

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Anežka Skřivánková

Zdroje lithia a jejich ložiskové typy
Lithium sources and deposit types

Bakalářská práce

Školitel:

doc. RNDr. Jiří Zachariáš, Ph.D.

Praha, 2025

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 29. 4. 2025

Anežka Skřivánková

Poděkování

Chtěla bych poděkovat doc. RNDr. Jiřímu Zachariášovi, Ph.D. za vedení této práce, jeho čas a cenné rady, které mi poskytnul při zpracování rešerše. Zároveň děkuji své rodině a přátelům za podporu.

Abstrakt

Lithium (Li) je chemický prvek důležitý pro rozvoj elektromobility, řady dalších moderních technologií a pro skladování energie z obnovitelných zdrojů. Jakožto klíčová součást lithium-iontových baterií zaznamenalo lithium během posledních 15 let více než osminásobný nárůst světové produkce, přičemž prognózy nadále ukazují pokračující růst poptávky. Tato skutečnost zvýrazňuje důležitost systematického průzkumu zdrojů Li, optimalizace těžebních technologií a zajištění udržitelného hospodaření s touto strategickou surovinou.

Bakalářská práce poskytuje přehled hlavních ložiskových typů lithia, mezi které patří Lithium-Cesium-Tantal (LCT) pegmatity (např. pegmatit Tanco v Kanadě, Bikita v Zimbabwe a Greenbushes v Austrálii), greiseny a Li obohacené granity (např. Cínovec v České republice) a solanky bezodtokých pánví (zejména tzv. „lithný trojúhelník“ – Argentina, Bolívie a Chile). Dále jsou analyzovány i alternativní zdroje, mezi které patří geotermální solanky (např. Campi Flegrei v Itálii), solanky ropných a plynových polí (lokality např. v Arkansasu a Texasu) a jíly obohacené o Li (např. v provincii Jün-nan v Číně, McDermittova kaldera ve Spojených státech), které vykazují potenciál stát se v budoucnu ekonomicky významnými, neboť jakožto nekonvenční typy zdrojů Li mohou doplnit ty tradiční.

Cílem práce je charakterizace jednotlivých ložiskových typů z hlediska geologického vývoje, mineralogického složení a obsahu Li. U každého typu jsou uvedeny reprezentativní lokality s ekonomickým nebo vědeckým významem a v poslední části také způsoby těžby podle ložiskového typu. V současnosti dominantní metoda získávání Li ze solanek představuje proces postupné evaporace a zvyšování koncentrace solanky v sérii evaporačních bazénů, zatímco těžba lithiových rud zahrnuje vyšší podíl hydrometalurgických procesů. V závěru je diskutován i environmentální dopad těžby, zejména spotřeba vody a tvorba nezanedbatelného množství odpadů. Zároveň se poukazuje na potenciál recyklace lithium-iontových baterií, které dosáhly konce funkčnosti. Práce rovněž uvádí podíl jednotlivých zemí na světové produkci, zpracování a recyklaci lithných materiálů a v souvislosti s různorodými zdroji zdůrazňuje důležitost dalšího výzkumu zaměřeného na zefektivnění těžby a rozvoj recyklace.

Abstract

Lithium (Li) is critical for developing electromobility, various modern technologies, and storing renewable energy. As a key component of lithium-ion batteries, Li production has increased more than eightfold over the past 15 years, with forecasts indicating a continued growth in demand. This underscores the importance of systematically exploring lithium resources, optimizing extraction technologies, and ensuring the sustainable management of this strategic raw material.

The paper provides an overview of the main lithium deposit types, including Lithium-Caesium-Tantalum (LCT) pegmatites (e.g., the Tanco pegmatite in Canada, Bikita in Zimbabwe, and Greenbushes in Australia), greisens and enriched granites (e.g., Cínovec in the Czech Republic), and brines from closed-basin systems – especially within the so-called "Lithium Triangle" (Argentina, Bolivia, and Chile).

Alternative resources are also examined, such as geothermal brines (e.g., Campi Flegrei in Italy), brines from oil and gas fields (e.g., in Arkansas and Texas), and lithium-enriched clays (e.g., in Yunnan Province, China, and the McDermitt Caldera, USA). These unconventional resources can potentially become economically significant in the future, complementing the traditional sources.

This paper aims to characterize the various deposit types' geological evolution, mineralogical composition, and lithium content. Representative sites of economic or scientific importance are presented for each type. The final section discusses extraction methods according to the deposit type. Currently, lithium from brines is primarily obtained through gradual evaporation and concentration in a series of evaporation ponds, whereas lithium ore mining typically involves a higher degree of hydrometallurgical processing. The paper also addresses the environmental impacts of lithium extraction, particularly water usage and the generation of significant waste volumes. Additionally, it highlights the potential for recycling lithium-ion batteries at the end of their life cycle. The study outlines the global distribution of lithium production, processing, and recycling among countries and emphasizes the need for continued research focused on improving both extraction and recycling efficiency.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Lithium – vlastnosti a historie	2
3. Využití lithia.....	3
4. Minerály lithia	5
5. Hlavní typy ložisek lithia	10
5.1 Lithium-Cesium-Tantal (LCT) pegmatity	10
5.1.1 Pegmatit Greenbushes v Austrálii.....	13
5.2 Greisenová ložiska.....	13
5.2.1 Cínovec	14
5.3 Lithiem obohacené solanky	19
5.3.1 Solanky ropných a plynových polí	20
5.3.2 Geotermální solanky	21
5.3.3 Příklady ložisek solanek	22
5.4 Jíly obohacené o lithium.....	24
5.4.1 Zeolitové ložisko Jadar v Srbsku	25
6. Metody těžby, zpracování Li-surovin a jejich vliv na životní prostředí.....	26
7. Světová těžba a produkce lithia.....	28
8. Závěr.....	31
Použitá literatura.....	33

1. Úvod

Globální přechod od fosilních paliv k obnovitelným zdrojům energie je spojen se zvýšenou poptávkou po mnoha surovinách. Jedná se zejména o kobalt (Co), měď (Cu), grafit (C), nikl (Ni), prvky vzácných zemin a také lithium (Li). Lithium se díky svým fyzikálně-chemickým vlastnostem stalo klíčovým prvkem pro řadu moderních technologií, zejména pro lithium-iontové baterie v elektrických vozech a různá elektronická zařízení. Využívá se také ve sklářství, keramice a zdravotnictví (Goonan, 2012; Bradley et al., 2013). Podle prognóz Mezinárodní energetické agentury (2024a) se na základě analýz oznámených projektů těžby Li ukazuje, že nabídka suroviny od roku 2020 do roku 2030 vzroste na 450 kt Li, což je více než pětinašobný nárůst. S rychle rostoucí poptávkou se zajištění spolehlivé a diverzifikované dodávky stalo prioritou pro technologické společnosti v Asii, Evropě a Severní Americe (Jaskula, 2024). Problematika zdrojů Li tedy představuje aktuální téma v oblasti ložiskové geologie.

V této bakalářské práci se zabývám nejprve vlastnostmi Li a způsoby jeho využití. Jádrem práce se věnuje charakterizaci hlavních typů ložisek Li, mezi které patří LCT pegmatity, solanky bezodtokých pánví, greiseny, v menší míře také jíly obohacené o Li, solanky ropných a plynových polí a geotermální solanky (Bradley et al., 2017). Okrajově jsou uvedeny metody těžby podle typu daného ložiska a jejich vliv na životní prostředí. Zároveň jsou uvedena data o vývoji množství produkovaného Li v posledních 15 letech včetně podílu jednotlivých zemí na světové produkci.

2. Lithium – vlastnosti a historie

Lithium (Li), nazváno podle řeckého *lithos*, tj. kámen, se nachází v 1. skupině periodické tabulky a řadí se do skupiny alkalických kovů. Má nejmenší iontový poloměr po vodíku a heliu a při teplotě 20 °C je jeho hustota 0,53 g/cm³, jedná se tedy o pevný prvek s nejnižší hustotou. Vyznačuje se stříbrným leskem, značnou elektrickou ($1,17 \times 10^7$ S/m), tepelnou vodivostí (84,8 W/mK) a reaktivitou s vodou (Garrett, 2004). V kontaktu s ní vzniká hydroxid lithný (LiOH) a plynný vodík. Přítomnost Li a jeho sloučenin propůjčuje charakteristickou karmínovou barvu plameni.

Objevil ho švédský chemik a mineralog Johan August Arfwedson v roce 1817 při zkoumání minerálu petalitu (LiAlSi₄O₁₀). Během následujících let se potvrdila jeho přítomnost v mořské vodě, solankách, rostlinách a lidském těle (Emsley, 2003). V roce 1869 byl D. Mendělejevem zařazen do 1. skupiny periodické tabulky mezi alkalické kovy (Remy a Škramovský, 1971).

Na samém konci 19. století v roce 1898 začala těžba Li z pegmatitového ložiska Etta v Jižní Dakotě. Hlavním zdrojem Li však byly malé lomy s výskytem Li-nosných minerálů spodumenu, amblygonitu a lepidolitu, které byly získávány ručně. V roce 1938 došlo k zásadní proměně způsobu

získávání Li; ruční těžbu vystřídala mechanická těžba a technologické zpracování. Tento přechod je spojen se začátkem extrakce Li ze solanky jezera Searles v Kalifornii. Během 2. světové války výrazně vzrostla světová produkce díky širšímu využití prvku a značném pokroku v jeho technologickém zpracování. V 50. letech objednávka hydroxidu lithného Komise pro atomovou energii (AEC) přispěla k velkému nárůstu množství vytěženého Li. Mezi hlavní místa těžby Li se řadily doly v Kings Mountain a v obci Barraute v Quebecu s výskytem zájmového minerálu spodumenu. Významným dolem tohoto období byl lom Bikita v Zimbabwe. Další důležitý bod nastal v roce 1966, kdy začala extrakce Li ze solanky nacházející se v údolí Clayton Valley v oblasti pohoří Silver Peak ve státě Nevada (Norton, 1973). V 70. letech tři chemici M. Stanley Whittingham, John Goodenough a Yoshino Akira vyvinuli první lithium-iontový akumulátor. Vynález byl odměněn Nobelovou cenou v roce 2019, neboť se stal naprosto průlomovým a umožnil rozvoj dobíjecích elektronických zařízení jako jsou mobilní telefony, notebooky a fotoaparáty. Dnes hraje klíčovou roli v elektromobilitě a tematice obnovitelných zdrojů energie (The Royal Swedish Academy of Sciences, 2019).



Obr. 1: Vzorky Li kovu. Zdroj: britannica.com, autor: Dennis S.K

3. Využití lithia

Sloučeniny lithia nacházejí široké uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Uhličitan lithný (Li_2CO_3) se využívá ve sklářském a keramickém průmyslu, neboť zvyšuje pevnost a zároveň snižuje teplotní roztažnost daného materiálu. Slitiny hliníku a Li nachází upotřebení v leteckém průmyslu, zejména při výrobě vnějších konstrukcí letounů, od kterých se požaduje nízká hmotnost a zároveň pružnost a pevnost (Sanders, 1980). Uhličitan lithný je také součástí psycho–farmaceutik určených k léčbě bipolární poruchy. Během 40. a 50. let 20. století australský psychiatr John Cade objevil a dále zkoumal příznivý sedativní účinek uhličitanu lithného, který dokáže zmírnit střídající se extrémní manické a depresivní stavy bipolární mentální poruchy. Tato farmaceutika se využívají dodnes (Mitchell a Hadzi-Pavlovic, 2000).

Oxid lithný (Li_2O) se používá jako tavivo (Carroll a Angelo, 1983). Lithný hydroxid monohydrát ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) slouží k výrobě lithného mýdla, jenž je přísadou mazadel. Ta se vyznačují voděodolností, odolností vůči oxidaci a stabilitou v extrémních teplotách (American Metal Market, 1972).

Bromid lithný (LiBr) a chlorid lithný (LiCl) se používají v klimatizačních a odvlhčovacích zařízeních. Roztoky s obsahem těchto solí absorbují vodní páru a odstraňují přítomné bakterie, plísně a další nežádoucí mikroorganismy (Engineering News Record, 1983).

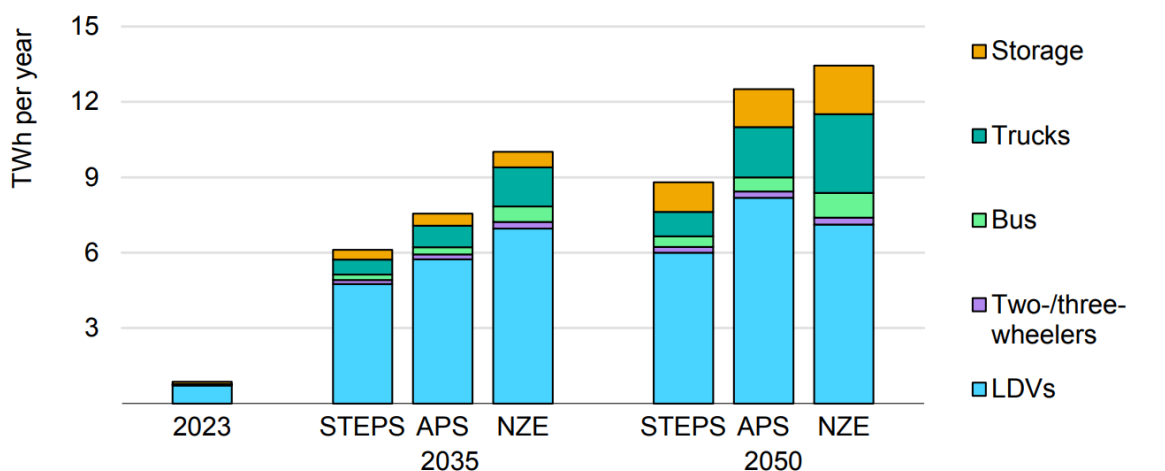
Izotop ${}^6\text{Li}$ v budoucnu bude vstupovat do procesu výroby energie jadernou fúzí. Entler (2018) uvádí: „V energetických fúzních reaktorech první generace bude probíhat termojaderná fúzní reakce jader deuteria a tritia (DT reakce).“ Tamtéž: „Deuterium se bude získávat separací vody, tritium se bude získávat jadernou reakcí ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ izotopu lithia ${}^6\text{Li}$ s neutrony vznikajícími přímo v reaktoru.“ Nicméně fúzní reakce v reaktorech druhé generace již bude probíhat bez účasti izotopu Li (Entler et al., 2019).

