbildung 6



Preisentwicklung von Lithiumhydroxid (LiOH), und Lithiumkarbonat (Li₂CO₃) unterschiedlicher Qualitäten und Spodumenkonzentrat von 1991-2021. (Eigene Darstellung R. Reich, nach: USGS, 1996-2021; Martin et al., 2017; Schmidt, 2017; DERA, 2019; Australian Government, 2020; Piedmont Lithium Limited, 2020, 2021b; London Metal Exchange, 2021; Statista, 2021).

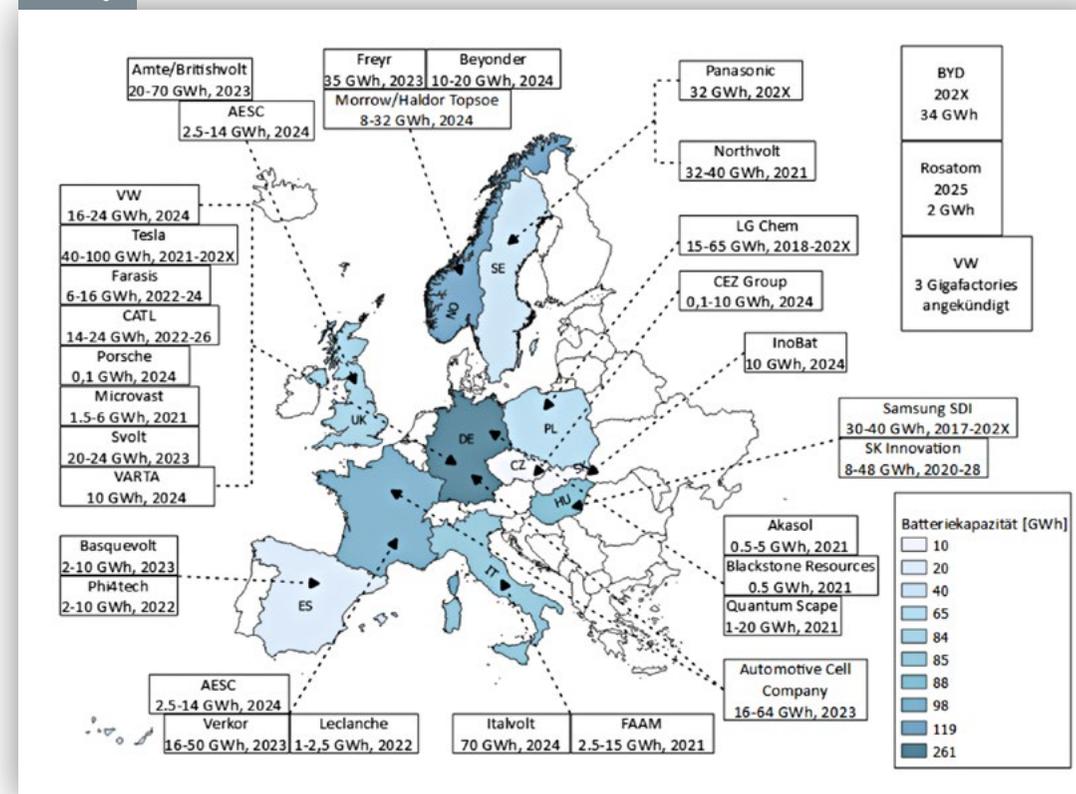
Vor dem Ausbruch des Russland-Ukraine-Kriegs gaben verschiedene Studien zukünftige Lithiumpreise für das Jahr 2025 mit rund 13.000 US\$/t – 14.000 US\$/t für Lithiumkarbonat „battery-grade“, 10.000 US\$/t für Lithiumkarbonat „technical-grade“, zwischen 15.000 US\$/t und 20.000 US\$/t für Lithiumhydroxid und rund 700 US\$/t für das Spodumenkonzentrat (6 % Lithiumoxid) an (Michaud, 2016; German Lithium Participation, 2021; Brightmore, 2021). Aufgrund der schneller steigenden Nachfrage gaben andere Analysten bereits für das Jahr 2022 durchschnittliche Preise für Lithiumkarbonat von 21.000 US\$/t und für Lithiumhydroxid von 20.812 US\$/t an (Goldinvest, 2021). Der Preis-Informationdienstleister Argus Media Group gibt für den 29. April 2022 einen Preis für Lithiumkarbonat (min 99.5% cif China) von 61.000 US\$/t und für Lithiumhydroxid (min 56.5% fob China) 71.500 US\$/t an (Argus Media Group, 2022).

Die Lithiumproduktionskosten hängen von der Art der Lagerstätte, dem Extraktionsverfahren sowie der Konzentration von Lithium in der Lösung bzw. im Erz ab. Im Durchschnitt betragen die Produktionskosten für eine Tonne Lithiumkarbonat aus Festgesteinen in Australien ca. 4.000 US\$ – 5.000 US\$ (Schmidt, 2017, Roedl und Partner, 2019). Dagegen werden die Kosten für die Lithiumextraktion im südamerikanischen Dreieck durch Evaporation derzeit auf 2.000 US\$/t – 2.500 US\$/t geschätzt (Roedl und Partner, 2019). Allerdings gibt der Haupteigentümer Galaxy Resources Limited Produktionskosten für die Sal de Vida-Anlage (eine der großen Solen in Argentinien) Produktionskosten in Höhe von 3.410 US\$/t Lithiumkarbonat an (Mining Data Online, 2021). Auch für den Salar de Olaroz und den Salar de Hombre Muerto liegen die Produktionskosten durch Evaporation mit 3.525 US\$/t bzw. rund 3.800 US\$/t (Schmidt, 2017) höher als von Roedl & Partner (2019) geschätzt. Nach Toba et al. (2021) kann die Lithiumgewinnung aus Geothermalwasser in den USA auch bei Lithiumpreisen von 7.000 US\$/t Lithiumkarbonat ökonomisch sein. Ventura et al. (2020) berechnen für die Gewinnung von Lithium aus Geothermieanlagen mittels eines selektiven Ionenaustauschers in den USA Gesamtproduktionskosten von bis zu 4.000 US\$/t Lithiumkarbonat.

3.2 Europäischer Markt ^{Steiger, K.}

Die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) erwartet 2040 einen Bedarfszuwachs an Lithiumionen-Hochleistungsspeichern für mobile Anwendungen um das Zehn- bis Fünfzigfache im Vergleich zu 2018 (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Diese Ergebnisse basieren auf den möglichen Zukunftsszenarien, den „Shared Socioeconomic Pathways“ des Weltklimarates, unter Annahme eines fossilen Pfades (geringer Lithiumbedarf) und eines nachhaltigen Pfades (hoher Lithiumbedarf) (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Wird der Wandel hin zur E-Mobilität weiter fortgeführt, werden 2030 weltweit 2 TWh Energiespeicher als Batterien nachgefragt werden (Bernhart, 2019). Laut Fraunhofer ISI sind es alleine in Europa 1 TWh (Thiemann et al., 2020). Unter Annahme des Einsatzes von 150 g Lithium pro kWh Batteriekapazität entspräche dies einem Bedarf von 150.000 t Lithium (ca. 800 kt LCE) in Europa für Batterien (Tarascon, 2010). Die Europäische Kommission nimmt einen Lithiumbedarf für Batterien in Europa für das Jahr 2030 von ca. 61.000 t (ca. 325 kt LCE) an (Bobba et al., 2020). Bis Ende der 2020er Jahre sollen in Europa zu den bestehenden fünf Batteriezellenfabriken, die eine Produktionskapazität von ca. 120 GWh leisten, über 30 neue Produktionsstätten für Lithiumionenbatterien errichtet werden, die eine Batteriekapazität von über 1.000 GWh produzieren wollen (Abb. 7). Die European Battery Alliance schätzt das Marktpotenzial für in Europa produzierte Batterien bis Mitte der 2020er auf 250 Mrd. Euro (BMW, 2021).

Abbildung 7



Errichtete und geplante Batteriezellenfabriken in Europa (Stand Februar 2022, nach: Ortiz, 2021; Equinor, 2020; CEZ Group, 2021; Porsche, 2021).

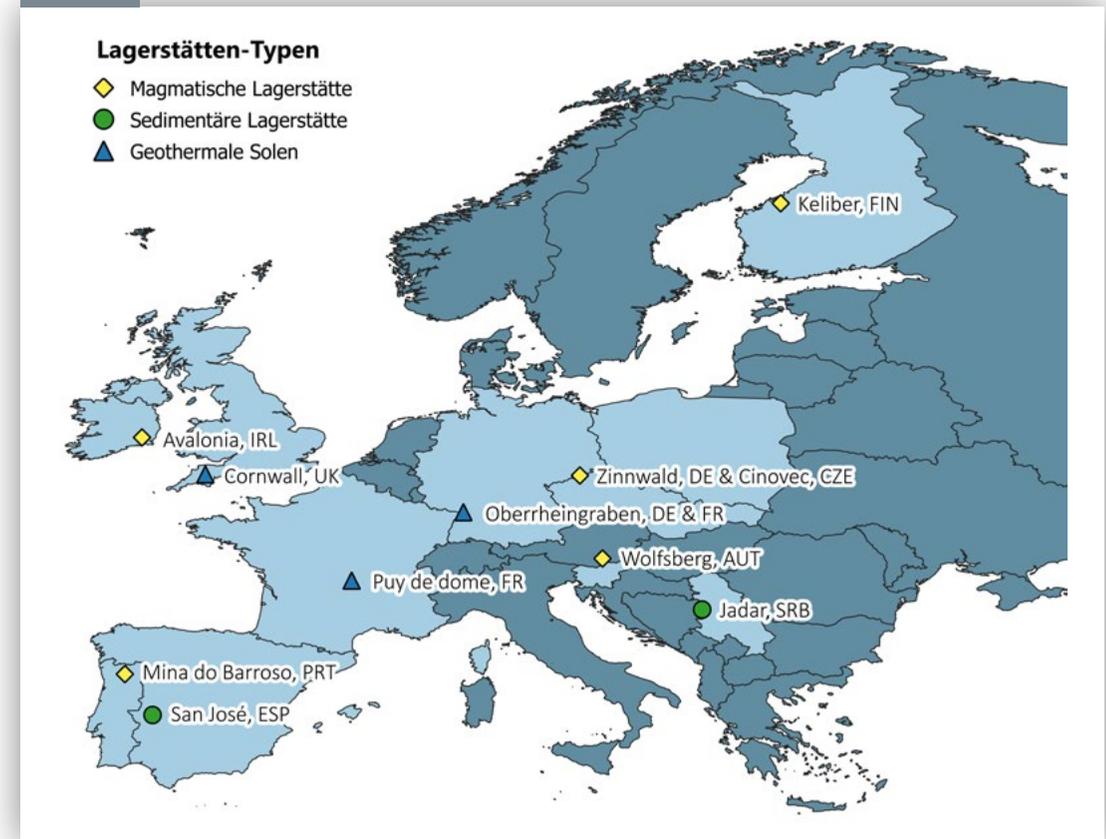
Um den Bedarf an importiertem Primärlithium für die Batterieproduktion zu verringern, wird neben einer möglichen innereuropäischen Lithiumproduktion auch der Einsatz von Rezyklaten angestrebt. Das Bundesumweltministerium hat mit Beteiligung der Industrie und Wissenschaft seit 2009 zahlreiche Projekte zum Recycling von Lithiumionenbatterien aus der Elektromobilität gefördert (Öko-Institut, 2020). Ebenso unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2019 durch die Etablierung des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ die Entwicklung der Lithiumrecyclingprozesse (z. B. InnoRec; BMBF, 2020). Verschiedene Studien nehmen an, dass die Einsatzquote für recyceltes Lithium in neuen Lithiumionenbatterien in den kommenden Jahrzehnten ansteigen wird und dadurch dementsprechend ein Beitrag zum steigenden Lithiumbedarf geleistet werden kann (vgl. Mayya et al., 2018; Velázquez-Martínez et al., 2019; Xu et al., 2020). Dies wird folglich der Erfüllung der europäischen Quotenvorgaben für die Recyclingeffizienzen und den Recyclinganteil in Lithiumionenbatterien dienen (EU Kommission, 2020c). Ausschlaggebend für die Verfügbarkeit von recyceltem Lithium werden steigende Rückführquoten der Lithiumionenbatterien sein (vgl. Gregoir und van Acker, 2022). Bei einer Rückführquote von 40 % könnte das sekundäre Lithiumkarbonat ungefähr 25 % des jährlichen Lithiumbedarfs für Batterien in der Elektromobilität decken, bei einer Rückführquote von 80 % ca. 53 % (Ziemann et al., 2018).



4. Lithium aus konventionellen Ressourcen in Europa

Auch in Europa soll Lithium im industriellen Maßstab abgebaut werden. Die Lithiumprojekte in Europa, die sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden, kommen in (1) magmatischen (Pegmatit, Granit und Gneisen), in (2) sedimentären Lagerstätten und in (3) geothermalen Solen vor. Die Projekte zu (1) befinden sich in Portugal, Deutschland, Tschechien, Österreich, Irland und Finnland, die Projekte zu (2) in Spanien und Serbien und die Projekte zu (3) in England, Frankreich und Deutschland (Abb. 8). Eine tabellarische Übersicht über die geologischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten ist in den Tabellen 13 bis 15 in Kapitel 6.1 zu finden.

Abbildung 8



Lithiumprojekte in Europa (Stand Februar 2022).

Für ein besseres Verständnis der Lagerstätten erfolgt zunächst eine kurze Einführung in die allgemeine Geologie sowie in Abbau, Aufbereitung und Weiterverarbeitung der lithiumhaltigen Gesteine. Nachdem die Lithiumprojekte im fortgeschrittenen Stadium in Europa beschrieben werden, werden die Umweltaspekte des Lithiumabbaus aus Festgestein erläutert.

4.1 Geologie Bergmann, Ch., Steinmüller, K.

4.1.1 Granite

Granite sind in der Erdkruste erstarrte, d.h. nicht eruptierte magmatische und langsam abgekühlte Gesteine (Plutonite). Ihr Mineralbestand besteht im Wesentlichen aus den Mineralen Quarz, Alkalifeldspat und Plagioklas, variablen Anteilen der Minerale Glimmer und Amphibol sowie Minerale mit weniger als 1%-Anteil am Gestein, wie z. B. Zirkon und Titanit. Granite machen einen großen Teil der kontinentalen Kruste aus, wobei einzelne Granitstöcke zehner Kilometer Größe haben können. Sie sind jedoch mehrheitlich in tieferen Krustenbereichen zu finden und gelangen durch Gebirgsbildung und Erosion an die Erdoberfläche. Granitische Magmen entstehen durch die teilweise Aufschmelzung anderer Gesteine. Unterschiedliche Prozesse verändern die chemische und mineralogische Zusammensetzung im Laufe der Magmenentwicklung während des Aufstiegs durch die Erdkruste. Granitische Gesteine unterscheiden sich daher untereinander zum Teil deutlich in ihrem Chemismus und damit ihrer Mineralzusammensetzung, wobei einzelne Elemente wie z. B. Lithium abbauwürdige Konzentrationen erreichen können. So sind die meisten für die Lithiumgewinnung relevanten Granite in Europa sogenannte Seltenmetall-Granite mit ebenfalls erhöhten Gehalten von meist Zinn, Tantal sowie Fluor. Die Granite haben meist ein Volumen $< 1 \text{ km}^3$. Diese Granite kommen in bestimmten geologischen Regionen in ganz Europa, mit Schwerpunkten in Frankreich, dem Nordwesten der Iberischen Halbinsel, Deutschland, Tschechien, Österreich, Irland und Skandinavien vor.

Ein Spezialfall sind Greisen. Diese sind Gesteine in Seltenmetall-Graniten, die durch magmatische Fluide hydrothermal umgewandelt wurden. Hierbei werden neue Minerale gebildet, die die in den Fluiden enthaltenen inkompatiblen Elemente aufnehmen. Greisen sind volumenmäßig relativ kleine, bis zu ca. 100 m mächtige Vorkommen, die entweder gangartig oder lagerförmig am Dach der Seltenmetall-Granite ausgebildet sein können. Sie bestehen hauptsächlich aus Quarz, Glimmer und Topas. Daneben kommen Fluorit, Turmalin, Kassiterit und Wolframit vor. Das Lithium in den Greisen ist an Glimmer wie Lepidolit und/oder Zinnwaldit, gebunden (z. B. Breiter et al., 2019).

4.1.2 Pegmatite

Pegmatite sind ebenfalls magmatische Gesteine und unterscheiden sich von Graniten im Wesentlichen durch ihre Grobkörnigkeit, aber auch einen vielfältigeren Mineralbestand. Einzelkristalle können mehrere Meter Größe erreichen, auch wenn sie meist im Zentimeter bis Dezimeterbereich bleiben. Die Mineralogie setzt sich aus variablen Mengen an Quarz, Plagioklas, Alkalifeldspat, Glimmer, Granat, Turmalin und Apatit zusammen. Häufig enthalten sind auch lithiumhaltige Minerale wie Spodumen, Petalit oder Amblygonit in Mengenanteilen unter 1 %. Pegmatite können als zusammenhängende Körper, aber auch als Ganggesteine vorkommen. Im Unterschied zu Granit erreichen sie nur Größen im hunderter Meter Bereich. Pegmatite sind meist also bedeutend kleiner als Granitintrusionen. Dies liegt daran, dass Pegmatite aus Restschmelzen granitischer Magmen kristallisieren. Auf ihrem Weg in die oberen Bereiche der Erdkruste kühlen granitische Magmen mit der Zeit ab und bilden Kristalle. Da die entstehenden Minerale bevorzugt sogenannte kompatible Elemente in ihre Kristallstruktur einbauen, reichern sich mit der Zeit inkompatible Elemente im Restmagma an. Mit zunehmender Kristallisation werden Kristalle aufgrund der höheren Dichte zurückgelassen. So entsteht eine stark mit inkompatiblen Elementen, darunter Lithium, angereicherte Restschmelze. Für die Lithiumgewinnung in Europa am wichtigsten sind die, entsprechend der angereicherten inkompatiblen Elemente benannten, Lithium-Cäsium-Tantal (LCT) Pegmatite. Diese kommen in Gebirgszügen in praktisch ganz Europa vor, insbesondere in Skandinavien, entlang der Zentral- und Ostalpen bis ins Böhmisches Massiv und im (Nord-)Westen der Iberischen Halbinsel (z. B. Gourcerol et al., 2019).

4.1.3 Sedimentgesteine

Sedimente entstehen durch Verwitterungs- und Erosionsprozesse von Gesteinen, durch die Partikel unterschiedlicher Größe sowie gelöste Bestandteile transportiert und abgelagert werden. Die im Laufe der Zeit entstehenden Schichten werden durch Überlagerung von weiterem Material kompaktiert und verfestigt. Sie werden in siliziklastische, chemische und biogene Sedimentgesteine unterteilt. Zu den ersteren gehören Ton-, Silt- und Sandsteine, zu den zweiten, Gips- und Salzablagerungen und zu den dritten z. B. Kalksteine und Kohlen. Derzeit gibt es außerhalb Europas z. B. in Nord- und Südamerika sowie Asien mehrere bekannte Lagerstätten, die sich in unterschiedlichen Stadien der Exploration befinden (z. B. Castor und Henry, 2020; Helvacı et al., 2004; O'Connor et al., 2018). Die Lithiumkonzentration in Sedimentlagerstätten ist meist geringer als in magmatischen Lagerstätten (Grant und Goodenough, 2021). Daher spielen Lithiumlagerstätten in Sedimenten zurzeit im Vergleich zu anderen Lagerstättenarten eine wirtschaftlich untergeordnete Rolle. Lithium kann außerdem in Bauxit- und sedimentären Eisen-Mangan-Lagerstätten vorkommen, wird derzeit aber aufgrund geringer Konzentrationen in Europa nicht gewonnen (Anderson, 2015).

4.2 Abbau, Aufbereitung und metallurgische Weiterverarbeitung

Bergemann, Ch., Reich, R., Steinmüller, K.

Die Ausführungen in diesem Kapitel gelten für Lithiumlagerstätten in Festgestein für das häufigste Lithiummineral Spodumen. Neue Verfahren werden in den Kapiteln für die einzelnen Lithiumprojekte beschrieben. Je nach Teufe kann Lithium entweder im Tagebau oder im Untertagebergbau gewonnen werden (BGS, 2016). Die Gewinnung im Tagebau wird für Lagerstätten verwendet, die sich nahe der Oberfläche befinden (normalerweise bis zu 600 m). Zur Gewinnung von Lithium aus Festgesteinen umfasst dies das Entfernen des Abraums, den Abbau des Erzes durch Bohren und Sprengen sowie den Transport des Erzes per LKW oder Förderband zur Aufbereitung oder Bevorratung. Der Abbau des Materials geschieht schichtweise, so dass horizontale Bänke an den Seiten des Tagebaus zurückbleiben, was dem Tagebau ein charakteristisches „gestuftes“ Aussehen verleiht (BGS, 2016). Die Untertagebaugewinnung wird eingesetzt, wenn die Lagerstätte sehr tief unter der Oberfläche liegt, oder eine Form besitzt, die einen Untertageabbau effizienter macht. Es kommt also vor, dass ein Tagebau mit fortschreitender Abbautiefe zu einem Untertagebau umgewandelt wird. Der Zugang zum Untertagebetrieb kann über einen Stollen

(horizontal), einen Schacht (vertikal) oder eine Rampe (schräg) erfolgen. Das Erz wird entlang von Strossen oder Abbaukammern abgebaut, die sich in verschiedenen Teufen unter der Oberfläche befinden und von denen aus das Erz über Tage gebracht wird (BGS, 2016).

Nach dem Abbau des Erzes wird ein Konzentrat produziert. Dafür wird das Erz zunächst gebrochen, gemahlen und gesiebt, um es in seine mineralischen Bestandteile aufzutrennen zu können (Banks et al., 1953; Peerawattuk und Bobicki, 2018). Getrennt wird durch gravimetrische-, magnetische und elektrostatische Verfahren, in Abhängigkeit von den physikalischen, elektrischen und/oder magnetischen Eigenschaften des Erz- und Gangartmaterials und der darin enthaltenen Minerale (Banks et al., 1953; Peerawattuk und Bobicki, 2018). Um letztendlich ein Konzentrat lithiumreicher Minerale zu produzieren, werden Flotation oder Schwimm-Sink-Scheidung angewendet (Banks et al., 1953, Peerawattuk and Bobicki, 2018).

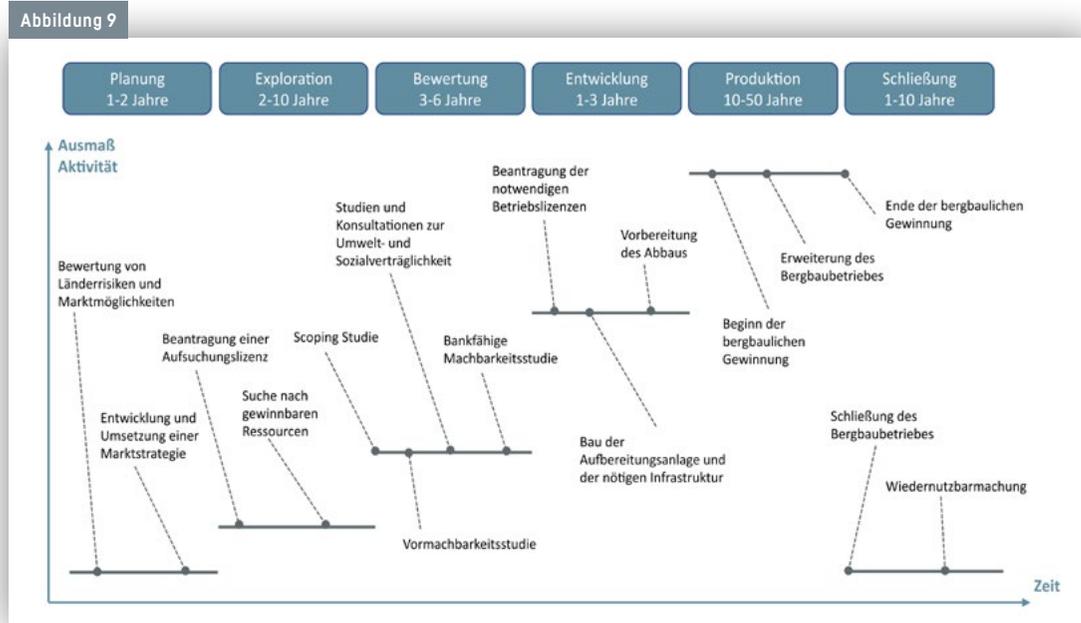
Nach der Herstellung des Konzentrats mit normalerweise 6 – 7 % Lithiumoxid (Li_2O), wird es zu Lithiumkarbonat (Li_2CO_3) oder Lithiumhydroxid (LiOH) weiterverarbeitet (Swain, 2017). Dies geschieht entweder durch Säurelaugung, die derzeit am häufigsten verwendete Methode, oder alternativ durch Karbonatlaugung oder eine Reihe weiterer seltener verwendeter Methoden (Salakjani et al., 2019; Meng et al., 2021). Für die Herstellung von Lithiumkarbonat wird der natürlich vorkommende α -Spodumen zunächst durch Rösten im Ofen bei $\geq 1050^\circ\text{C}$ in β -Spodumen $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ umgewandelt (Rosales et al, 2019). Durch das Rösten erfährt der Spodumen eine Phasenumwandlung und sein Kristallgitter wird geweitet (z. B. Abdullah et al., 2019). Nach der Umwandlung wird eine Mischung aus fein gemahlenem β -Spodumen und Schwefelsäure bei 250°C in Lösung gebracht, um Lithiumsulfat (Li_2SO_4) zu produzieren (Meshram et al., 2014). Anschließend wird das Lithiumsulfat gelaugt, wodurch Eisen, Aluminium und Magnesium entfernt werden (z. B. Meng et al., 2021). Die gereinigte Lithiumsulfat-Lösung wird mit Natriumkarbonat (Na_2CO_3) behandelt, um Lithiumkarbonat auszufällen (Swain, 2017, Meng et al., 2021).

Bei der Karbonatlaugung wird gemahlener β -Spodumen mit Wasser gemischt, um einen feinkörnigen Schlamm herzustellen. Diese Mischung reagiert anschließend durch Zugabe von Natriumkarbonat und Kohlenstoffdioxid (CO_2) bei 215°C und 2,14 MPa zu Lithiumhydrogenkarbonat (LiHCO_3). Bei diesem Prozess werden z. B. Magnesium und Kalzium entfernt und schließlich durch Austreiben des überschüssigen Kohlenstoffdioxids mittels Erhitzen Lithiumkarbonat ausgefällt (Tran und Luong, 2015). Neben Lithiumhydroxid und Lithiumkarbonat kann als Produkt auch Lithiumfluorid gewonnen werden. Dabei wird der durch hydro-metallurgische Prozesse gewonnenen, lithiumreichen Lösung Kaliumfluorid zugegeben, wodurch Lithiumfluorid ausgefällt wird (Deutsche Lithium, 2019).

4.3 Projekte zur Lithiumgewinnung aus magmatischem Festgestein Steinmüller, K., Steiger, K., Reich, R.

Lithiumprojekte aus magmatischem Festgestein in Europa in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium sind Mina do Barroso in Portugal, Zinnwald in Deutschland, Cinovec in Tschechien, Wolfsberg in Österreich und Keliber in Finnland (Stand Ende 2021). Ein weiteres Projekt ist Avalonia in Irland, dieses befindet sich allerdings in der Frühphase der Exploration. Vier dieser Projekte (Mina do Barroso, Wolfsberg, Keliber und Avalonia) sind an Pegmatite gebunden, zwei davon (Zinnwald und Cinovec) sind mit Graniten bzw. Greisen vergesellschaftet.

Bevor die einzelnen Projekte genauer beschrieben werden, soll Abbildung 9 zum besseren Verständnis die verschiedenen Stadien der Entwicklung eines Rohstoffprojekts, von der Planung der Aufsuchung bis hin zu einem möglichen Bergbaubetrieb und dessen Schließung darstellen.



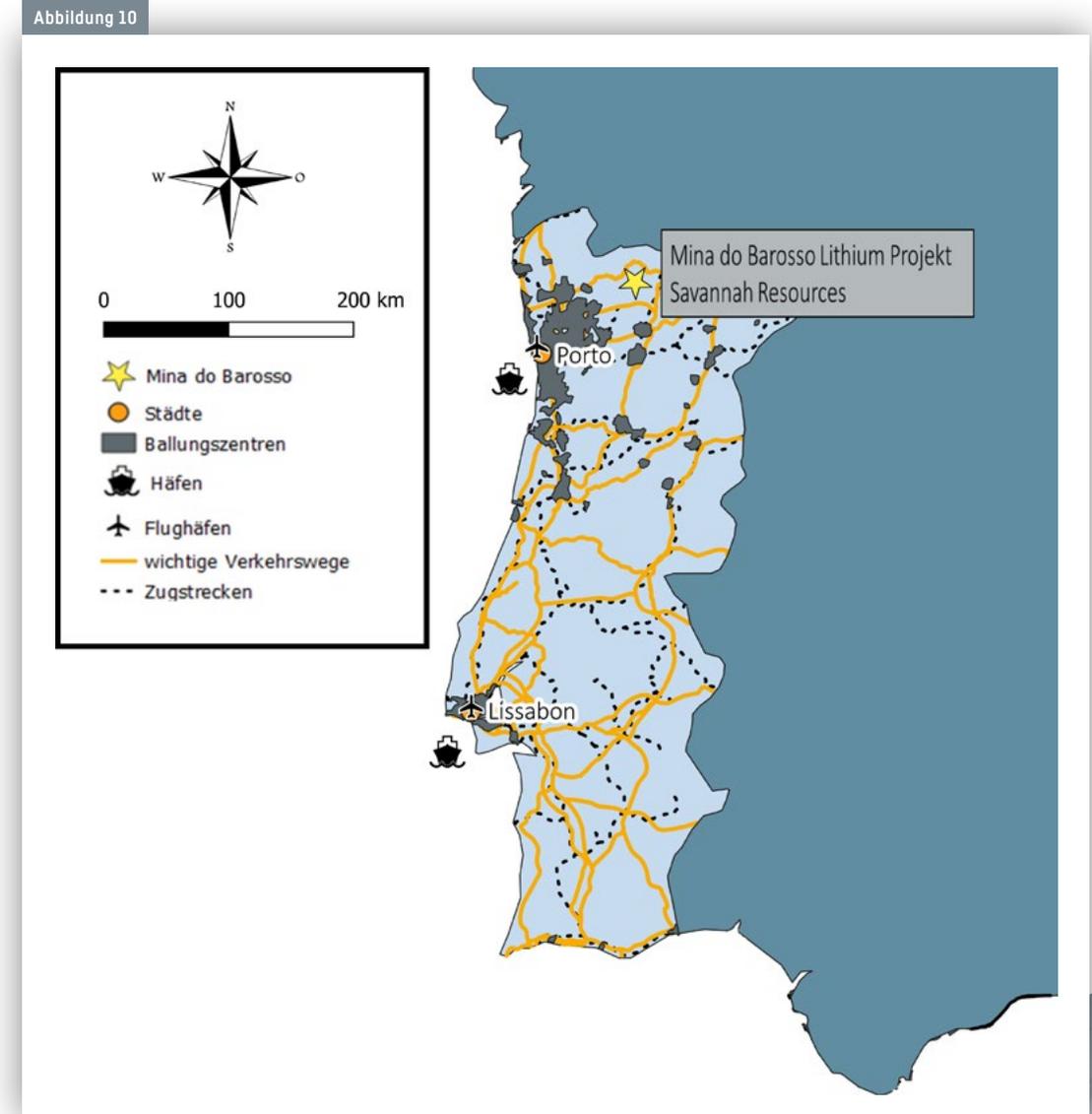
Verlauf der Entwicklung eines Rohstoffprojektes von der Planung bis zur Schließung (nach KPMG, 2014).