Klíčovým využitím Li je výroba baterií, které můžeme rozlišit na tzv. primární a sekundární. Primární lithiové baterie obsahují čisté Li, nejsou určené k dobíjení a nalezneme je v malých elektronických zařízeních. Sekundárním typem jsou lithium-iontové baterie, vyráběné ze sloučenin Li, které jsou stabilnější a zároveň určené k opakovanému nabíjení. Jsou zabudovány do elektronických zařízení jako jsou telefony, kamery, drony, a hrají zásadní roli v rozvoji elektro-automobilového průmyslu. Vyrábí se v různých chemických konfiguracích, přičemž nejčastější je kombinace niklu (Ni) s kobaltem (Co) a manganem (Mn). V porovnání s jinými typy baterií se vyznačují vysokou hustotou energie, tedy schopností uložit velké množství energie na jednotku objemu. Tendence k samovybíjení je velmi malá, a jsou schopné operovat za vyššího napětí. Díky tomu mohou být zabudované baterie menší, lehčí a s delší výdrží (Goonan, 2012). Tento druh baterií se též využívá při skladování elektrické energie získávané např. z fotovoltaických panelů (The Royal Swedish Academy of Sciences, 2019).

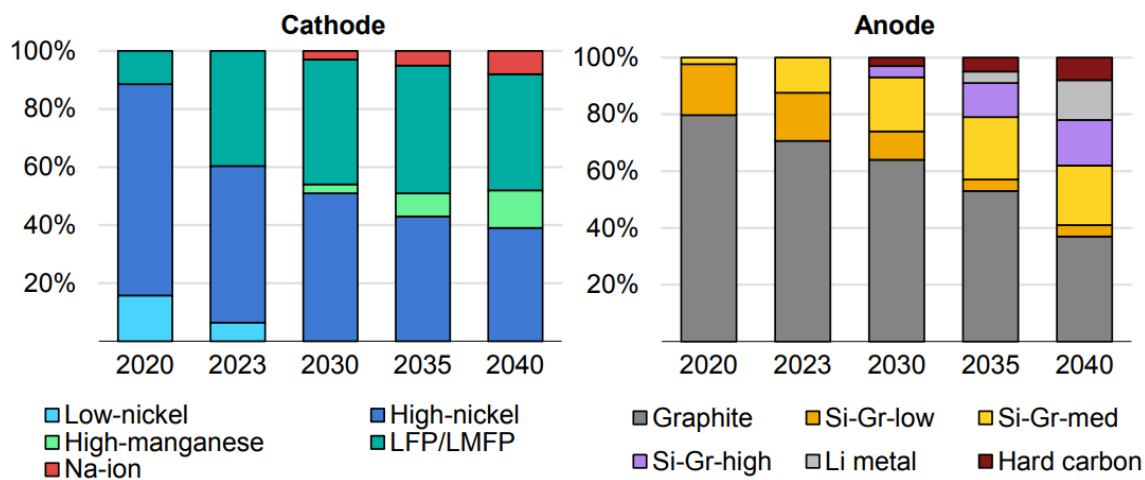
Podíl využití Li v různých odvětvích průmyslu prošel za posledních 20 let výraznou proměnou, neboť ještě v roce 2005 zcela převládalo použití v keramice a sklářství (60 %), v roce 2016 již začaly

dominovat baterie (35 %) a v roce 2024 byl podíl různých druhů využití následující: baterie (87 %), keramika a sklářství (5 %), mazadla (2 %), úprava vzduchu (1 %), využití pro zdravotnické účely (1 %) a ostatní (Jaskula, 2005, 2016, 2024).

Dnes převažujícím způsobem využití Li jsou tedy lithium-iontové baterie (LIB). Na grafech níže (Obr. 2) je znázorněn předpokládaný podíl baterií úložných systémů energie, nákladních vozidel, autobusů, motorek a tříkolek, a osobních vozidel (LDVs = light-duty vehicles) v letech 2023–2050.



IEA. CC BY 4.0.



IEA. CC BY 4.0.

Obr. 2: Na obrázku výše je znázorněn poměr celkové kapacity jednotlivých typů LIB dle jejich konečného využití. Předpokládaný vývoj typů baterií podle složení katody a anody je znázorněn na dvou sousedících grafech níže. Zdroj: International Energy Agency (2024b)

4. Minerály lithia

Mezi zdrojové minerály Li patří zejména spodumen, petalit, lepidolit, amblygonit, elbait, eukryptit, hektorit, jadarit, montebrasit a zabuyelit (Bradley et al., 2017). Minerálem s nejvyšším obsahem Li je griceit (LiF ; 26,76 hm.% Li), který je však poměrně vzácný. Druhý nejvyšší obsah Li pak má zabuyelit (Li_2CO_3 ; 18,79 hm.% Li). Obsahy Li ve většině ostatních minerálů jsou menší než 5 hm.% (Tab. 1).

Spodumen se vzorcem $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ patří do skupiny inosilikátů. Má monoklinickou symetrii a vyskytuje se ve formě sloupcovitých krystalů případně zrn a jejich agregací. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 6,5–7. Štěpnost je dobrá podle $\{110\}$. Vyskytuje se v několika barevných variantách; bílé, šedé, béžové, ale také emeraldově zelené, která nese název hiddenit, růžové a lehce fialové, která se nazývá kunzit (Obr. 3). Charakteristický je skelný lesk. Mezi známá naleziště tohoto minerálu patří rakouské Korutany, Afgánistán, Haddam v Connecticutu, Etta u Keystone v Jižní Dakotě a další. V České republice jsou známé lokality Dobrá Voda, Jeclov, Panská Lhota a Otov.

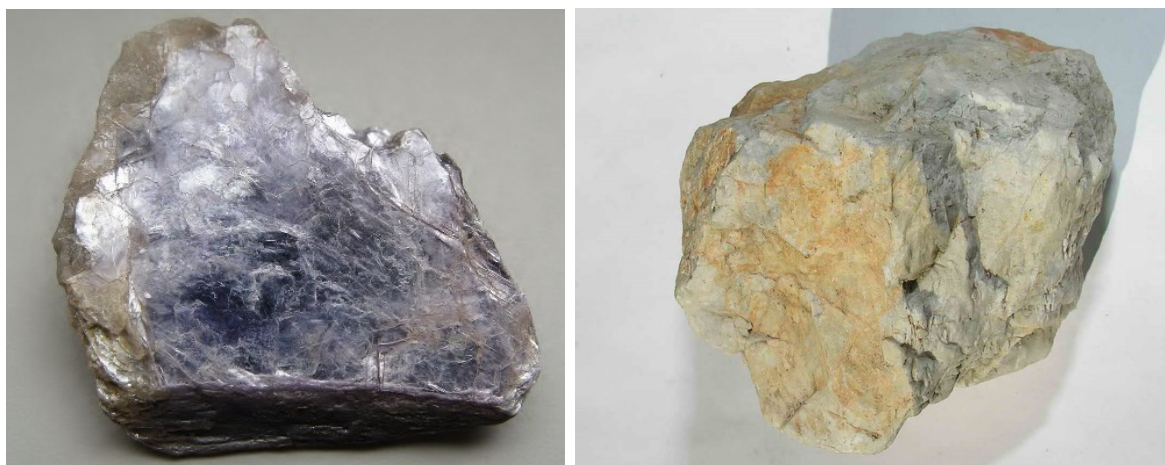


Obr. 3: Nalevo je spodumen z lokality Huntington Hampshire County, Massachusetts, USA. Napravo kunzit z lokality Mt. Tule, San Diego County, California, USA. Zdroj: mindat.org

Lepidolit s chemickým vzorcem $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ patří do skupiny fylosilikátů. Krystalová soustava je monoklinická. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 2–3. Má dokonalou štěpnost podle $\{001\}$. Je průsvitný, bezbarvý případně bělavý, nažloutlý či nafialovělý a mívá perleťový lesk (Obr. 4). Nejznámějším nalezištěm v ČR je pegmatit lokality Rožná na Moravě. Dalšími lokalitami jsou Jeclov a Dobrá Voda u Velkého Meziříčí. Světové lokality se nachází ve Švédsku, ve státě Maine v USA a v Brazílii.

Amblygonit označovaný $(\text{Li},\text{Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{F},\text{OH})$ se řadí mezi fosfáty. Symetrie je triklinická. Tvrdost je v rozmezí 5,5–6. Má dokonalou štěpnost podle $\{100\}$ a dobrou podle $\{110\}$. Vyskytuje se v bílém, žlutém, šedivém, modrošedém a zelenošedém zbarvení (Obr. 4). Je průhledný či průsvitný se skelným leskem. Vyskytuje se v lithných pegmatitech a vzácně v greisenech. Příklady nalezišť jsou pegmatity na

ostrově Elba v Itálii, v indickém Kašmíru, Black Hills v Jižní Dakotě a další. V České republice může být nalezen v Nové Vsi u Českého Krumlova, v Dolních Borech, a u Verněřova u Aše.



Obr. 4: Nalevo lepidolit z lokality Minas Gerais v Brazílii. Napravo amblygonit. Zdroj: wikimedia.org, autor: Ra'ike, Luis Miguel Bugallo Sánchez.

Elbait s obecným vzorcem $\text{NaLi}_{2,5}\text{Al}_{6,5}(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$ je pojmenován podle ostrovu Elba v Itálii. Patří do skupiny cyklosilikátů. Má trigonální symetrii. Vytváří sloupcovité krystaly (Obr. 5), stébelnaté či zrnité agregáty. Tvrdost je 7,5 a štěpnost je nezřetelná. Je mnoho barevných variant včetně bezbarvé, růžové, modré, zelené. Lesk je skelný. Mezi známá naleziště patří lokality Penig v Německu, Ambazac ve Francii, Utö ve Švédsku, Pala v jižní Kalifornii, San Piero na Elbě, Afgánistán a další. Mezi česká naleziště se řadí Nová Ves u Českého Krumlova, Sušiče, Rožná u Bystřice nad Pernštejnem, Dobrá Voda u Velkého Meziříčí, Laštovičky a Řečice.

Eukryptit značený LiAlSiO_4 se řadí do skupiny nesosilikátů s trigonální či romboedrickou souměrností. Tvrdost je 6,5. Vyznačuje se nedokonalou štěpností a hnědým, bílým, či neutrálním zbarvením, může být průhledný případně průsvitný a má skelný lesk (Obr. 5). Mezi typická naleziště patří lom Bikita v Zimbabwe a lokalita Fillow Quarry v Branchville, Connecticut ve Spojených státech.

Hektorit se vzorcem $\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ je jílový minerál, který vzniká rozkladem alterovaného vulkanického tufu a řadí se mezi fylosilikáty, smektity. Tvrdost je v rozmezí 1–2. Symetrie je monoklinická, bývá prismatický s dokonalou štěpností podle $\{001\}$. Barva je bělavá a může být průsvitný a matný (Obr. 5). Pojmenování získal podle svého naleziště, lomu Hector v Kalifornii.



Obr. 5: Nalevo Elbait z lokality Paprok, Afgánistán. Napravo výše eukryptit z King sMountain, North Carolina, USA. Napravo níže hektorit z Lyles Hectorite Mine, Arizona, USA. Zdroj: mindat.org, autor: Weinrich Minerals, inc., Vandall King, Yannick Verbelen.

Montebrasit $\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$ se řadí mezi fosfáty s triklinickou soustavou symetrie. Vytváří velké krystaly ve tvaru štíhlých hranolů. Tvrdost je na škále od 5,5 do 6. Má dokonalou štěpnost podle $\{100\}$ a dobrou podle $\{110\}$. Vyznačuje se modravou, zelenavou, šedavou či neutrální barvou (Obr. 6). Bývá průhledný či průsvitný. Svě jméno dostal podle místa výskytu, francouzského lomu Montebras.

Zabuyelit, uhličitan lithný s chemickým vzorcem $\text{Li}_2(\text{CO}_3)$, se řadí mezi karbonáty s monoklinickou symetrií a tvrdostí 3. Štěpnost je dokonalá podle $\{100\}$ a dobrá podle $\{011\}$. Je bezbarvý, průhledný se skelným leskem (Obr. 6). Název nese podle místa výskytu v hypersalinním prostředí jezera Zabuye v Číně.



Obr. 6: Nalevo montebrasit z lomu Montebras ve Francii. Napravo zabuyelit z lomu Tanco v Kanadě. Zdroj: mindat.org

Cinvaldit se vzorcem $\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ je fylsilikát s monoklinickou symetrií. Tvoří krátce sloupcovité či destičkovité krystaly a šupinkaté či lupenité agregáty. Barva je stříbřitě bílá, šedohnědá, někdy lehce narůžovělá. Má perleťový lesk a dokonalou štěpnost podle $\{001\}$. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 3–5. Mezi světové lokality výskytu patří Seward na Aljašce, pegmatity v Cornwallu, Altenberg v Sasku. Mezi naleziště v České republice patří Cínovec, Krupka, Horní Slavkov a např. pegmatit u Nové Vsi u Českého Krumlova (Vávra, 2013).



Obr. 7: Cinvaldit z ložiska Cínovec v Krušných horách České republiky. Zdroj: mindat.org, autor: Jan Čermák, Leon Hupperich

Tab. 1: Významné Li-nosné minerály (řazeno podle klesajícího obsahu Li). Zdroj: Bradley et al. (2017)

Minerál	Chemický vzorec	Li (hm.%)	Vazba na geologické prostředí
Zabuyelit	Li_2CO_3	18,79	Evaporitový minerál
Eukryptit	LiAlSiO_4	5,51	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Montebrasit	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH})$	4,74	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Amblygonit	$(\text{Li},\text{Na})\text{AlPO}_4(\text{OH},\text{F})$	4,44	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Spodumen	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3,73	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Lepidolit	$\text{KLi}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	3,58	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Jadarit	$\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7\text{OH}$	3,38	Hydrotermální alterace vulkanického popela v bezodtokých pánvích
Petalit	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	2,09	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Elbait	$\text{Na}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	1,89	Pegmatitové intruze orogenních pásem
Cinvaldit	$\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	1,59	Pegmatitové intruze a tělesa greisenů
Hektorit	$\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,54	Hydrotermální alterace vulkanického popela v bezodtokých pánvích

5. Hlavní typy ložisek lithia

Lithium se kvůli vysoké reaktivitě a rozpustnosti v přírodním prostředí vyskytuje ve sloučeninách. Ve většině případů je přítomné pouze jako stopový prvek. Jeho průměrná koncentrace v oceánské kůře je 4,3 ppm a v kontinentální kůře 20 ppm (McLennan, 2001). Mořská voda v průměru obsahuje 0,18 ppm Li (Remy, 1961). Významné koncentrace Li se nachází v ložiscích zejména LCT pegmatitů, obohacených granitů, různých druhů solanek a obohacených jíílů (Bradley et al., 2017).

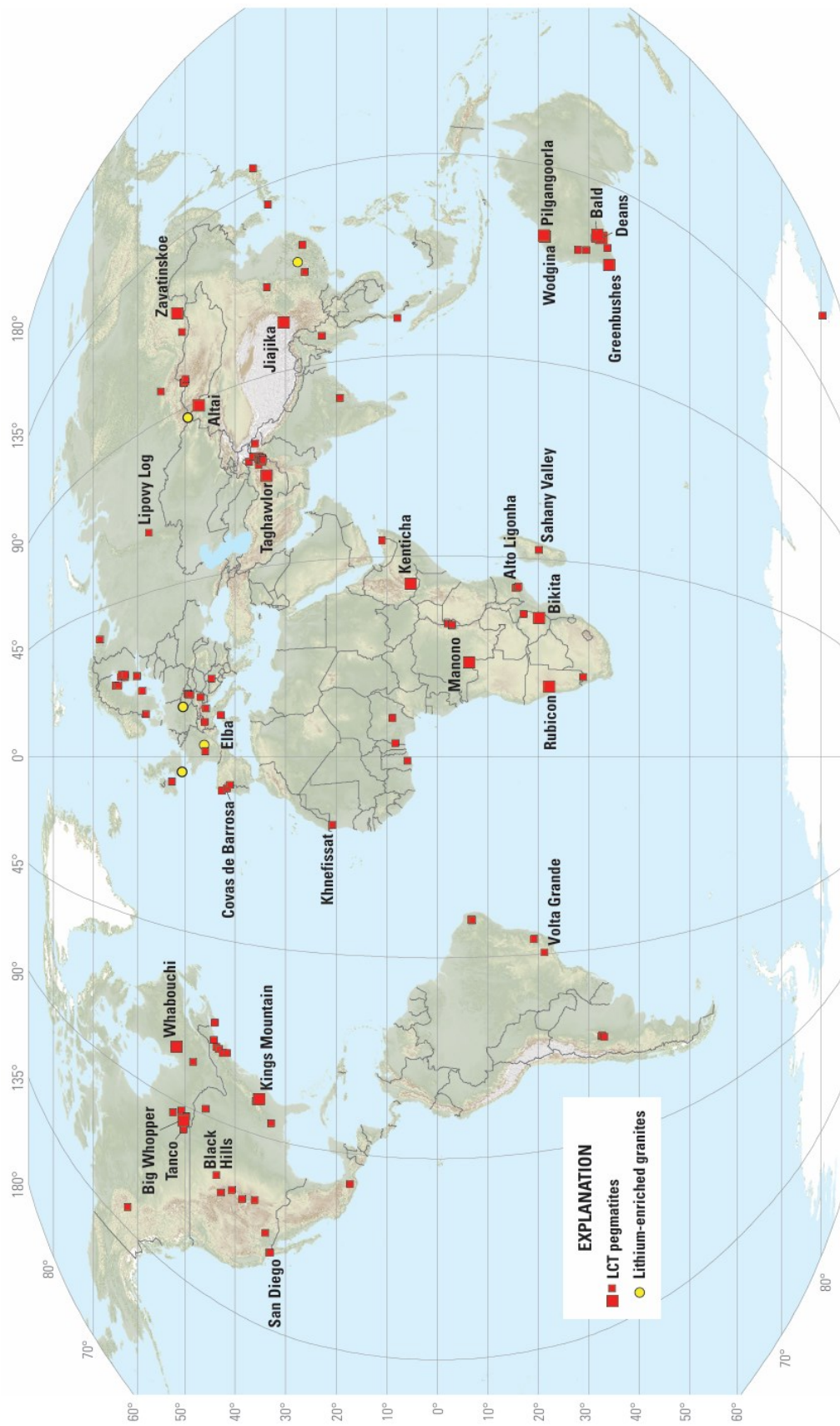
5.1 Lithium-Cesium-Tantal (LCT) pegmatity

Jedním z hlavních zdrojů lithia jsou LCT pegmatity obohacené o lithium, cesium a tantal. Jedná se o typ granitických pegmatitů, jejichž mineralogické složení zahrnuje křemen, K-živce, albit a muskovit. Mezi akcesorické minerály se řadí granát, turmalín a apatit. Zdrojové minerály lithia jsou spodumen, petalit a lepidolit. Cesium je spojeno s minerálem polucitem a tantal s kolumbitem-tantalitem (Bradley et al., 2017). Matečná granitoidní hornina je peraluminní, obvykle se jedná o I-typ vzniklý anatexí intermediálních a bazických hornin, nebo o granitový S-typ z metasedimentárního protolitu. LCT pegmatity jsou vázány na konvergentní procesy tektonických desek, které vedou ke vzniku kolizních orogénů a sjednocování kontinentů, k čemuž docházelo se zvýšenou intenzitou zejména v obdobích před 2650, 1800, 525, 350 a 100 miliony lety (Bradley, 2011). Tyto procesy způsobily pronikání pegmatitů do metamorfovaných hornin facie zelených břidlic až nižší amfibolitové facie, v některých případech i do granitu, gabra a dalších magmatických hornin (Černý, 1992).

Vlastnosti hostitelských hornin a jejich sklon k duktilní či křehké deformaci, v závislosti na teplotě a tlaku, ovlivňují výsledný tvar pegmatitu, který může tvořit čočkovitá tělesa, vrstvy, pravé a ložní žíly. Jeden z největších LCT pegmatitů, Greenbushes v Austrálii, dosahuje délky 3 km a šířky několik stovek metrů. Většinou jsou však pegmatity menší (Bradley a McCauley, 2016).

Rozlišujeme pegmatity s homogenní, zonální a vrstevnatou vnitřní stavbou. Homogenní stavba je vzácná, ale vyznačuje se výskytem megakrystalů křemene a spodumenu v jemnozrnné matrix s rozeznatelným albitem a také křemenem. Zonální stavba je naopak velmi běžná. Byly popsány pegmatity až s devíti zónami s odlišným minerálním složením a texturou. Texturní diference způsobuje, že od okrajových zón směrem do jádra pegmatitu se velikost zrn zvětšuje. Obecně lze však rozlišit čtyři základní zóny: okrajovou („border“), stěnovou („wall“), prostřední („intermediate“) a centrální („core“). Okrajová zóna je několika centimetrů mocná jemnozrnná hranice mezi pegmatitem a hostitelskou horninou a tvoří ji křemen, muskovit a albit. Více hrubozrnná stěnová zóna obsahuje albit, perthit, křemen a muskovit, přičemž velikost krystalů je obvykle menší než 30 cm. Zároveň se v ní mohou vyskytovat turmalín a beryl. Prostřední zóna zahrnuje plagioklas, K-živce, slídové minerály, křemen a případně beryl, spodumen, elbait, kolumbit-tantalit, polucit a Li-fosfáty. Centrální zóna je tvořena křemenem a v některých případech obsahuje také perthit, albit, spodumen, montebrasit a jiné Li-aluminosilikáty (Cameron et al., 1949).

V LCT pegmatitech krystalizuje bohatá škála minerálů, které mohou vytvářet krystaly neobyčejné velikosti, např. největší nalezený spodumen dosahoval délky 14 m, beryl 18 m a největší K-živec 49 m. Díky vysokému obsahu průmyslově využitelných minerálů a hrubozrnné textuře je možné pegmatity efektivněji těžit a zpracovávat (Rickwood, 1981; London, 2008).



Base from U.S. Geological Survey Global 30 arc-second elevation data (1996) and from Natural Earth (2014); Robinson projection; World Geodetic System 1984 datum

Obr. 8: Na mapě jsou znázorněny výskyty nejvýznamnějších LCT pegmatitů a Li obohacených granitů. Zdroj: Bradley et al. (2017)

5.1.1. Pegmatit Greenbushes v Austrálii

Příkladem pegmatitového ložiska s význačným obsahem minerálu spodumenu je ložisko Greenbushes v Západní Austrálii. Hostitelskou horninou je rula jejíž vznik se datuje do doby před přibližně 3100 Ma (Fletcher et al., 1983). V období před okolo 2610 Ma docházelo k četným intruzím granitoidů, z nichž poslední byla právě žilná intruze pegmatitu Greenbushes před 2527 Ma (Partington et al., 1995).

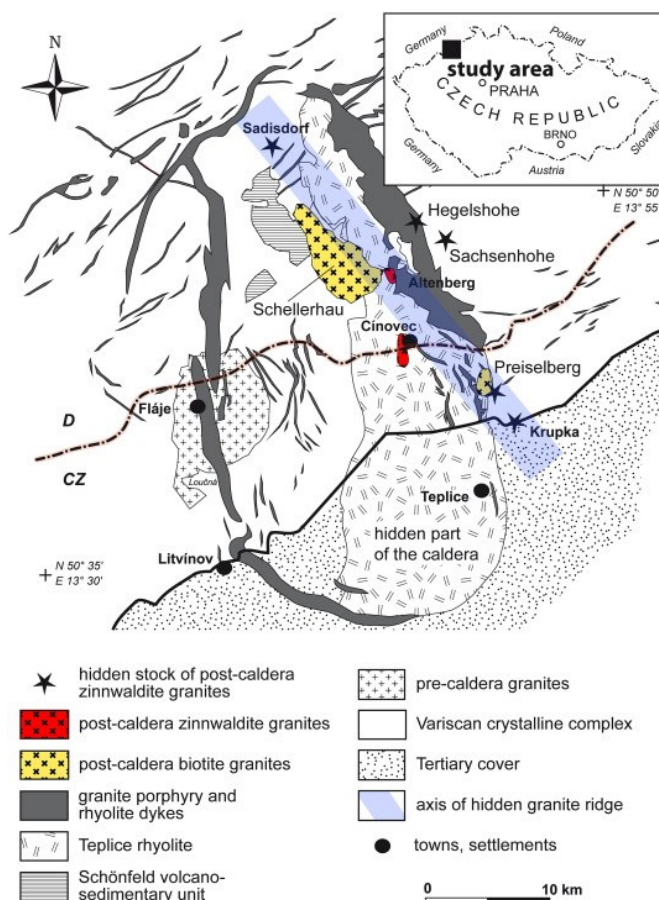
Proces krystalizace tohoto pegmatitu byl spojen s probíhajícími deformačními procesy, hydrotermální alterací a metamorfózou. To, že deformace, metamorfóza a krystalizace probíhaly současně, naznačuje tmel rozpraskaných turmalínů tvořený spodumenem, biotitem a granátem, stejně jako asociace biotitu s turmalínem, tantalitem, uraninitem a kasiteritem. Kontaktní zóny nedeformovaných částí pegmatitu obsahují albit, křemen, biotit, turmalín, inkluze cínu a tantalitu, granát, zirkon a kalcit. V metasomatizované oblasti se vyskytuje biotit, scapolit, muskovit, turmalín a holmquistite. Intruze se vyznačuje jedinečnou zonální stavbou, ve které minerály Li, které obvykle krystalizují v prostřední či centrální zóně, se v tomto případě nachází v zóně okrajové. V hlavní intruzivní oblasti pegmatitu se nachází hrubozrnný euhedrání spodumen s křemenem. Akcesorické minerály v zóně obohacené Li zahrnují apatit, turmalín, muskovit, beryl a tantalit (Partington et al., 1995).