Die Entwicklung eines Rohstoffprojekts von der Exploration bis hin zu einem möglichen Bergbaubetrieb kann Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nehmen und wird in der dreiteiligen Videoreihe zur „Wirtschaftlichkeitsbewertung von Rohstoff-Projekten“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erklärt (youtube: GeoChannel BGR LBEG).

4.3.1 Mina do Barroso, Portugal – Savannah Resources Plc

Lage

Das Lithiumprojekt Mina do Barroso befindet sich in Nordportugal in der Nähe der Stadt Boticas und ist etwa 145 km vom Tiefwasserhafen Leixões in der Nähe der Stadt Porto entfernt (Abb. 10).



Lage des Savannah Lithiumprojekts Mina do Barroso (nach Savannah Resources Plc., 2021).

Projektgeologie

Das Projekt befindet sich im Barroso-Alvão Pegmatitfeld, welches aus einer Vielzahl von lithiumreichen Aplit-Pegmatit-Gängen besteht. Die Nebengesteine sind hauptsächlich deformierte Gesteine, die durch eine Granitintrusion kontaktmetamorph überprägt wurden [Carvalho und Farinha, 2004]. Das Projekt ist an die spodumenreichen Aplit-Pegmatit-Gänge im Norden und Nordosten des Gebietes gebunden [Martins et al., 2011].

Geschichte und Exploration

Seit Anfang der 2000er Jahre baut Savannah Lithium Ltda, ein portugiesisches Unternehmen, Feldspat auf dem Gebiet von Mina de Barroso ab, der an die keramische Industrie in Portugal verkauft wird. Savannah Lithium Ltda gehört zu 100 % der Savannah Resources Plc [Savannah], einem an der Londoner Börse [AIM] gelisteten, britischen Unternehmen. Savannah führte von 2017 bis 2019 ein umfangreiches Explorationsprogramm auf Lithium im Gebiet des Mina do Barroso Projekts durch. Insgesamt wurden über 140 Bohrlöcher mit zusammen mehr als 13.500 Bohrmetern niedergebracht. Durch die Bohrungen wurden drei Hauptvorkommen [Grandoa, Reservatorio und NOA] entdeckt, die über eine Länge von fast 4 km zu verfolgen sind, eine durchschnittliche Mächtigkeit von 300 m haben und bis 100 m in die Tiefe reichen [Savannah Resources Plc, 2018]. Daneben wurden noch zwei weitere Vorkommen [Pinheiro und Aldeia] gefunden. Mit Stand 2019 enthalten die Vorkommen des Projektes insgesamt 27 Mio. t Ressourcen mit durchschnittlich ca. 1,0 % Lithiumoxid [Tab. 1, Savannah Resources Plc, 2021a].

Tab. 1: Ressourcen des Projektes Mina do Barroso, Stand 2019 (nach Savannah Resources Plc, 2021a).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithiumoxid (Gew.%)	Lithiumoxid (t)	Lithiumkarbonat-äquivalent (LCE) [Mt]
Gemessen (measured)	6,6	1,1	72.000	0,18
Angezeigt (indicated)	8,4	1,0	87.000	0,21
Vermutet (inferred)	12,0	1,1	128.000	0,32
Total	27,0	1,06	287.000	0,71

Projektentwicklung und aktueller Stand

Im Juni 2018 veröffentlichte Savannah auf der Basis der 14 Mio. t damals vermuteten Ressourcen mit durchschnittlich 1,1 % Lithiumoxid eine Konzeptstudie [Scoping Study]. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass der Erzkörper durch einen Tagebau abgebaut und das Erz in einer Aufbereitungsanlage mit Schweretrennung und Flotation zu einem Spodumenkonzentrat aufbereitet wird [Savannah Resources Plc, 2018]. Um den ökologischen Fußabdruck des Bergwerkes zu verringern, hat Savannah vor, die Aufbereitungsabgänge [Tailings] trocken abzulagern [Savannah Resources Plc, 2018]. Dadurch muss kein Schlammteich [Tailings Storage Facility] gebaut werden und der Bergwerksbetrieb benötigt weniger Platz. Die Lebenszeit des Bergwerkes wurde mit 11 Jahren angegeben. Über die Lebenszeit des Bergwerkes, würde die jährliche Bergbauproduktion ca. 1,3 Mio. t Erz betragen, die jährlich 175.000 t Spodumenkonzentrat mit 6 % Lithiumoxid aufbereitet würden. Es ist geplant, das Konzentrat auf dem internationalen Markt zu verkaufen. Die Konzeptstudie stellt die Wirtschaftlichkeit des Projektes heraus. Laut der Studie ist der Investitionsbedarf [CAPEX] für das Projekt 109 Mio. US\$ und die Betriebskosten [OPEX] bis zum Spodumenkonzentrat betragen 271 US\$/t [Savannah Resources Plc, 2018]. Unter der Annahme eines Preises für Spodumenkonzentrat von 685 US\$/t hat das Projekt einen Kapitalwert [NPV] bei einer 8 % Abzinsung von 356 Mio. US\$ vor Steuern. Nach Fertigstellung der Konzeptstudie im Jahr 2018 ging Savannah davon aus, dass zügig eine bankfähige Machbarkeitsstudie [Definite Feasibility Study, DFS] durchgeführt und im ersten Quartal 2020 das erste Spodumenkonzentrat produziert würde. In einer Präsentation des Unternehmens vom September 2021 wurde die Fertigstellung der Machbarkeitsstudie für 2022 und der Start der Bergbauproduktion für 2023 angekündigt. Außerdem wurden Feldspat und Quarz als mögliche Nebenprodukte genannt [Savannah Resources Plc, 2021a]. Im Mai 2020 legte Savannah Lithium der portugiesischen Umweltbehörde Agência Portuguesa do Ambiente [APA] umfassende Berichte über Umweltverträglichkeitsprüfungen und Bergbaupläne über die geplante Entwicklung vor. Im April 2021 gab die Umweltbehörde der Umweltverträglichkeitsprüfung eine vorläufige Genehmigung [Savannah Resources Plc, 2021a]. Savannah wird nun zu den nächsten Phasen des Genehmigungsprozesses übergehen, einschließlich einer öffentlichen Konsultation, die dann von der Umweltbehörde vor der endgültigen Genehmigung bewertet wird. Das Unternehmen führt bereits Gespräche mit einer Reihe potenzieller Abnahmepartner für das Spodumenkonzentrat. Savannah bereitet sich auch auf die Finanzierung der Projektentwicklung vor und arbeitet mit verschiedenen Finanzdienstleistern zusammen, um ein Finanzierungspaket

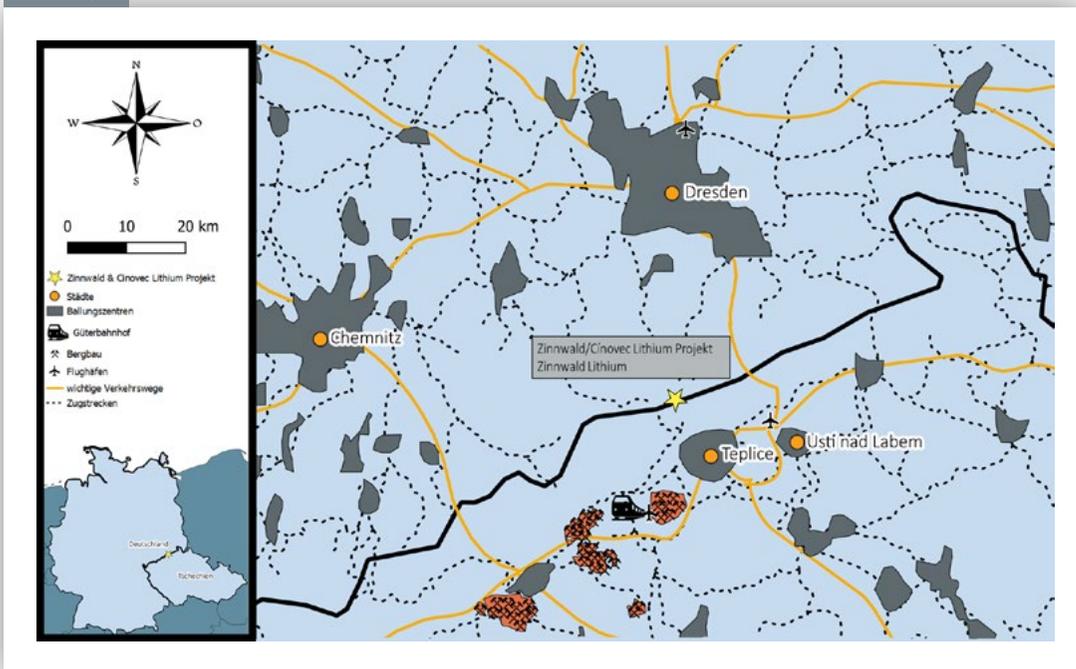
zu erhalten, das die Investitions- und Betriebskapitalanforderungen des Projekts abdeckt [Savannah Resources Plc, 2021a]. Im Mai 2020 gab Savannah bekannt, dass die Beantragung einer Projektförderung bei EIT InnoEnergy erfolgreich war, um über die Business Investment Plattform der European Battery Alliance [EBA] finanzielle und technische Unterstützung zu erhalten. Im Januar 2021 ist Savannah eine Investitionsvereinbarung mit dem portugiesischen Energiekonzern Galp Energia, SGPS, S.A. eingegangen. Im Rahmen dieser Vereinbarung wird der Energiekonzern 10 % des Projekts Mina do Barroso übernehmen und 6,4 Mio. USD sofort investieren. Die Investition von 6,4 Mio. USD wird die bankfähige Machbarkeitsstudie für das Projekt unterstützen. Laut Savannah prüft der Energiekonzern ebenfalls eine Abnahmevereinbarung für 100.000 t Spodumenkonzentrat jährlich, was über 50 % der erwarteten Jahresproduktion des Bergwerks entspricht [Savannah Resources Plc, 2021b].

4.3.2 Zinnwald, Deutschland – Deutsche Lithium GmbH

Lage

Das Zinnwald Lithiumprojekt befindet sich im Osten von Deutschland, 35 km von Dresden entfernt, nahe der Grenze zur Tschechischen Republik [Abb. 11].

Abbildung 11



Lage des Zinnwald Lithiumprojekts (nach Zinnwald Lithium Plc, 2021).

Projektgeologie

Das Lithiumprojekt Zinnwald ist an die Kuppel des Zinnwald-Cinovec Granits gebunden, der in Rhyolite eingedrungen ist. Die Restlösungen, die durch die Magmenentgasung entstanden sind, bewirkten die metasomatische Veränderung der Granitkuppel hin zu einem Greisen und die Vererzung mit Lithium und anderen Elementen wie Zinn und Wolfram [Dittrich et. al, 2020]. Das Lithium in Zinnwald ist im Glimmermineral Zinnwaldit eingebaut. Die glimmerreichen Greisenlagen können bis zu 40 m mächtig werden und bestehen aus Quarz, Zinnwaldit, Topas, Fluorit, Zinnstein, Wolframit, Scheelit und Sulfiden.

Geschichte und Exploration

Die Lagerstätte Zinnwald wurde bereits von 1540 bis 1945 auf Zinn und Wolfram untertage bergmännisch abgebaut. Seit 2010 erfährt die Lagerstätte Zinnwald wegen ihres hohen Lithiumgehalts erneut Aufmerksamkeit. Seit 2012 erkundete das 50:50 Joint Venture Deutsche Lithium GmbH, bis 2021 bestehend aus der in London ansässigen Zinnwald Lithium Plc (ehemals Eriss Resources) und der deutschen SolarWorld AG, die Lagerstätte Zinnwald auf ihre Lithiumressourcen. Im Juni 2021 gab die Zinnwald Lithium Plc bekannt, dass sie nun alleiniger Eigentümer der Deutschen Lithium GmbH ist [Zinnwald Lithium Plc, 2021]. Der Hauptanteilseigner der Zinnwald Lithium Plc ist wiederum Bacarona Lithium Plc, auch ansässig in London [Zinnwald Lithium Plc, 2021]. Zuerst beprobte die Deutsche Lithium in den untertägigen Stollen und anschließend, zwischen 2012 und 2017, teufte das Unternehmen 24 Kernbohrungen und eine Bohrung ohne Kern mit insgesamt 6.940 Bohrmeter ab [Deutsche Lithium, 2020]. Die anschließend durchgeführte Vorratsberechnung, in die auch validierte historische Bohrdaten mit einfließen, ergab nach JORC insgesamt 35,5 Mio. t „gemessene“ und „angezeigte“ Ressourcen mit durchschnittlich 0,35 % Lithium. Insgesamt enthält die Lagerstätte 665.240 t Lithiumkarbonat-äquivalent [LCE] [Tab. 2; Bacarona Lithium Plc, 2019].

Tab. 2: Ressourcen des Projektes Zinnwald, Stand 2018 [Bacarona Lithium Plc, 2019].

Ressourcen [JORC]	Erzvorräte [Mt]	Lithium [%]	LCE [Mt]
Gemessen (measured)	18,5	0,36	ca. 0,36
Angezeigt (indicated)	17,0	0,34	ca. 0,31
Vermutet (inferred)	4,9	0,35	ca. 0,92
Total	40,4	0,35	ca. 0,76

Während der Durchführung der Machbarkeitsstudie [Definite Feasibility Study, DFS] wurden die „gemessenen“ und „angezeigten“ Ressourcen der Lagerstätte zu „gesicherten“ und „wahrscheinlichen“ Reserven umgewandelt. Dabei ergaben sich insgesamt 31,2 Mio. t „gesicherte“ und „wahrscheinliche“ Reserven mit durchschnittlich 0,3 % Lithium (Tab. 3).

Tab. 3: Reserven der Lagerstätte Zinnwald (nach Bacarona Lithium Plc, 2019).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithium (%)	LCE (Mt)
Gesichert (proven)	16,5	0,31	ca. 0,27
Wahrscheinlich (probable)	14,7	0,29	ca. 0,23
Total	31,2	0,30	ca. 0,5

Projektentwicklung und aktueller Stand

Im Jahre 2014 fertigte die SolarWorld AG eine Konzeptstudie [Scoping Study] für die Lagerstätte Zinnwald an. Die Studie wurde auf einer Ressource („gemessen“ und „angezeigt“) von 26,5 Mio. t mit 0,36 % Lithium angefertigt. Sie zeigte, dass das Projekt Zinnwald sowohl technisch als auch wirtschaftlich machbar sei. Basierend auf den Reserven [Tab. 3] präsentierte die Deutsche Lithium im Mai 2019 eine Machbarkeitsstudie, die bis zum September 2020 zweimal aktualisiert wurde [Bancora Lithium Plc, 2019; Zinnwald Lithium Plc., 2021]. In der Machbarkeitsstudie plant die Deutsche Lithium GmbH den Untertageabbau des Erzkörpers von Zinnwald. Demnach wird das Erz zunächst in einer Aufbereitungsanlage gebrochen, gemahlen und durch Magnetscheidung und Flotation konzentriert [Tadesse et al., 2019]. Anschließend wird das Zinnwalditkonzentrat in einer pyro- und hydrometallurgischen Anlage in mehreren Schritten (Rösten, Laugen, Ausfällen) zu batteriefähigem Lithiumfluorid (LiF) umgewandelt. Neben der Produktion von Lithiumfluorid wird auch noch Kaliumsulfat (K₂SO₄) für die Düngemittelindustrie gewonnen. Die Lebenszeit des Bergwerks wird auf 30 Jahre geschätzt. Die jährliche Bergbauproduktion beträgt 570.000 t Erz mit einer jährlichen Produktion von Lithiumfluorid von 5.112 t. Laut Machbarkeitsstudie ist das Projekt wirtschaftlich. Der Investitionsbedarf (CAPEX) beträgt 159 Mio. € und die Betriebskosten (OPEX) bis zur Produktion von Lithiumfluorid sind 13.058 €/t. Auf der Grundlage eines Preises für Lithiumfluorid von 22.000 €/t ist der Kapitalwert (NPV) des Projektes mit 8 % Abzinsung 428 Mio. € vor Steuern. Das Genehmigungsverfahren, inklusive Umweltverträglichkeitsprüfung, wurde 2017 abgeschlossen und die Deutsche Lithium hat eine Bergbaulizenz für Zinnwald erhalten, die bis Ende 2047 gültig ist [Zinnwald Lithium Plc, 2021]. Nach der Fertigstellung der Machbarkeitsstudie untersucht die Deutsche Lithium, ob der Produktion von Lithiumfluorid die Produktion von Lithiumhydroxid vorzuziehen wäre. Gleichzeitig steht das Unternehmen in Verhandlungen mit potentiellen Abnehmern für Lithiumfluorid und Investoren für die Entwicklung der Lagerstätte Zinnwald [Zinnwald Lithium Plc, 2021]. Als möglicher Start der Produktion in Zinnwald wird 2023 angegeben.

4.3.3 Cinovec, Tschechien – European Metals Holdings Ltd

Lage

Das Cinovec-Projekt befindet sich im Südosten des Projekts Zinnwald in Tschechien. Es befindet sich 100 km nordwestlich von Prag [Abb. 11, Kap. 4.3.2].

Projektgeologie

Das Lithiumprojekt Cinovec in Tschechien ist dem Projekt Zinnwald auf deutscher Seite geologisch sehr ähnlich. Cinovec ist ebenfalls an Greisen in der Kuppel des Zinnwald-Cinovec Granits gebunden.

Geschichte und Exploration

Wie Zinnwald hat Cinovec eine lange Bergbaugeschichte, die sogar bis ins 13. Jahrhundert zurückreicht [European Metals Holdings Ltd, 2015]. Seit den 1940er Jahren wurde in Cinovec in einem Untertagebergbau Wolfram und Zinn gewonnen. Nach der Auflösung der ehemaligen Sowjetunion und wegen fallender Metallpreise wurde das Bergwerk 1993 geschlossen und im Jahr 2000 das Gelände saniert. Im Jahr 2012 erwarb European Metals eine 100%ige Beteiligung an den Explorationsrechten für das Projektgebiet Cinovec zusammen mit einer umfangreichen Datenbank historischer Explorationsdaten. Seither hat das Unternehmen 30 weitere Kernbohrungen mit einer durchschnittlichen Länge von jeweils 400 m abgeteuft, durch die die historischen Explorationsdaten validiert wurden. Basierend auf dem Bohrprogramm und den validierten Explorationsergebnissen erstellte das Unternehmen im Jahre 2012 eine erste Vorratsberechnung nach JORC, die 2015, 2017 sowie 2021 aktualisiert wurde. Tabelle 4 zeigt die aktuelle Vorratsberechnung von 2021 [European Metals Holdings Ltd, 2021]. Daraus geht hervor, dass Cinovec eine „gemessene“ Ressource von 53,3 Mio. t mit 0,48 % Lithiumoxid, eine „angezeigte“ Ressource von 360,2 Mio. t mit 0,44 % Lithiumoxid sowie eine vermutete Ressource von 294,7 Mio. t mit 0,39 % Lithiumoxid hat. Insgesamt enthält die Lagerstätte Cinovec 6,9 Mio. t Lithiumkarbonatäquivalent (LCE).

Tab. 4: Ressourcen der Lagerstätte Cinovec (European Metals Holdings Ltd, 2021).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithium (%)	Lithium-oxid (%)	LCE (Mt)	Wolfram (%)	Zinn (%)
Gemessen (measured)	53,3	0,22	0,48	0,64	0,02	0,08
Angezeigt (indicated)	360,2	0,20	0,44	3,88	0,02	0,05
Vermutet (inferred)	294,7	0,18	0,39	2,87	0,02	0,05
Total	708,2	0,20	0,42	7,39	0,05	0,04

Projektentwicklung und aktueller Stand

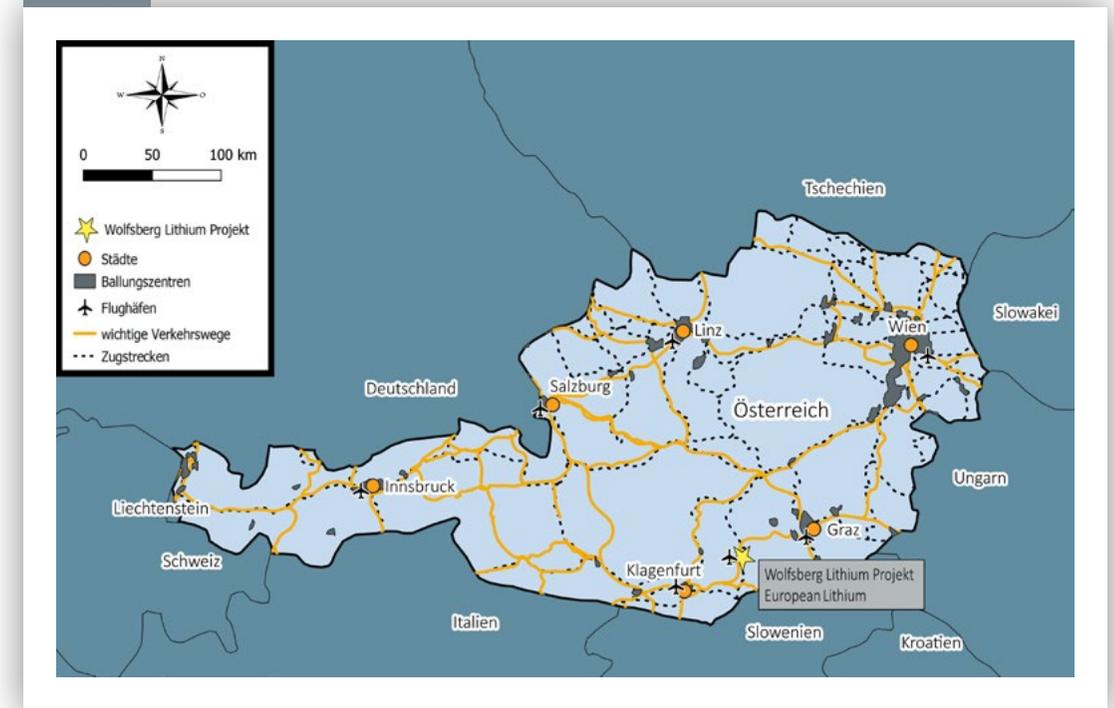
Im Jahr 2015 erstellte das Unternehmen eine Konzeptstudie (Scoping-Study), die hervorhob, dass die Lagerstätte Cinovec aufgrund ihrer Größe, ihres Gehalts und ihrer Lage ein sehr attraktives Entwicklungsprojekt ist. Deshalb wurde empfohlen, eine weiterführende Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS) anzufertigen. Diese Vormachbarkeitsstudie wurde im Jahre 2017 vorgelegt. Sie basierte auf rund 10 % der damals „angezeigten“ Ressourcen (34,5 Mio. t) und ging davon aus, dass Cinovec untertage mit einer jährlichen Bergbauproduktion von 1,7 Mio. t abgebaut wird (European Metals Holdings, 2017). Die geplante Lebenszeit des Bergwerks beträgt 21 Jahre. Grundsätzlich wird das Erz nach dem Abbau und dem untertägigen Brechen in einer Aufbereitungsanlage gemahlen und durch Magnetscheidung konzentriert. Anschließend wird das Zinnwalditkonzentrat in einer metallurgischen Anlage in mehreren Schritten (Rösten, Laugen, Ausfällen) zu batteriefähigem Lithiumkarbonat umgewandelt. Laut der Vormachbarkeitsstudie würde Cinovec so jährlich 20.800 t Lithiumkarbonat produzieren. Neben dem Lithiumkarbonat produziert Cinovec ein Zinn-Wolframkonzentrat. Im Jahre 2019 veröffentlichte European Metals eine aktualisierte Vormachbarkeitsstudie, in der aufgezeigt wird, dass das Lithiumkarbonat durch Kalkzugabe zu Lithiumhydroxid umgewandelt werden kann (S&P Global, 2019). 2021 wurde die Vormachbarkeitsstudie erneut aktualisiert, nun wird angenommen, dass die Lebensdauer des Bergwerks 25 Jahre beträgt, jährlich 2,25 Mio. t Erz abgebaut und jährlich 29.386 t Lithiumhydroxid produziert werden können (European Metals, 2022a). Um den ökologischen Fußabdruck des Betriebs so klein wie möglich zu halten, werden die Aufbereitungsabgänge (Tailings) weitgehend entwässert und als Trockenstapel (dry stack) abgelagert. Dadurch wird die Größe des Schlammteichs (Tailings Storage Facility) stark reduziert. Die erste Vormachbarkeitsstudie von 2017 sowie darauffolgende bestätigten, dass das Projekt wirtschaftlich machbar ist. Laut der aktualisierten Vormachbarkeitsstudie (2021) beträgt der Investitionsbedarf (CAPEX) 644 Mio. US\$ und die Betriebskosten (OPEX) bis zur Produktion von Lithiumhydroxid (unter Berücksichtigung der Erlöse aus dem Verkauf des Zinn-/Wolframkonzentrates) 5.567 US\$/t (European Metals, 2022a). Auf der Grundlage eines Preises von 17.000 US\$/t für Lithiumhydroxid wird der Kapitalwert (NPV) des Projektes (mit 8% Abzinsung) mit 1.938 Mio. US\$ nach Steuern angegeben (European Metals, 2022a). European Metals Holdings hat als strategische Partner den tschechischen Energieversorger CEZ Group und EIT InnoEnergy gewonnen. Das Unternehmen hat sich mit 29 Mio. Euro am Projekt beteiligt und EIT InnoEnergy unterstützt das Unternehmen bei der Suche nach Abnehmern des Lithiumkarbonats sowie bei der Finanzierung des Projektes. Schließlich hat European Metals die deutsche SMS Group für die Planung, das Beschaffungswesen und den Bau (engineering – procurement- construction EPC) der Aufbereitungsanlage für Lithium gewonnen (European Metals, 2022b). Analysten erwarten den Beginn der Produktion in Cinovec für 2024 (S&P Global, 2021a).

4.3.4 Wolfsberg, Österreich – European Lithium Ltd

Lage

Das Wolfsberg Lithiumprojekt befindet sich in Österreich, 270 km südwestlich von Wien, zwischen Klagenfurt und Graz. Das Projekt ist circa 50 km von der Stadt Graz entfernt (Abb. 12).

Abbildung 12



Lage des Wolfsberg Lithiumprojekts (nach European Lithium Ltd, 2021).

Projektgeologie

Geologisch betrachtet besteht dieses Lithiumprojekt aus mehreren, parallel verlaufenden, spodumenführenden Pegmatiten, die bis 300 m lang und mehrere Zehnermeter mächtig sind. Die Nebengesteine sind quarzreiche Glimmerschiefer und Amphibolite (Lücke und Ucik, 1986).

Geschichte und Exploration

Wolfsberg wurde 1981 von Minerex, einem staatlichen Unternehmen Österreichs, entdeckt. Nach umfangreichen Explorationstätigkeiten, inklusive 17.000 m Kernbohrungen und 1.400 m untertägigen Auffahrungen, erstellte Minerex im Jahre 1987 eine Machbarkeitsstudie (Definite Feasibility Study, DFS). Auf Grund des damals geringen Bedarfs an Lithium entschied die österreichische Regierung jedoch, das Projekt nicht weiterzuentwickeln.

1988 wurde das Projekt an die Bleiberger Bergwerksunion (BBU), ebenfalls ein staatliches Unternehmen, übertragen. Die BBU wurde 1991 geschlossen und das Projekt wurde an die Kärntner Montanindustrie GmbH (KMI), einem privaten Bergbauunternehmen, verkauft. KMI hielt die zugehörigen Explorationslizenzen aufrecht und im Jahre 2011 wurde KMI die Abbaulizenz erteilt. Noch im selben Jahr erwarb die an der Australian Securities Exchange (ASX) gelistete Global Strategic Metals („GSM“) sowie die Exchange Minerals über ihre gemeinsame Tochtergesellschaft ECM Lithium AT GmbH das Projekt von KMI. Im Jahre 2014 beschlossen die GSM Aktionäre die Börsennotierung an der Australian Securities Exchange (ASX) in Sydney zu löschen und das Wolfsberg Projekt dem ausgegründeten Unternehmen European Lithium Ltd zu übertragen. Die European Lithium Ltd ist seit 2016 an der ASX gelistet (European Lithium, 2021a). Nach dem Erwerb von Wolfsberg hatte GSM/European Lithium zwischen 2014 und 2017 weitere Bohrungen abgeteuft und die Explorationsdaten, Kernbohrungen und Beprobungen unter Tage von Minerex validiert. Basierend auf diesen Arbeiten präsentierte die European Lithium 2017 eine Vorratsberechnung nach JORC. Tabelle 5 zeigt, dass Wolfsberg eine „gemessene“ Ressource von 2,86 Mio. t mit 1,28 % Lithiumoxid sowie eine „angezeigte“ Ressource von 3,44 Mio. t mit 1,08 % Lithiumoxid hat (European Lithium, 2018).