5.2 Greisenová ložiska

Greiseny vznikají hydrotermální metasomatickou přeměnou magmatických hornin, zejména granitoidních plutonů. Přeměna intruzivního tělesa je patrná zejména v jeho vrcholové (apikální) části a obecně k ní dochází následujícími procesy: postmagmatická fluida nejprve v hlubších částech masivu vyvolávají draselnou metasomatózu (mikroklinizaci) při teplotách, které se pohybují kolem 550–650°C. Nad touto úrovní dochází při teplotách 400–550 °C k navýšení acidity a následné sodné metasomatóze (albitizaci), během které vznikají albitity, leukokratní jemnozrnné horniny s dominantním obsahem albitu a případnými vyrostlicemi křemene a K-živce, s obsahem muskovitu či lithných slíd. V oblastech, kde je kyselost hydrotermálních roztoků nejvyšší, dochází k prokřemenění hornin a vzniku greisenu za teplot v rozmezí 250–450 °C. Greisen vzniklý v části intruzivního tělesa se nazývá endogreisen, zatímco greisen vzniklý v jeho nadloží se nazývá exogreisen. Takto vzniklá tělesa jsou bohatá na křemen a slídy jako muskovit, cinvaldit a biotit. Obvykle také obsahují topaz, turmalín, fluorit, případně alkalické živce jako mikroklin či albit. Kromě lithia představují významný zdroj surovin zejména cínu (Sn) a wolframu (W) (Zimák, 2021).

5.2.1 Cínovec

Ložisko Cínovec se nachází ve východní části Krušných hor, v rámci Sasko-durynské oblasti Českého masivu. Vývoj Cínovce probíhal v rozmezí před 330 až 310 Ma, je spjat s pozdní variskou tektonickou aktivitou, vulkanismem a vznikem Teplické kaldery (Breiter, 2012). Studie variského vývoje ve východní oblasti Krušných hor ukazují následující posloupnost událostí. Nejprve došlo k intruzi peraluminního biotitového granitu, který reprezentují plutony Fláje a Telnice v Čechách a Niederbobritzsch v Sasku. Následně probíhala erupce peraluminního ryolit-dacitového magmatu, která byla provázena ukládáním tufů. Po této fázi následovaly exploze teplického ryolitu přecházející ve výlevy, vytvoření vulkánu a jeho následný kolaps. Ten vedl ke vzniku Teplické kaldery o rozměrech přibližně 40 x 20 km. Do oblasti následně intrudoval biotitový granit. V poslední fázi došlo k intruzi silně frakcionovaného granitu s obsahem Li (Breiter, 1997). Tento proces byl doprovázen vznikem vulkanických brekcí a greisenů bohatých na cín a wolfram (Romer a Kroner, 2016). Granitové intruze tvořily skrytý podzemní hřbet protínající kalderu ze severozápadu na jihovýchod s několika vyvýšeninami, které vystupují na povrch. Mezi hlavní takové elevace patří Cínovec a Altenberg. Svrchní část Cínovce má tvar S-J protažené eliptické kupole s rozměry 1,4 x 0,3 (Breiter et al., 2016). Geologická situace této oblasti je znázorněna na Obr. 9.



Obr. 9: Schematická mapa oblasti Teplické kaldery. Červeně zvýrazněné jsou cinvalditové granity, žlutě znázorněné jsou biotitové granity. Zdroj: Breiter et al. (2017).

O horninovém složení Cínovce (Obr. 10) poskytl unikátní informace téměř 1500 m hluboký vrt CS-1 (Štemprok a Šulcek, 1969). Klenba plutonu sahá do hloubky 260 m a představuje ji leukokráttní jemnozrnný albit-cinvalditový granit (na Obr. 10 je znázorněn růžovou barvou). V nejsvrchnějších částech je postižen kaolinizací. Minerální složení zahrnuje subhedrální albit, anhedrální křemen a cinvaldit, sericitizovaný K-živce a mezi akcesorické minerály se řadí fluorit, topaz, zirkon, kasiterit, kolumbit, xenotim, thorit a monazit (Breiter et al., 2017b).

V hloubkách v rozmezí 34–213 m se nacházejí střednězrnné křemen-cinvalditové greiseny. Obsahují anhedrální slídy, křemenné agregáty, fluorit a topaz. Minoritně se zde vyskytují také kasiterit, kolumbit, scheelit, wolframit, zatímco zirkon, xenotim, thorit a REE-fluorokarbonáty se vyskytují pouze akcesoricky. Tělesa greisenů představují tenké polohy o mocnosti 1–2 m a zároveň tvoří lemy křemen-cinvalditových žil o mocnosti v řádu desítek centimetrů. Největší těleso v centrální části dosahuje mocnosti 20 m. Tělesa greisenů jsou však přítomná zejména v jižní části kupole, kde prostupují celý objem albit-cinvalditového granitu. Během procesu oddělení vodného fluida od silikátové taveniny vznikla hustá síť trhlin, podél které docházelo k metasomatickému přepracování granitů. Tehdy docházelo k nahrazení živců křemenem a cinvalditem (Breiter et al., 2016). Tělesa greisenů jsou na Obr. 10 znázorněna zelenou barvou.

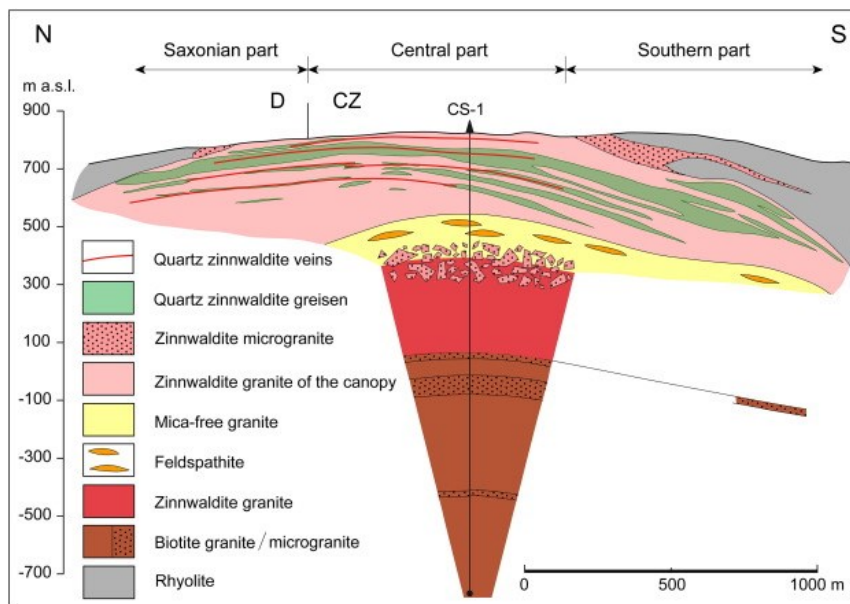
V rozmezí 260–368 m jsou zaznamenány střednězrnné porfyrické bezslídné granity. V albitové matrix se vyskytují vyrostlice perthitu, křemene, K-živce. Akcesoricky je přítomen fluorit, zirkon, rutil, thorit, kasiterit a kolumbit (Breiter et al., 2017b). Na Obr. 10 jsou vyznačeny žlutě.

V oblasti 270–368 m jsou až 5 m mocné polohy draselných jemnozrnných až střednězrnných feldspatitů, které jsou v řezu vyznačeny oranžovou barvou. Minerální složení tvoří K-živce, albit, křemen a velmi jemnozrnný sericit (Breiter et al., 2017b).

Na úrovni mezi 369–530 m se vyskytuje jemnozrnná porfyrická modifikace cinvalditového granitu, cinvalditový mikrogranit. Obsahuje zejména cinvaldit, minoritně topaz a fluorit, akcesoricky rutil a thorit (Breiter et al., 2017b). V řezu je vyznačen růžovou barvou s tečkami.

Středně až hrubozrnný albit-cinvalditový granit v hloubkách 530–735 m se vyznačuje homogenní texturou. Je složen z minerálů jako jsou perthit o velikosti 5–10 mm, subhedrální křemen o průměru až 5 mm, albit a cinvaldit. Minoritně se v něm vyskytují topaz, fluorit, zirkon, xenotim, thorit, monazit, rutil, kasiterit, kolumbit, scheelit a pyrochlor (Breiter et al., 2017b). Na Obr. 10 je vyznačen červenou barvou.

Biotitové granity v hloubce 735–1596 m (na Obr. 10 vyznačené hnědou barvou) mají homogenní mineralogické složení zahrnující perthitické K-živce (o rozměrech až 25 x 15 mm), plagioklas, křemen a Li-obohacený biotit. Akcesorické minerály jsou zirkon, xenotim, thorit, monazit a rutil (Breiter et al., 2017b).



Obr. 10: Řez Cínovcem vytvořený na základě vrtu CS-1. Zdroj: Breiter et al. (2017).

Obsah lithia v horninách vrtu CS-1 se zvyšuje z hloubky směrem k povrchu. V biotitových granitech se obsah Li pohybuje v rozmezí 100 až 300 ppm, zatímco v tělesech greisenů dosahuje 4000 ppm. Obsah prvků jako fluor (F), rubidium (Rb) také vzrůstá směrem k povrchu, stejně jako obsahy prvků jako niob (Nb) a tantal (Ta). Distribuce cínu (Sn) a wolframu (W) jsou více variabilní, ale nejvyšších hodnot dosahují v greisenech.

Breiter et al. (2017b) vytvořili následující model vývoje Cínovce.

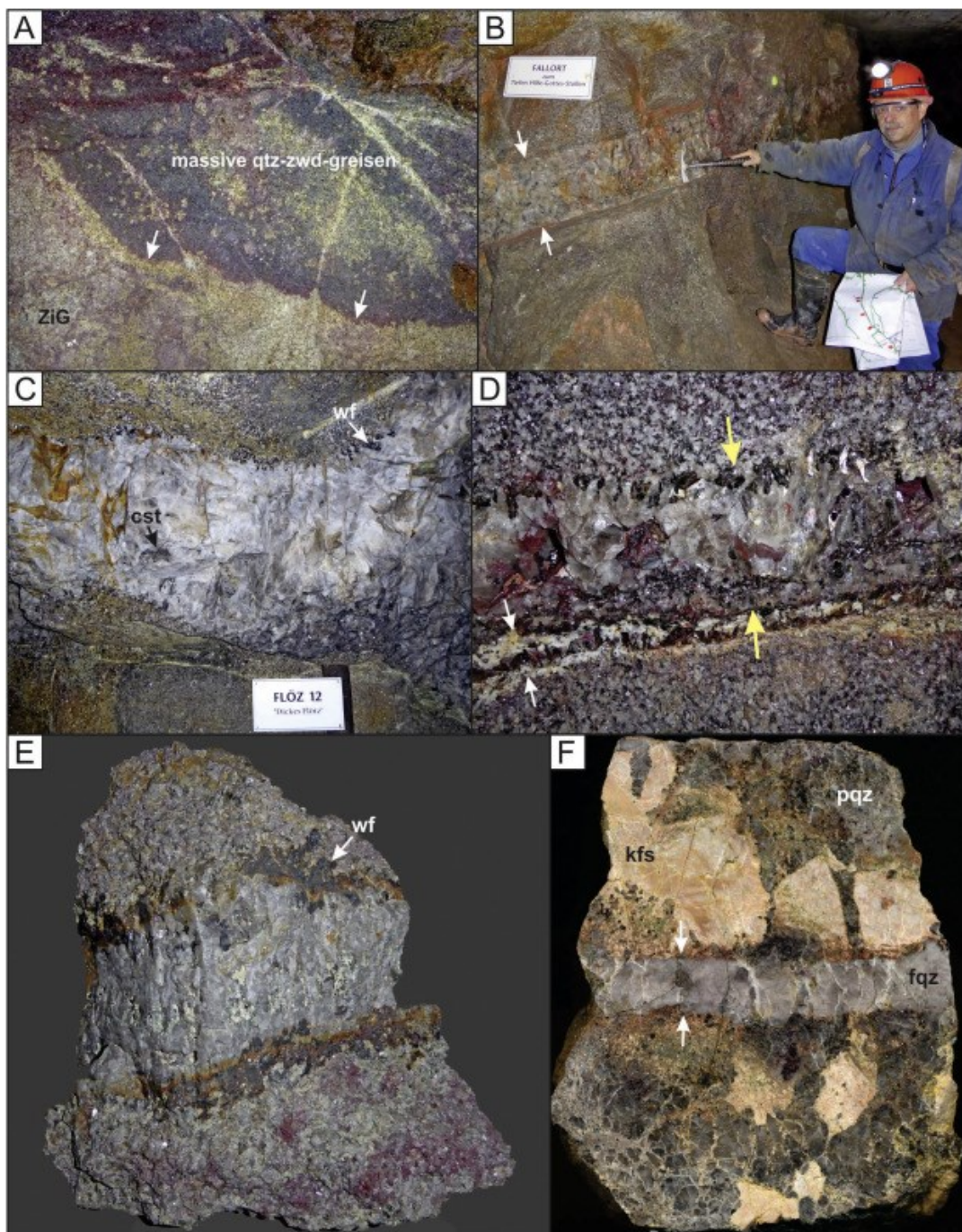
1. Do útvaru Teplické kaldery intrudovalo magma obohacené o Sn, W, Nb a Ta, které vykryštovalo do podoby biotitového granitu s několika texturně odlišnými faciemi, ale podobným chemickým složením. Nedošlo však k frakcionaci či segregaci rudních prvků do fluid.
2. Podél západního kontaktu biotitového granitu vystoupila intruze cinvalditového granitu do subvulkanických úrovní a vykryštovala.
3. Magma pod vykryštovanou intruzí bylo obohaceno o vodu a následně došlo k explozivní degazaci.
4. V horní části intruzivního pně vykryštoval stockscheider v důsledku podchlazení. Magma cinvalditového granitu prošlo magmatickou frakcionací. Během té voda migrovala vzhůru,

došlo k navýšení obsahu litofilních prvků. Obsah kompatibilních prvků se naopak mírně snížil směrem k povrchu.