Tab. 5: Ressourcen der Lagerstätte Wolfsberg (Stand 2017, nach: European Lithium Ltd, 2018a; Update der Ressourcen in European Lithium, 2022).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithiumoxid (%)	LCE (Mt)
Gemessen (measured)	2,86	1,28	0,09
Angezeigt (indicated)	3,44	1,08	0,09
Vermutet (inferred)	4,68	0,78	0,09
Total	10,98	1,00	0,27

Projektentwicklung und aktueller Stand

Auf der Grundlage der „gemessenen“ und „angezeigten“ Ressourcen von 2017, erstellte European Lithium eine Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS), die 2018 veröffentlicht wurde und die Machbarkeit des Projektes bestätigt (European Lithium Ltd, 2018b). In der Vormachbarkeitsstudie wird davon ausgegangen, dass der Erzkörper mit einer jährlichen Bergbauproduktion von 620.000 t unter Tage abgebaut wird. Die Lebensdauer des Bergwerkes wird mit 12 Jahren angegeben (European Lithium Ltd, 2018b). Im Zuge der Studie wurden die Ressourcen zu Reserven umgewandelt (Tab. 6).

Tab. 6: Reserven der Lagerstätte Wolfsberg (Stand 2017, nach: European Lithium Ltd, 2018a).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithiumoxid (%)	LCE (Mt)
Gesichert (proven)	4,32	0,69	ca. 0,07
Wahrscheinlich (probable)	3,12	0,75	ca. 0,06
Total	7,44	0,71	ca. 0,13

Durch die untertägige Gewinnungsmethode wird das Erz zu 40 % verdünnt, da viel Nebengestein mit abgebaut werden muss. Deshalb wird das Erz nach dem Abbau untertägig gebrochen und vorsortiert, um es wieder für die Aufbereitungsanlage anzureichern. In der Aufbereitungsanlage wird das Material gemahlen und in mehreren Prozessschritten Glimmer abgetrennt. Anschließend wird das spodumenreiche Material flotiert und jährlich 55.400 t Spodumenkonzentrat mit 6 % Lithiumoxid erzeugt (European Lithium Ltd, 2018a). Die Abgänge werden danach nochmals flotiert, um verkaufsfähige Feldspat- und Quarzkonzentrate zu gewinnen. Das Spodumenkonzentrat wird in eine nahegelegene chemische Anlage südlich von Wolfsberg transportiert. Dort wird es in mehreren pyro- und hydrometallurgischen Schritten (Rösten, Laugen, Ausfällen) zu Lithiumhydroxid umgewandelt. Laut der Vormachbarkeitsstudie würden in Wolfsberg jährlich 8.400 t Lithiumhydroxid produziert werden. Um den ökologischen Fußabdruck des Betriebs so klein wie möglich zu halten, werden sämtliche Aufbereitungsabgänge als Verfüllmaterial für den untertägigen Abbau verwendet.

Aus der Vormachbarkeitsstudie geht die positive Wirtschaftlichkeit des Projekts Wolfsberg hervor. Der Investitionsbedarf (CAPEX) ist mit 424 Mio. US\$ angegeben und die Betriebskosten bis zur Produktion von Lithiumhydroxid (unter Berücksichtigung der Erlöse der Nebenprodukte Quarz und Feldspat) betragen 6.561 US\$/t (European Lithium Ltd, 2018). Bei einem Preis von 18.350 US\$/t

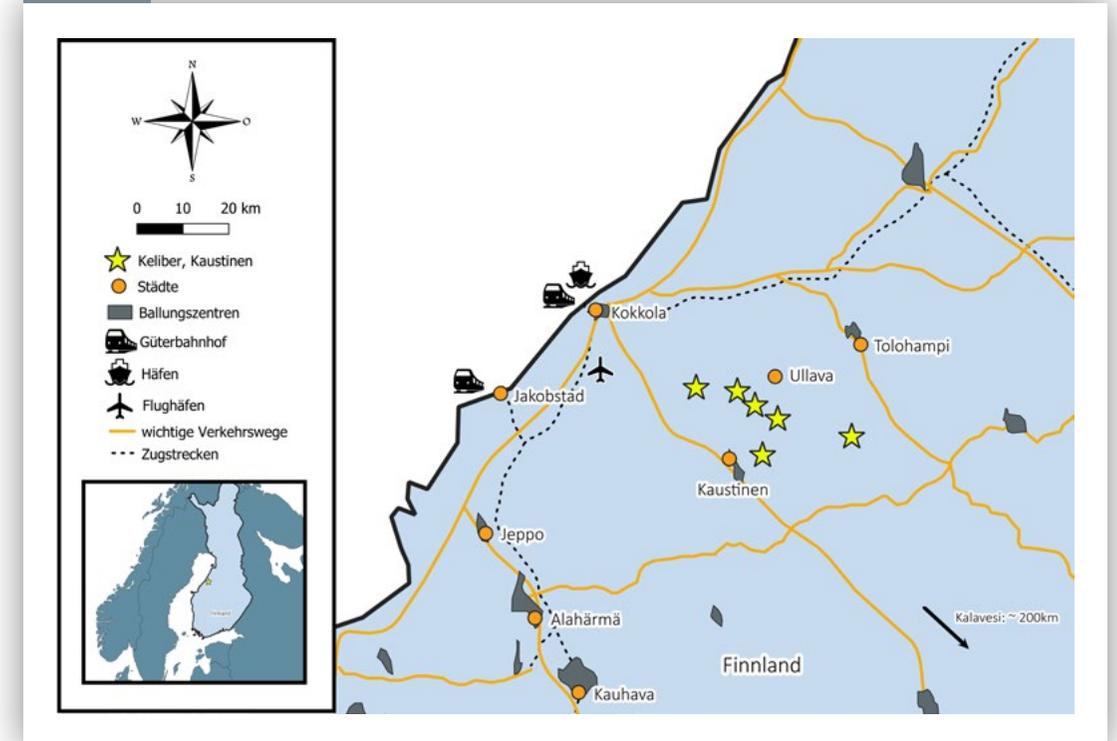
für Lithiumhydroxid beträgt der Kapitalwert (NPV) bei 8 % Abzinsung 339,4 Mio. US\$ vor Steuern [European Lithium Ltd, 2018]. European Lithium erstellt derzeit eine bankfähige Machbarkeitsstudie [Definite Feasibility Study, DFS]. Im Zuge der Studie werden die Vorräte vergrößert, um eine jährliche Bergbauproduktion von 800.000 t zu gewährleisten und die jährliche Produktion von Lithiumhydroxid auf über 10.000 t zu steigern [European Lithium Ltd, 2021b]. Daneben werden weitere Aufbereitungstest sowie metallurgische Tests durchgeführt. Neben der Erstellung der bankfähigen Machbarkeitsstudie ist European Lithium in das Genehmigungsverfahren für den späteren Betrieb eingebunden. Für den Bergbaubetrieb wurde eine Grundlagenstudie [Baseline Studie] angefertigt. Laut Entscheidung der Bergbaubehörde ist für den Bergbaubetrieb keine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) notwendig. Die Umweltaspekte müssen aber im Bergbaurahmenplan beleuchtet werden. Für die chemische Anlage ist bis jetzt noch keine Grundlagenstudie [Baseline Studie] erstellt worden. Im Gegensatz zum Bergbaubetrieb benötigt die Errichtung und der Betrieb der chemischen Anlage aber eine UVP. Schließlich ist das Unternehmen dabei, mit mehreren europäischen Partnern die Projektfinanzierung zu erstellen und einen Abnahmevertrag von Lithiumhydroxid zu verhandeln. European Lithium nimmt an, dass mit der Produktion von Lithiumhydroxid im Jahre 2023 begonnen werden kann [European Lithium Ltd, 2021b].

4.3.5 Keliber, Finnland – Keliber Oy

Lage

Das Keliber Lithiumprojekt befindet sich im Gebiet von Kaustinen, Mittelösterbotten, Westfinnland. Es besteht aus sechs Projekten, die an Pegmatite gebunden sind: Emmes, Syväjärvi, Rapasaari, Outovesi, Länttä und Leviäkangas [Abb. 13].

Abbildung 13



Lage des Lithiumprojektes Keliber (nach, Keliber, 2019).

Projektgeologie

Im Gebiet von Kaustinen sind mehr als zehn Spodumen-Pegmatite bekannt, die bis 400 m lang und mehrere Zehnermeter mächtig sind. Die Nebengesteine der Pegmatite sind Glimmerschiefer, Metagrauwacken und Metavulkanite.

Geschichte und Exploration

Die Pegmatitvorkommen im Gebiet von Kaustinen sind schon seit den 1960er Jahren bekannt. Keliber begann 1999 dort zu explorieren. Die Arbeiten fokussierten sich auf Lättiä, Emmes und Jänislampi. Ab 2004 begann Keliber, Kernbohrungen in Lättiä abzuteufen. Zwischen den Jahren 2010 und 2019 teufte das Unternehmen auf den anderen Vorkommen Emmes, Syväjärvi, Rapasaari, Läviakangas und Outovesi Kernbohrungen ab. Parallel dazu, von 2003 bis 2012, explorierte der Geologische Dienst von Finnland (GTK) die Vorkommen von Läviakangas und Syväjärvi und entdeckte Rapasaari. Das Explorationsprogramm beinhaltete auch Kernbohrungen. Aus den Bohrdaten erstellte der GTK abschließend Vorratsabschätzungen für Läviakangas und Syväjärvi.

Momentan hat Keliber die Bergbaugenehmigung für Lättiä sowie Explorationslizenzen für Rapasaari, Syväjärvi, Outovesi, Emmes und Läviakangas. Die Beantragung der Bergbaugenehmigungen für Rapasaari und Syväjärvi ist im Gange. Im Jahre 2016 veröffentlichte Keliber eine erste Ressourcenabschätzung nach JORC für Syväjärvi, Rapasaari, Lättiä, und Outovesi. Danach erstellte Keliber im Jahre 2018 aus fast 50.000 Kernbohrmetern eine Ressourcenabschätzung nach JORC für alle fünf Projekte (Tab. 7). Die sechs Projekte weisen zusammen eine „gemessene“ Ressource von 4,11 Mio. t mit 1,24 % Lithiumoxid sowie eine „angezeigte“ Ressource von 9,38 Mio. t mit 1,15 % Lithiumoxid auf (Keliber, 2021a).

Tab. 7: Ressourcen der fünf fortgeschrittenen Lithiumprojekte (nach Keliber, 2021a).

Ressourcen (JORC)	Syväjärvi		Rapasaari		Lättiä		Outovesi		Emmes		Läviakangas		Total		
	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %	
Gemessen (measured)	1,54	1,33	2,35	1,09	0,42	1,09	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	4,31	1,24	k.A.
Angezeigt (indicated)	1,17	1,07	5,76	0,96	0,91	1,02	1,43	1,08	1,22	1,14	0,19	1,14	9,38	1,15	k.A.
Sub-Total	2,71	1,22	8,11	1,00	1,328	1,04	0,281	1,43	1,08	1,22	0,19	1,14	13,689	1,07	0,36
Vermutet (inferred)	0,12	0,79	1,54	0,91	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,28	0,90	0,90	1,93	0,90	k.A.
Total	2,83	2,01	9,64	1,91	1,33	1,04	0,28	1,43	1,08	1,22	0,47	2,04	15,62	1,97	0,42

Projektentwicklung und aktueller Stand

Basierend auf den Ressourcen von 2016 erstellte Keliber eine Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS). Die Studie zeigt, dass das Lithiumprojekt großes wirtschaftliches Potential besitzt. Daraufhin entschloss sich das Unternehmen für das Projekt eine bankfähige Machbarkeitsstudie (Definite Feasibility Study, DFS) anzufertigen. Die bankfähige Machbarkeitsstudie wurde auf der Grundlage der Ressourcen von 2018 (Tab. 7) erstellt und im Jahre 2019 veröffentlicht (Keliber Oy, 2019). Im Zuge der Studie wurden die Ressourcen zu Reserven umgewandelt (Tab. 8).

Tab. 8: Reserven der fünf Lithiumprojekte von Keliber (nach Keliber Oy, 2021a).

Ressourcen (JORC)	Syväjärvi		Rapasaari		Lättiä		Outovesi		Emmes		Total		
	Mt	Li ₂ O %	Mt	Li ₂ O %									
Gesichert (proven)	1,433	1,18	2,420	0,97	0,41	0,94	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	4,264	1,04	0,11
Wahrscheinlich (probable)	0,491	0,97	5,790	0,85	0,7	0,86	0,22	1,06	0,86	1,01	8,038	0,88	0,17
Total	1,92	1,13	8,21	0,89	1,09	0,89	0,22	1,06	0,86	1,01	12,30	0,94	0,28

Laut der bankfähigen Machbarkeitsstudie wird das Erz in Syvjäarvi und Outovesi im Tagebau und in Emmes untertägig gewonnen. In Lättiä und Rapasaari wird das Erz sowohl im Tagebau als auch untertägig abgebaut. Die Lebenszeit der fünf Bergwerke soll insgesamt 13 Jahre betragen und die jährliche Bergbauproduktion wird 574.000 t Erz sein [Keliber, 2019]. Das Erz wird noch im Bergbaubetrieb gebrochen und zur Aufbereitungsanlage nach Kalavesi transportiert. Dort wird das grob gebrochene Erz in eine feinere Fraktion gebrochen und anschließend gemahlen [Keliber Oy, 2019]. Danach folgt eine Magnetscheidung. Letztendlich wird das Erz flotiert, um jährlich 113.000 t Spodumenkonzentrat mit 4,5 % Lithiumoxid zu erzeugen [Keliber, 2019]. Das Spodumenkonzentrat wird in die chemische Weiterverarbeitung in Kokkola transportiert, wo es mittels mehrerer pyro- und hydrometallurgischer Schritte (Rösten, Laugen, Ausfällen) zu Lithiumhydroxid umgewandelt wird. Laut der bankfähigen Machbarkeitsstudie wird Keliber jährlich rund 12.000 t Lithiumhydroxid aus dem eigenen Spodumenkonzentrat produzieren.

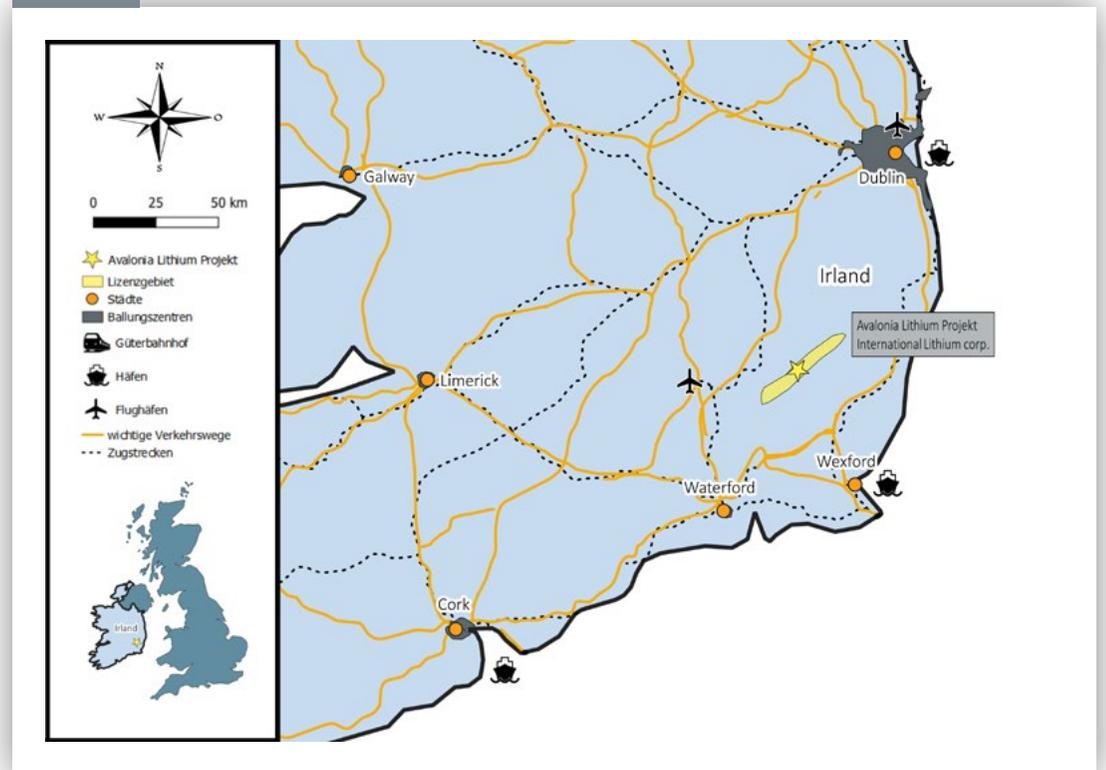
Die bankfähige Machbarkeitsstudie bestätigt die wirtschaftliche Machbarkeit des Projektes. Der Investitionsbedarf (CAPEX) beträgt 313 Mio. Euro. Die Betriebskosten (OPEX) bis zur Produktion von Lithiumhydroxid belaufen sich auf 4.541 Euro/t. Bei einem durchschnittlichen Preis für Lithiumhydroxid von ca. 12.000 €/t ist der Kapitalwert (NPV) des Projektes bei einer Abzinsung von 8 % 510 Mio. Euro vor Steuern [Keliber, 2019].

Aktuell ist das Unternehmen dabei, durch weitere Bohrprogramme die Reserven zu erhöhen, um letztendlich die jährliche Produktion von Lithiumhydroxid von 12.700 t auf 15.000 t zu steigern [Keliber, 2021]. Im Februar 2021 ging Keliber eine Partnerschaft mit dem südafrikanischen Bergbauunternehmen Sibanye-Stillwater ein [Keliber, 2021b]. Das Unternehmen wird Keliber unterstützen, sein Lithiumprojekt weiterzuentwickeln. Mit 40 Mio. Euro wird Sibanye-Stillwater unter anderem die Vergrößerung von Reserven, die Aktualisierung der bankfähigen Machbarkeitsstudie sowie den Bau von Infrastruktur finanzieren. Schließlich hat Keliber die Unternehmung Sweco Industry Oy als Engineering – Procurement- Construction (EPC) Partner ausgewählt. Sweco Industry ist verantwortlich für die Planung, die Beschaffung und die Bauleitung für das Lithiumprojekt. Nach Angaben von Keliber wird mit der Produktion von Lithiumhydroxid im Jahre 2025 begonnen [Keliber, 2021b].

4.3.6 Avalonia, Irland – International Lithium Corp.

Das Lithiumprojekt Avalonia befindet sich im Südosten von Irland, 80 km südlich von Dublin [Abb. 14]. Im Projektgebiet von Avalonia sind über eine Distanz von 50 km mehrere Spodumen-Pegmatit-Vorkommen vorhanden. Die Pegmatite sind SW-NE streichende, bis zu 20 m mächtige Gänge, deren Nebengesteine Granite oder Metasedimente sind [Barros et al, 2016]. Das Avalonia-Projekt gehört einem Joint Venture Unternehmen, das zu 55 % im Besitz von Ganfeng Lithium aus China und zu 45 % von International Lithium Corporation [Kanada] ist. Avalonia ist im Stadium der Exploration und momentan werden die Pegmatite Aclare und Moylisha durch Bohrungen untersucht. Erste Ergebnisse der Bohrproben deuten auf hohe Lithiumoxidgehalte in den Pegmatiten hin [International Lithium Corporation, 2021].

Abbildung 14



Lageplan des Avalonia Projekts [nach International Lithium Corporation, 2021].

4.4 Projekte zur Lithiumgewinnung aus sedimentären Gesteinen Steinmüller, K., Steiger, K., Reich, R.

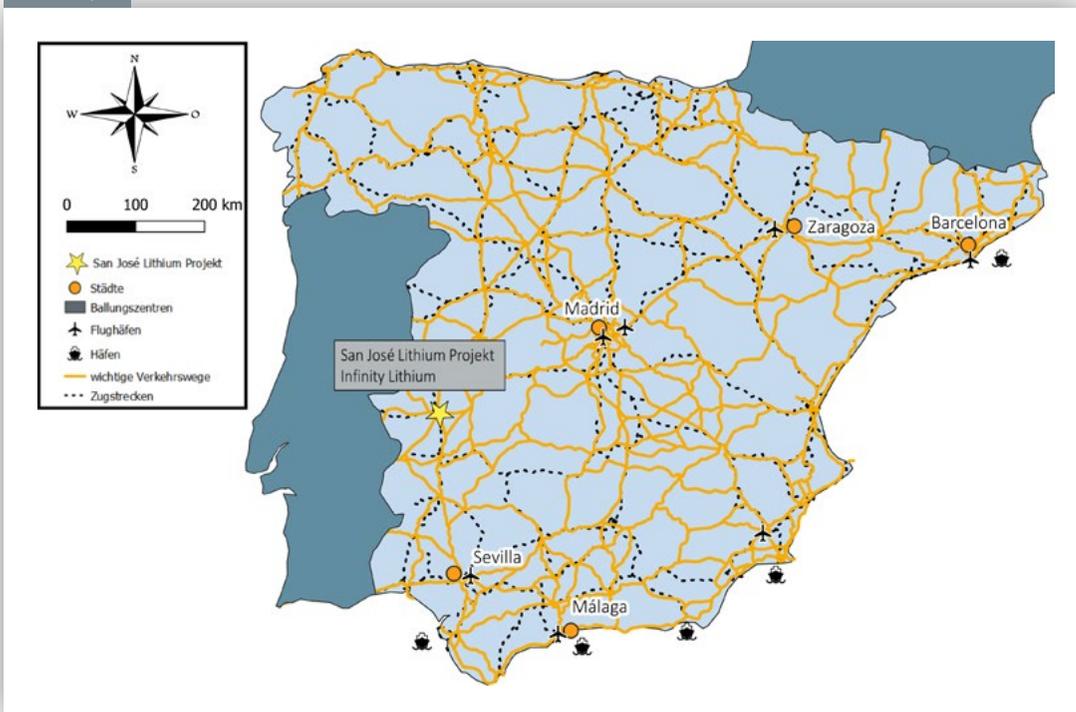
Es gibt derzeit zwei Projekte zur Gewinnung von Lithium aus sedimentären Festgesteinen in Europa. Das Projekt der Infinity Lithium Corporation Ltd in San José, Spanien und das derzeit allerdings gestoppte Jadar Lithiumborat-Projekt von Rio Tinto in Serbien.

4.4.1 San José, Spanien – Infinity Lithium Corporation Ltd

Lage

Das Lithiumprojekt San José befindet sich in der westspanischen Region Extremadura. Es liegt in der Nähe der Stadt Cáceres, ungefähr 280 km westlich von Madrid (Abb. 15).

Abbildung 15



Lage des Infinity Projekts San José (nach Infinity Lithium, 2021a).

Projektgeologie

Da Lithium hauptsächlich in San José / Valdeflores in Glimmern von Tonsteinen, bzw. psammopelitischen Sedimenten (Pesquera et al., 2020) enthalten ist, wird dieses Vorkommen den sedimentären Lagerstätten zugeordnet. Jedoch ist die Geologie aufgrund der assoziierten Gesteine sehr komplex und die Entstehung ist Gegenstand aktueller Forschung (Antunes et al., 2013; Pesquera et al., 2020). Obwohl die Sedimente die lithiumführende Lithologie repräsentieren, handelt es sich hier um eine komplexe Vergesellschaftung von Sedimenten, hydrothermalen Gängen sowie Leukograniten (Pesquera et al., 2020).

Geschichte und Exploration

San José war früher ein Zinnbergwerk, welches in den 1960er Jahren stillgelegt wurde. Im Gebiet von San José wurde bereits in den 1990er Jahren Lithiumexploration durchgeführt. Ein spanisches Unternehmen teufte damals mehrere Bohrungen ab und erstellte 1991 eine Machbarkeitsstudie (Definite Feasibility Study, DFS) für die Produktion von Lithiumkarbonat vor Ort. Im Jahr 2015 gewann die Infinity Lithium Corporation Ltd (Infinity), früher Plymouth Minerals, zusammen mit dem Projektpartner Valoriza Minería eine öffentliche Ausschreibung für die Entwicklung des Lithiumprojekts San José. Infinity hält 75 % und Valoriza Minería 25 % der Anteile des Projektes. In den Jahren 2016 und 2017 führte Infinity ein umfangreiches Bohrprogramm mit 52 Bohrungen und insgesamt 10.500 Bohrmeter durch. Durch ein erweitertes Explorationsprogramm hatten sich die Vorräte von San José bis 2018 auf insgesamt 111 Mio. t Ressourcen („vermutet“ und „angezeigt“) mit durchschnittlich 0,61 % Lithiumoxid erhöht (Tab. 9). Insgesamt enthält das Vorkommen 1,7 Mio. t Lithiumkarbonat-äquivalent (LCE) (Infinity Lithium, 2021a).

Tab. 9: Erzvorräte des Projektes San José (Stand 2018, nach Infinity Lithium, 2021a).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithium (%)	Lithiumoxid (%)	Zinn (%)	LCE (Mt)
Angezeigt (indicated)	59,0	0,29	0,63	0,02	ca. 0,92
Vermutet (inferred)	52,2	0,27	0,59	0,02	ca. 0,76
Total	111,2	0,28	0,61	0,02	ca. 1,7

Projektentwicklung und aktueller Stand

Basierend auf 28,5 Mio. t angezeigten Ressourcen fertigte Infinity im November 2018 zunächst eine Konzeptstudie [Scoping-Study] an [Infinity Lithium, 2018]. In dieser ging Infinity davon aus, dass der Erzkörper von San José durch einen Tagebau abgebaut wird, um batteriefähiges Lithiumhydroxid zu gewinnen. Es wurde eine Lebenszeit des Bergwerks von 24 Jahren angenommen. Die jährliche Bergbauproduktion sollte sich auf 1,25 Mio. t Erz belaufen, die jährliche Lithiumhydroxidproduktion wurde mit 15.000 t angegeben [Infinity Lithium, 2018]. Im August 2019 folgte eine Vormachbarkeitsstudie [Pre-Feasibility Study, PFS], die die Ergebnisse der Konzeptstudie bestätigte. Die Vormachbarkeitsstudie wurde auf der Basis von 37,2 Mio. t angezeigter Ressourcen angefertigt und die Lebenszeit des Bergbaubetriebes entsprechend mit 30 Jahren angenommen. Die Tagebauförderung sollte 19 Jahre, mit einer jährlichen Gesamtförderung von 1,25 Mio. t, betragen, wobei ein Teil der Bergbauförderung direkt der Aufbereitung zugeführt und der Rest auf Halde gelegt würde. Nach Tagebauschließung wurde vorgesehen, die Produktion aus Haldenmaterial noch 11 Jahre fortzuführen [Infinity Lithium, 2019]. Die jährliche Produktion von 15.000 t Lithiumhydroxid wurde als unverändert angegeben. Die Vormachbarkeitsstudie unterstrich die Wirtschaftlichkeit und stellte die Nachhaltigkeit des Projektes heraus. So hat San José, im Vergleich mit ähnlichen Betrieben, niedrige Produktionskosten für Lithiumhydroxid, zum anderen ist das gewählte Verfahren zur Aufbereitung des Erzes und zur Produktion des Lithiumhydroxids weniger umweltbelastend und hat geringere CO₂ Emissionen als die Verfahren, die in China zur Lithiumhydroxid-Produktion angewendet werden [Infinity Lithium, 2019].

Parallel zur Erarbeitung der Konzeptstudie und Vormachbarkeitsstudie wurden von Infinity die nötigen Umweltstudien durchgeführt, die das spanische Recht fordert, um eine Genehmigung für die Inbetriebnahme des Lithiumabbaus in San José zu erlangen [Infinity Lithium, 2019]. Nach einer Grundlagenstudie [Baseline Study], die über eine Zeitspanne von einem Jahr durchgeführt wurde, wurde eine Umweltverträglichkeitsstudie angefertigt und eingereicht, die alle geforderten Aspekte der Entwicklung, des Betriebs und der Schließung eines Bergbauprojektes abdeckt. Mit einer endgültigen Genehmigung, die erst nach einer öffentlichen Konsultation zu erwarten ist, wird im dritten Quartal 2022 gerechnet [Infinity Lithium, 2019]. Der Produktionsstart von San José ist für 2025 vorgesehen [Infinity Lithium, 2019].

Im Zuge des Genehmigungsverfahrens für den Tagebau und der Prozessanlage kam es zu Bürgerprotesten gegen das Projekt San José. Aufgrund dessen hat das Unternehmen das Abbauverfahren geändert und die Planung von einem Tagebau auf ein Untertagebergwerk umgestellt. Dazu wurde im Jahr 2021 eine Konzeptstudie für das neue Konzept verfasst. Gemäß der Studie ist der Untertagebau mit einer integrierten Prozessanlage ebenfalls wirtschaftlich. Die Mine soll 26 Jahre bestehen und die Förderung jährlich 19.480 t Lithiumhydroxid ermöglichen. Der Investitionsbedarf [CAPEX] verdoppelt sich dadurch auf 532 Mio. US\$ und die Betriebskosten [OPEX] bis zur Produktion von Lithiumhydroxid werden sich auf 6.399 US\$/t belaufen. Unter der Annahme eines langfristigen Preises von 17.000 US\$/t für Lithiumhydroxid erzielt das Projekt einen Kapitalwert [NPV] bei einer 10 % Abzinsung von 811 Mio. US\$ vor Steuern [Infinity Lithium, 2021a].

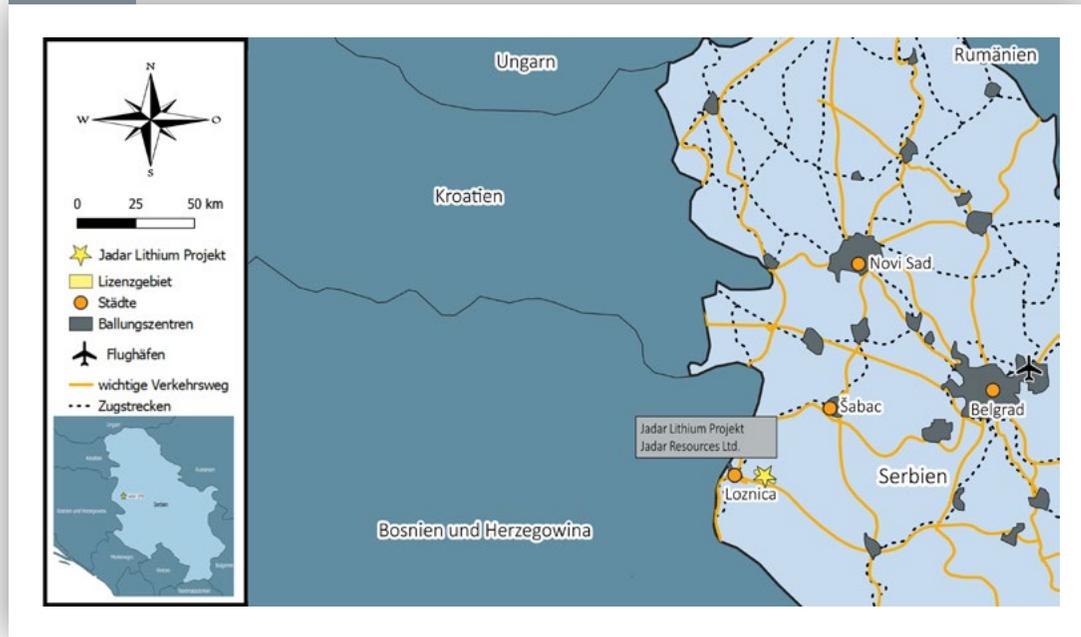
Im Mai 2020 stellte Infinity sein San José Projekt der Europäischen Union und der Europäischen Investmentbank [EIB] vor. Daraufhin wurde Infinity im Juni 2020 umfangreiche finanzielle Unterstützung von EIT InnoEnergy zugesagt. Die zugesagten Mittel von EIT InnoEnergy sollen folgendermaßen verwendet werden: [1] Realisierung der ersten Phase der Pilotanlage, [2] Unterstützung beim „Fundraising“ für die weitere Finanzierung, [3] Unterstützung bei der Suche von Abnehmern für das Lithiumhydroxid und [4] Unterstützung bei der Beschaffung der notwendigen Genehmigung für das Projekt sowie bei der strategischen Platzierung des Unternehmens in der europäischen Batterie-wertschöpfungskette. Zusätzlich hat Infinity vor Kurzem eine nicht bindende Absichtserklärung mit LG Energy Solution über die Abnahme von jährlich 10.000 t Lithiumhydroxid in den nächsten 5 Jahren unterzeichnet [Infinity Lithium, 2021b].

4.4.2 Jadar, Serbien – Rio Tinto

Lage

Das Jadar Lithiumborat-Projekt von Rio Tinto im Jadarbecken liegt im Westen Serbiens in der Nähe der Stadt Loznica (Abb. 16).

Abbildung 16



Lage des Jadar Projekts (nach Rio Tinto, 2020).

Projektgeologie

Die Lagerstätte erstreckt sich auf einem Gebiet von ca. 3 km auf 2,5 km und liegt in einer Tiefe von 100 m bis 720 m, in einer 400 m bis 500 m mächtigen lakustrinen Sedimentsequenz. Diese wird von kalkhaltigen Ton-, Silt- und Sandsteinen dominiert. Die Sedimente fallen leicht nach Norden ein, sind von Störungen durchzogen und überlagern diskordant ältere Gesteine. In den Sedimenten sind schichtförmige Linsen eingelagert, die das lithiumhaltige Mineral Jadarit und Natriumborate enthalten. Generell können eine obere Boratzone und drei darunterliegende Jadaritzonen (obere, mittlere und untere) unterschieden werden (Rio Tinto 2020).

Geschichte und Exploration

Das Jadar Projekt wurde 2004 von Rio Tinto entdeckt und bis 2020 durch Bohrungen exploriert, um die Erzvorräte zu definieren. Insgesamt wurden über 500 Bohrungen, überwiegend Kernbohrungen, mit einer Gesamtlänge von 215 km abgeteuft. Im Jahr 2016 veröffentlichte Rio Tinto seine erste Vorratsberechnung nach JORC und aktualisierte diese im Jahr 2020 (Rio Tinto, 2020) (Tab. 10). Die Ressourcen von Jadar betragen 139,2 Mio. t mit einem Lithiumoxidgehalt von 1,78 % und einem Bortrioxid-Gehalt von 14,7 % (Rio Tinto, 2020).

Tab. 10: Ressourcen des Projektes Jadar (nach Rio Tinto, 2020).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithiumoxid (%)	Bortrioxid (%)	LCE (Mt)
Angezeigt (indicated)	55,2	1,68	17,9	ca. 2,3
Vermutet (inferred)	84,1	1,84	12,6	ca. 3,8
Total	139,2	1,78	14,7	ca. 6,1

Auf Grundlage der Ressourcen erstellte Rio Tinto eine Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS), die 2020 abgeschlossen wurde. Im Zuge der Studie wurden die Ressourcen in Reserven umgewandelt (Tab. 11). Die Lagerstätte umfasst 16,6 Mio. t Erzreserven mit einem Lithiumoxidgehalt von 1,81 % und einem Bortrioxidgehalt von 13,4 % (Rio Tinto, 2020).

Tab. 11: Reserven des Projektes Jadar (nach Rio Tinto, 2020).

Ressourcen (JORC)	Erzvorräte (Mt)	Lithiumoxid (%)	Bortrioxid (%)	LCE (Mt)
Wahrscheinlich (probable)	16,6	1,81	13,4	ca. 0,74
Total	16,6	1,81	13,4	ca. 0,74

Projektentwicklung und aktueller Stand

Die Vormachbarkeitsstudie zeigt, dass das Jadar-Projekt das Potenzial hat, sowohl batteriefähiges Lithiumkarbonat als auch Borsäure zu produzieren. Jadar wird aus einem Untertagebergwerk und industriellen Verarbeitungsanlagen sowie dazugehöriger Infrastruktur bestehen. Nach dem Abbau wird das Erz zu einem Jadaritkonzentrat aufbereitet und anschließend hydrometallurgisch zu Lithiumkarbonat, Borsäure und Natriumsulfat weiterverarbeitet. Die Lebenszeit des Gewinnungsbetriebes soll 40 Jahre betragen (Rio Tinto, 2021). Der Betrieb würde jährlich ca. 55.000 t batteriefähiges Lithiumkarbonat, 160.000 t Borsäure und 255.000 t Natriumsulfat als Nebenprodukt produzieren (Rio Tinto, 2021). Rio Tinto hat vor, den ökologischen Fußabdruck des Bergbaubetriebes so klein wie möglich zu halten und will keinen Schlammteich für die Aufbereitungs- und Prozessabgänge bauen. Es ist geplant, die groben Abgänge aus der Aufbereitung als Verfüllungsmaterial für das Bergwerk zu verwenden. Darüber hinaus werden die Rückstände des hydrometallurgischen Prozesses mit gefilterten Aufbereitungsabgängen vermischt, getrocknet und in einem Filterrückstandslager gestapelt. Rio Tinto hat bisher keine Informationen zur Wirtschaftlichkeit des Projektes veröffentlicht. Es wird jedoch berichtet, dass die Investitionen in den Gewinnungsbetrieb 2,4 Mrd. US\$ betragen sollen (Rio Tinto, 2021). 2020 gab Rio Tinto an, nach der Fertigstellung der Vormachbarkeitsstudie eine Machbarkeitsstudie zu erstellen (Rio Tinto, 2020). Aktuell ist das Projekt gestoppt, da die serbische Regierung aufgrund des Widerstands der Bevölkerung und von Umweltschützern den Raumplan zurückgezogen und die Genehmigungen für das Projekt widerrufen hat (Rio Tinto, 2022).

4.5 Umweltaspekte der Lithiumgewinnung aus Festgestein^{Slunitschek, K.}

Bei der Gewinnung von Lithium aus Festgestein entstehen vor allem durch den Wasser- und Flächenbedarf (bei Tagebau) sowie den CO₂-Ausstoß Umwelteinflüsse. Zusätzlich können die Entstehung und die Verbreitung von Stäuben eine Umweltbelastung darstellen. Der Ausbreitung von Stäuben wird häufig durch das Versprühen von Wasser entgegengewirkt, was sich in einem erhöhten Wasserverbrauch widerspiegelt. Während eine Vielzahl von wissenschaftlichen Studien den Wasserverbrauch bei der Lithiumgewinnung aus Sole untersuchen, ist der Wasserverbrauch der bergmännischen Gewinnung nur unzureichend untersucht. Dai et al. [2019] geben den Süßwasserbedarf für die Produktion von einer Tonne Lithiumkarbonat mit 39,6 m³ an, während nach Kelly et al. [2021] 62 m³ benötigt werden. Dabei werden 22 m³ für den Abbau und die Konzentratherstellung und 40 m³ für die Konzentratveredelung zu Lithiumkarbonat benötigt [Kelly et al., 2021].

Der Flächenbedarf ist neben der Erzkonzentration von der Art des Bergwerks (Tagebau, Untertagebau), der Abraummenge sowie der Aufbereitung und Lagerung des aufbereiteten Gesteins abhängig. Nach Drobe [2020b] ergibt sich der Flächenverbrauch bei übertägiger Gewinnung vor allem aus der Tagebaufläche und den Flächen für Halden und Absetzbecken für die Tailings. Dabei liegt der Flächenbedarf pro Tonne Lithiumkarbonat zwischen 4 – 13 m³. Bei untertätigem Abbau ergibt sich der Flächenbedarf vor allem aus Flächen für Halden und Absetzbecken. Dieser Bedarf kann durch die Lagerung oder die Verfüllung mit Abbau- und Produktionsrückständen in ausgeerzten Stollen reduziert werden, wie für das Jadar-Projekt geplant.

Der Energiebedarf der Lithiumgewinnung aus Erzgestein und Sole ist abhängig von der Lithiumkonzentration im Ausgangsgestein bzw. Salzwasser sowie der Aufbereitungstechnik. Während die Gewinnung aus Sole einen Energiebedarf von 13.142 MJ/t Lithiumkarbonat aufweist, werden für die bergmännische Gewinnung 175.230 MJ/t Lithiumkarbonat benötigt [Kelly et al., 2021]. Der große Unterschied lässt sich auf den hohen Energiebedarf für das Brechen und Mahlen sowie das Erhitzen des Gesteins zurückführen [Drobe, 2020b; Kelly et al., 2021]. Kelly et al. [2021] geben den daraus resultierenden CO₂-Ausstoß für die bergmännische Gewinnung mit 20,5 t CO₂-Äquivalent/t Lithiumkarbonat an, wohingegen Stamp et al. [2012] 2,27 t CO₂-Äquivalent/t Lithiumkarbonat und Roskill Information Services 9 t CO₂-Äquivalent/t Lithiumkarbonat [Globe Newswire 2020] angeben. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Studien beruhen auf unterschiedlichen Annahmen der zugrundeliegenden Berechnungsmodelle. In Bezug auf den Gesamtenergiebedarf und den Gesamtausstoß von Treibhausgasen einer Batterie, der anteilmäßig größten Lithiumverwendung, ist der Abbau nur für einen geringen Teil des gesamten CO₂-Austosses der Lithiumionenbatterie-Produktion verantwortlich [Romare und Dahlöf, 2017].



5. Lithium aus unkonventionellen Ressourcen in Europa

Neben der Gewinnung von Lithium aus magmatischen und sedimentären Festgesteinen gibt es auch Vorhaben, das Metall aus unkonventionellen Ressourcen wie Minenwässern, Ölförderwässern, Meerwasser, Salzstöcken und Geothermalwasser zu fördern. Dabei ist die Förderung von Lithium aus geothermischen Solen im industriellen Maßstab am weitesten fortgeschritten. Um einen umfassenden Einblick in die Forschung zu geben, werden im Folgenden Extraktionstechnologien und Projekte zur Lithiumextraktion aus Geothermalwasser sowie Projekte zur Förderung von Lithium aus Minenwässern, Ölförderwässern, Meerwasser und Salzstöcken beschrieben.

5.1 Lithium aus Geothermalwasser

5.1.1 Grundlagen und Extraktionsmethoden^{Slunitschek, K., Reich, R.}

In Europa sind Lithiumvorkommen in Geothermalwasser in Deutschland, Frankreich, England, Italien und Griechenland bekannt [TU Freiberg, 2013, Sanjuan et al., 2022]. Bei der Geothermie wird die in der Erde gespeicherte Wärme als Energiequelle für die Erzeugung von Wärme und/oder Strom genutzt [Stober, 2012]. Dazu werden Bohrungen in den Untergrund abgeteuft, wobei die Teufe vom geothermischen Gradienten (Temperaturanstieg pro 100 m Tiefe) im Untergrund und dem Nutzungsziel abhängt. Geologische und hydrogeologische Bedingungen bestimmen, ob die petrothermale oder die hydrothermale Geothermie angewendet wird. Bei der petrothermalen Geothermie wird die in den Gesteinen gespeicherte Wärme genutzt, in dem kaltes Wasser über eine Injektionsbohrung in den Untergrund eingespeist wird und sich dies durch den Wärmeübertrag vom Gestein aufs Wasser aufheizt [Stober 2020]. Über eine Förderbohrung wird das warme Wasser gefördert und die Wärme über einen Wärmetauscher entzogen, bevor das Wasser wieder in das Reservoir injiziert wird. Bei der hydrothermalen Geothermie werden heiße, im Untergrund vorhandene Fluide an die Oberfläche gepumpt und nach dem Wärmeübertrag wieder in diesen reinjiziert. Während bei der petrothermalen Geothermie ein Wasserkreislauf genutzt wird, wird bei der hydrothermalen Geothermie stets neues Wasser gefördert und die Reinjektionsbohrung muss möglichst weit von der Förderbohrung entfernt liegen, damit sich das reinjizierte, kalte Wasser nicht mit dem heißen Geothermalwasser mischen kann.

Da bei der petrothermalen Geothermie kein Geothermalwasser gefördert, sondern lithiumarmes Oberflächenwasser zirkuliert wird, kommen für die Lithiumextraktion nur hydrothermale Geothermiesysteme in Betracht. Der Lithiumgehalt sowie der gesamte Salzgehalt und die chemische Zusammensetzung des Geothermalwassers sind von der umgebenden Geologie abhängig. Exemplarisch kann dies an Geothermalwasser aus dem Süddeutschen Molassebecken verdeutlicht werden, dessen Lithiumkonzentration zwischen 0,01 mg/L und 162,00 mg/L bei Gesamtsalzgehalten von 0,37 – 74,80 g/L liegt [Stober, 2014]. Geothermalwasser im Oberrheingraben weist Lithiumkonzentrationen von 160 – 200 mg/L bei einem Gesamtsalzgehalt von 101 – 121 g/L auf [Sanjuan et al., 2016], während Fluide im Norddeutschen Becken 63 – 237 mg/L Lithium [Regenspurg et al., 2016; Sanjuan et al., 2022] bei Gesamtsalzgehalten zwischen 154,5 g/L und 285,5 g/L [Stober et al., 2014b] beinhalten.

Die herkömmliche Lithiumgewinnung aus Solen mittels Evaporation, wie sie im Lithiumdreieck Südamerikas angewendet wird, ist in weiten Teilen Europas aufgrund zu hoher Niederschläge oder zu geringer Sonneneinstrahlung nicht möglich. Aufgrund des meist großen Konzentrationsunterschieds von Lithium [mg/L] zur Gesamtsalzfracht [g/L] sind selektive Extraktionsverfahren notwendig, um Lithium mit möglichst wenig weiteren, unerwünschten Elementen, wie z. B. Magnesium oder Natrium zu gewinnen. Zusätzlich müssen geeignete Verfahren über eine schnelle Extraktionskinetik verfügen, um bei den teils hohen Volumenströmen in Geothermieanlagen (z. B. 50 – 80 L/s im Geothermiekraftwerk Insheim; Pfalzwerke Geofuture, 2021) eine großskalige Wasserrückhaltung zu vermeiden. Eine weitere Herausforderung ist der häufig im geförderten Formationswasser enthaltene Fluiddruck von mehreren Zehnern bar, der in der Geothermieanlage aufrechterhalten werden muss, um eine Ausfällung der Salzfracht zu vermeiden. Des Weiteren werden die 120 – 200°C [Sanjuan et al., 2016] heißen geförderten Formationswässer in der Geothermieanlage nicht vollständig abgekühlt, um mineralische Ausfällungen aus übersättigtem Geothermalwasser in der Verrohrung zu vermeiden. Aufgrund der vielfältigen Einflussparameter und Anforderungen ist die Eignungsfähigkeit unterschiedlicher Extraktionsmethoden standortabhängig.

Verglichen mit der Evaporation von Solen aus Salaren, bei der Lithium zuerst konzentriert, Verunreinigungen entfernt und anschließend als Karbonat oder Hydroxid ausgefällt wird, wird Lithium bei der Direktfällung direkt aus der Sole gewonnen. Die Direktfällung stellt eine günstige und wirtschaftliche Methode dar, die aufgrund niedriger technischer Anforderungen leicht umsetzbar ist [Zhang et al., 2019]. Der Einfluss des pH-Wertes, der Temperatur und der Spurenelementkonzentration auf das Fällungsreagenz bzw. das System spielen eine große Rolle [Zhang et al., 2019]. Effiziente Fällungsmethoden, die sich nur durch das verwendete Reagenz unterscheiden, sind die Karbonat-, Aluminat- und Magnesium-Salzausfällung sowie Co-Fällung von Borat und Phosphat [Zhang et al., 2019]. Die chemische Zusammensetzung der Sole entscheidet über die Art der Fällungsmethode. Solen mit hohem Magnesium-Lithium-Verhältnis [Mg/Li-Verhältnis] sind aufgrund der Ähnlichkeit beider Ionen mit höherem Aufwand aufzubereiten als Solen mit geringem Mg/Li-Verhältnis [Nie et al., 2017]. Bei hohem Mg/Li-Verhältnis muss zuerst Magnesium ausgefällt werden, bevor Lithium selektiv gewonnen werden kann [Zhang et al., 2019]. Jedoch wird bei der Fällung magnesiumreicher Phasen häufig Lithium mit ausgefällt, weshalb die nutzbare Lithiumausbeute um 20 – 30 % verringert ist [Zhang et al., 2019]. Dennoch werden meist kombinierte Extraktionsverfahren angewendet, um unerwünschte Nebenbestandteile wie Silizium, Bor, Magnesium, Eisen oder Kalzium mittels Zugabe von Natriumhydroxid (NaOH), Oxalsäure- oder Aluminiumchlorid zu entfernen und dadurch die Reinheit des Lithiumkonzentrats zu erhöhen [Zhang et al., 2019, Goldberg et al., 2021].

Für eine effiziente und selektive Lithiumextraktion gewinnen Membranverfahren, die Nanofiltration, Flüssigmembranen und Elektrodialyse umfassen, an Bedeutung [Gaikwad et al., 2011, Somrani et al., 2013, Choubey et al., 2017, Song et al., 2017, Wiśniewska et al., 2018, Meng et al., 2021]. Membranen können aus Polymeren, Keramiken oder Verbundwerkstoffen bestehen [Van der Bruggen, 2013] und besitzen eine unterschiedliche Permeabilität für Ionen, basierend auf deren Eigenschaften wie z. B. Ionenladung, -radius oder Diffusionsgeschwindigkeit [Sun et al., 2015]. Bei der Nanofiltration werden einwertige Kationen wie Lithium von zweiwertigen Kationen (z. B. Magnesium und Kalzium) getrennt. Das Verfahren ist allerdings untauglich für die Trennung von Lithium und Natrium und somit für viele Solen ungeeignet [Wen et al., 2006, Somrani et al., 2013]. Flüssigmembranen sind vor allem organische Verbindungen wie Nitrophenole, Polyetheraminderivate oder Kronenetherderivate, die ein großes Volumen lithiumreicher Lösung von einem kleineren Volumen,

lithiumarmer Lösung trennen [Sakamoto et al., 1987]. Dadurch wird Lithium gegen den osmotischen Druck transportiert und aus der initialen Lösung entfernt [Sakamoto et al., 1987].

Bei der Elektrodialyse werden die aufgrund ihrer Ladung unterschiedlichen Diffusionsraten ein- und zweiwertiger Ionen in einem elektrischen Feld genutzt [Choubey et al., 2017, Song et al., 2017]. Für diese Methode werden eine Anode, eine Kathode und ein Elektrolyt benötigt. Für die Elektroden können Eisenphosphat, Silber, Natriumthiosulfat oder Mangandioxid verwendet werden [Song et al., 2017, Peerawattuk and Bobicki, 2018]. Die Sole dient sowohl als Lithiumquelle als auch als Elektrolyt [Song et al., 2017, Peerawattuk and Bobicki, 2018]. Aufgrund des elektrischen Feldes laufen Redoxreaktionen zwischen Kathode und Anode ab, wodurch Lithium an der Kathode fixiert und selektiv aus der Lösung entfernt wird [Song et al., 2017]. Membranprozesse sind günstig und besitzen eine hohe Umweltverträglichkeit durch den Verzicht auf Säuren und andere Chemikalien [Choubey et al., 2017, Song et al., 2017]. Allerdings müssen die Solen vor der Anwendung verdünnt werden, da der osmotische Druck, der auf die Membranen wirkt, sonst zu hoch wäre [Wen et al., 2006, Somrani et al., 2013, Sun et al., 2015, Song et al., 2017]. Die elektrische Spannung muss außerdem so gewählt werden, dass keine Fällung von Verunreinigungen, wie Natrium, Magnesium oder Kalzium und Sulfat, verursacht wird [Gaikwad et al., 2011, Zhao et al., 2013]. Häufig wird die Selektivität für Lithium anderer Methoden mittels elektrochemischer Verfahren erhöht. Bei Anwendung von Membranverfahren werden Lithiumextraktionseffizienzen von 5 – 22 % erreicht [Reich et al., 2022].

Bei der Lösungsmittlextraktion, die auch als Flüssig-Flüssig-Extraktion bezeichnet wird, stehen zwei unmischbare Lösungen unterschiedlicher Dichte miteinander in Kontakt [Rydberg, 2004]. Diese beiden Lösungen können beispielsweise eine lithiumreiche Sole und eine organische Lösung sein, wobei Lithium aus der ursprünglichen wässrigen Phase in die organische Phase migriert [Rydberg, 2004]. Als organische Lösungsmittel werden Tributylphosphat mit Kerosin oder Methylisobutylketon in Kombination mit Eisen(III)-chlorid, Perchlorat oder Tetraphenylborat als Co-Extrahenten verwendet [Xiang et al., 2016, Shi et al., 2017]. Aufgrund geringer technischer Anforderungen und der hohen Effizienz bei niedrigen Produktionskosten ist diese Methode vorteilhaft, jedoch werden auch große Mengen saurer Abwässer produziert [Kawamoto and Tamaki, 2011, Liu et al., 2017, Shi et al., 2017].

Intensiv erforschte Methoden zur Lithiumextraktion sind Ionenaustausch- und Sorptionsverfahren. Beide Verfahren basieren auf dem Prinzip der Zugabe eines Feststoffs in eine lithiumreiche Lösung, wodurch Lithium selektiv vom Feststoff aufgenommen oder sorbiert wird (Helfferich, 1995). In den meisten Fällen ist der Ionenaustausch ein Lithium ↔ Natrium- oder Lithium ↔ Wasserstoff-Austausch (z. B. Gast and Klobe, 1971, Navarrete-Casas et al., 2007, Kim and Grey, 2010, Ooi et al., 2016, Marthi et al., 2021). Bei der Sorption wird zwischen Physisorption, einer schwachen elektrostatischen Bindung, und Chemisorption, einer starken chemischen Bindung, unterschieden (Bruggenwert and Kamphorst, 1979, Park et al., 2015, Prodromou, 2016, Huber et al., 2019). Die elektrostatische Bindung der Physisorption wird dadurch verursacht, dass Lithium als (hydratisierter) Komplex an einer negativ geladenen Oberfläche elektrostatisch gebunden wird, während Lithium bei der Chemisorption einwertige Kationen im Kristallgitter austauscht (Limousin et al., 2007). Das bedeutet, dass Chemisorption einen Ionenaustausch darstellt, Physisorption dagegen nicht. Sowohl Ionenaustausch als auch Sorption sind abhängig von pH-Wert, Temperatur der Lösung, Lithiumkonzentration und vom Verhältnis zwischen Lithium in der Lösung und Menge des Sorbens sowie der Struktur des Sorbens (z. B. Lemaire et al., 2014, Prodromou, 2016, Wiśniewska et al., 2018). Die Lithiumausbeute wird zudem durch die spezifischen kinetischen Eigenschaften des Sorbens, die Kontaktzeit von Sorbens und Lösung und durch die mögliche Verwendung von Additiven beeinflusst (z. B. Eckstein et al., 1970, Sullivan et al., 2003, Bouguerra et al., 2007, Navarrete-Casas et al., 2007, Hawash et al., 2010). Als Sorbenzien werden unterschiedliche Lithium-Mangan-Oxide, Titan-Oxide, Aluminium-Hydroxide, Lithium-Eisen-Phosphate, Tonminerale oder Zeolithe erforscht (Slunitschek et al., 2021).

5.1.2 Projekte zur Lithiumextraktion aus Geothermalwasser^{Steiger, K., Slunitschek, K.}

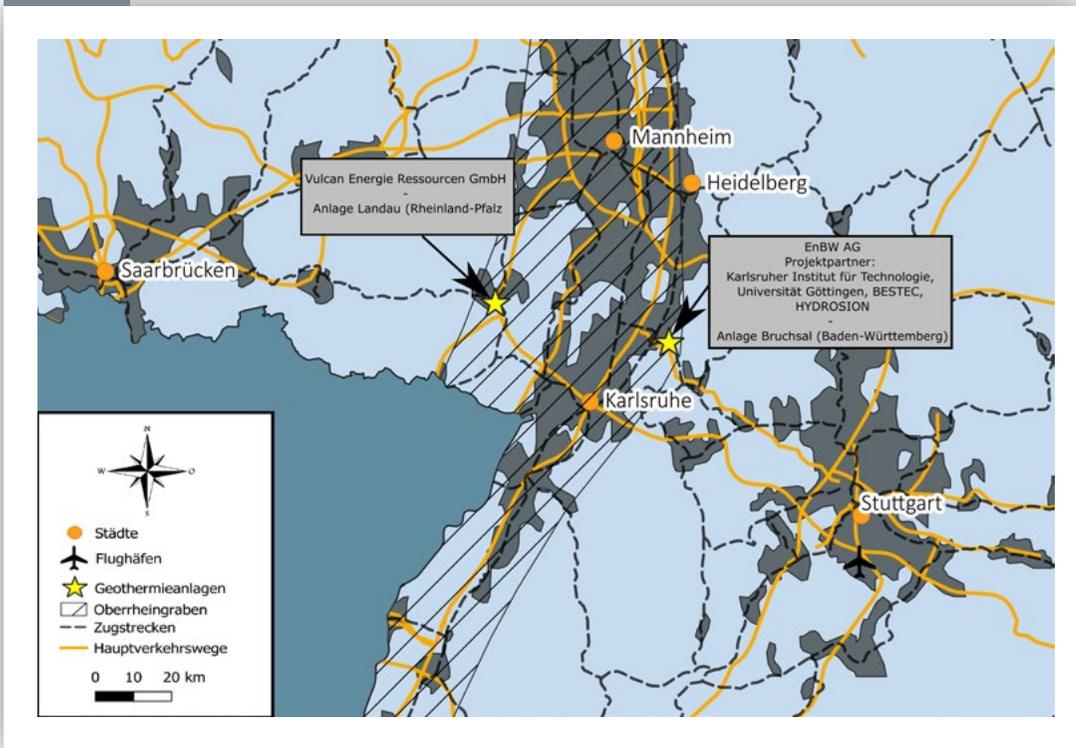
In Deutschland und Frankreich gibt es u.a. Lithiumvorkommen im Oberrheingraben. Der Oberrheingraben erstreckt sich über die Schweiz, Deutschland und Frankreich von Basel im Süden bis Frankfurt im Norden über eine Länge von ca. 300 km mit einer Breite von 35-40 km. An seinen Flanken treten warme Solequellen aus, die bereits historisch von Menschen vor allem balneologisch genutzt wurden. Die Nutzung der tiefen Geothermie (> 400 m Tiefe) startete in Deutschland im Jahr 2007 in Landau. Die Thermalwässer befinden sich in ca. 2.000 - 7.000 m Tiefe und können an Störungszonen aufsteigen und dort Solequellen bilden. Über die Menge an Geothermalwasser im Oberrheingraben sowie die Fläche des theoretisch nutzbaren Reservoirs ist wenig bekannt, da bisher die thermische Nutzung im Vordergrund stand. Erste geochemische Untersuchungen zeigen, dass im Untergrund des Oberrheingraben unterschiedliche Geothermalwasserreservoirs vorkommen. Ob diese miteinander verbunden oder voneinander getrennt sind, ist bisher nicht vollständig geklärt und Gegenstand der Forschung. Hohe Lithiumgehalte finden sich besonders in Solen mit hohen Temperaturen und hohem Salzgehalt. Über die Herkunft des Lithiums und die Prozesse der Lösung und des Transportes im Geothermalwasser wird in der Wissenschaft noch diskutiert (Drüppel et al., 2020; Sanjuan et al., 2022).