5. Těkavé látky zůstávaly součástí taveniny až do dosažení saturace. Posléze došlo k oddělení samostatné fluidní fáze a vzácné kovy, fluor a lithium se přesunuly do fluid.
6. Vodou ochuzená tavenina krystalizovala do bezslidného granitu. Fluida bohatá na F a Li migrovala vzhůru a došlo k vytvoření greisenů a křemen-cinvalditových žil.
7. Pozdější část fluid chudých na Li a F způsobila sericitizaci granitu a lokální muskovitizaci cinvalditu podél puklin a dutin.

Breiter et al. (2017a) poskytli detailní analýzu souvislosti magmaticko-hydrotermálních procesů s geochemickým složením granitických těles Cínovce. Rozlišili čtyři hlavní typy křemene, do jehož krystalové mřížky vstupuje kromě Ti a Al také Li. Analýza ukazuje, že vyšší obsah Li koreluje s vyšším obsahem Al. Ve skoro všech typech granitů se vyskytuje koncentrická zonální stavba křemene s hexagonálním průřezem krystalů, který je charakteristický pro růst za stabilních podmínek.

Primární magmatický křemen je jemnozrný až střednězrný a vytváří vyrostlice. Obsah Al se pohybuje v rozmezí 100–400 ppm, Ti v rozmezí 5–120 ppm, obsah Li obvykle přesahuje 10 ppm. Hydrotermální křemen vznikající procesy greisenizace má nižší obsah Al, obvykle méně než 100 ppm, obsah Ti méně než 5 ppm a obsah Li méně než 10 ppm. Euhedrání krystaly křemene v dutinách žil s obsahem Al méně než 100 ppm, Ti méně než 5 ppm, Li nejvýše 15 ppm. Pozdní hydrotermální mléčný křemen vytváří tenkou vrstvu na povrchu křemene v dutinách greisenových těles a v žilách. Vyznačuje se vysokým obsahem Al (500–2200 ppm), Li (80–99 ppm), Rb, Sr, Fe, Mn a nízkým obsahem Ti (méně než 1 ppm) (Breiter et al., 2017a). Fotografie hornin z oblasti se nachází na Obr. 11.

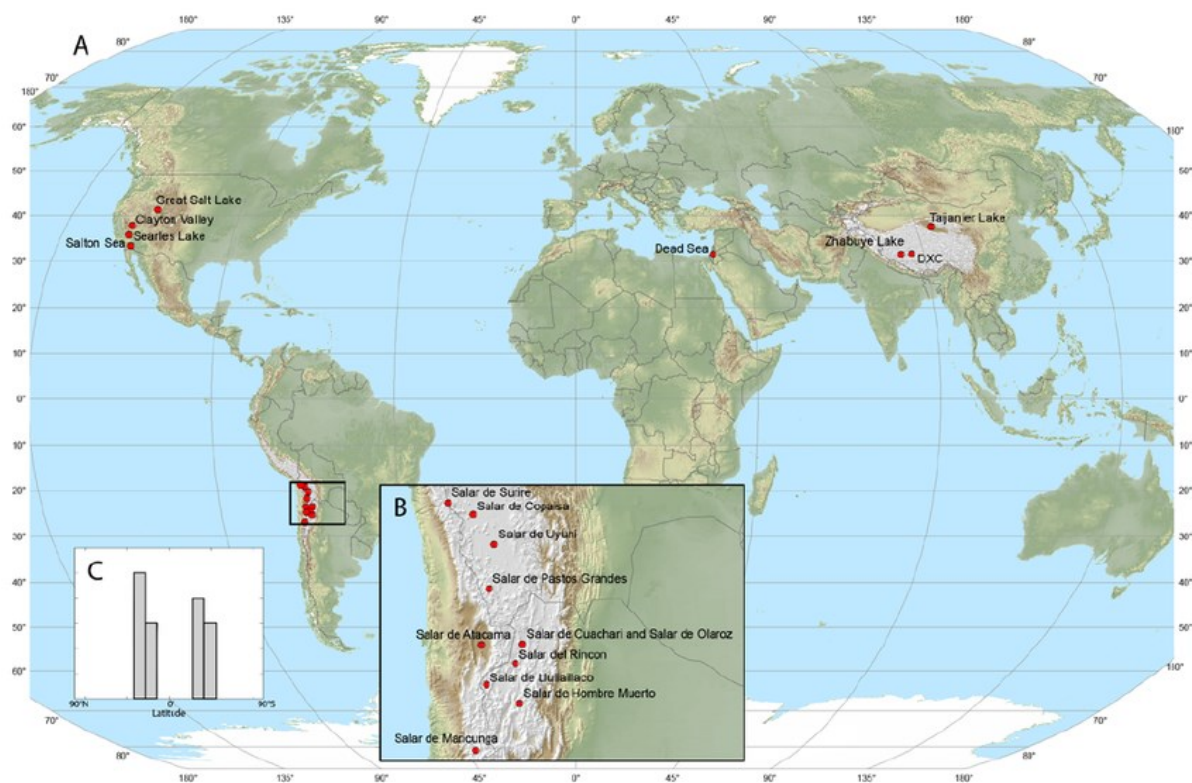


Obr. 11: A) Masivní křemen-cinvalditový greisen v zinnwaldit-albitovém granitu (ZiG). B) Křemen-cinvalditová žíla o mocnosti 25 cm v greisenu. C) Žíla s wolframitem (wf) a kasiteritem (cst) o mocnosti přibližně 60 cm. D) Žíla bohatá na cinvaldit. Červenohnědé oblasti tvoří hematit, který pokrývá krystaly křemene. Bílé šipky ukazují na leukokratickou žílu, jejíž vznik předcházela vzniku hydrotermální žíly. E) Křemenná žíla s wolframitem (wf) na kontaktu. F) Stockschneider s megakrystaly K-živce (kfs), pegmatitového křemene (pqz) a křemenné žíly (fqz)
Zdroj: Müller et al. (2018)

5.3 Lithiem obohacené solanky

Lithiem obohacené solanky jsou vody s navýšenou koncentrací různých druhů solí, včetně Li. Obsahy Li se běžně pohybují v rozmezí 200–1400 mg/l, u ekonomicky využitelných zdrojů v rozmezí 200–4000 mg/l. Taková ložiska se nacházejí v oblastech s výskytem lithiem obohacených hornin, zejména felsických vulkanitů, které procházejí procesy zvětrávání či hydrotermální alterací. Za standardních podmínek se lithium uvolněné během procesů zvětrávání dostává do řek a jejich prostřednictvím do oceánů. Existují však i oblasti bez odtoku, nebo s minimem odtoku, kde pak dochází ke koncentraci všech solí (včetně Li) do bezodtokých solných pánví a jezer. Tento proces může být zvýrazněn, pokud souběžně dochází též k subsidenci anebo zvýšené geotermální aktivitě. Bezodtoké podmínky pánve, kde dlouhodobě převažuje evaporace nad srážkami, jsou klíčovou predispozicí pro vytvoření a uchování solanky. Subsidencí vzniká prostor pro ukládání sedimentů, které následně slouží jako kolektor obohacených vod (solanek). Dalším důležitým faktorem vzniku jsou aridní klimatické podmínky a vysoký tepelný tok. Při evaporaci dochází k postupnému srážení evaporitových minerálů, a to od nejméně rozpustných až po velmi rozpustné. Kationty sodíku (Na), draslíku (K) a vápníku (Ca) vytváří minerály jako např. dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhydrit (CaSO_4) či halit (NaCl), avšak lithium kvůli své vysoké rozpustnosti ve vodě, zůstává nevysráženo v roztoku solanky (Bradley et al., 2013).

Solanky bezodtokých pánví s ekonomicky významnými koncentracemi Li jsou kvartérního stáří. Z geotektonického pohledu pánve vznikaly za různých podmínek. Příkladem pánve, která byla vytvořena v důsledku extenze a vzniku systému half-grabenů je Clayton Valley v Nevadě, USA. Další pánve jako Salar de Atacama v Chile a Salar de Uyuni v Bolívii se nachází na náhorní plošině podél konvergentního okraje And. Jezero Zabuye je součástí systému bezodtokých pánví v Tibetské náhorní plošině na svrchní desce Himalájsko-tibetského kolizního orogénu. Distribuci lokalit výskytu solanek ve světě ukazuje Obr. 12.



Obr. 12: A) Mapa zaznamenávající výskyty Li obohacených solanek. B) Přiblížení oblasti Jižní Ameriky s hojným výskytem ložisek. C) Histogram znázorňující bimodální rozložení solanek podle zeměpisné šířky. Lithné solanky se vyskytují v oblastech aridního podnebí, přičemž příznivé zóny výskytu leží mezi přibližně 19° a 37° severní nebo jižní šířky. Zdroj: Bradley et al. (2013)

Vysoké koncentrace Li v solankách se obecně vyskytují v oblastech s vysokou nadmořskou výškou. Důležitou charakteristikou při vyhodnocování solankových zdrojů Li je poměr hořčíku (Mg) a Li. Vzhledem k jejich podobnému iontovému poloměru je obtížné prvky oddělit. Přítomný Mg zabraňuje vzniku LiCl. Nízký poměr Mg/Li umožňuje efektivnější extrakci Li ze solanky. Poměr se u různých solanek liší, avšak u průmyslově využívaných solanek se pohybuje v rozmezí méně než 1 až více než 30 (Vikström et al., 2013).

5.3.1 Solanky ropných a plynových polí

Ropné solanky s vysokým obsahem Li vznikají jako vedlejší produkt průzkumu, těžby a produkce ropy a zemního plynu. Koncentrace rozpuštěného Li se pohybuje v rozmezí 0,038–505 mg/l (Rotko et al., 2024). Složení těchto solanek vykazuje vysokou variabilitu v závislosti na jednotlivých fázích a metodách těžby uhlovodíků. Ovlivňujícími faktory jsou zeměpisná poloha a hloubka ložiska, strukturní podmínky prostředí, stáří a složení těžených uhlovodíků. Složení obvykle zahrnuje anorganické látky jako jsou rozpuštěné soli, těžké kovy, radioizotopy a ionty, zejména chloridů, sodíku, vápníku, hořčíku a hydrogenuhličitanů. Zároveň obsahuje organické látky jako benzen, toluen, polyaromatické uhlovodíky a organické kyseliny. Na rozdíl od solanek v bezodtokých pánvích bývají uloženy ve větších hloubkách (Neff et al., 2011).

Významnými lokalitami s výskytem solanek ropných a plynových polí se zvýšenou koncentrací Li jsou oblasti v geologické formaci Smackover, která se rozprostírá v oblasti států Alabama, Arkansas, Louisiana, Texas, Mississippi a Florida. V Texasu byla zaznamenána koncentrace Li až 692 ppm. Na území Arkansasu solanky ropných a plynových polí vykazují koncentraci Li v rozmezí 100 až 500 ppm. V Evropě je potenciál získávání Li ze solanky plynového pole Altmark v Německu, jejíž koncentrace přesahuje hodnotu 250 ppm. Ropné solanky s navýšenou koncentrací Li (přibližně 150–240 ppm) se nachází také v Cchajdamské pánvi Tibetské náhorní plošiny (Evans, 2008; Disu et al., 2024).

5.3.2 Geotermální solanky

V oblastech se zvýšeným tepelným tokem a přítomností cirkulující vody probíhá rozpouštění kovů, včetně lithia. Geotermální solanky obohacené Li s koncentrací 100–480 mg/l vznikají v důsledku kombinace geologických a geochemických procesů. (Neupane a Wendt, 2017; Sanjuan et al., 2022a). Hlavním řídicím faktorem je působení vysokoteplotního a vysokotlakého prostředí a jeho interakce s cirkulujícími fluidy. Důležitou roli hraje také magmatická aktivita, zvýšená evaporace povrchové vody a rozpouštění evaporitových minerálů. V některých případech hraje roli i interakce hydrotermálních fluid se sedimentárními horninami, např. slínovci (Elders a Cohen, 1983; McKibben et al., 1987; Giggenbach, 1992; Hedenquist a Thompson, 1995).

Geotermální solanky obohacené o Li lze rozdělit do dvou základních typů na základě převládající teploty geotermálního systému (Sanjuan et al., 2022b). U prvního typu teplota obvykle přesahuje hranici 300 °C a koncentrace Li se pohybuje v mezi 250 až 480 mg/l. Nachází se v mezozoických sedimentárních rezervoárech, ve kterých docházelo ke kvartérnímu vulkanismu, přičemž zvýšená teplota je výsledkem intenzivní magmatické aktivity, zejména degazace magmatu. Příklady oblastí se nachází v Itálii; území sopky Monte Sabatini v Laziu a aktivní kaldera Campi Flegrei v Kampánii (Calamari et al., 1976; Buonasorte et al., 1995). Dalším příkladem je oblast Saltonského moře v Kalifornii (Elders a Cohen, 1983). Druhým typem jsou nízko až vysokoteplotní geotermální systémy s teplotou v rozpětí 120–250 °C, které se vyznačují koncentrací Li od 140 do 210 mg/l. Nachází se v hlubokých tektonicky založených sedimentárních pánvích s krystalinickým basementem. Tento typ geotermálního systému je méně běžný, avšak významným příkladem je Hornorýnská nížina nacházející se na území Německa a Francie (Nicholson, 1993).