In England ist lithiumhaltiges Geothermalwasser aus Cornwall bekannt. Im Gegensatz zum Oberrheingraben befindet sich das Thermalwasser nicht in tiefliegenden Gesteinen, sondern zirkuliert in lithiumreichen, zerklüfteten Graniten mit erhöhtem Wärmefluss. Das lithiumreiche Thermalwasser tritt an mehreren Stellen als warme Solen an der Oberfläche oder in aufgelassenen Bergwerken aus (Cornish Lithium, 2022).

5.1.2.1 Deutschland Steiger, K., Slunitschek, K., Steinmüller, K.

Stand 2021 arbeiten auf deutscher Seite im Oberrheingraben zwei Unternehmen daran, im industriellen Maßstab Lithium aus Geothermalwasser zu fördern (Abb. 17). Die 2020 gegründete Vulcan Energie Ressourcen GmbH (Vulcan), Tochterunternehmen der 2018 gegründeten australischen Vulcan Energy Resources, sowie die EnBW AG wollen die bestehende Technik der Strom- und Wärmeerzeugung aus der Tiefengeothermie erweitern und ein direktes Lithiumextraktionsverfahren (DLE) in den Produktionskreislauf einführen (Vulcan Energie Ressourcen, 2021; EnBW, 2021).

Abbildung 17



Lithiumprojekte im Oberrheingraben auf deutscher Seite.

Vulcan Energie Ressourcen GmbH

2020 wurde eine Konzeptstudie (Scoping-Study) veröffentlicht, in der die Konzessionsgebiete Ortenau, das in der Folge als Ortenau II bewilligt wurde, und Mannheim angegeben wurden (Vulcan Energy Resources, 2020a). Zwischenzeitlich wurden die Explorationslizenzen Taro/Lisbeth, Lampertheim, Therese, Ludwig, Kerner und Löwenherz bewilligt (Vulcan Energy Resources, 2022a). Das Unternehmen hat somit Lizenzen zur Exploration auf einem Gebiet von ca. 983 km² (Stand Januar 2022; Vulcan Energy Resources, 2022a). Weiterhin in der Bewerbungsphase um Explorationslizenzen befinden sich die Gebiete

Rheinaue, das in Heßbach umbenannt wurde, und Ried (persönliche Kommunikation Geschäftsführer Horst Kreuter, Nov. 2021). Bevor das Geothermiekraftwerk Insheim und damit die Produktionslizenzen Ende 2021 in den Besitz von Vulcan übergingen, hatte Vulcan 2019 mit der Pfalzwerke geofuture GmbH ein verbindliches Memorandum of Understanding (MoU) geschlossen, um die Machbarkeit der Lithiumgewinnung aus der Sole in der Insheimer Förderlizenz zu testen (Vulcan Energy Resources, 2019, 2022a). Das Kraftwerk verfügt über zwei Bohrungen mit 3,42 km und 3,67 km Tiefe, die Förderrate beträgt zwischen 60 und 70 L/s, womit über 160 °C heißes Geothermalwasser gewonnen wird (Küperkoch et al., 2018). Auf der Grundlage bekannter Aquiferdaten (Volumen, Porositäten, Permeabilität etc.), seismischer Profile und Lithiumanalysen erstellte Vulcan 2019 die erste Ressourcenabschätzung für die Lizenzgebiete Insheim und Ortenau (Vulcan Energy Resources, 2020a). Für Insheim wurden die Ressourcen als „angezeigt“ und für Ortenau als „vermutet“ klassifiziert. Ende des Jahres 2020 veröffentlichte Vulcan eine aktualisierte Ressourcenabschätzung für seine Lizenzgebiete. Durch die Aktualisierung wurden die „vermuteten“ Ressourcen von Ortenau zu „angezeigt“ aufgewertet (Vulcan Energy Resources, 2020b). Ebenfalls wurden die Ressourcen des Lizenzgebietes Taro abgeschätzt und als „vermutet“ und „angezeigt“ klassifiziert. Mit Stand Januar 2022 werden in den Lizenzgebieten von Vulcan insgesamt fast 16 Mio. t LCE vermutet (Tab. 12).

Tab. 12: Ressourcen in den Lizenzgebieten der Vulcan Energy Resources Ltd (nach Vulcan Energy Resources, 2022).

Ressourcen (JORC)	Aquifer Volumen (km ³)	Sole Volumen (km ³)	Ø Li (mg/l)	Ø Porosität (%)	Lithium (kt)	Lithium-oxid (kt)	LCE (Mt)
Ortenau							
Vermutet (inferred)	117,97	11,21	181	9,5	2.029	4.367	10,80
Angezeigt (indicated)	17,00	2,14	181	12,6	388	835	2,06
Taro							
Vermutet (inferred)	15,92	1,50	181	9,0 – 9,5	271	583	1,44
Angezeigt (indicated)	8,42	0,86	181	9,0 – 12,6	156	336	0,83
Insheim							
Angezeigt (indicated)	8,32	0,75	181	9,0	136	292	0,72
Total (angezeigt) genutzt in PFS	25,42				544		2,89
Total (angezeigt & vermutet)	167,64	16,46	181		2.980	6.413	15,85

Die positive Konzeptstudie veranlasste Vulcan eine Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS) durchzuführen, die 2021 fertiggestellt wurde (Vulcan Energy Resources, 2021a). Die Ressourcengrundlage waren die „angezeigten“ Ressourcen der Konzessionen Insheim und Ortenau. Die Vormachbarkeitsstudie bestätigt die wirtschaftliche Machbarkeit eines kombinierten Betriebes zur Produktion von Lithiumhydroxid und erneuerbarer Energie (Vulcan Energy Resources, 2021a). Das Projekt soll ab 2024 in zwei Geothermie-Anlagen mittels DLE-Anlagen Lithiumchlorid extrahieren, das in einer separaten Lithiumraffinerie zu 15.000 t Lithiumhydroxid in Batteriequalität umgewandelt werden soll (Vulcan Energy Resources, 2022b). Ab 2025 sollen durch drei weitere Geothermie-Anlagen zusätzlich noch 25.000 t Lithiumhydroxid jährlich produziert werden (Vulcan Energy Resources, 2022b). Durch diese fünf Geothermie-Anlagen möchte die Vulcan Energie Ressourcen GmbH 74 MW Energie jährlich erzeugen (Vulcan Energy Resources, 2021a). Im Januar 2022 gab das Unternehmen bekannt, dass es gemeinsam mit Nobian, dem viertgrößten Chloralkali Produzenten in Europa, an der Entwicklung für den Bau und den Betrieb der Lithiumraffinerie arbeitet, die aus dem extrahierten Lithiumchlorid das Lithiumhydroxid in Batteriequalität produzieren soll (Vulcan Energy Resources, 2022c). Das Unternehmen wirbt damit, Lithiumhydroxid klimaneutral herzustellen und lediglich 17 – 50 % des Wassers (80 m³/ t LiOH) i.V. zur Gewinnung aus Festgestein (170 m³/t LiOH) oder Sole (469 m³/t LiOH), zu verbrauchen sowie nur einen Bruchteil der Fläche konventioneller Lithiumgewinnung in Anspruch zu nehmen (Vulcan Energie Ressourcen, 2021b, 2021c).

Der Investitionsbedarf (CAPEX) für das Lithiumgeschäft sind in der ersten Phase 473 Mio. Euro, in der zweiten Phase 700 Mio. Euro, was in Summe 1.173 Mio. Euro sein wird (Vulcan Energy Resources, 2022b). Damit sind die Investitionskosten fast doppelt so hoch wie bei einem Projekt, das aus Festgestein Lithiumhydroxid produziert (siehe Kapitel 2.3: Infinity CAPEX 532 Mio. US\$). Die Betriebskosten (OPEX) bis zur Produktion von Lithiumhydroxid belaufen sich in der ersten Phase auf 3.201 EUR/t Lithiumhydroxid, danach in der zweiten Phase sinken sie auf 2.855 EUR/t (2.681 EUR/t Gesamtbetrachtung), was weniger als die Hälfte vergleichbarer europäischer Projekte darstellt (siehe Kapitel 2.3: Infinity OPEX 6.399 US\$/t) (Vulcan Energie Ressourcen, 2022d). Als Lithiumhydroxidpreis hat das Unternehmen in seiner Vormachbarkeitsstudie 12.542 EUR/t angenommen (Vulcan Energie Ressourcen, 2020a). Für die finanzielle Unterstützung hat das Unternehmen EIT InnoEnergy als strategischen Partner gewonnen, der nicht nur finanziell unterstützt, sondern auch bei der Beschaffung von weiterem Kapital hilft oder Verbindungen zu Unternehmen in der europäischen Batterie-Lieferkette sowie zu relevanten politischen

Akteuren herstellt (InnoEnergy, 2020). Bis Mitte 2022 möchte Vulcan die Machbarkeitsstudie (Definite Feasibility Study, DFS) für das Projekt durchführen. In diesem Rahmen wird das DLE-Verfahren für Lithium im Pilotstadium erprobt (AlterResearch, 2021; Vulcan Energy Resources, 2021h). Darüber hinaus verhandelt Vulcan mit potentiellen Partnern, Batteriezellenherstellern und Automobilunternehmen bezüglich der Abnahme des Lithiumhydroxids. Abkommen mit LG Energy Solutions, dem belgischen Recyclingkonzern Umicore, der Renault Gruppe und der Volkswagen Gruppe wurden bereits unterzeichnet (Vulcan Energy Resources, 2021d, 2021e, 2021f, 2021g).

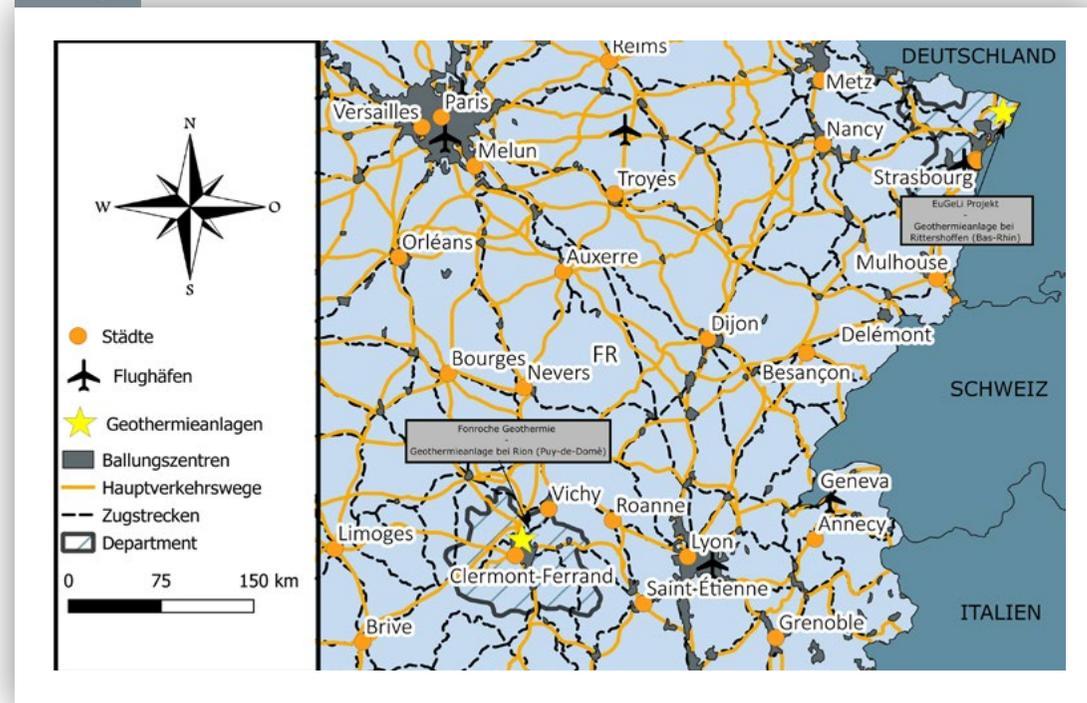
Kooperationsprojekt UnLimited

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) durch den Projektträger Jülich (PTJ) geförderte Forschungsprojekt „UnLimited“ ermöglicht dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zusammen mit der Energie Baden-Württemberg (EnBW) und weiteren Universitäts- und Wirtschaftspartnern an einem geeigneten Sorptionsmittel zu forschen und den Bau einer Pilotanlage für den EnBW-Standort Bruchsal zu konzipieren (UnLimited, 2022). Im Geothermiekraftwerk Bruchsal wird Geothermalwasser aus ca. 2500 m Tiefe mit 25 L/s gefördert und für die Stromproduktion und Fernwärmeversorgung genutzt (Informationsportal Geothermie, 2022). Das Geothermalwasser hat eine Lithiumkonzentration von ca. 160 mg/L auf (Sanjuan et al., 2016). Weiterhin wird im Rahmen des Projekts auch die Größe des Lithiumvorkommens im Oberrheingraben sowie die Herkunft des Lithiums und die Prozesse der Lösung und des Transports untersucht. Für die Extraktion werden neuartige Verfahren basierend auf der Sorption von Lithium an einen Feststoff entwickelt (Slunitschek et al., 2021, Reich et al., 2022, UnLimited, 2022b). Aufgrund der komplexen Chemie des Geothermalwassers werden unterschiedliche Sorptionsmittel auf ihre Lithiumadsorptionskapazität und -selektivität sowie auf die chemische Beständigkeit des Sorbens unter verschiedenen Bedingungen (Temperatur, pH-Wert, etc.) untersucht und die technische und ökonomische Machbarkeit bewertet (UnLimited, 2022). In ersten Untersuchungen mit einem Sorptionsmittel auf Manganoxidbasis konnte unter Laborbedingungen die Eignung bewiesen und Lithium erfolgreich aus dem Geothermalwasser extrahiert werden. Das Sorptionsmittel zeigt neben einer schnellen Sorption eine hohe Lithiumselektivität, was aufgrund der hohen Salzfracht des Geothermalwassers im Oberrheingraben notwendig ist (Slunitschek et al., 2021).

5.1.2.2 Frankreich^{Steiger, K.}

Auf der französischen Seite des Oberrheingrabens wurde ebenfalls an der Lithiumextraktion aus Geothermalwasser geforscht. An dem von EIT Raw Materials vornehmlich finanzierten Projekt EuGeLi (European Geothermal Lithium Brines), Laufzeit von Januar 2019 bis Dezember 2021, arbeiteten zehn Unternehmen und akademische Institutionen aus Frankreich, Belgien und Deutschland daran, Lithium mittels eines Adsorptionsmittels in Extraktions Säulen aufzufangen [EIT Raw Materials, 2020]. In den Versuchen wurden die Extraktions Säulen auf der Reinjektionsseite bestehender Geothermiekraftwerke angebracht. Diese Säulen sind mit einem aktiven, pelletförmigen Feststoff gefüllt, an dem das gelöste Lithium sorbiert und anschließend durch Evaporation als Lithiumkarbonat gewonnen werden kann. Die Sole wird direkt nach dem Vorgang wieder in den Untergrund reinjiziert. Vor der Weiterverarbeitung zur Batteriequalität wird das Lithiumkarbonat gereinigt [ERAMET, 2019]. Im Frühjahr 2021 gelang es dem Projektteam zum ersten Mal Lithium aus Geothermalwasser aus dem Kraftwerk Rittershofen zu extrahieren [ERAMET, 2021]. In diesem Projekt sollten des Weiteren die europäischen, geothermischen Lithiumlagerstätten besser verstanden und ein profitables Wirtschaftsmodell für den gesamten Prozess von der Lithiumgewinnung bis hin zur Veredelung des Lithiums in Batteriequalität berechnet werden [ERAMET, 2019]. Das Projekt endete im Dezember 2021 mit dem erfolgreichen Resultat, dass eine kleine Menge an battery-grade Lithiumkarbonat produziert wurde [BRGM, 2022].

Abbildung 18

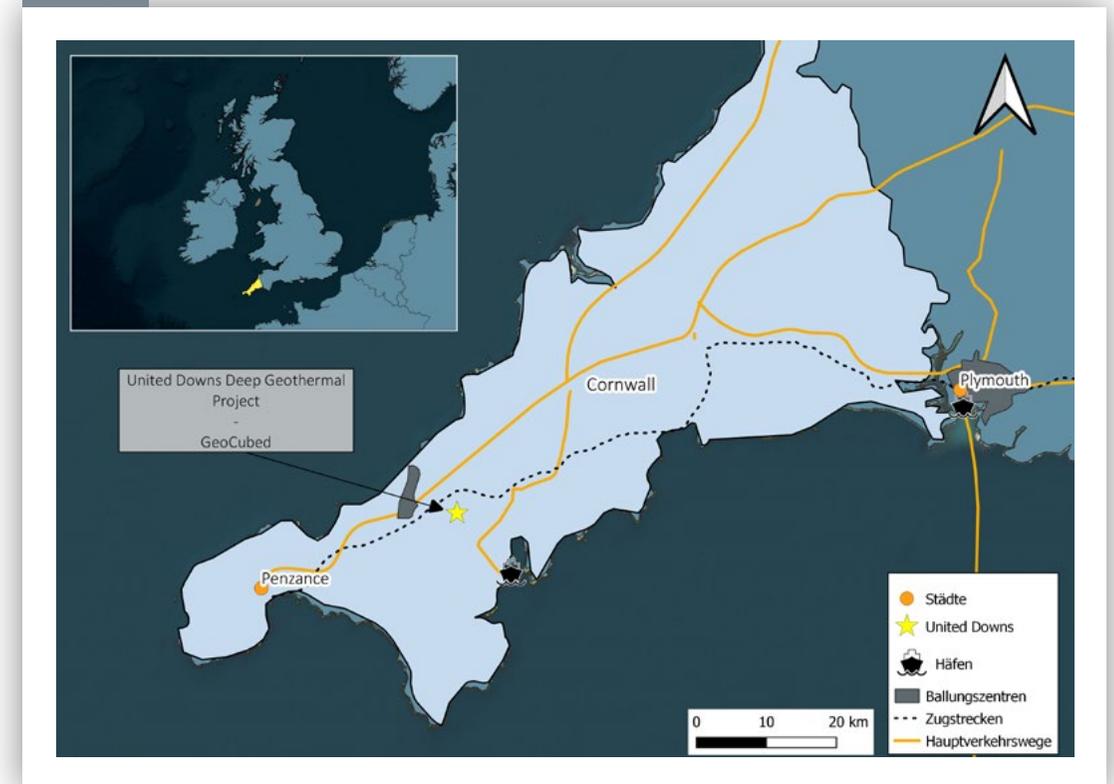


Lithiumprojekte in Frankreich.

5.1.2.3 England^{Steiger, K.}

In Cornwall, im Südwesten von England, arbeitet das Unternehmen Cornish Lithium Limited daran, Lithium aus oberflächennahem (ca. 1 km tief) und tiefem (ca. 5 km tief) Geothermalwasser im Gebiet United Downs gewinnen zu können [Abb. 15, Cornish Lithium, 2021]. Ende 2019 teufte das Unternehmen Bohrungen in Granit ab, der bei früheren Bergbauarbeiten als durchlässig und mit geothermischen Wässern angereichert erkannt wurde. Insgesamt wurden acht Abschnitte beprobt [Cornish Lithium, 2021].

Abbildung 19



Lithiumprojekt in Südengland.

Cornish Lithium Limited gründete gemeinsam mit Geothermal Engineering Limited (GEL) das Joint Venture GeoCubed mit dem Zweck der Stromerzeugung, Wärmegewinnung und Lithiumextraktion in Südengland. Im Juli 2021 gab das Unternehmen bekannt, dass das französische Startup Geolith SAS die Pilotanlage mit ihrer Lithium-Capt® Direct Lithium Extraction Technologie ausstatten wird. Es ist geplant, dass die Pilotanlage 10 t LCE pro Jahr produziert und als Grundlage für die Hochskalierung einer industriellen Anlage dient [Geo3, 2021]. Im August 2021 gab Geothermal Engineering Limited die bislang höchsten Lithiumkonzentrationen von 250 mg/L bekannt [Geothermal Engineering Ltd, 2021]. Es ist geplant, dass mit Hilfe von Rossshire Engineering (RSE) die Pilotanlage bis Ende März 2022 fertig gestellt sein soll [Geo3, 2022].

5.1.3 Chancen und Risiken der Lithiumgewinnung aus Geothermalwasser^{Steiger, K.}

Wie am Beispiel von Cornish Lithium ersichtlich, kann die Lithiumgewinnung aus Geothermalwasser aus oberflächennahen (< 400 m) oder tiefen (400-5.000 m) geothermischen Systemen erfolgen. Unabhängig von der Lithiumgewinnung ist bereits erforscht, dass die Gewinnung von Erdwärme durch oberflächennahe und Tiefengeothermie mit unterschiedlichen Risiken verbunden ist [PK Geothermie, 2011]. Neben den Risiken sind aber auch ökologische, wirtschaftliche und technische Chancen für diese Art von Lithiumgewinnung in Betracht zu ziehen.

5.1.3.1 Chancen

Ökologische Chancen

Einer der Vorteile der Energiegewinnung aus Geothermie ist die geringere Emissionsmenge, durchschnittlich 122 g CO₂/kWh, im Vergleich zur fossilen Energieerzeugung, die zwischen 450 g CO₂/kWh und 1.300 g CO₂/kWh liegt [Kagel und Gawell, 2005; Shortall et al., 2014]. Explorationsunternehmen werben daher damit, dass die Lithiumgewinnung aus geothermalen Tiefenwässern, bei gleichzeitiger Stromproduktion, im Gegensatz zur Gewinnung aus Festgestein (bis zu 15 t CO₂/t LiOH) klimaneutral oder gar negativ sei [Minviro, 2020; VER, 2022a]. Genauso sei der Wasserverbrauch bei der Lithiumgewinnung aus Geothermalwasser (ca. 100m³/t LiOH) geringer als beispielsweise bei der Gewinnung aus lateinamerikanischen Solen (470 m³/t LiOH) [VER, 2022a]. So wie die geothermale Energie im Vergleich zu anderen Energiegewinnungsmöglichkeiten weniger Fläche bedarf, so ist dies nach den Angaben einer Pilotanlage im Oberrheingraben auch bei der Lithiumgewinnung vergleichend zur Gewinnung aus Festgestein oder Solen der Fall. Darüber hinaus sei ebenso die Verwendung von Reagenzien und die Abfallerzeugung deutlich geringer [Soltani et al., 2021; VER, 2022a].

Wirtschaftliche und technische Chancen

Die Gewinnung von Lithium in Europa aus Geothermalwasser, in bisher noch nicht genau definierbaren Mengen, könnte verschiedene positive wirtschaftliche Effekte mit sich bringen. Zum einen wäre es ein heimischer Beitrag zum steigenden Lithiumbedarf, der mit einer derzeit von einem Unternehmen vermuteten Produktion von ca. 35,2 kt LCE ab dem Jahr 2025 ein Anteil von ca. 11% am europäischen Bedarf 2030 decken könnte [siehe Kapitel 3, 7; Bobba et al., 2020]. Zum anderen könnte die Standortleistung bestehender Geothermiekraftwerke diversifiziert werden, wenn in den Gebieten, in denen erhöhte Lithiumgehalte im Geothermalwasser zu finden sind, wie beispielsweise im

Oberrheingraben oder im Norddeutschen Becken, zusätzlich Lithium wirtschaftlich extrahiert wird. Dies soll die Pilotanlage der Vulcan Energie Ressourcen GmbH in Landau in der Pfalz demonstrieren, wo im Geothermalwasser Werte bis zu 181 mg Lithium/L nachgewiesen werden [VER, 2022]. Außerhalb von Europa sind vergleichbare Projekte in Südkalifornien, USA, beispielsweise im Gebiet von Salton Sea begonnen worden [MacGregor, 2009; McKibben et al., 2020; Stringfellow & Dobson 2021]. Durch die Erprobung und Anwendung innovativer Technologien könnte ein Beitrag zur Klimaneutralität geleistet werden.

5.1.3.2 Risiken

Ökologische Risiken

Sowohl bei der oberflächennahen (< 400 m) Geothermie als auch bei der Tiefengeothermie (400-5.000 m) können Risiken für die Umwelt auftreten. So können oberflächennahe Bohrungen die Oberflächengewässer verschmutzen, Veränderungen in der Grundwasserleiterbeschaffenheit hervorrufen oder zu Temperaturveränderungen im Untergrund führen. Bei der Tiefengeothermie müssen zudem die Bohrspülungen entsorgt werden [PK Geothermie, 2011; Frick et al., 2007]. Eingriffe und Nutzungen des Grundwassers werden in Deutschland durch das Wasserhaushaltsgesetz geregelt und basieren auf der EU-Wasserrahmenrichtlinie [WHG, 2009; EU-WRRL, 2000]. Die Richtlinie VDI 4640 gibt des Weiteren einen Richtwert für die maximal erlaubte Erwärmung des Grundwassers bei oberflächennahen Geothermieprojekten an [VDI, 2019; Haehnlein et al., 2010].

Wirtschaftliche und technische Risiken

Bei oberflächennahen wie auch Tiefengeothermieprojekten können verschiedene technische wie auch wirtschaftliche Risiken auftreten, beispielsweise der Einsatz unzureichender technischer Materialien wie Abdichtungen [PK Geothermie, 2011]. Bei der Tiefengeothermie sind nach PK Geothermie [2011] wirtschaftliche und technische Risiken:

- › Unerwartete geologische Verhältnisse: die Struktur im Untergrund entspricht nicht den vorangegangenen Modellierungen.
- › Fündigkeitsrisiko: das Reservoir ist quantitativ oder qualitativ nicht ausreichend.
- › Bohrrisiko: alle mit den Bohrungen verbundenen technischen Risiken.
- › Betriebsrisiko / Dauerhaftigkeit: quantitative und qualitative Veränderungen während der Betriebszeit.
- › Seismisches Risiko: induzierte Seismizität kann in Gebieten mit bereits vorhandener natürlicher Seismizität ungewollte Ereignisse hervorrufen.

Das Risiko der induzierten Seismizität hängt von der Beschaffenheit des Untergrundes ab, Spannungsveränderungen im Untergrund können zu induzierter Seismizität führen [Buijze et al., 2019]. Bei der Tiefengeothermie wird durch Reinjektion des Formationswassers nach der Wärmegewinnung der Fluiddruck erhöht, was zu induzierter Seismizität führen kann [Buijze et al., 2019]. Mikroerdbeben sowie extrem bis sehr leichte Erdbeben sind durch induzierte Seismizität bei verschiedenen Geothermieprojekten im Oberrheingraben, in Landau [ML: max. 2,4 – 2,7], Insheim [ML: max. 2,2 – 2,4], Soult-sous-Forets [ML: max. 3,4] und Basel [ML: max. 1,7 – 3,4] gemessen worden [Groos et al., 2013; Charléty et al., 2007; Gaucher et al., 2015; Deichmann und Ernst, 2009]. Nach der Mercalli-Skala können Mikroerdbeben [ML bis 2,9] nur von wenigen Menschen wahrgenommen werden, extrem leichte Erdbeben [ML: 3,0] sind vereinzelt von Menschen spürbar und sehr leichte Erdbeben [ML: bis 3,9] sind mit Erschütterungen eines vorbeifahrenden LKWs zu vergleichen [Clauser, 2016].

Der Erfolg von Tiefengeothermieprojekten hängt nicht nur vom Überwinden technischer Risiken ab, sondern auch von der finanziellen Machbarkeit (Return on Invest Risiko) sowie sozialen wie auch rechtlichen Bedingungen, wie öffentliche Akzeptanz [siehe Kapitel 6.2] und Genehmigungsverfahren [Reinecker et al. 2019]. Dies ist entsprechend auf die Lithiumproduktion aus Geothermalwasser zu übertragen.

5.2 Lithium aus Minenwässern^{Steiger, K.}

Das Projekt MERLIN (mining water lithium extraction), ein Forschungsvorhaben des Leibniz Instituts für neue Materialien (INM) in Saarbrücken mit Unterstützung der RAG-Stiftung widmet sich der Extraktion von Elementen wie Strontium, Barium oder Lithium aus den Grubenwässern in den ursprünglichen Steinkohlerevieren Ruhr und Saar (vgl. Steiger et al., 2022). Für die Erforschung wird Grubenwasser aus zwei ehemaligen Bergwerken an der Saar verwendet [dpa, 2021]. Die Konzentration von Lithium in den Grubenwässern ist mit 20 mg/L gering, allerdings werden im ehemaligen Saarrevier 18 Mio. m³

Grubenwasser jährlich verpumpt, die ca. 1.900 t Lithium enthalten [Bertram, 2021; dpa, 2021]. Im Labor wird das Grubenwasser durch eine Zelle mit zwei unterschiedlich geladenen Elektroden geschickt, so werden die Lithium- und Chlor-Ionen elektrochemisch extrahiert, anschließend wird die Zelle mit Frischwasser gespült (vgl. Kapitel 5.1.1; RAG Stiftung, 2021). Das gewonnene Lithiumchlorid soll dann weiter aufbereitet werden [RAG Stiftung, 2021]. Die Ressourcenverfügbarkeit von Lithium aus Grubenwässern in weiteren Ländern Europas soll im Rahmen des Projekts durch weitere geochemische Analysen untersucht werden [INM, 2020].

5.3 Lithium aus Produktionswässern^{Steiger, K.}

Eine weitere innovative Möglichkeit der Lithiumgewinnung stellt die Extraktion aus Produktionswässern von Öl- oder Gasförderungen dar [McEachern, 2017, vgl. Steiger et al., 2022]. Da bei der Förderung von Kohlenwasserstoffen abhängig vom Lagerstättentyp und -alter gleichzeitig auch Formationswässer mitgefördert werden, setzt sich das Produktionswasser aus den Formationswässern und der Injektionsflüssigkeit zusammen [Neff et al., 2011]. In Deutschland wird im Norddeutschenbecken, u.a. aus Rotliegend und Zechstein Horizonten, Erdgas gefördert [LBEG, 2020]. In eben diesen Horizonten wurden bei Tiefengewässeruntersuchungen Lithiumwerte von durchschnittlich 58 mg/L gemessen [Stober et al., 2014b]. So nimmt Weißenborn an, dass aus den Rotliegend- und Zechsteinförderungen in Deutschland jährlich ca. 300.000 m³ Produktionswasser aus Erdgaslagerstätten gefördert werden und hierdurch die Möglichkeit bestünde Lithium zu gewinnen [Weißenborn, 2019]. Das Formationswasser im Altmark Gasfeld in Sachsen-Anhalt weist eine Lithiumkonzentration von max. 357 mg/L auf [Lüders et al., 2010]. In Produktionswässern aus ukrainischen Öl- und Gasfeldern wurden durchschnittlich zwischen 10 und 20 mg/L Lithium gemessen [Reva, 2019]. Verschiedene Extraktionstechnologien, wie beispielweise Adsorption mittels Ionenaustauscharzen oder Nanofiltration, wären für eine Lithiumextraktion aus diesen Wässern denkbar (vgl. 5.1.1) [ACS Energy, 2019]. Außerhalb von Europa, im US-Bundesstaat Pennsylvania haben zwei Unternehmen die Absicht, als Joint Venture aus den Produktionswässern der Schiefergas-Förderung des Marcellus und Utica Shales Lithium zu extrahieren [Produced Water Society, 2021].

5.4 Lithium aus Meerwasser^{Steiger, K.}

Das von der Europäischen Union geförderte Projekt Sea4Value hat zum Ziel, bis 2024 ein modulares Solebergbauverfahren zu konzipieren, bei dem verschiedene Minerale und Metalle aus den Solen von Meerwasserentsalzungsanlagen durch Adsorptionsverfahren gewonnen werden können (vgl. Steiger et al., 2022). Fünfzehn Einrichtungen entlang der kompletten Wertschöpfungskette sind daran beteiligt, darunter auch drei aus Deutschland (EU Kommission, 2020b). Extrahiert werden sollen künftig Magnesium, Bor, Scandium, Indium, Vanadium, Gallium, Lithium, Rubidium sowie Molybdän zunächst aus Entsalzungsanlagen auf den Kanarischen Inseln sowie in Denia an der Mittelmeerküste Spaniens (EU-Recycling Magazin 2021). Weltweit wird an verschiedenen Standorten an der Extraktion von Lithium aus Meerwasser geforscht, von Korea über Saudi-Arabien bis zu den USA (Chung et al., 2004; Li et al., 2021; Diallo et al., 2015). Der Lithiumgehalt im Meerwasser variiert, in der Nordsee wurden Lithiumkonzentrationen von 0,1 ppm gemessen, in japanischen Küstengewässern im Pazifik 1,173 ppm (Choubey et al., 2017). Die Verfahren, die dabei am häufigsten angewendet werden, sind Adsorptionsverfahren, elektrochemische Verfahren oder Membran-Verfahren (vgl. Kapitel 5.1.1 Grundlagen und Extraktionmethoden) (Xua et al., 2016; Liu et al., 2020; Li et al., 2021).

5.5 Lithium aus Salzlagerstätten^{Steiger, K.}

Lithiumvorkommen wurden auch im europäischen Becken in Salzlagerstätten in Norddeutschland in Gorleben und Morsleben mit max. 401 ug/g in Soleproben und 161 ug/g in Gesteinsproben gefunden. Die größte Konzentration an Lithium wurde in den Solen der anhydritführenden Schichten mit einer Mächtigkeit max. 80 m in Gorleben entdeckt. Diese sind in ihrer Konzentration mit Vorkommen in Kalifornien, USA und Mexiko vergleichbar (Mertineit und Schramm, 2019). Bereits in den 1960er Jahren haben Untersuchungen von Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein Lithium mit einer Konzentration max. 490 ug/g in Steinsalz nachgewiesen (Herrmann, 1961). Im Abbauggebiet Asse waren es durchschnittlich 6,61 mg/L (BGE, 2017). Es ist jedoch unklar, welchen Ursprungs das Lithium ist, da der Gehalt des ursprünglichen Meerwassers im Vergleich mit 0,17 ug/g gering ist (Mertineit und Schramm, 2019).

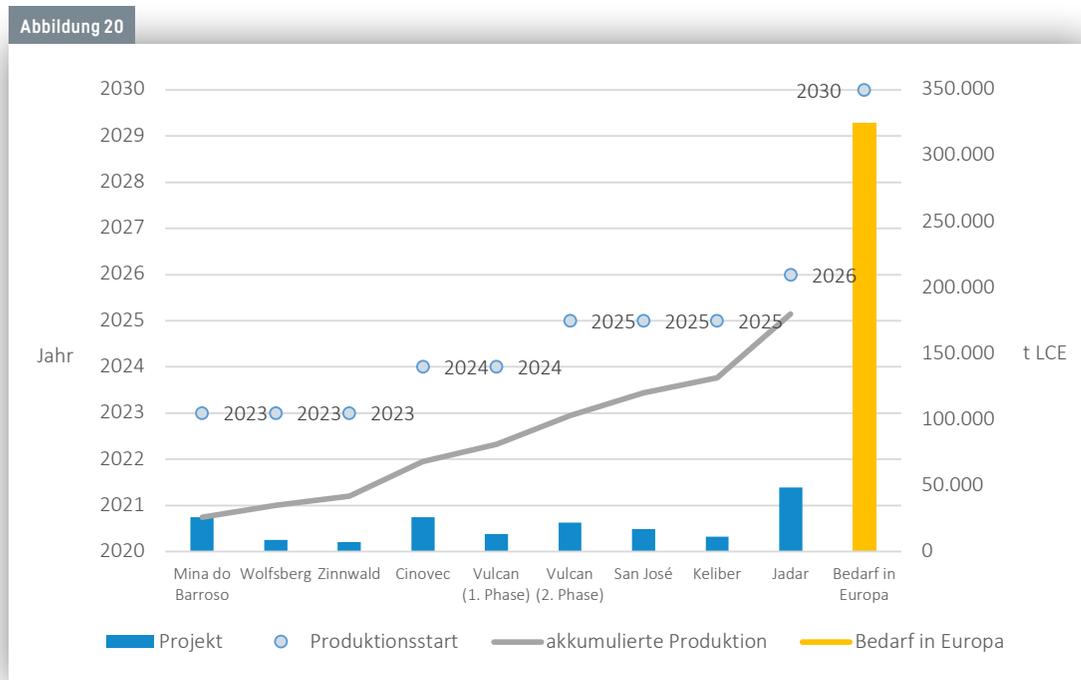
6. Herausforderungen bei der europäischen Lithiumgewinnung

Die Entwicklung und der Betrieb von Lithiumgewinnungs- und -weiterverarbeitungsbetrieben in Europa hilft, die Importabhängigkeit der europäischen Industrie für diesen Rohstoff zu verringern. Jedoch existieren zahlreiche Hürden, die die Projektentwickler überwinden müssen. Neben technischen, wirtschaftlichen und genehmigungsrechtlichen Herausforderungen im Laufe der Projektentwicklung gibt es in verschiedenen europäischen Ländern Bürgerinitiativen gegen den Lithiumabbau (Baker, 2021).



6.1 Technisch-wirtschaftliche Herausforderungen Steinmüller, K., Steiger, K.

Wenn die in dieser Studie vorgestellten Projekte aus magmatischen und sedimentären Gesteinen sowie geothermalen Solen, die sich in einem fortgeschrittenen Projektstadium befinden (vgl. Kap. 4.3 und Kap. 4.4), planmäßig in Betrieb gehen und batteriefähiges Lithium auf einem konstanten Level erzeugen, könnten ab 2025 ca. 132 kt LCE heimisch produziert werden. Bei einem Lithiumbedarf für Batterien in Europa von ca. 325 kt LCE (vgl. Kap.3.2, Bobba et al., 2020), könnten diese sieben Projekte somit ca. 40,5 % zur Bedarfsdeckung beitragen. Durch die Rücknahme der Genehmigungen für das Jadar-Projekt (Serbien) zu Beginn 2022 stehen ca. 48,8 kt LCE (ca. 55 kt Lithiumhydroxid) als potentiell innereuropäisches Lithiumangebot erstmal nicht für den Markt zur Verfügung (Abb. 20; Tab. 13).



Mögliche Lithiumproduktion durch die in dieser Studie vorgestellten Projekte in Europa bis 2030.

Sollte das Jadar-Projekt wiederaufgenommen werden, läge die heimische Produktion bei ca. 180 kt LCE und könnte dadurch ca. 55,4 % des Lithiumbedarfs in Europa 2030 decken (Abb. 20, Tab. 13). Hinsichtlich dieses Projekts kann angenommen werden, dass ein großes, global agierendes Unternehmen wie Rio Tinto die technisch-wirtschaftlichen Herausforderungen im Zuge der Projektentwicklung gut meistern könnte, anders als es derzeit bei den ökologisch-sozialen Vorbehalten aussieht (vgl. Kapitel 6.2).

Die Herausforderung aller genannten Projekte ist einerseits die planmäßige Realisation, da es zu Projektverzögerungen oder Projektabbrüchen, hauptsächlich aufgrund technisch-wirtschaftlicher Gründe, wie zu geringer Erzgehalt, falsche Preisannahme oder Verzögerung bei der Finanzierung, kommen kann. Erfahrungsgemäß haben geplante Bergbauprojekte, die im Vergleich zu anderen Projekten einen niedrigeren Preis für ihr zukünftiges Produkt annehmen können, eher die Chance, später in Produktion zu gehen. Ein niedrigerer Produktpreis kann angesetzt werden, wenn das geplante Bergbauprojekt entweder hohe Erzgehalte oder niedrige Betriebskosten (OPEX) hat, bzw. beides zutrifft. Beide Faktoren machen Rohstoffprojekte robuster gegenüber möglichen Preisverfällen. Bei dem derzeitigen Preishoch von Lithium, Lithiumhydroxid lag im November 2021 noch bei 27.400 US\$/t und Ende April 2022 bei 71.500 US\$/t (USGS, 2022; Argus Media Group, 2022), wären alle beschriebenen Lithiumprojekte wirtschaftlich. Marktanalysen gaben vor dem Russland-Ukraine-Krieg Preise für Lithiumhydroxid im Zeitraum 2022 bis 2025 zwischen 15.000 und 20.000 US\$/t an, für Lithiumkarbonat „battery-grade“ zwischen 13.000 – 14.000 US\$/t, für Lithiumkarbonat „technical-grade“ ca. 10.000 US\$/t rund 700 US\$/t für das Spodumenkonzentrat (6 % Lithiumoxid) (vgl. Kap. 2; Brightmore, 2021; Michaud, 2016; German Lithium Participation, 2021). Würden die Preise wieder auf ein solches Niveau sinken, könnten die europäischen Projekte, bei denen in der Machbarkeitsstudie (Definite Feasibility Study, DFS) hohe Preise angenommen wurden (Zinnwald 22.000 €/t, Cinovec 17.000 US\$/t, Wolfsberg 18.350 US\$/t, San José 17.000 US\$/t; Tab.15), gefährdet sein.

Analysiert man die angesetzten Marktpreise und die Betriebskosten (OPEX) der Projekte, die eine Lithiumgewinnung aus magmatischem Festgestein planen (Tab. 15), erkennt man, dass das Projekt Keliber (Finnland) die niedrigsten Betriebskosten (4.541 €/t) für Lithiumhydroxid hat und dadurch die niedrigsten Preisannahmen für dieses Produkt (12.000 €/t) machen konnte. Darüber hinaus ist bei dem Projekt mit dem südafrikanischen Bergbaukonzern Sibanye-Stillwater ein finanziell solventer Industriepartner eingestiegen, der die Weiterentwicklung mitfinanzieren könnte (European Metals, 2022b; Keliber, 2021b). Vergleicht man dazu die Betriebskosten und die angesetzten Marktpreise von Cinovec (Tschechien; 5.567 US\$/t, 17.000 US\$/t), Wolfsberg (Österreich; 6.561 US\$/t, 18.350 US\$/t) und San José (Spanien; 6.399 US\$/t, 17.000 US\$/t), so erkennt man, dass die Betriebskosten und die angesetzten Marktpreise deutlich höher liegen als bei Keliber (Tab. 15). Die höheren Betriebskosten und hohen Preisannahmen könnten den Produktionsstart verhindern, falls die Preise sich für Lithiumhydroxid in der Zeit der geplanten Produktionsbeginne unter 17.000 US\$/t befinden.

6.2 Mangelnde öffentliche Akzeptanz^{Steiger, K.}

Ob bei der Lithiumgewinnung aus Festgestein oder aus Geothermalwasser, ob in Süd- oder Osteuropa oder Deutschland, lokale Bürgerinitiativen und überregionale Interessengruppen leisten Widerstand gegen die Vorhaben. Das Projekt von Savannah Resources in Covas do Barroso in Portugal wird als Vorzeigeprojekt in Bezug auf die Einbeziehung von Bürgern und Gemeinden in das Abbauvorhaben benannt [Baker, 2021]. Trotzdem wehren sich die Interessengruppen gegen das Projekt, da die Region landschaftliches Weltkulturerbe ist und nachhaltiger Ackerbau betrieben wird [Bastian et al., 2021]. Ob die Novellierung des Bergbaugesetzes in Portugal aus 2021 die öffentliche Akzeptanz erhöhen wird, ist fraglich. In dieser sind vor allem drei Bereiche besonders gestärkt worden: Um grünen Bergbau und Wiederaufbereitung voranzutreiben sollen anspruchsvolle Standards im Sinne einer ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit etabliert werden. Um die Transparenz von Verfahren zu erhöhen und zu gewährleisten, wird die Informationsverteilung an und die Beteiligung der Bevölkerung gefördert. Auch die Gewinne aus Rohstoffprojekten sollen zwischen dem Staat, den Gemeinden und der lokalen Bevölkerung gerecht aufgeteilt werden [Silva Aroso und Magalhães, 2021].

Auch in Spanien schließen sich lokale Interessengruppen zusammen und protestieren, gemeinsam mit internationalen Unterstützern, gegen den Abbau von Lithium in Cáceres, Extremadura von Infinity Lithium. Das Netzwerk „Sí a la vida y no a la minería“ („Ja zum Leben, nein zum Bergbau“) hat 2020 mit 134 internationalen Organisationen einen Brief an die Präsidentin der Europäischen Kommission, Frau von der Leyen, geschrieben, in dem sie ihre Sorge bezüglich der Unterstützung der australischen Infinity durch die EU bekunden [Netzwerk Yes to Life, No to Mining, 2020]. Seit 2017 gibt es die lokale Bürgerinitiative „Salvemos la montaña“ („Rettet den Berg“), die sich gegen den Lithiumabbau einsetzt. Die Initiative ist davon überzeugt, dass Jobs im Bereich des nachhaltigen Tourismus, der Viehzucht, der Käseproduktion oder der Imkerei durch den Bergbau bedroht wären. Der Bürgermeister der Stadt Cáceres, Luis Salaya, versicherte, dass niemals eine Lithiummine in Betrieb genommen werde [Bastian, 2021]. Die Lithiumvorkommen liegen in San José Valdefloréz, einem Naherholungsgebiet Sierra de la Mosca und nur 800 m vom historischen Stadtzentrum entfernt. Es existiert ein Gemeindeplan, der die Ansiedlung der Rohstoffindustrie näher als 2 km zum Stadtgebiet verbietet. Dieser wurde 2018 nochmals mehrheitlich beschlossen [Netzwerk „Yes to Life, No to Mining“, 2020]. Eine Probebohrung wurde genehmigt, während eine weitere abgelehnt wurde. Es gab Demonstrationen

vor dem Rathaus mit bis zu 3.000 Personen. Infinity zieht nun in Spanien gegen die Politik vor Gericht, u.a. weil der Widerspruch zur Verweigerung der Probebohrung abgelehnt wurde. Das Unternehmen ist bereit, einen Teil der Grube auch unter Tage zu betreiben und auch Staub-Emissionen durch spezielle Maßnahmen einzudämmen [Bastian et al., 2021].

Monatelange Proteste, in denen Tausende Demonstranten in Belgrad und anderen serbischen Städten gegen das Jadar-Projekt von Rio Tinto, in der Nähe von Loznica, Jadar, Serbien, auf die Straßen gingen, resultierten darin, dass die serbische Regierung die bereits erteilten Genehmigungen zurückzog [de Launey, 2022]. Im Vorfeld wehrten sich verschiedene Akteure gegen das Projekt. Die serbische Regierung erhielt einen Brief der serbischen Akademie der Wissenschaften, in dem sie gebeten wurde, die irreversiblen Konsequenzen eines Lithiumabbaus in Jadar in Betracht zu ziehen. Zwei Bürgerinitiativen reichten eine Klage gegen das Tochterunternehmen Rio Sava Explorations wegen Umweltzerstörung ein. Vor dem Stopp des Projekts verlangten Bürgerinitiativen, dass das Lithium von einem serbischen Staatskonzern abgebaut werden soll, so dass bei einem kontrollierten Abbau die höchsten Umweltstandards angewendet werden und die Einnahmen dem serbischen Staat und nicht Rio Tinto zugutekommen würden [Bastian et al., 2021].

Auch im Oberrheingraben, Deutschland, stößt die Vulcan Energie Ressourcen GmbH auf Vorbehalte Ihrer Explorationsanträge. Während des Jahres 2021 stimmten die Verantwortlichen in diversen Gemeinden in der Ortenau, einem Landkreis im Oberrheingraben, gegen 3D-seismische Erkundungen des Unternehmens sowie gegen Verlängerung der Genehmigung der Förderung von Erdwärme, Soleförderung und Lithiumgewinnung zu gewerblichen Zwecken. Die Entscheidungen gegen die Vorhaben wurden damit begründet, dass Bedenken bezüglich unvorhersehbarer Umweltauswirkungen bestünden [Badische Neuste Nachrichten, 2021, 2021a, 2021b].

Um die öffentliche Akzeptanz und das Verständnis der Bevölkerung für die komplexen Zusammenhänge von Bergbau, Bergbautechnologie und moderner Umweltschutzstandards im Bergbau sowie die Notwendigkeit des Bergbaus zur Gewinnung von Rohstoffen für Produkte wie CO₂-freie Batterien zu erhöhen, ist eine sachlich-neutrale Aufklärung notwendig [vgl. Cousse et al., 2021].



7. Fazit Steiger, K., Kolb, J., Hilgers, C.

Gegenwärtig ist die europäische Lithiumionenbatterieindustrie auf internationale Importe von Lithiumhydroxid oder Lithiumkarbonat angewiesen. Die größten Lithiumreserven liegen in Lateinamerika und Australien, raffiniertes Lithium stammt zum größten Teil dorthin, aber auch aus China. Wie bereits die COVID-19 Pandemie und jüngst der Krieg zwischen Russland und der Ukraine aufzeigen, sind die Rohstofflieferketten nach Europa teilweise hoch fragil und der Bedarf schwierig über die bisherigen Marktstrukturen wirtschaftlich zu regeln und zu decken. Der Ausbau des heimischen, innereuropäischen Bergbaus könnte dazu beitragen, resiliente Lithiumlieferketten zu etablieren.

Den wirtschaftlichen Eckdaten, der genehmigungsrechtlichen Situation und der positiven Einstellung der Bevölkerung zufolge lassen sich die in dieser Studie beschriebenen Projekte Cinovec in Tschechien und Keliber in Finnland als die in Europa am wahrscheinlichsten in Produktion gehenden Projekte bezeichnen. Das Vorantreiben von technologischer Innovation sowie die Weiterentwicklung der Fördermöglichkeiten aus konventionellen (Kap. 4.3 und Kap. 4.4) und unkonventionellen Ressourcen (Kap. 5) bieten Chancen, nachhaltige Methoden zu etablieren. Gemeinsam mit den weiterentwickelten technologischen Kompetenzen im Bereich der Lithiumförderung können diese auf dem Weltmarkt angeboten und dadurch auch Nachhaltigkeit im internationalen Bergbau vorangetrieben sowie Wertschöpfung in deutschen Unternehmen generiert werden.

Die Herausforderungen des innereuropäischen Bergbaus sind neben der technischen Machbarkeit, der Finanzierung und teilweise langjährigen Genehmigungsverfahren besonders auch die Ablehnung der Bergbauprojekte durch die Öffentlichkeit. Auch aufgrund von geologischen Gegebenheiten, wie z. B. dem Erzgehalt, die im Laufe eines Projekts, mit Zunahme der Datenlage, anders als prognostiziert ausfallen können, ist eine planmäßige Realisation aller beschriebenen Projekte nur schwer vorherzusagen.

Um den Bedarf an Lithium aus primären Lagerstätten für die Batteriezellenherstellung zu verringern, wird in der Europäischen Union das Recycling von Lithiumionenbatterien vorangetrieben. Prognosen geben an, dass der Bedarf an Lithium im Jahr 2050 zwischen 20 % und 53 % durch Batterierecycling bedient werden könnte, die tatsächliche Rate ist von den technisch möglichen Rückgewinnungsraten des Lithiums aus Batterien sowie der Durchführung im industriellen Maßstab abhängig (Xu et al., 2020; Ziemann et al., 2018).

Allerdings werden die beiden Säulen heimischer Bergbau und Recycling den Bedarf an Lithium in Europa nicht decken können. Importe werden weiterhin notwendig sein, gerade um die Zukunftstechnologien zu produzieren. Ohne die Ausweitung des innereuropäischen Bergbaus, die Verbesserung von bestehenden Abbau- und Raffinationstechnologien sowie die erfolgreiche Umsetzung von innovativen Gewinnungstechnologien u.a. durch Digitalisierung und Automatisierung, unter Einhaltung der notwendigen Umweltschutz- und sozialen Standards, wird die Abhängigkeit Europas vom internationalen Markt nicht zu reduzieren sein.

Danksagungen

Für Ihre Unterstützung beim Erstellen der Abbildungen sowie dem Glossar wird Luis Baumgartner und Lennart Böke gedankt. Für zahlreiche Diskussionen zur Rohstofflage in Europa wird Herrn Dr. Benjamin Busch gedankt.

Literatur

A

Abdullah, A.A., Oskierski, H.C., Altarawneh, M., Senanayake, G., Lumpkin, G. und Dlugogorski, B.Z. [2019]. Phase transformation mechanism of spodumene during its calcination. *Minerals Engineering* 140, 105883.

AlterResearch. [2021]. Vulcan Energy Resources - Once an exploration company, now an incumbent operator; PT raised, remains BUY. 10.12.2021. URL: https://v-er.eu/wp-content/uploads/2021/12/2021_12_10_Vulcan-Energy_e2.pdf [26.01.2022].

Ambrose, H. und Kendall, A. [2020]. Understanding the future of lithium: Part 1, resource model. *Journal of Industrial Ecology* 24, 80-89.

An, J.W., Kang, D.J., Tran, K.T., Kim, M.J., Lim, T. und Tran, T. [2012]. Recovery of lithium from Uyuni salar brine. *Hydrometallurgy* 117, 64-70.

Anderson, S.T. [2015]. The mineral Industry of Hungary. In 2012 Yearbook, Hungary, USGS Science for a changing world.

Antunes, I.M.H.Ribeiro, Ribeiro Neiva, A.M., Farinha Ramos, J.M.F., Bravo Silva, P., Guerreiro Silva, M.M.V. und Corfu, F. [2013]. Petrogenetic links between lepidolite-subtype aplite-pegmatite, aplite veins and associated granites at Segura (central Portugal). *Geochemistry* 73, 323-341.

Aral, H. und Vecchio-Sadus, A. [2008]. Toxicity of lithium to humans and the environment—a literature review. *Ecotoxicology and environmental safety* 70, 349-356.

ArcGIS. [2020]. Hellgraue Hintergrundkarte. arcgis.com.

Argus Media Group. [2022]. Lithium Prices. URL: <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium> [02.05.2022].

ASC Energy. [2019]. Lithium Recovery from Oil and Gas Produced Water: A Need for a Growing Energy Industry. Vol. 4, 1471-1474.

Australian Government. [2020]. Lithium - Resources and Energy Quarterly December 2020. In: Department of Industry, S., Energy and Resources [ed.].

B

Bacanora Lithium. [2019]. URL: Pressemitteilung Feasibility Study vom 05.06.2019. <http://www.deutschlithium.de/investor-relations/#nachrichten> [03.11.2021].

Baker, M. [2021]. Lithium: Western nations face opposition to lithium mining from local communities. 26.07.2021, Roskill, A Wood MacKenzie Business. URL: <https://roskill.com/news/lithium-western-nations-face-opposition-to-lithium-mining-from-local-communities/>.

Banks, M.K., McDaniel, W.T., Sales, P.N. [1953]. A Method for Concentration of North Carolina Spodumene Ores. URL: https://mrl.ies.ncsu.edu/wp-content/uploads/sites/13/2015/08/1953_Conc_NC_Spod_Ores.pdf [08.08.2021].

Barros R., Menuge J.F. und Harrop J. [2016]. Spodumene pegmatites in southeast Ireland: petrogenesis and economic potential as a resource of lithium and rare metals, *Plinius* 42, 635.

Bastian, N., Brüggmann, M., Louven, A. und Volkery, C. [2021]. Das große Spiel um die Vorräte: Europa will für E-Autobatterien Lithium fördern – doch die Bürger wehren sich. *Handelsblatt* 27.07.2021 URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/international/rohstoffe-das-grosse-spiel-um-die-vorraete-europa-will-fuer-e-auto-batterien-lithium-foerdern-doch-die-buerger-wehren-sich/27445716.html?ticket=ST-2201589-wY94QZ0qnz-Ez2z00nztS-cas01.example.org> [29.07.2021].

Bernhart, W. [2019]. Zukunftsmarkt Batterie-Recycling: Verpasst Europa [wieder] den Anschluss? 14.11.2019. URL: [https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-\(wieder\)-den-Anschluss.html](https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-(wieder)-den-Anschluss.html) [03.03.22].

Bertram, I. [2021]. Neues Verfahren im Test: Batterie-Rohstoff aus Grubenwasser. 07.03.2021. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/Lithiumgewinnung-grubenwasser-nrw-101.html> [02.03.22].

BGE - Bundesanstalt für Endlagerung. [2017]. Chemische Analyse salinärer Lösungen aus dem Grubengebäude der Schachanlage Asse II – Qualitätssicherung und Kontrollanalytik. Bericht über den Zeitraum 01. Januar – 31. Dezember 2015. 319 S. URL: https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Asse/Wesentliche_Unterlagen/Strahlenschutz/UEberwachung_des_Wassers_in_der_Asse/20171116_Asse_Chemische_Analyse_Salinarer_Loesungen_1Januar2015-31Dezember2015.pdf [14.03.2022].

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [2020a]. Lithium: Informationen zur Nachhaltigkeit. 13 S.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [2020b]. Lithium: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. 6 S.

BGS - British Geological Survey [2016]. Lithium, 39 p. URL: https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/mineralProfiles/lithium_profile.pdf [08.08.2021].

BNN – Badische Neuste Nachrichten. [2021]: Kategorisches Nein zur Lithium-Erkundung. Ausgabe Nr. 214, Seite 33.

BNN - Badische Neuste Nachrichten. [2021a]. Gemeinderat Rheinmünster erteilt Suche nach Lithium und Erdwärme im Boden Absage. 06.10.2021. URL: <https://bnn.de/mittelbaden/buehl/rheinmuenster/gemeinderat-rheinmuenster-stoppt-suche-nach-lithium-und-erdwaerme-im-boden> [03.11.2021].

BNN - Badische Neuste Nachrichten. [2021b]. Keine Geothermie in Renchen: Gemeinderat erteilt Vulcan Energy Resources eine Absage. 20.10.2021. URL: <https://bnn.de/mittelbaden/ortenau/renchen/gemeinderat-renchen-erteilt-vulcan-energy-resources-absage> [03.11.2021]

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung. [2020]. Batterieforschung in Deutschland. Pressemitteilung vom 08.07.2020. URL: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/batterieforschung/batterieforschung_node.html [28.04.2022].

Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F. und Pavel, C. [2020]. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study, 98 p. URL: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf

Bouguerra, W., Ali, M.B.S., Hamrouni, B. und Dhahbi, M. [2007]. Equilibrium and kinetic studies of adsorption of silica onto activated alumina. *Desalination* 206, 141-146.

Bowell, R.J., Lagos, L., de los Hoyos, C.R. und Declercq, J. [2020]. Classification and characteristics of natural lithium resources. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology* 16, 259-264.

Breiter, K., Hlozkova, M., Korbelova, Z. und Galiova, M.V. [2019]. Diversity of lithium mica compositions in mineralized granite-greisen system: Cínovec Li-Sn-W deposit, Erzgebirge. *Ore Geology Reviews* 106, 12-27.

Brightmore, D. [2021]. Lithium Outlook “bright as ever”, 5 p. 21.05.2021. URL: <https://miningdigital.com/supply-chain-and-operations/lithium-outlook-bright-ever-report> [10.12.21].

BRGM. [2022]. EuGeLi: Lithium extraction from geothermal brines in Europe 17.01.22. URL: <https://www.brgm.fr/en/current-project/eugeli-lithium-extraction-geothermal-brines-europe> [26.01.2022].

Bruggenwert, M.G.M. und Kamphorst, A. [1979]. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. *Developments in Soil Science: Elsevier* 5, 141-203.

Buijze, L., van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B.B.T., van Wees, J.-D., van Yperen, G.C.N., und ter Heege, J.H. [2020]. Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences* 98. <https://doi.org/10.1017/njg.2019.6> [04.02.22].

Bundesministeriums der Justiz. [2009]. Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Wasserhaushaltsgesetz (WHG). 18.8.2021. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/ [25.02.22].

C

Carvalho, J.M.F. und Farinha, J.A.L.B. [2004]. Lithium Potentialities in Northern Portugal, 17th Industrial Minerals International Congress, Barcelona.

Castor, S.B. und Henry, C.D. [2020]. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: Geologic, Mineralogical, and Geochemical Characteristics and Possible Origin. URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/minerals/minerals-10-00068/article_deploy/minerals-10-00068-v2.pdf?version=1579670493 [27.07.2021].

CEZ Group. [2021]. The first step to towards the construction of the Gigafactory. The MIT and ČEZ sign a memorandum. Pressemitteilung, 27.07.2021. URL: <https://www.cez.cz/en/media/press-releases/the-first-step-to-towards-the-construction-of-the-gigafactory-the-mit-and-cez-sign-a-memorandum-147566> [12.11.2021].

Charlétya, J., Cuenotb, N., Dorbatha, C., Dorbatha, C., Haesslera, H. und Frogneux, M. [2007]. Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forets. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* Vol. 44, 1091–1105.