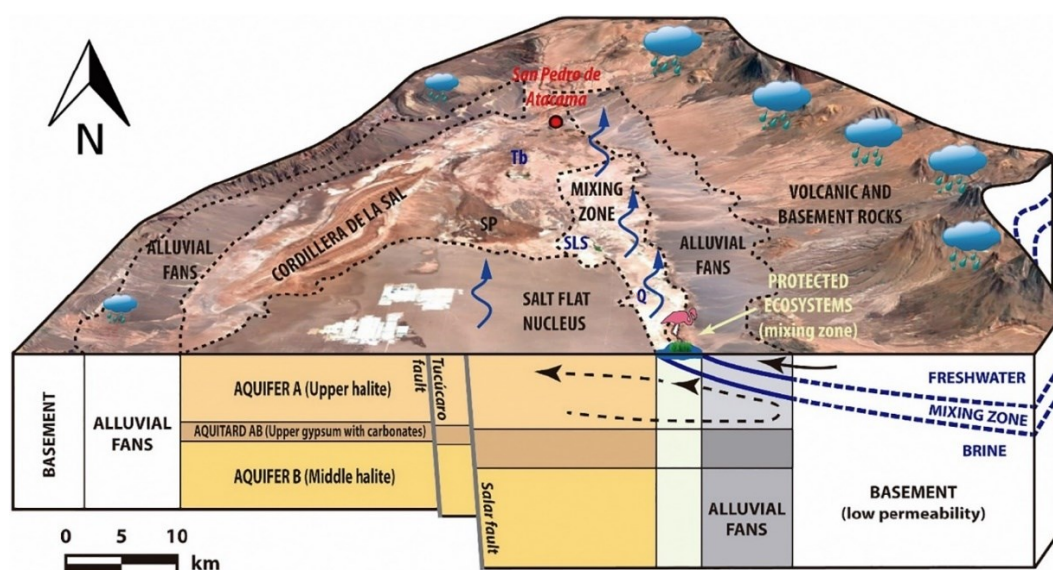
5.3.3 Příklady ložisek solanek

Salar de Atacama, Chile

Největší solná pláň nacházející se v poušti Atacama v severní části Chile, nese název Salar de Atacama. Salar de Atacama je protažená v severo-j jižním směru, rozkládá se na území s plochou přibližně 2900 km², ze západu je ohraničena horským pásmem Kordillery Domeyko a z východu ji obklopuje náhorní plošina a Západní Kordillery. Z tektonického hlediska se nachází v oblasti sousedící s aktivním vulkanickým obloukem. Na paleozoické podloží nasedají sedimenty kontinentálního původu spolu s evapority. Vše pronikají vulkanické horniny z pozdního paleozoika a mesozoika.

Během oligocénu docházelo k ukládání vulkanických, aluviálních a jezerních sedimentů. Na přelomu oligocénu a miocénu v oblasti sedimentovaly konglomeráty, pískovce a docházelo k precipitaci evaporitů, jejichž mocnost v např. v severní části pánve činí až 1300 m, v centrální zóně pak 900 m. Ta je překrytá až 100 m mocnými ignimbrity a vulkano-sedimentárními horninami miocénu a pliocénu. Během holocénu docházelo k ukládání aluviálních sedimentů, diatomitů a evaporitů.

Povrch solné pláně tvoří detriticko-evaporitické, karbonátové, sulfátové, chloridové krusty s různou zrnitostí. Voda do oblasti přitéká řekami San Pedro, Socaire a Aquas Blancas a též vyvěrá z pramenů Tambillo a Tilopozo, avšak její distribuce je nerovnoměrná. V okrajové zóně se nacházejí bazény, doliny, propadliny a deprese vyplněné vodou, které se pohybují od malých rozměrů až po větší bazény s průměrem 80 m a hloubkou 15 m, jako je Laguna de Cejas a jezero Tebinquiche. Podzemní voda má koncentrace rozpuštěných solí v rozmezí od 2 do 325 g/l. Solanka nejvíce obohacená o Li se koncentruje ve svrchní 30 m mocné solné vrstvě o ploše přibližně 1400 km² (Lowenstein a Risacher, 2009). Jedná se o solanku s průměrnou hodnotou celkových rozpuštěných látek 340 g/l (TDS). Zdrojem lithia v solankách jsou ryolitické ignimbrity s obsahem 29 až 89 ppm Li (Marazuela et al., 2019).



Obr. 13: Model pánve Salar de Atacama. Centrální zóna (nucleus) je tvořena halitem, ohraničují ji karbonáty a sádrovce a nakonec vulkanické horniny (Vásquez et al., 2013). Zdroj: Marazuela et al. (2019)

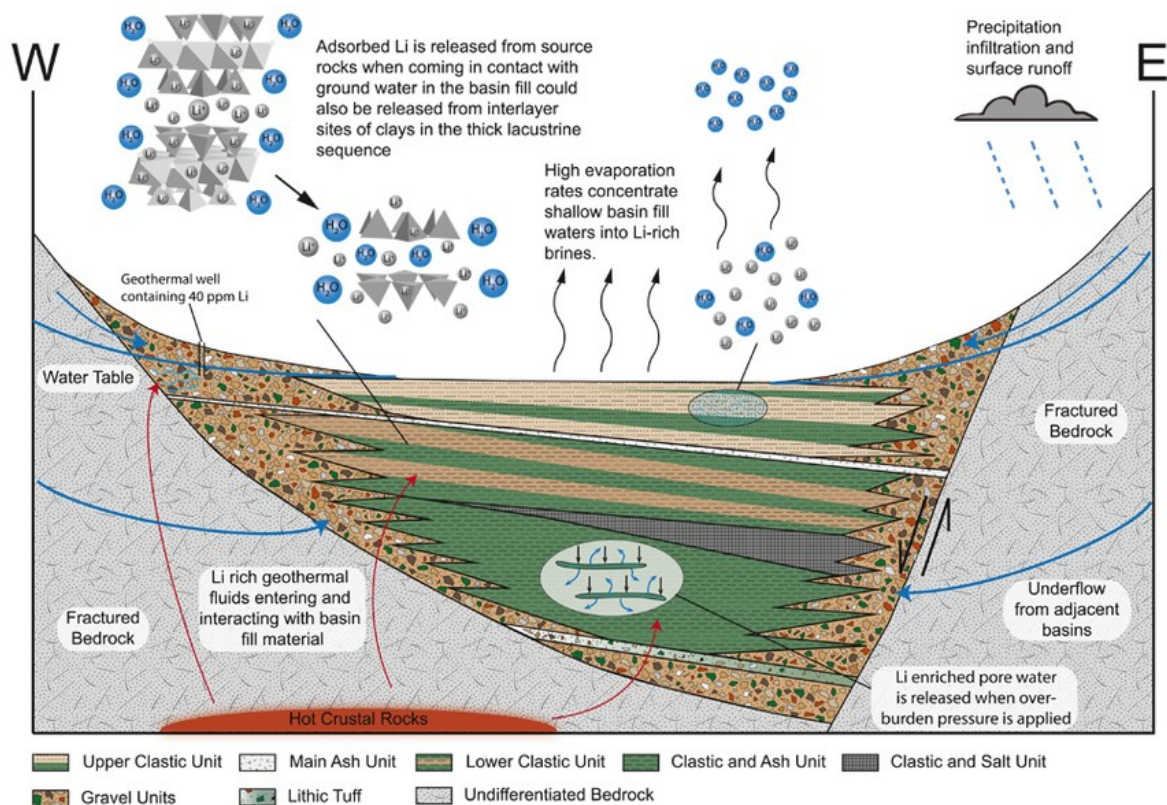
Clayton Valley, USA

Údolí Clayton Valley se rozprostírá v západním koutě státu Nevada ve Spojených státech amerických, ze západu ho ohraničuje pohoří Silver Peak, na jižní a jihovýchodní straně se tyčí pohoří Palmetto a Montezuma, zatímco Weepah Hills a Paymaster ridge obklopují údolí ze severu a východu. Pohoří, jejichž nejvyšší vrchol Piper Peak ční do nadmořské výšky 2880 m, se svažují do údolí, ve kterém leží v nadmořské výšce 1300 m playa o rozloze 100 km².

Playa je pokrytá kvartérními sedimenty aluviálních vějířů a písčných dun. Jednotlivé části playi jsou tvořené různými zónami sedimentů. V severovýchodní oblasti se nachází jemnozrnná siltová frakce a solné minerály, které obklopují vrstvy siltu, a písky, lemované travertinem či siltovou frakcí s vegetačním pokryvem (Motts a Matz, 1970). Výše položená jihozápadní oblast je tvořena travertinem či siltem a vegetačním pokryvem. V jižní části jsou písčné duny částečně stabilizované vegetací. Stavba sedimentárního podloží svědčí o tom, že se během pleistocénu střídala období dešťů a období sucha. Během vlhkých deštivých období se v mělkovodním jezerním prostředí ukládala směs smektitu, ilitu, kaolinitu a chloritu, vulkanoklastických sedimentů, písku a šterku. V sušších obdobích krystalizovaly evaporitové minerály (Davis et al., 1986).

Kromě terciérních pískovců, jílovitých břidlic, brekcií a konglomerátů vyskytujících se v oblasti, jsou však za hlavní zdroj Li považovány vulkanické a pyroklastické horniny, vulkanický popel a tufy terciérního stáří, jejichž původ se přisuzuje vulkanické aktivitě kaldery Silver Peak, či aktivitě v pásmu Montezuma, v pohoří Palmetto či sopky Jackson (Robinson et al. 1968). Tufy prošly diagenetickou alterací za vzniku zeolitů a jílových minerálů, zejména hektoritu. Alterace přispěla k nabožení hornin Li, jehož koncentrace v hornině je až 120 ppm (Davis et al., 1986).

V této oblasti můžeme rozčlenit tři typy podzemních vod, které infiltrují do aluviálních sedimentů a tufů, jež slouží jako hydrogeologický kolektor. První typ podzemních vod se vyskytuje ve vyšších polohách horských oblastí a vyznačuje se nízkou teplotou a nízkou koncentrací solí. Druhý typ podzemních vod oblasti jsou termální slané vody, k jejichž ohřevu pravděpodobně dochází na kontaktu s magmatickým krbem v severní oblasti playi. Třetím typem jsou slané studené podzemní vody v centru a zejména v severovýchodním rameni playi, které jsou klíčovým zdrojem Li. Jedná se o podpovrchové solanky se salinitou až 20 hm. %. Podle Davise et al. (1986) vznik lithné solanky probíhal následujícím způsobem: v depoziční oblasti, kterou byla playa či mělké jezero, se koncentrovala voda typu NaCl s obsahem Li, během interpluviálních období v oblasti krystalizoval halit, zatímco Li zůstávalo v roztoku solanky. Během posledních 10 000 let došlo k infiltraci meteorické vody, rozpouštění evaporitových minerálů a dalšímu navýšení salinity (Davis et al., 1986; Coffey et al., 2021). Na obrázku je znázorněn řez podložím (Obr. 14), ve kterém zlomové struktury vytváří místa pro akumulaci solanky s vysokou koncentrací Li (Davis et al., 1986; Coffey et al., 2021)



Obr. 14: Model systému solanek v pánvi Clayton Valley znázorňuje horninovou stratigrafii, mechanismy vzniku, akumulace a migrace solanek a rozložení lithia v prostoru. Coffey et al. (2021).

5.4 Jíly obohacené o lithium

Další skupinu zdrojů lithia představují ložiska sedimentárního původu, lithiem obohacené jíly. Podle Zhao et al. (2025) lze tato ložiska rozdělit podle způsobu vzniku a charakteristického geologického prostředí na dvě hlavní kategorie: jíly vzniklé z bauxitových sedimentů (např. formace Daoshitou v provincii Jün-nan v Číně), a lakustrinní jílové sedimenty. Tyto se dále člení na tři podtypy: zeolitový typ (oblast Jadar v Srbsku), vulkanické sedimenty (oblast McDermittovy kaldery ve Spojených státech) a jílové sedimenty solných jezer (vyskytující se např. v Cchajdamské pánvi v Číně) (Zhao et al., 2025).

Jíly bohaté na Li vznikající z krasového bauxitu obsahují jílové minerály jako chlorit, kaolinit, ilit spolu s minerály bohatými na Al, jako je diaspor a böhmít. Příkladem je výše zmíněná formace Daoshitou v Číně s následujícím způsobem vzniku: v podmínkách teplého a vlhkého klimatu probíhalo zvětrávání karbonátových hornin a vytváření krasových depresí. Následnou interakcí mezi minerálními klasty a alkalickými vodnými roztoky vznikl smektit bohatý na Li (Benson et al., 2023). V důsledku opětovné transgrese a ukládání vápenců, docházelo ke kompakci a přeměně Li obohaceného smektitu na cookeit, který je považován za hlavní zdrojový minerál Li v této oblasti. Koncentrace Li se pohybuje v rozmezí 560–6800 ppm (Ye et al., 2025).

Vulkanické sedimenty obohacené Li vznikají v důsledku interakce uloženého sopečného popela s vodou a hydrotermálními roztoky, která vede k uvolnění lithia. Lithium je následně transportováno a spolu s jílovými sedimenty ukládáno v prostředí sopečných jezer. Takto vzniklé a uložené jíly bývají bohaté na SiO₂ a Mg. Hlavní zdrojové minerály lithia jsou zástupci ilitové a smektitové skupiny (Benson et al., 2017). Významnou lokalitou s hojným výskytem sedimentů sopečného původu je Kings Valley a zejména oblast kolem McDermittovy kaldery v Nevadě. Jedná se o tufové sedimenty miocenního stáří, jejichž mocnost se v závislosti na morfologii podloží pohybuje od 1 do 90 m. Hlavním smektitovým minerálem je hektorit a v závislosti na konkrétní oblasti sedimenty obsahují v rozmezí 0,1–0,6 % Li. Jíly s přítomností hektoritu se vyznačují světle až tmavě zelenou či hnědou barvou, která závisí na oxidačním stavu přítomného železa (Glanzman et al., 1978; Rossi, 2010). Obsah Li ze sedimentárních sledů, ve kterých převažují smektitové minerály, se průměrně pohybuje od 1000 ppm do 4000 ppm, zatímco v oblastech s dominantní ilitovou skupinou minerálů je v rozmezí 4000–8000 ppm Li (Benson et al., 2023).