Choubey, P.K., Chung, K.-S., Kim, M.-s., Lee, J.-c. und Srivastava, R.R. [2017]. Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element Lithium. Part II: From sea water and spent lithium ion batteries (LIBs). *Minerals Engineering* 110, 104-121.

Chung, K.-S., Lee, J.-C., Kim, E.-J., Lee, K.-E., Kim, Y.-S. und Ooi, K. [2004]. Recovery of Lithium from Seawater Using Nano-Manganese Oxide Adsorbents Prepared by Gel Process. *Material Science Forum* 449-452, 277-280.

Clauser, C. [2016]. Einführung in die Geophysik. Globale physikalische Felder und Prozesse der Erde. 2. Auflage. Springer.

Cornish Lithium Ltd. [2021]. Lithium in Geothermal Waters. URL: <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/> [23.03.2022].

Cornish Lithium Ltd. [2022]. United Downs. URL: <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/united-downs/> [23.03.2022].

Cousse, J., Trutnevyte, E. und Hahnel, U.J.J. [2021]. Tell me how you feel about geothermal energy: Affect as a revealing factor of the role of seismic risk on public acceptance. *Energy Policy* 158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112547> [02.02.22].

D

Dai, Q., Kelly, J.C., Gaines, L. und Wang, M. [2019]. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries* 5 (2), 48. DOI: 10.3390/batteries5020048.

Deichmann, N. und Ernst, J. [2009]. Earthquake focal mechanisms of the induced seismicity in 2006 and 2007 below Basel [Switzerland]. *Swiss Journal of Geoscience* Vol. 102, 457–466.

De Launey, G. [2022]. Serbia revokes Rio Tinto lithium mine permits following protests. 21.01.2022. URL: <https://www.bbc.com/news/world-europe-60081853> [02.02.22].

Deutsche Lithium. [2019]. Technical Report on the Feasibility Study for the Zinnwald Lithium Project, Germany, 20 p.

Deutsche Lithium. [2020]. Technical Report on the Feasibility Study for the Zinnwald Lithium Project, Germany, 382 p.

Deutsche Rohstoffagentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA. [2019]. Preismonitor April 2019.

Deutsche Rohstoffagentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA. [2020]. Preismonitor April 2020.

Deutsche Rohstoffagentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA. [2021a]. Chart des Monats, März 2021.

Deutsche Rohstoffagentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA. [2021b]. Preismonitor April 2021.

Deutsche Rohstoffagentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA. [2021c]. Rohstoff Preismonitor März 2021. 4.

Deutsche Rohstoffagentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DERA. [o. D.]. Rohstoff Lithium: material.

Deutsche Welle. [2021]. Rohstoffe - Portugal: Lithium-Krieg hinter den Bergen. URL: <https://www.dw.com/de/portugal-lithium-krieg-hinter-den-bergen/a-59040654>.

Diallo, M.S., Kotte, M.R. und Cho, M. [2015]. Mining Critical Metals and Elements from Seawater: Opportunities and Challenges. *Environmental Science and Technology, Special Issue: Critical Materials Recovery from Solutions and Wastes*.

Dill, HG. [2020]. A geological and mineralogical review of clay mineral deposits and phyllosilicate ore guides in Central Europe – A function of geodynamics and climate change. *Ore geology reviews* 119, 103304.

Dittrich, T., Helbig, M., Kühn, K., Bock, W.D. und Müller, A. [2020]. The Zinnwald Lithium-Project: Transferring legacy exploration data into new mineral resources, *European Geologist Journal* 49, p.12-17.

dpa. [2021]. Wie Forscher aus Bergbau-Grubenwasser Lithium gewinnen wollen. URL: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/batterietechnik-forscher-wollen-lithium-aus-grubenwasser-gewinnen-a-cb65e762-8ca2-424a-9794-32b1c1181878> [02.03.22].

Drobe, M. [2020a]. Vorkommen und Produktion mineralischer Rohstoffe - ein Ländervergleich [2020]. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 36.

Drobe, M. [2020b]. Lithium - Informationen zur Nachhaltigkeit. Unter Mitarbeit von Michael Schmidt und Gudrun Franken. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/lithium.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 19.05.2021.

Drüppel, K., Stober, I., Grimmer, J.C. und Mertz-Kraus, R. [2020]. Experimental alteration of granitic rocks: Implications for the evolution of geothermal brines in the Upper Rhine Graben, Germany. *Geothermics* 88, 101903. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101903.

E

Eckstein, Y., Yaalon, D.H. und Yariv, S. [1970]. The effect of lithium on the cation exchange behaviour of crystalline and amorphous clays. *Israel Journal of Chemistry* 8, 335-342.

Eco News. [2021]. APA closes assessment on lithium mine in Montalegre without decision. Lusorecursos changed the project. 25.08.2021 URL: <https://econews.pt/2021/08/25/apa-closes-assessment-on-lithium-mine-in-montalegre-without-decision-lusorecursos-changed-the-project/> [03.11.2021].

EIT Raw Materials. [2019]. EuGeLi – European Geothermal Lithium Brines. URL: <https://eitrawmaterials.eu/project/eugeli/>.

EIT Raw Materials. [2020]. EuGeLi project extracting European lithium for future electric vehicle batteries. 14.09.2020. URL: <https://eitrawmaterials.eu/eugeli-project-extracting-european-lithium-for-future-electric-vehicle-batteries/> [26.01.22].

Eramet. [2019]. EuGeLi project: extracting European lithium for future electric vehicle batteries. URL: <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project>.

Eramet. [2021]. Eramet and Électricité de Strasbourg (ÉS) announce the success of the first pilot test to extract lithium from geothermal brine in Alsace, France. Press Release 11.05.2021. URL: <https://www.eramet.com/sites/default/files/2021-05/Eramet-ES-PR-EuGeLi-11052021.pdf> [02.11.2021].

EU Kommission. [2020a]. Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. European Commission 474 final, 26 S., URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>.

EU Kommission. [2020b]. Die Umwandlung von Anlagen zur Meerwasserentsalzung in Rohstoffminen. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/869703/de> [28.10.2021].

EU Kommission. [2020c]. Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. 10.12.2020. S. 143. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF [28.04.2022].

European Lithium Ltd. [2018a]. Annual Report 2018. URL: <https://europeanlithium.com/announcements/financial-reports/> [08.03.22].

European Lithium Ltd. [2018b]. European Lithium completes positive PFS, ASX Release, 50 p.

European Lithium. [2019]. Unternehmenspräsentation. März 2019. URL: <https://europeanlithium.com/presentationen-und-factsheet-presentations-factsheet/> [08.03.22].

European Lithium Ltd. [2021a]. Projektgeschichte. URL: <https://europeanlithium.com/wolfsberg-lithiumprojekt/projektgeschichte/> [08.08.21].

European Lithium Ltd. [2021b]. Wolfsberg Lithium Project, Corporate Presentation February 2021, 22 p. URL: https://europeanlithium.com/wp-content/uploads/2021/03/210201-European-Lithium-Presentation_Feb-2021FINAL.pdf [08.03.22].

European Lithium Ltd. [2022]. Quaterly activities report and appendix 5B for the quarter ending 31 December 2021. 31.01.22. URL: <https://europeanlithium.com/wp-content/uploads/2022/01/220131-December-2021-Quarterly-Report-Combined.pdf> [08.03.22].

European Metals Holding Ltd. [2015]. A competent person's report on the Cinovec Lithium-Tin Project, Czech Republic, prepared by Wardell Armstrong, 92 p. URL: <https://pdfroom.com/books/european-metals-holdings-competent-persons-report-on-the-cinovec/DkgVeJW9d9B>.

European Metals Holding Ltd. [2017]. Preliminary Feasibility Study confirms as potentially low cost lithium carbonate producer, 28 p. URL: <https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/674e66ca-8c9.pdf>.

European Metals Holding Ltd. [2021]. Quarterly Report September 2021, 10 p. URL: <https://www.londonstockexchange.com/news-article/EMH/quarterly-report/15079423>.

European Metals Holding Ltd. [2022a]. PFS Update delivers outstanding results. Pressemitteilung vom 19.01.22. URL: <https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/7381a65f-d0b.pdf> [08.03.22].

European Metals Holding Ltd. [2022b]. Ethically sources European battery metals power Europe's sustainable future. Unternehmenspräsentation vom 28.01.22. URL: <https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/98f1dec2-9ad.pdf> [08.03.22].

EU-Recycling Magazin. [2021]. Das Recycling von Lithiumionenbatterien bekommt Konturen. 05/2021, S. 18. <https://eu-recycling.com/Archive/31441>.

Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union. [2000]. RICHTLINIE 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0003.02/DOC_1&format=PDF [25.02.22].

Eurostat. [2021]. Glossary: Baseline Study. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Baseline_study.

Equinor. [2021]. Panasonic, Equinor and Hydro to explore potential for European battery business. Pressemitteilung vom 18.11.2020. URL: <https://www.equinor.com/news/archive/202011-battery-business> [12.11.2021].

F

Frick, S., Schröder, G., Rychtyk, M., Bohnenschäfer, W. und Kaltschmitt, M. [2007]. Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung – Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung. – Endbericht, Forschungsprojekt FKZ 205 42 110 im Auftrag des Umweltbundesamtes; Leipzig.

G

Gaikwad, R.W., Misal, S.A. und Gupta, D.V. [2011]. Removal of metal from acid mine drainage (AMD) by using natural zeolite of Nizarneshwar Hills of Western India. Arabian Journal of Geosciences 4, 85-89.

Gast, R.G. und Klobe, W.D. [1971]. Sodium-lithium exchange equilibria on vermiculite at 25 and 50 C. Clays and Clay minerals 19, 311-319.

Gaucher, E., Schoenball, M., Heidbach, O., Zang, A., Fokker, P.A., van Wees, J.D. und Kohl, T. [2015]. Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews 52, 1473-1490.

Geothermal Engineering Ltd. [2021]. Geothermal Engineering Ltd confirms highest global concentration of lithium in geothermal fluid at its United Downs site. Press release 11. August 2021. URL <https://geothermal-engineering.co.uk/lithium-august/>.

Geo3. [2021]. GeoCubed selects GeoLith's Li-Capt® DLE Technology for United Downs Pilot Plant and Deep Geothermal Water Samples Successfully Obtained Following GEL Pump Test. Press release 22. Juli 2021. URL: <https://geocubed.co.uk/news/geocubed-selects-geoliths-li-capt-dle-technology-for-united-downs-pilot-plant-and-deep-geothermal-water-samples-successfully-obtained-following-gel-pump-test/>.

Geo3. [2022]. GeoCubed selects RSE (Ross-shire Engineering) to Provide EPCC Support for The United Downs Pilot Plant and Deep Geothermal Assay Results Confirm Expected Lithium Concentrations. Press release 11.01.2022. URL: <https://geocubed.co.uk/news/geocubed-selects-rse-to-provide-epcc-support-for-the-united-downs-pilot-plant-and-deep-geothermal-assay-results-confirm-expected-lithium-concentrations/> [26.01.2022].

German Lithium Participation. [2021]. Entwicklung des Lithiumkarbonatpreises (battery grade, in US-Dollar) zwischen 2002 und 2021 mit Preisprognose bis 2025/2030 © HWS AG / GLP. Düsseldorf.

Globe Newswire. [2020]. Roskill: CO₂ emissions from lithium production set to triple by 2025. Online verfügbar unter <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/10/05/2103285/0/en/Roskill-CO2-emissions-from-lithium-production-set-to-triple-by-2025.html>, zuletzt aktualisiert am 05.10.2020, zuletzt geprüft am 11.07.2021.

Gregoir, L., van Acker, K., Beretta, S., Heron, C. [2022]: Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw material challenge. Policymaker Summary. URL: <https://eurometaux.eu/media/20ad5yza/2022-policy-maker-summary-report-final.pdf> [09.05.2022].

Goldberg, V., Winter, D., Nitschke, F., Rath, M., Held, S., Spitzmüller, L., Budach, I., Pavez, M., Morata, D. und Koschikowski, J. [2021]. The potential of raw material extraction from thermal brines—Successful milestones of the BrineMine project. *Oil gas-European Magazine* 47(1), 26-33.

Goldinvest. [2021]. Fitch: Lithiumpreise werden weiter steigen. 16.11.2021. URL: <https://goldinvest.de/mining-resources/fitch-lithiumpreise-werden-weiter-steigen> [30.04.2022].

Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J. und Galiegue, X. [2019]. Re-assessing the European lithium resource potential – A review of hard-rock resources and metallogeny, *Ore Geology Reviews* 119, 494-519.

Grant, A., und Goodenough, K. [2021]. Is there enough Lithium to make all the Batteries? *Battery Bits* 26.06.2021. URL: <https://medium.com/batterybits/is-there-enough-lithium-to-make-all-the-batteries-c3a522c01498> [08.09.2021].

Greene-Kelly, R. [1955]. Lithium absorption by kaolin minerals. *The Journal of Physical Chemistry* 59, 1151-1152.

Groos, J., Zeiß, J., Grund, M. und Ritter, J. [2013]. Microseismicity at two geothermal power plants at Landau and Insheim in the Upper Rhine Graben, Germany. *Geophysical Research Abstracts* 15 [EGU2013-2742].

Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Kesler, S.E., Everson, M.P. und Wallington, T.J. [2011]. Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? *Journal of Industrial Ecology* 15, 760-775.

H

Hawash, S., Abd El Kader, E. und El Diwani, G. [2010]. Methodology for selective adsorption of lithium ions onto polymeric aluminium (III) hydroxide. *Journal of American Science* 6, 301-309.

Heahnlein, S., Bayer, P., Blum, P. [2010]. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2611-2625.

Helferich, F.G. [1995]. Ion exchange. New York, USA: Dover Publications, Inc.

Helvacı, C., Mordogan, H., Colak, M. und Gündogan, I. [2004]. Presence and Distribution of Lithium in Borate Deposits and Some Recent Lake Waters of West-Central Turkey. *International Geology Review* Vol. 46, 177-190.

Herrmann, A.G. [1961]. Über das Vorkommen einiger Spurenelemente in Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein. *Kali Steinsalz* Vol. 3, 209-220.

Houston, J. [2010]. Technical report on the Cauchari Project. In: Ltd, O. (ed.) Jujuy Province, Argentina. Queensland.

Huber, F., Berwanger, J., Polesya, S., Mankovsky, S., Ebert, H. und Giessibl, F.J. [2019]. Chemical bond formation showing a transition from physisorption to chemisorption. *Science* 366, 235-238.

I

Infinity Lithium. [2018]. Lithium Hydroxide Scoping Study, San Jose delivers outstanding results, ASX Release, 64 p.

Infinity Lithium. [2019]. Pre-Feasibility Study, San Jose Lithium Hydroxide Project, ASX, 57 p.

Infinity Lithium. [2021a]. San José Lithium Project, Integrated Underground Mine & Lithium Hydroxide Production, Scoping Study, 20 p.

Infinity Lithium. [2021b]. Infinity signs offtake MoU with LG Energy Solutions. ASX-Mitteilung vom 28.06.21. URL: https://cdn-api.markitdigital.com/apiman-gateway/ASX/asx-research/1.0/file/2924-02388412-6A1038319?access_token=83ff96335c2d45a094df02a206a39ff4 [08.03.22].

Informationsportal Geothermie. [2022]. Standortsteckbrief Bruchsal. <https://www.tiefegeothermie.de/projekte/bruchsal> [17.03.2022].

InnoEnergy. [2021]. World's first zero carbon lithium extraction project to start in Germany. Press release 21.07.2020. URL: <https://www.innoenergy.com/news-events/world-s-first-zero-carbon-lithium-extraction-project-to-start-in-germany/> [26.01.2022].

INM Leibniz. [2020]. Grubenwasser als Wertwasser – Bergbau trifft Elektromobilität. Pressemitteilung vom 23. November 2020. URL: <https://www.leibniz-inm.de/pressemitteilung/grubenwasser-als-wertwasser-bergbau-trifft-elektromobilitaet/>.

Intaranont, N., Garcia-Araez, N., Hector, A.L., Milton, J.A. und Owen, J.R. [2014]. Selective lithium extraction from brines by chemical reaction with battery materials. *Journal of Materials Chemistry A* 2, 6374-6377.

International Lithium Corporation. [2021]. Corporate Presentation, March 2021, 25 p.

J

Jamasmie, C. [2021]. Portuguese energy group backs Savannah's lithium project. 12.01.2021. URL: <https://www.mining.com/portuguese-energy-group-backs-savannahs-lithium-project/> [08.08.2021].

K

Kagel, A. und Gawell, K. [2005]. Promoting Geothermal Energy: Air Emissions Comparison and Externality Analysis. *The Electricity Journal* 18(7), 90 – 99. DOI: /10.1016/j.tej.2005.07.004.

Kawamoto, H. und Tamaki, W. [2011]. Trends in supply of lithium resources and demand of the resources for automobiles. NISTEP Science & Technology Foresight Center.

Keliber. [2019]. Update Definitive Feasibility Study. 28.02.2019. URL: https://www.keliber.fi/site/assets/files/1864/updated_dfs_presentation_28022019.pdf [08.03.22].

Keliber. [2021a]. Mineral resources and ore reserves. URL: <https://www.keliber.fi/en/geology/mineral-resources-and-ore-reserves/> [08.08.21].

Keliber. [2021b]. Progress Report Q1, April 2021, 21 p.

Kelly, J.C., Wang, M., Dai, Q. und Winjobi, O. [2021]. Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 174, 105762. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105762.

Kesler, S.E., Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Everson, M.P. und Wallington, T.J. [2012]. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore geology reviews* 48, 55-69.

Kim, J. und Grey, C.P. [2010]. 2H and 7Li solid-state MAS NMR study of local environments and lithium adsorption on the iron (III) oxyhydroxide, akaganeite [β -FeOOH]. *Chemistry of Materials* 22, 5453-5462.

Kudryavtsev, P.G. [2016]. Lithium in nature, application, methods of extraction. *Journal“ Scientific Israel-Technological Advantages* 18, 63-83.

L

LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen. [2020]. Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2019. 70 S. URL: https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/155558/Erdoel_und_Erdgas_in_der_Bundesrepublik_Deutschland_2019.pdf [05.01.2022].

Lee, T.D. 1984. Planning and mine feasibility study—An own er's perspective. In *Proceedings of the 1984 NWMA Short Course “Mine Feasibility—Concept to Completion.”* Compiled by G.E. McKelvey. Spokane, WA: Northwest Mining Association. National Instrument 43-101.

Lemaire, J., Svecova, L., Lagallarde, F., Laucournet, R. und Thivel, P.-X. [2014]. Lithium recovery from aqueous solution by sorption/desorption. *Hydrometallurgy* 143, 1-11.

Piedmont Lithium Limited. [2020]. Chemical plant PFS demonstrates exceptional economics and optionality of USA location. ASX Release.

Li, Z., Li, C., Liu, X., Cao, L., Li, P., Wei, R., Li, X., Guo, D., Huang, K.-W. und Lai, Z. [2021]. Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining. *Energy Environ. Sci.* 14, 3152. DOI: 10.1039/D1EE00354B.

Limousin, G., Gaudet, J.-P., Charlet, L., Szenknect, S., Barthes, V. und Krimissa, M. [2007]. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied geochemistry* 22, 249-275.

Linneen, N., Bhave, R., Woerner, D. [2019]. Purification of industrial grade lithium chloride for the recovery of high purity battery grade lithium carbonate. *Separation and Purification Technology*, Vol. 214, p.168-173.

Liu, W., Xu, H., Shi, X. und Yang, X. [2017]. Fractional crystallization for extracting lithium from Cha'erhan tail brine. *Hydrometallurgy* 167, 124-128.

Liu, C., Li, Y., Lin, D., Hsu, P., Liu, B., Yan, G., Wu, T., Cui, Y. und Chu, S. [2020]. Lithium Extraction from Seawater through Pulsed Electrochemical Intercalation. *Joule* 4(7), 1459-1469.

London Metal Exchange, LME. [2021]. The London Metal Exchange - an HKEX Company.

Lücke, W. und Ucik, F.H. [1986]. Die Zusammensetzung der Pegmatite von Edling und Wolfsberg bei Spittal/Drau (Kärnten) im Rahmen der Pegmatitvorkommen des Millstätter See-Rückens, *Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A.*, Band 7, 173-187.

Lüders, V., Plessen, B., Romer, R.L., Weise, S.M., Banks, D.A., Hoth, P., Dulski, P. und Schettler, G. [2010]. Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin. *Chemical Geology* 276, 198-208.

M

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Baur, S.-J., Billaud, M., Deubzer, O., Eberling, E., Erdmann, L., Haendel, M., Krail, M., Loibl, A., Maisel, F., Marwede, M., Neef, C., Neuwirth, M., Rostek, L., Rückschloss, J., Shirinzadeh, S., Stijepic, D., Tercero Espinoza, L. und Tippner, M. [2021]. Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. – DERA Rohstoffinformationen 50, 366 S., Berlin.

MacGregor, C. [2009]. Battery lithium could come from geothermal waste water. *New Scientist* 204(2738), 23. DOI:10.1016/S0262-4079(09)63248-6 [25.02.2022].

Mărgulescu, S. und Mărgulescu, E. [2014]. Spotlight on lithium: lithium producers are developing process technology to supply the anticipated growing demand. *Lithium Market Trends. Chemical Engineering* 121, 17-22.

Marthi, R., Asgar, H., Gadikota, G. und Smith, Y.R. [2021]. On the Structure and Lithium Adsorption Mechanism of Layered H₂TiO₃. *ACS Applied Materials & Interfaces* 13, 8361-8369.

Martin, G., Rentsch, L., Höck, M. und Bertau, M. [2017]. Lithium market research–global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials* 6, 171-179.

Martins, T., Lima, A., Simons, W.B., Falster, A.U. und Noronha F. [2011]. Geochemical fractionation of Nb-Ta oxides in Li-bearing pegmatites from the Barroso-Alvão pegmatite field, northern Portugal, *The Canadian Mineralogist* 49, 777-791.

Mayyas, A., Steward, D., Mann, M. [2018]. The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies* 17. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>.

McEachern, P. [2017]. Lithium recovery from oilfield produced water brine and wastewater treatment. Report prepared for MGX Minerals, 9-21.

McKibben, M.A., Elders, W.A. und Raju, A.S.K. [2020]. Lithium and Other Geothermal Mineral and Energy Resources Beneath the Salton Sea. *CRISIS AT THE SALTON SEA: The Vital Role of Science in Academia*, 69 – 80. URL: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/68788876/SSTF_Report_Chapter_7_FINAL_with_REF-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1645784689&Signature=SB91J4oKsCRIQiXeiJAgHxv0QxuctMczl6VNuJu9eJbV3t-Cv6xPuTKxMSruNbaUnpGZmFDFFRVQvDTunua5lOgeEuBZvpUbqyKI8GQ9M9g55q8Wsg0Va2qphwfacEfbRcyQz-flh5Op49c9GCvzPCQ0k6UTxQVC6o67TBFtIzrvv5qCCqUmCCNKRI7e6g~7QbgyDNFXKi40oIU-ZT-JBpDfOxR8qJf-l~5y0d9E433B5M1zeBxe7oGNyWtEiE354RV2KysAAKc8mk1l5-xhNi8iBeFIZBt27UkTntT6YsMMJJ-rxY6C3Jgm-fsDKUv7zLTb0LMev~oPxjFy9hJWQeailg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA [25.02.2022].

Meng, F., McNeice, J., Zadeh, S.S. und Ghahreman, A. [2021]. Review of lithium production and recovery from minerals, brines, and lithium-ion batteries. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 42, 123-141.

Mertineit, M. und Schramm, M. [2019]. Lithium Occurrences in Brines from Two German Salt Deposits (Upper Permian) and First Results of Leaching Experiments. *MDPI Minerals* 9, 766. doi:10.3390/min9120766.

Meshram, P., Pandey, B.D. und Mankhand, T.R. [2014]. Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy* 150, 192-208.

Michaud, L.D. [2016]. Processing Spodumene by Froth Floatation for Lithium Extraction. 911Metallurgist (ed.). Mining Data Online. [2021]. Sal de Vida Project. URL: <https://miningdataonline.com/property/3228/Sal-de-Vida-Project.aspx> [21.05.2021].

Minviro. [2020]. The CO₂ Impact of the 2020s Battery Quality Lithium Hydroxide Supply Chain. January 2020. URL: <https://www.minviro.com/the-co2-impact-of-the-2020s-battery-quality-lithium-hydroxide-supply-chain/> [08.02.22].

Mohr, S.H., Mudd, G.M. und Giurco, D. [2012]. Lithium resources and production: critical assessment and global projections. *Minerals* 2, 65-84.

N

Navarrete-Casas, R., Navarrete-Guijosa, A., Valenzuela-Calahorra, C., López-González, J.D. und García-Rodríguez, A. [2007]. Study of lithium ion exchange by two synthetic zeolites: Kinetics and equilibrium. *Journal of colloid and interface science* 306, 345-353.

Neff, J., Lee, K. und DeBlois, E. [2011]. Produced Water: Overview of Composition, Fates and Effects. In: Lee, K., Neff, J.: *Produced Water, Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies*. P. 3- 54.

Neupane, G. und Wendt, D.S. [2017]. Assessment of mineral resources in geothermal brines in the US. Proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, 13-15.

Netzwerk Yes to Life, No to Mining. [2020]. Casa en apoyo „Salvemos la Montaña“ de Cáceres. URL: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgU7DO-ItBwzqJsuyNIPAWaGloQC177J9bmLCWaVgKFbIP5g/viewform> [08.11.21].

Nie, X.-Y., Sun, S.-Y., Song, X. und Yu, J.-G. [2017]. Further investigation into lithium recovery from salt lake brines with different feed characteristics by electrodialysis. *Journal of Membrane Science* 530, 185-191.

O

O'Connor, T., Clark, A., Kyser, K., Stefan, L. und Li, V. [2018]. Uranium-Lithium deposits at Macusani, Peru: Geology, Processing & Economics along the path to production. *International Symposium on Uranium raw material for the nuclear fuel cycle: Exploration, mining, production, supply and demand, economics and environmental issues (URAM-2018)*.

Öko-Insitut. [2020]. Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithiumionenbatterien, Verbundvorhaben MERCATOR, 16 S. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strategiepapier-Mercator-Recycling-Batterien.pdf> [12.11.2021].

Ortiz, S. [2021]. Gigafactories: Europe's major commitment to economic recovery through the development of battery factories. 07.04.2021. URL: <https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories> [28.11.2021].

Ooi, K., Makita, Y., Sonoda, A., Chitrakar, R., Tasaki-Handa, Y. und Nakazato, T. [2016]. Modelling of column lithium adsorption from pH-buffered brine using surface Li⁺/H⁺ ion exchange reaction. Chemical Engineering Journal 288, 137-145.

Ooi, K., Miyai, Y. und Katoh, S. [1987]. Lithium-ion sieve property of λ -type manganese oxide. Solvent Extraction and Ion Exchange 5, 561-572.

P

Park, H., Singhal, N. und Jho, E.H. [2015]. Lithium sorption properties of HMnO in seawater and wastewater. Water Research 87, 320-327.

Pauwels, H., Brach, M. und Fouillac, C. [1993]. Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben: Origin of compounds and water-rock interactions. Geochimica et cosmochimica acta 57, 2737-2749.

Peerawattuk, I. und Bobicki, E.R. [2018]. Lithium Extraction and Utilization: A Historical Perspective. Extraction 2018: Springer, 2209-2224.

Pesquera, A., Robles, E.R., Gil-Crespo, P.P., Valls, D. und Torres Ruiz, J. [2020]. The metasomatic enrichment of Li in psammopelitic units at San José-Valdeflórez, Central Iberian Zone, Spain: a new type of lithium deposit, Sci Rep 10, 10828.

Pfalzwerke Geofuture. [2021]. Aus Pfalzwerke geofuture GmbH wird Natürlich Insheim GmbH. URL: <https://www.geothermie-insheim.de/index.php/das-kraftwerk> [09.02.2022].

Pistilli, M. [2021]. What are Prefeasibility and Feasibility Studies? URL: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/prefeasibility-feasibility-studies/> [28.11.2021].

PK Geothermie. [2011]. Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. 58 S., URL: https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Downloads/FS2011_Top_6.2_Anlage_PK_Geothermie_Bericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [25.02.2022].

Porsche. [2021]. Cellforce errichtet Produktion in Reutlingen-Nord/ Kirchentellinsfurt. Pressemitteilung, 12.12.2021. URL: <https://newsroom.porsche.com/de/2021/unternehmen/porsche-cellforce-produktion-hochleistungs-batteriezellen-reutlingen-nord-kirchentellinsfurt-26792.html> [04.01.2022].

Prodromou, K.P. [2016]. Lithium adsorption on amorphous aluminum hydroxides and gibbsite. Eurasian Journal of Soil Science 5, 13-16.

Produced Water Society. [2021]. MGX Minerals and Eureka Resources join forces in lithium recovery venture - Produced Water Society. 09.07.21. URL: <https://producedwatersociety.com/mgx-minerals-and-eureka-resources-join-forces-in-lithium-recovery-venture/> [02.03.22].

R

RAG Stiftung. [2020]. Grubenwasser als Wertwasser – Bergbau trifft Elektromobilität. Pressemitteilung vom 23. November 2020. URL: <https://www.rag-stiftung.de/presse/pressemitteilungen/grubenwasser-als-wertwasser-bergbau-trifft-elektromobilitaet>.

Regenspurg, S., Feldbusch, E., Norden, B. und Tichomirowa, M. [2016]. Fluid-rock interactions in a geothermal Rotliegend/Permo-Carboniferous reservoir (North German Basin). Applied Geochemistry 69, 12-27. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.03.010.

Reich, R., Slunitschek, K., Danisi, R.M., Eiche, E. und Kolb, J. [2022]. Lithium Extraction Techniques and the Application Potential of Different Sorbents for Lithium Recovery from Brines. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. DOI: 10.1080/08827508.2022.2047041

Reinecker, J., Hochschild, T., Kraml, M., Löschan, G. und Kreuter, H. [2019]. Experiences and challenges in geothermal exploration in the Upper Rhine Graben. European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, 11-14 June 2019.