5.4.1 Zeolitové ložisko Jadar v Srbsku

Jediné známé Li-zeolitové ložisko na světě se nazývá Jadar a je součástí neogenního pánevního systému v Srbsku. Na Balkánském poloostrově vznikaly v době neogénu ve vnitrohorských údolích typu graben a half-graben nebo v okrajových oblastech Panonského moře jezerní pánve. K jejich tvorbě docházelo od oligocénu či začátku miocénu, a jejich vývoj byl ukončen na přelomu miocénu a pliocénu. V těchto prostředích docházelo k sedimentaci říčních, bažinných a jezerních usazenin. Řadíme mezi ně např. pánve Valjevo-Mionica, Pranjani a Jadar (Obradović et al., 1997). Na severo-západním okraji Srbska se rozprostírá jedna z lakustrinních a později mořských pánví, pojmenovaná podle řeky Jadar, která vznikala v období oligocénu až pliocénu. Paleoklimatické podmínky se vyznačovaly teplým, subtropickým klimatem se střídáním vlhkých a suchých období (Obradović et al., 1997). Vyplňují ji až 2000 m mocné sedimentární horniny jako je vápenec, slínovec, vložky uhlí, ropné břidlice a lakustrinní evapority obohacené o bor a lithium. Interakcí mezi vodou a sedimenty pravděpodobně vznikl bor-lithiový silikát zeolitové skupiny jadarit. Za možný vznik se považuje též hydrotermální devitifikace tufů či alterace jílových minerálů (Stanley et al., 2007).

Jadarit tvoří masivní bílé agregáty či nodulární agregáty v jemnozrnném karbonátovém matrix. Přítomné jsou minerály jako kalcit, dolomit, K-živec, rutil, albit, ilmenit, pyrit a jemnozrnný muskovit. Vzácněji také searlesit, analcim, chlorit a křemen (Obradović et al., 1997).

6. Metody těžby, zpracování Li-surovin a jejich vliv na životní prostředí

Metoda těžby a získávání lithia se odvíjí od typu daného ložiska. Z horninových zdrojů se obecně získává hydroxid lithný (LiOH), ze solanek se extrahuje uhličitan lithný (Li_2CO_3) (Graham et al., 2021).

Obecně nejpoužívanější technologie pro extrakci lithia ze solanky probíhá následujícím způsobem: solanka se čerpá z podpovrchového akviferu solné pláně a napouští se do řady vodních nádrží, které slouží jako mělké odpařovací bazény. Postupnou evaporací dochází k navýšení koncentrace lithia na přibližně 6000 ppm. V procesu odpařování se současně sráží a následně získávají soli ostatních iontů jako jsou Na, K, Mg (Peiró et al., 2013; Swain, 2017). Po dosažení optimální koncentrace chloridu lithného (LiCl) je solanka přečerpána do čistícího zařízení, přičemž chemické látky, které se samovolně nesrážejí, jako např. boritany a kationty Mg, se odstraňují chemickou úpravou. Koncentrovaná solanka se upravuje uhličitanem sodným (Na_2CO_3) a dochází ke srážení Li_2CO_3 , který je možné dále zpracovat na jiný zájmový průmyslový produkt. Celý proces obvykle trvá 12 až 24 měsíců a díky aridním klimatickým podmínkám oblastí s výskytem zájmových solanek je poměrně nízkonákladový (Flexer et al., 2018).

Proces extrakce lithia ze solanek ovlivňuje životní prostředí dvěma hlavními způsoby: spotřebou vody a tvorbou odpadních látek. Do procesu extrakce lithia vstupují dva typy vod; prvním typem je solanka s alespoň 170 g/l a nejčastěji 300 g/l celkového množství rozpuštěných solí (TDS), druhým typem je sladká voda s méně než 10 g/l celkovým množstvím rozpuštěných solí. Solanka se nachází zejména v centrálních oblastech solných pánví, zatímco sladká voda se nachází na okraji solných pánví jako volná voda ve zvodni (King et al., 2012). Solanka se nevyužívá v zemědělství a není vhodná pro lidskou spotřebu, ale má vliv na rovnováhu celkového ekosystému. Sladká voda se čerpá samostatně a využívá se pro účely extrakce a čištění lithia. Její spotřeba se pohybuje mezi 5 až 50 m³ na tunu čistého Li_2CO_3 , což není zanedbatelné množství vzhledem k aridním klimatickým podmínkám daných oblastí (Flexer et al., 2018). Evaporační metoda extrakce lithia také produkuje obrovské množství odpadu ve formě vysrážených solí. Při odpařování solanky s 300 g/l TDS a 700 ppm lithia se při 70% výtěžnosti na každou tunu Li_2CO_3 vytvoří přes 115 tun odpadu. Hlavními složkami jsou soli Na, K, hydroxid hořečnatý ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) a síran vápenatý (CaSO_4). Tyto látky sice nejsou toxické, ale jejich množství si žádá vhodné nakládání s odpady. Při extrakci 20 000 tun Li_2CO_3 ročně bude po 10 letech probíhající těžby vyprodukováno 23 milionů tun odpadu (Flexer et al., 2018).

Hledají se rychlejší a k životnímu prostředí šetrnější způsoby získávání lithia ze solanek, mezi které patří přímá extrakce lithia (DLE). Mezi metody DLE patří procesy založené na adsorpci, iontové výměně, použití membránových technologií a elektrochemických procesů. Tyto metody jsou předmětem intenzivního výzkumu, který se zaměřuje na jejich efektivitu, stabilitu a udržitelnost (Farahbakhsh et al., 2024).

Těžba lithiových rud zahrnuje v porovnání se solankami vyšší podíl hydrometalurgických procesů (Habashi, 1997). Konkrétní postup se odvíjí od přítomného nerostu a závisí tak na jeho chemickém složení a dalších fyzikálně-chemických vlastnostech (Vikström et al., 2013). Obvykle postup zahrnuje drcení a zahřívání rudy, během kterého dochází k přeměně krystalové fáze lithia z alfa na beta. V rudě přítomné lithium je vytěsněno sodíkem. Výsledný materiál se rozemele na jemný prášek a po smísení s kyselinou sírovou (H_2SO_4) se materiál podrobí pražení. Filtrací a srážením se odstraňují nečistoty a příměsi jako Mg a Ca. Přidáním uhličitanu sodného (Na_2CO_3) se dosáhne krystalizace uhličitanu lithného (Li_2CO_3) (Habashi, 1997).

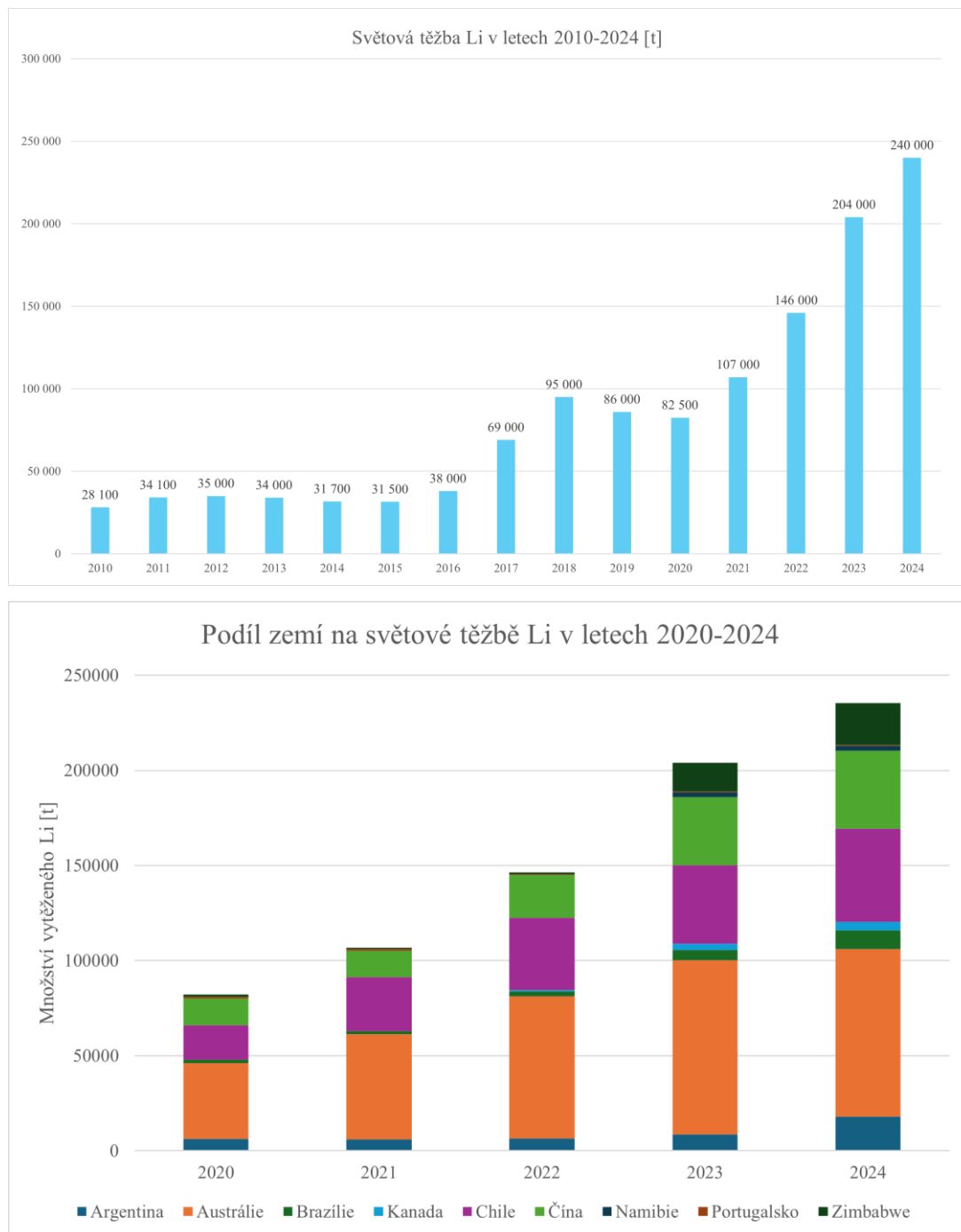
Důlní odpady vznikající při těžbě a zpracování horninových zdrojů Li se vyznačují vysokým obsahem SiO_2 a Al_2O_3 a středním zastoupením Na_2O , K_2O a Fe_2O_3 , které pocházejí především z křemene, živců a slíd. Tyto odpady obsahují také 0,02 – 1,3 hm.% Li_2O ve formě zbytkového spodumenu, lepidolitu a cinvalditu. Obecně nejsou odpady považovány za toxické, ale některé mohou obsahovat stopy uranu (U) a thoria (Th) (Hudson-Edwards, 2024).

V současnosti jsou předmětem výzkumů metody nakládání s lithium-iontovými bateriemi (LIB), které dosáhnou ukončení prodeje a marketingové podpory produktu (End of Life, zkratka EOL), zejména potom metody a strategie recyklace použitých materiálů (Ma et al., 2025). Mezi průmyslově využívané metody patří pyrometalurgická, hydrometalurgická a případně přímá recyklace, přičemž další metody se testují v laboratorním či pilotním měřítku (Zhou et al., 2021). Při pyrometalurgickém zpracování dochází za vysoké teploty (přibližně 1500 °C) k tavení baterií a spalování sloučenin na bázi uhlíku. Prvky jako Co, Ni, Mn zůstávají ve slitině a mohou být dále zpracovány. V procesu však dochází ke ztrátě ostatních složek, zejména grafitu, oceli, Al a Li (Beaudet et al., 2020). Hydrometalurgie využívá vysoké rozpustnosti kovů včetně Li v kyselině. Proces obnáší roztřídění komponentů, získání oceli, měděné a hliníkové fólie, a následné drcení. Tato metoda se považuje za vhodnou pro získávání Li, které lze extrahovat srážením Li_2CO_3 po vyčištění loužicího roztoku. Díky tomu se hydrometalurgie považuje za slibnou metodu recyklace baterií (Propulsion Quebec, 2019; Beaudet et al., 2020). Optimalizace procesu recyklace by byla možná díky dalšímu výzkumu recyklačních technologií pro odlišné typy baterií a díky opatřením regulující jejich design zajišťující snadnější demontáž (Ma et al., 2025).

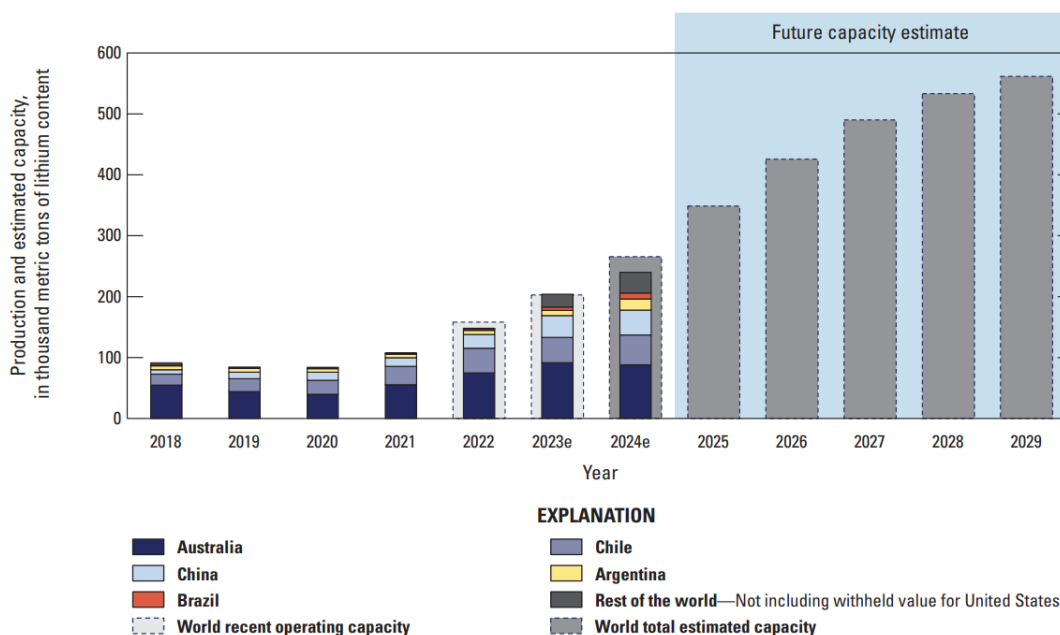
Čína zcela dominuje na trhu s recyklací materiálů s více než 80% zastoupením, přičemž 20 nejvýznamnějších společností na úpravu a recyklaci materiálů jsou čínské, z nich vedou GEM, Brunp (dceřiná spol. CATL) a Hunan Hongjie New Material (International Energy Agency, 2024a).

7. Světová těžba a produkce lithia

Těžba lithia v průběhu let výrazně roste. Graf znázorňuje vývoj (zaokrouhleného) množství vytěženého Li od roku 2010 do roku 2024 (USGS, Jaskula, 2010–2024).



Obr. 15: Výše je graf světové těžby lithia mezi lety 2010–2024. Od roku 2020 docházelo ke každoročnímu nárůstu vytěženého Li, přičemž druhý graf znázorňuje podíl jednotlivých zemí na jeho produkci. Hlavními producenty byla Austrálie, Chile, Čína, Zimbabwe, Brazílie, Kanada, Argentina, Portugalsko a Namibie. Zdroj dat: USGS, (2010–2024)



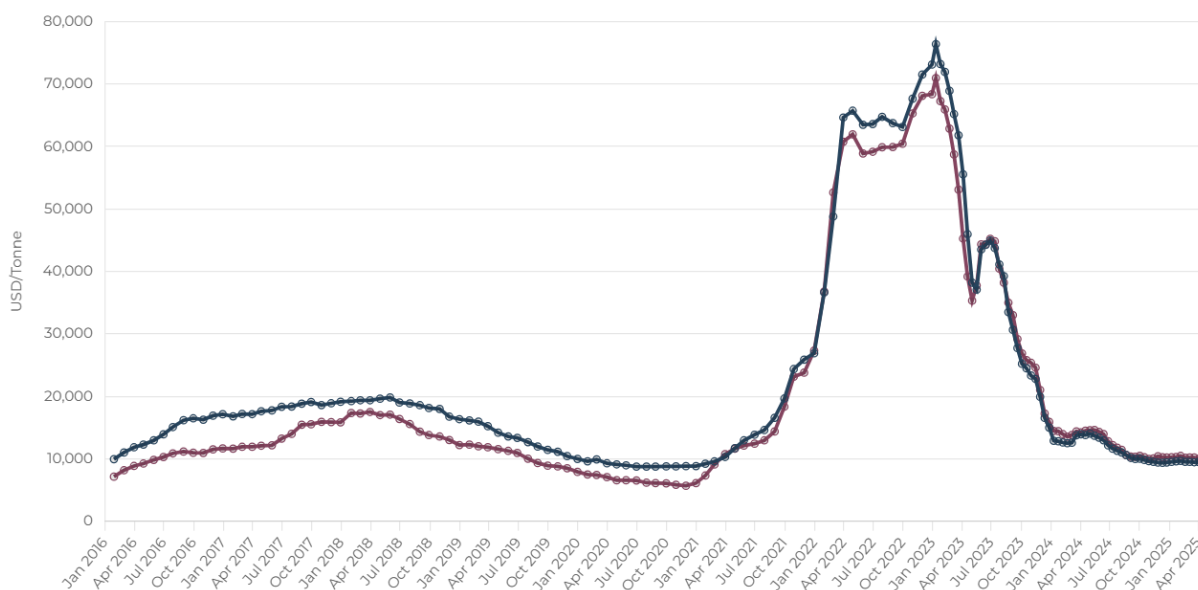
Obr. 16: Odhadovaná kapacita produkce Li v letech 2018 až 2029. Ve statistice je zahrnuta potenciální produkce těchto zemí: Argentina, Austrálie, Bolívie, Brazílie, Čína, Česko, Finsko, Francie, Ghana, Jihoafrická republika, Kanada, Kongo, Německo, Mali, Mexiko, Namibie, Nigérie, Peru, Portugalsko, Rakousko, Rusko, Rwanda, Srbsko, Španělsko, Velká Británie a Zimbabwe. Zdroj: Alonso et al. (2025)

Ve světovém měřítku dominuje Austrálie, která zůstává hlavním producentem lithia díky vysokému obsahu spodumenu v ložiscích Greenbushes, Pilgangoora, Wodgina a dalších, přičemž se na základě analýz předpokládá, že bude do roku 2030 představovat přibližně třetinu celkové světové produkce (International Energy Agency, 2024b). Lom Greenbushes je povrchový důl v Západní Austrálii, který vlastní a provozuje společnost Talison Lithium Australia Pty Ltd. Z 51 % je vlastněna Tianqi Lithium Energy Australia Pty Ltd, z 49 % je vlastněna Albemarle Corp. Komodity lomu Greenbushes jsou lithium a spodumen.

Druhým největším producentem Li je Chile díky rozsáhlé Salar de Atacama, avšak mezi země Latinské Ameriky, které hrají klíčovou roli, patří i Argentina a Bolívie. Důl Salar de Atacama nacházející se 210 km východně od Antofagasty je vlastněn společností Sociedad Química y Minera de Chile S.A. Komodity získávané ze solanky jsou draslík, lithium, bór, síran draselný a kyselina boritá (International Energy Agency, 2024b).

Čína je největším světovým výrobcem a spotřebitelem Li, její podíl na světové produkci se zvětšuje a podle některých scénářů v budoucnu bude předčít v produkci Chile a stane se tak druhým největším světovým producentem (International Energy Agency, 2024b). Rafinace Li ze solanek probíhá obvykle lokálně v oblasti ložiska, zejména solanky Latinské Ameriky a Číny. Zpracování Li z horninové rudy probíhá dominantně v Číně, která zpracovává materiály domácí produkce, ale také ty vytěžené v některé z Afrických zemí či Austrálii (International Energy Agency, 2024b).

V evropském měřítku hraje klíčovou roli Cínovec v Krušných horách České republiky. Ministerstvo životního prostředí a ministerstvo průmyslu udělilo povolení společnosti Geomet s r.o. ke stanovení ložiska na Cínovci. Geomet s r. o. zaštiťuje licence na těžbu nerostů na Cínovci. Ze 49 % je společnost vlastněna australskou firmou EMH a z 51 % společností ČEZ, a.s. Ověřené zásoby Li představují 53,3 Mt s 0,48% Li_2O , pravděpodobné zásoby byly stanoveny na 360,2 Mt s 0,44% Li_2O a předpokládané zásoby jsou 294,7 Mt s 0,39% Li_2O , přičemž zásoby obsahují 7,39 mil. tun LCE (Lithium Carbonate Equivalent). Díky těmto hodnotám se jedná o největší ložisko Li v Evropě a 5. největší horninové ložisko na světě (European Metals, 2025).



Obr. 17: Vývoj cen lithia (vážený průměr v USD/t produktu; hnědá linie – Li_2CO_3 , tmavě šedá linie - LiOH) na světovém trhu od roku 2016 do současnosti. Zdroj: www.benchmarkminerals.com

Poslední téma, které je třeba zmínit, je vývoj cen Li (obchodovaného jako Li_2CO_3 , či LiOH) na světovém trhu. Po raketovém nárůstu ceny zhruba mezi lety 2022–2023 (Obr. 17) došlo k propadu cen na velmi nízké úrovni (okolo 10 USD/kg). Budoucí vývoj cen na světovém trhu může být významným pozitivním, nebo negativním faktorem, který rozhodne o tom, zda se některé ložisko bude, nebo nebude těžit.

8. Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřuje na rešerši hlavních zdrojů lithia (Li) a jejich ložiskových typů. Úvodní část se věnuje vlastnostem tohoto prvku, které z něj činí strategický prvek pro výrobu moderních technologií. Lithium nachází uplatnění ve sklářském a keramickém průmyslu, při výrobě maziv, zařízení na úpravu vzduchu a ve zdravotnictví, kde se využívá například při léčbě bipolární poruchy. V současnosti však přibližně 87 % celosvětové spotřeby lithia náleží výrobě lithium-iontových baterií.

Z mineralogického hlediska je minerálem s nejvyšším obsahem Li griceit (LiF ; 26,76 hm.% Li), který je však poměrně vzácný. Z hlediska ložiskové geologie mezi významné minerály patří zejména zabuyelit ($\text{Li}_2(\text{CO}_3)$; 18,79 hm.% Li), eukryptit (LiAlSiO_4 ; 5,51 hm.% Li), montebrasit ($\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$; 4,74 hm.% Li), amblygonit ($(\text{Li},\text{Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{F},\text{OH})$; 4,44 hm.% Li), spodumen ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$; 3,73 hm.% Li), lepidolit ($\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$; 3,58 hm.% Li), elbait ($\text{NaLi}_{2,5}\text{Al}_{6,5}(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$; 1,89 hm.% Li), cinvaldit ($\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$; 1,59 hm.% Li) a hektorit ($\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$; 0,54 hm.% Li).

LCT pegmatity představují primární zdroj lithia, cesia a tantalu, díky hrubozrnné textuře a vysokému obsahu průmyslově využitelných minerálů jako jsou spodumen, petalit a lepidolit. Vznikají v oblastech kolizních orogénů a jsou spjaty s peraluminními granity. Jejich struktura a zonálnost umožňují efektivní těžbu a zpracování. Greisenová ložiska vznikají hlubinnou hydrotermální alterací granitoidních plutonů, přičemž mineralogické složení z nich činí důležitý zdroj nejen lithia, ale i cínu a wolframu. Lithiem obohacené solanky vznikají zejména v bezodtokých sedimentárních pánvích za aridních klimatických podmínek, kde dlouhodobá evaporace přispívá k akumulaci solí včetně Li (u ekonomicky využitelných ložisek je koncentrace Li 200–4000 mg/l). Klíčovými faktory vzniku ložisek jsou zvětrávání felsických hornin, subsidence pánví a zvýšený tepelný tok. Alternativními zdroji Li jsou geotermální solanky a solanky ropných a plynových polí. Lithiem obohacené jíly představují významný sedimentární zdroj lithia a dělí se na bauxitové sedimenty a lakustrinní jílové sedimenty s třemi podtypy; zeolitový typ, vulkanické sedimenty a sedimenty solných jezer. Lithium je v tomto případě vázáno zejména ve smektitových a ilitových minerálech, jako je hektorit a montmorillonit.

Způsob těžby a získávání lithia se liší v závislosti na typu ložiska. Zatímco z horninových zdrojů se obvykle získává hydroxid lithný (LiOH), solanky slouží převážně k produkci uhličitanu lithného (Li_2CO_3). Nejrozšířenější metodou extrakce lithia ze solanek je evaporační proces, který však představuje zátěž životního prostředí z hlediska spotřeby vody a tvorby odpadních solí. Alternativní technologie přímé extrakce lithia (DLE) představují perspektivní směr vývoje, neboť by umožnily efektivněji extrahovat Li z alternativních typů solanek, např. ropných a plynových polí a geotermálních solanek. U těžby z horninových zdrojů převažují hydrometalurgické postupy, přičemž důlní odpady nejsou považovány za toxické, ale některé mohou obsahovat stopy uranu (U) a thoria (Th). Vzhledem k

rostoucímu množství lithium-iontových baterií, které již dosáhly konce funkčnosti, nabývá na významu jejich recyklace, přičemž na trhu s recyklací materiálů v současnosti dominuje Čína.

Austrálie je v současnosti největším světovým producentem Li, avšak významnými producenty jsou Chile a Čína. V evropském kontextu na důležitosti nabývá ložisko Cínovec v České republice, které je označeno za největší svého druhu v Evropě.

9. Seznam citované literatury

- American Metal Market, 1972. Humble Unveils Lithium Grease Am. Met. Mark. 12.
- Beaudet, A., Larouche, F., Amouzegar, K., Bouchard, P., Zaghbi, K., 2020. Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials. *Sustainability* 12, 5837.
- Benson, T.R., Coble, M.A., Dilles, J.H., 2023. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Sci. Adv.* 9, eadh8183.
- Benson, T.R., Coble, M.A., Rytuba, J.J., Mahood, G.A., 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nat. Commun.* 270.
- Bradley, C.B., McCauley, A.D., Stillings, L.M., 2017. Scientific Investigations Report (Scientific Investigations Report No. 2010-5070-0), Mineral Deposit Models for Resource Assessment.
- Bradley, D., McCauley, A., 2016. A Preliminary Deposit Model for Lithium-Cesium-Tantalum (