Reva, M.V., Chomko, D.F. und Chomko, F. [2021]. Prospects lithium extraction from produced water in oil and gas fields of Ukrainian. Geoinformatics 2021, 11-14 May 2021, Online Event. In EAGE. Doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521150>

Richter, A. [2021]. French developer Fonroche Geothermie is planning to expand its geothermal power project at Puy-de-Dôme in Central France with the extraction of Lithium. URL: <https://www.thinkgeoenergy.com/planned-geothermal-lithium-extraction-puy-de-dome-france/>.

Rio Tinto. [2020]. Rio Tinto declares maiden Ore Reserve at Jadar. Notice to ASX 10.12.2020. URL: <https://www.riotinto.com/-/media/Content/Documents/Invest/Reserves-and-resources/RT-Jadar-Reserves-2020.pdf?rev=c31b0fd7047f46dcba39bc3dea49ccb6> [03.11.21].

Rio Tinto. [2021]. Jadar Project, Facts at a Glance. Factsheet. 5 S. Juli 2021. URL: <https://www.riotinto.com/-/media/Content/Documents/Operations/Jadar/RT-Jadar-Fact-sheet-EN.pdf?rev=1656fd48750f4579a69ce-7b4e953038c> [03.11.21].

Rio Tinto. [2022]. Jadar Project Update. Pressemitteilung vom 20.01.2022. URL: <https://www.riotinto.com/operations/projects/jadar> [08.03.22].

Roedl und Partner. [2019]. Lithium – das Rückgrat der Energie- und Mobilitätswende. URL: <https://www.roedl.de/themen/erneuerbare-energien/2019-11/lithium-batterie-elektroautos-energiwende-mobilitaetswende> [29.03.22].

Romare, M. und Dahlöf, L. [2017]. The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles. Report number C 243. IVL Swedish Environmental Research Institute.

Rosales, G.D., Resentera, A.C.J., Gonzalez, J.A., Wuilloud, R.G. und Rodriguez, M.H. [2019]. Efficient extraction of lithium from β -spodumene by direct roasting with NaF and leaching. Chemical Engineering Research and Design 150, 320-326.

Rydberg, J. [2004]. Solvent extraction principles and practice, revised and expanded: CRC press.

Ryu, T., Ryu, J.C., Shin, J., Lee, D.H., Kim, Y.H. und Chung, K.-S. [2013]. Recovery of lithium by an electrostatic field-assisted desorption process. Industrial & Engineering Chemistry Research 52, 13738-13742.

S

S&P Global. [2019]. Updated study raises value of European Metals Cinovec lithium project by 105%, 2 p.

S&P Global. [2021a]. European Metals' Cinovec project to produce low carbon lithium. 23.11.21. URL: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/market-insights/latest-news/metals/112321-european-metals-cinovec-project-to-produce-low-carbon-lithium> [08.03.22].

S&P Global. [2021]. Opposition to Rio Tinto's Jadar lithium project gains momentum in Serbia. URL: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/061021-opposition-to-rio-tintos-jadar-lithium-project-gains-momentum-in-serbia> [08.10.2021].

Safari, S., Lottermoser, B.G. und Alessi, D.S. [2020]. Metal oxide sorbents for the sustainable recovery of lithium from unconventional resources. Applied Materials Today 19, 100638.

Sakamoto, H., Kimura, K. und Shono, T. [1987]. Lithium separation and enrichment by proton-driven cation transport through liquid membranes of lipophilic crown nitrophenols. Analytical Chemistry 59, 1513-1517.

Salakjani, N.K., Singh, P. und Nikoloski, A.N. [2019]. Production of Lithium – A literature review. Part 2. Extraction from Spodumene. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 42, 268-283.

Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, C., Dezayes, C., Scheiber, J. und Brach, M. [2016]. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation. *Chemical Geology* 428, 27-47. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.02.021.

Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E. und Rombaut, A. [2022]. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. *Geothermics* 101, 102385. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102385.

Savannah Resources Plc. [2010-2021]. Mina do Barroso Project, Portugal. URL: <https://www.savannahresources.com/assets/mina-do-barroso/> [08.06.2021].

Savannah Resources Plc. [2018]. Scoping Study for the Mina do Barroso Lithium Project Delivers NPV of US\$356m Solid Basis to Fast Track the Project to a Feasibility Study, AIM, 24 p.

Savannah Resources Plc. [2021a]. Europe's leading conventional lithium project, Corporate Presentation, September 2021, 29 p.

Savannah Resources Plc. [2021b]. Heads of Agreement between Savannah and Galp re. strategic investment & offtake agreement. Pressemitteilung vom 12.01.21. URL: <https://www.savannahresources.com/cms/wp-content/uploads/2021/01/Heads-of-Agreement-between-Savannah-and-Galp-re.-Strategic-Investment-Off-take-Agreement-12.01.21.pdf> [08.03.2022].

Schmidt, M. [2017]. Rohstoffrisikobewertung – Lithium. – DERA Rohstoffinformationen 33: Berlin.

Shi, C., Jing, Y., Xiao, J., Wang, X., Yao, Y. und Jia, Y. [2017]. Solvent extraction of lithium from aqueous solution using non-fluorinated functionalized ionic liquids as extraction agents. *Separation and Purification Technology* 172, 473-479.

Shortall, R., Davidsdottir, B. und Axelsson, G. [2014]. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44, 391-406.

Silva Aroso, J. und Magalhães, O. [2021]. The Mining Law Review: Portugal. 01.11.21. *The Mining Law Review* Edition 10. URL: <https://thelawreviews.co.uk/title/the-mining-law-review/portugal-mining-law> [07.03.22].

Slunitschek, K., Kolb, J. und Eiche, E. [2021]. Lithium extraction from geothermal brines. *GIT Laborfachzeitschrift* 7-8.

Somrani, A.A.H.H., Hamzaoui, A.H. und Pontie, M. [2013]. Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO). *Desalination* 317, 184-192.

Soltani, M., Kashkooli, F.M., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K. und Nathwani, J. [2021]. Environmental, economic and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140, 110750. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750> [02.02.22].

Song, J.F., Nghiem, L.D., Li, X.-M. und He, T. [2017]. Lithium extraction from Chinese salt-lake brines: opportunities, challenges, and future outlook. *Environmental Science: Water Research & Technology* 3, 593-597.

Stamp, A., Lang, D.J. und Wäger, P.A. [2012]. Environmental impacts of a transition toward e-mobility: the present and future role of lithium carbonate production. *Journal of Cleaner Production* 23(1), 104-112. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.10.026.

Statista. [2021]. Statista: Global No. 1 Business Data Platform.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. [2022]. Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030. S., Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000153059.

Stringfellow, W.T. und Dobson, P.F. [2021]. P.F. Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. *Energies* 2021 14(20), 6805. <https://doi.org/10.3390/en14206805>. [22.02.2022].

Stober, I. und Bucher, K., [2012]. *Geothermie*. Springer Berlin Heidelberg, 390 S.

Stober, I., [2014]. Hydrochemical properties of deep carbonate aquifers in the SW German Molasse basin. *Geotherm Energy* 2(13), 1-20. DOI: 10.1186/s40517-014-0013-1.

Stober, I., Wolfgramm, M. und Birner, J. [2014b]. Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland. *Z. geol. Wiss., Berlin* 41/42, 5-6, 339 – 380. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ingrid-Stober/publication/272677993_Hydrochemie_der_Tiefenwasser_in_Deutschland/links/55fff9d408aeba1d9f841f19/Hydrochemie-der-Tiefenwaesser-in-Deutschland.pdf?origin=publication_detail [05.01.2022].

Stober, I. und Bucher, K. [2015]. Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids* 15(3), 464-482. DOI: 10.1111/gfl.12122.

Sullivan, E.J., Reimus, P.W., Chipera, S.J. und Counce, D. [2003]. Effects of mineralogy, exchange capacity, surface area and grain size on lithium sorption to zeolitic alluvium near Yucca Mountain, Nevada. *Clays and Clay minerals* 51, 634-643.

Sun, S.-Y., Cai, L.-J., Nie, X.-Y., Song, X. und Yu, J.-G. [2015]. Separation of magnesium and lithium from brine using a Desal nanofiltration membrane. *Journal of Water Process Engineering* 7, 210-217.

Swain, B. [2017]. Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology* 172, 388-403.

Sykes, J. [2019]. A global overview of the geology and economics of lithium production. <https://minexconsulting.com/wp-content/uploads/2019/12/Lithium-Presentation-July-2019.pdf>. [15.03.2022].

T

Tadesse, B., Makuei, F., Albjanic, B. und Dyer L. [2019]. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. *Minerals Engineering* 131, 170-84.

Talens Peiro, L., Nuss, P., Mathieux, F. und Blengini, G. [2018]. Towards Recycling Indicators based on EU flows and Raw Materials System Analysis data, EUR 29435 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-79-97247-8 [online], JRC112720. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112720/kj-na-29435-en-n_recycling_report.pdf [23.03.2021].

Tarascon, J.M. [2010]. Is lithium the new gold? *Nature Chemistry* 2, 510. URL: <https://www.nature.com/articles/nchem.680.pdf> [03.03.2022].

The Mineral Corporation. [2019]. Mineral Resource estimates for the Falchani Lithium Project in the Puno District of Peru. 76.

Thielmann, A., Wietschel, M., Funke, S., Grimm, A., Hettseheimer, T., Langkau, S., Loibl, A., Moll, C., Neef, C., Plötz, P., Sievers, L., Tercero Espinoza, L. und Edler, J. [2020]. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Fraunhofer ISI. 36 S. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf> [17.05.2021].

Toba, A.-L., Nguyen, R.T., Cole, C., Neupane, G. und Paranthaman, M.P. [2021]. U.S. lithium resources from geothermal and extraction feasibility. *Resources, Conservation and Recycling* 169, 105514. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105514.

Tran, T. und Luong, V.T. [2015]. Chapter 3 – Lithium production processes, *Lithium process chemistry: Resources, extraction, batteries and recycling*. Ed. Chagnes, A. and Swiatowska, J., 1st Edition, Elsevier Science.

U

UnLimited. [2022]. Projektbeschreibung. URL: <https://www.geothermal-lithium.org/projektbeschreibung> [23.03.2022].

UnLimited. [2022b]. Erforschung von alternativen Lithiumsorbenzien. URL: <https://www.geothermal-lithium.org/news/erforschung-von-alternativen-lithiumsorbenzien> [23.03.2022]

USGS – US Geological Survey. [1996 - 2022]. Mineral Commodity Summaries. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries> [17.04.2022].

UTS. [2021]. Reducing new mining for electric vehicle battery metals: responsible sourcing through demand reduction strategies and recycling, 49 p.

V

Van der Bruggen, B. [2013]. Nanofiltration. Encyclopedia of membrane science and technology, 1-23.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure. [2019]. Thermische Nutzung des Untergrunds. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Richtlinie 4640. Juni 2019.

Veil, J.A. [2011]. Produced Water Management Options and Technologies. In: Lee, K., Neff, J.: Produced Water, Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies, 537-571. DOI 10.1007/978-1-4614-0046-2_29.

Ventura, S., Bhamidi, S., Hornbostel, M., Nagar, A. und Perea, E. [2016]. Selective recovery of metals from geothermal brines. SRI International, Menlo Park, CA (United States): N. p.

Ventura, S., Bhamidi, S., Hornbostel, M. und Nagar, A. [2020]. Selective recovery of lithium from geothermal brines: Final Project Report. California Energy Commission [CEC-500-2020-02]. URL: <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-05/CEC-500-2020-020.pdf> [24.10.2021].

Vulcan Energy Resources. [2019]. Largest JORC Lithium Resource in Europe – Vulcan Zero Carbon Lithium Project. ASX Release 04.12.2019. URL: <https://www.asx.com.au/asxpdf/20191204/pdf/44c8kqdpfn5dgz.pdf> [03.11.2021].

Vulcan Energy Resources. [2020a]. Positive Scoping Study Confirms Potential for Major European Zero Carbon Lithium™ Project. ASX Release 21.02.2020. URL: <https://www.asx.com.au/asxpdf/20200221/pdf/44f9tjldkj6y1b.pdf> [03.11.2021].

Vulcan Energy Resources. [2020b]. Updated Ortenau Indicated and Inferred Lithium-Brine Resource & Zero Carbon Lithium® Project JORC Resource. ASX Release 15.12.2020. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/a76f8ca4-88ba-467e-ac01-e4a7ad498bc5/UpdatedOrtenauIndicatedandInferredResource> [03.11.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021a]. Positive PFS & Maiden JORC Ore Reserve. ASX Release 15.01.2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/6a9c79d2-5c99-40d7-ba32-72cd6ea3a6f6/PositivePreFeasibilityStudy> [03.11.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021b]. 2021 Sustainability Report (Extract). URL: <https://annualreport.v-er.eu/wp-content/uploads/Vulcan-Energy-Sustainability-Report.pdf> [26.01.2022].

Vulcan Energy Resources. [2021c]. Company Presentation May 2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/6d00e2f3-6431-43c0-8222-7ccad698889e/ZeroCarbonLithiumCorporatePresentation> [01.09.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021d]. Binding Lithium Offtake Term Sheet with LG. Energy Solution ASX Release 19.07.2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/cb1494da-9763-4300-a12f-c17072dbc540/BindingLithiumOfftakeTermSheetSignedwithLG> [03.11.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021e]. Binding Lithium Offtake Agreement with Umicore. ASX Release 18.10.2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/87fb0d83-5d79-46d4-a907-8f8e24ff776a/BindingLithiumOfftakeAgreementSignedwithUmicore> [03.11.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021f]. Binding lithium offtake agreement with Renault. ASX Release 22.11.2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/346fc118-1b04-4c8c-98e0-50cc3534ff14/BindingOfftakeAgreementSignedwithRenault> [03.12.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021g]. Binding lithium offtake agreement with Volkswagen Group. ASX Release 08.12.2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/4a8714c5-51c8-4cd5-8ae8-2e684c200107/BindingOfftakeAgreementSignedwithVolkswagenGroup> [10.12.2021].

Vulcan Energy Resources. [2021h]. Company Presentation: Direct Lithium Extraction (DLE) Technical Update 12.11.2021. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/26fb21af-bebf-4c5f-8092-96cbb038cb1/DirectLithiumExtractionTechnicalUpdatePresentation> [26.01.2022].

Vulcan Energy Resources. [2022a]. Grant of further licenses significantly grows Zero Carbon Lithium™ Project. ASX Release 04.01.2022. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/cdb9e9e7-e8d6-4fd1-8c0a-b6f77785de41/NewlicencessignificantlygrowsZeroCarbonLithiumProject> [26.01.2022].

Vulcan Energy Resources. [2022b]. 2022 Corporate Presentation. January 2022. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/47e9bde3-d8d1-4c5e-80fd-86aadf2c51a6/CorporatePresentationJanuary2022> [26.01.2022].

Vulcan Energy Resources. [2022c]. Agreement with Nobian for the development of the Central Lithium Plant. ASX Release 11.01.2022. URL: <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/8af83d3f-6c26-4a6e-aa42-52315c5f89d2/AgreementwithNobianforthedevelopmentoftheCLP> [26.01.2022].

Vulcan Energy Resources. [2022d]. 2022 Corporate Presentation. February 2022. URL: <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/1c6af37b-c1e.pdf> [05.03.2022].

W

Weißborn, D. [2019]: Lithium – eine Chance auch für die deutsche Erdöl- und Erdgasbranche? – Teil 2. URL: <https://www.erdoel-erdgas-deutschland.de/lithium-eine-chance-auch-fuer-die-deutsche-erdoel-und-erdgas-branche-teil-2/> [05.01.2022].

Wen, X., Ma, P., Zhu, C., He, Q. und Deng, X. [2006]. Preliminary study on recovering lithium chloride from lithium-containing waters by nanofiltration. Separation and Purification Technology 49, 230-236.

Wiśniewska, M., Fijałkowska, G., Ostolska, I., Franus, W., Nosal-Wiercińska, A., Tomaszewska, B., Goscińska, J. und Wójcik, G. [2018]. Investigations of the possibility of lithium acquisition from geothermal water using natural and synthetic zeolites applying poly (acrylic acid). Journal of Cleaner Production 195, 821-830.

X

Xiang, W., Liang, S., Zhou, Z., Qin, W. und Fei, W. [2016]. Extraction of lithium from salt lake brine containing borate anion and high concentration of magnesium. Hydrometallurgy 166, 9-15.

Xua, X., Chena, Y., Wana, P., Gasemb, K., Wanga, K., Hec, T., Adidharmab, H. und Fan, M. [2016]. Extraction of lithium with functionalized lithium ion-sieves. Progress in Materials Science 84, 276-313.

Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A. und Steubing, B. [2020]. Future material demand for automotive lithium-based batteries. Communications Materials 1, 1-10.

Z

Zhang, Q.-H., Li, S.-P., Sun, S.-Y., Yin, X.-S. und Yu, J.-G. [2010]. Lithium selective adsorption on low-dimensional titania nanoribbons. Chemical Engineering Science 65, 165-168.

Zhang, Y., Hu, Y., Wang, L. und Sun, W. [2019]. Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches. Minerals Engineering 139, 105868.

Zhao, Z., Si, X., Liu, X., He, L. und Liang, X. [2013]. Li extraction from high Mg/Li ratio brine with LiFePO₄/FePO₄ as electrode materials. Hydrometallurgy 133, 75-83.

Ziemann, S., Müller, D.B., Schebeck, L., Weil, M. [2018]: Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach. Resources, Conservation and Recycling 133, 76-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.031> [31.03.2022].

Zimbabwe Lithium. [2020]. Producing the metal of the future. URL: <https://www.zimlithium.com> [09/2019].

Zinnwald Lithium Plc. [2021]. Developing the next lithium producer in the heart of Europe, Corporate Presentation, July 2021, 25 p. URL: <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2021/07/04194422/ZNWD-presentation-05.07.21-2.pdf> [08.08.21].

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lithiumvorkommen weltweit	12
Abb. 2: Unterschiedliche lithiumführende Lagerstättentypen, Vorkommen und Ressourcenverteilung	13
Abb. 3: Lithiumreserven und -ressourcen unterschiedlicher Länder weltweit	14
Abb. 4: Lithiumproduktion der vier führenden Produktionsländer und der weiteren Länder kumuliert, zwischen den Jahren 2000 und 2020 in Tonnen pro Jahr	15
Abb. 5: Prozentuale Anteile globaler Endnutzung der Gesamtproduktion der Jahre 2015 bis 2020	16
Abb. 6: Preisentwicklung von Lithiumhydroxid (LiOH), und Lithiumkarbonat (Li ₂ CO ₃) unterschiedlicher Qualitäten und Spodumenkonzentrat von 1991-2021	18
Abb. 7: Errichtete und geplante Batteriezellenfabriken in Europa	21
Abb. 8: Lithiumprojekte in Europa	23
Abb. 9: Verlauf der Entwicklung eines Rohstoffprojektes von der Planung bis zur Schließung	28
Abb. 10: Lage des Savannah Lithiumprojekts Mina Do Barroso	29
Abb. 11: Lage des Zinnwald Lithiumprojekts	32
Abb. 12: Lage des Wolfsberg Lithiumprojekts	37
Abb. 13: Lage des Lithiumprojektes Keliber	41
Abb. 14: Lageplan des Avalonia Projekts	45
Abb. 15: Lage des Infinity Projekts San José	46
Abb. 16: Lage des Jadar Projekts	50
Abb. 17: Lithiumprojekte im Oberrheingraben auf deutscher Seite	60
Abb. 18: Lithiumprojekte in Frankreich	64
Abb. 19: Lithiumprojekt in Südengland	65
Abb. 20: Mögliche Lithiumproduktion durch die in dieser Studie vorgestellten Projekte in Europa bis 2030	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ressourcen des Projektes Mina do Barroso, Stand 2019	30
Tab. 2: Ressourcen des Projektes Zinnwald, Stand 2018	33
Tab. 3: Reserven der Lagerstätte Zinnwald	34
Tab. 4: Ressourcen der Lagerstätte Cinovec	35
Tab. 5: Ressourcen der Lagerstätte Wolfsberg	38
Tab. 6: Reserven der Lagerstätte Wolfsberg	39
Tab. 7: Ressourcen der fünf fortgeschrittenen Lithiumprojekte	42
Tab. 8: Reserven der fünf Lithiumprojekte von Keliber	43
Tab. 9: Erzvorräte des Projektes San José	47
Tab. 10: Ressourcen des Projektes Jadar	51
Tab. 11: Reserven des Projektes Jadar	51
Tab. 12: Ressourcen in den Lizenzgebieten der Vulcan Energy Resources Ltd.	61
Tab. 13: Projektdaten der in Kapitel 4 beschriebenen Lithiumprojekte.	74
Tab. 14: Übersicht über die Ressourcen- und Reservenangaben der in Kapitel 4 beschriebenen Lithiumprojekte aus Festgestein.	75
Tab. 15: Wirtschaftlichkeitsdaten der in Kapitel 4 beschriebenen Lithiumprojekte.	75

B-reicher Ton

Tone, die in Sedimenteinheiten vorkommen und Bor in erhöhter Menge enthalten. Beispiel: Das Rio Tinto Projekt in Serbien, der dort vorkommende Jadarit, ist ein Lithium-Bor-Silikat, das durch hydrothermale Alteration von vulkano-sedimentären Gesteinen gebildet worden ist.

Batteriequalitäten

Der Anwendungsbereich von Lithiumkarbonat oder Lithiumhydroxid ist abhängig von der Reinheit des verarbeiteten Lithiums. In der Batterieindustrie werden beispielsweise Reinheiten von mindestens 99,5 Gew.% benötigt, wohingegen niedrigere Reinheiten für die Glas- und Keramikindustrie ausreichen. Je nach Anwendungsgebiet, Mineralogie des geförderten Lithiumkonzentrates und Lagerstättentyp (z. B. Sole, Pegmatit) variieren die Verarbeitungsverfahren und letztlich die Reinheiten des Lithiums (Schmidt, 2017).

Battery grade

Für hoch-technologische Anwendungen wie der Lithiumionenbatterie, wird Lithium mit „battery grade“ benötigt. Das Lithium weist durch hintereinandergeschaltete Verarbeitungsprozesse geringe Verunreinigungen auf. Durch moderne Verfahren kann eine Reinheit von bis zu 99,95 wt% erreicht werden (Schmidt, 2017; Linneen et al., 2019).

Industrial grade

Lithium mit „industrial grade“, mit einer Reinheit zwischen 98 und 99,3 Gew.%, benötigt weitere Verfahren, um für hoch-technologische Verfahren einsetzbar zu sein (Schmidt, 2017; Linneen et al., 2019).

Technical grade

Lithium der Kategorie „technical grade“ weist geringe Mengen an Verunreinigungen wie Eisen auf und wird vor allem in der Glas- und Keramikindustrie eingesetzt (Schmidt, 2017; Linneen et al., 2019).

Brownfield-Projekt

Brownfields sind, im Gegensatz zu Greenfields, Areale, in denen Lagerstätten bekannt sind und abgebaut werden/wurden.

End of Life (EoL)

EoL kennzeichnet den letzten Abschnitt eines Produktes in dessen Lebenszyklus. Das Produkt wird entweder nur noch begrenzt oder gar nicht produziert, oder es ist nach einer gewissen Zeit in der individuellen Nutzung unbrauchbar (Talens Peiro et al., 2018).

Grundlagenstudie (Baseline Study)

Eine Analyse der Ausgangslage eines Rohstoffförderprojekts. Es wird untersucht, welche Informationen berücksichtigt und analysiert werden müssen, um die Ausgangssituation genau zu definieren und somit die Bemessungsgrundlage für künftige Fortschritte bewertet oder Vergleiche vollzogen werden können (Eurostat, 2021).

JORC

Der JORC-Code bietet ein verbindliches System für die Klassifizierung von Explorationsergebnissen, Mineralressourcen und Erzreserven entsprechend des Grades des Vertrauens in geologische Kenntnisse und technischer und wirtschaftlicher Überlegungen in öffentlichen Berichten (<https://www.jorc.org/>).

Konzeptstudie (Scoping Study)

Eine Konzeptstudie (vorläufige Bewertungsstudie) ist die Umwandlung einer Projektidee in ein umfassendes Investitionsangebot. Die Ergebnisse werden in Form einer vorläufigen Bewertung vorgelegt (Lee, 1984).

Lithiumkarbonatäquivalent (LCE)

Damit die unterschiedlichen Lithiumprodukte wie Lithiumoxid, Lithiumhydroxid oder Lithiumfluorid verglichen werden können, werden diese oft in Lithiumkarbonatäquivalenten (Lithium Carbonate Equivalent = LCE) umgerechnet. Die Umrechnungsfaktoren, wie z. B. Lithiumkarbonat (1 LCE) oder Lithiumhydroxid (1,5 LCE), sind beispielsweise in Schmidt (2017) nachzulesen.

Machbarkeitsstudie (Definite Feasibility Study, DFS)

Die Machbarkeitsstudie greift Themen aus der vorausgegangenen Vormachbarkeitsstudie auf und konkretisiert diese. Eine Machbarkeitsstudie folgt dem Zweck, genauere Angaben über die Effektivität und Profitabilität des Projektes zu machen. Solche Angaben können genutzt werden, um weitere Aspekte wie Investitionen, Gewinnoptimierung und Projektdauer zu evaluieren (Pistilli, 2021).

Ölfeldsolen

Bei der Extraktion von Öl und Gas werden saline Formationswässer gefördert, die aus früheren Evaporationszyklen in Seen oder Meerbecken hervorgegangen sind. Aufgrund der Evaporation haben sich womöglich erhöhte Lithiumgehalte in den Solen eingestellt.

Reserven

Eine Mineralreserve ist der wirtschaftlich und technisch abbaubare Teil einer gemessenen und/oder angezeigten Mineralressource.

Gesicherte Reserven (proved):

Eine nachgewiesene Mineralreserve ist der wirtschaftlich und technisch abbaubare Teil einer gemessenen Mineralressource.

Wahrscheinliche Reserven (probable):

Eine wahrscheinliche Mineralreserve ist der wirtschaftlich und technisch abbaubare Teil einer angezeigten und unter bestimmten Umständen auch einer gemessenen Mineralressource.

Ressourcen

Eine Ressource ist eine Konzentration oder Ablagerung eines Materials von wirtschaftlichem Interesse in oder auf der Erdkruste in einer solchen Form, Qualität oder Quantität, dass begründete Aussichten auf eine spätere wirtschaftliche Gewinnung bestehen. Der Standort, die Menge, der Gehalt oder die Qualität, die Kontinuität und andere geologische Merkmale einer Mineralressource sind bekannt, werden geschätzt oder anhand spezifischer geologischer Nachweise und Kenntnisse, einschließlich Probenahmen, interpretiert. Ressourcen werden in der Reihenfolge der zunehmenden geologischen Verfügbarkeit in die Kategorien „vermutet“ und „hypothetisch“ für die prognostizierten sowie "abgeleitet", "angezeigt" und "gemessen" für die entdeckten Ressourcen eingeteilt.

Angezeigte Ressourcen (indicated):

Eine angezeigte Ressource ist der Teil einer Ressource, für den Menge, Gehalt oder Qualität, Dichte, Form und physikalische Eigenschaften zuverlässig geschätzt werden können.

Gemessene Ressourcen (measured):

Eine gemessene Ressource ist der Teil einer Ressource, für den Menge, Gehalt oder Qualität, Dichte, Form und physikalische Eigenschaften mit ausreichender Sicherheit geschätzt werden können.

Vermutete Ressourcen (inferred):

Eine vermutete Ressource ist der Teil einer Ressource, für den Menge und Gehalt oder Qualität auf der Grundlage begrenzten geologischen Nachweises und Probenahme nur geschätzt werden kann.

U-reicher Ton

Tone, die in Sedimenteinheiten vorkommen und erhöhte Urangehalte haben. Beispiel: Die Falchani Lagerstätte in Peru, die hydrothermal alterierte Tone in lakrustinen Sedimenteinheiten und alterierte rhyolitische Tuffe aufweist, die an Uran und Lithium angereichert sind.

Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS)

Eine Vormachbarkeitsstudie beinhaltet grundlegende Analysen und Informationen zu einem möglichen Projekt, um Investoren Grundlagen zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Fortführung des Projektes zu bieten [Pistilli, 2021].

Vulkano-Sedimentär

Sedimente vulkanischen Ursprungs. Für die Lithiumgewinnung ist wichtig, dass diese Minerale beinhalten, die Lithiumführend sind. Beispiel: Hektorit, ein Tonmineral, das in der Kings Valley Lagerstätte vorkommt und lithiumführend ist. Es liegt dort in Sedimenten vulkanischen Ursprungs vor, die hydrothermal alteriert wurden.

Impressum

Herausgeber

THINKTANK industrielle Ressourcenstrategien
angesiedelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Campus West, Gebäude 6.36
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe
Homepage: www.thinktank-irs.de
LinkedIn: THINKTANK industrielle Ressourcenstrategien

Editoren

Katharina Steiger
Wissenschaftliche Mitarbeiterin THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien
Christoph Hilgers
Professur für Strukturgeologie und Tektonik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Jochen Kolb
Professur für Geochemie und Lagerstättenkunde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

AutorInnen

Katharina Steiger^{1,2}, Rebekka Reich³, Klemens Slunitschek³, Klaus Steinmüller²
Christian Bergemann² Christoph Hilgers¹ und Jochen Kolb³

Zitierhinweis

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (Eds.) [2022]: Lithium in Europa. Hrsg. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. 101 S. Karlsruhe. [2022]: Lithium in Europa. Hrsg. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. Karlsruhe.

Kapitel sind wie folgt zu zitieren

z. B. Reich, R. [2022]: Weltweite Vorkommen und Produktion. In Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (Eds.): Lithium in Europa. Hrsg. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. Karlsruhe. S. 10 – 13.

Stand

Veröffentlicht 12/2022

Grafische Konzeption, Illustration, Satz

unger+ kreative strategien GmbH, Stuttgart, www.ungerplus.de

DOI-Nummer

10.5445/IR/1000154047

Copyright

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wurde mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg und des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Professur für Strukturgeologie und Tektonik

² THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien

³ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Professur für Geochemie und Lagerstättenkunde



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT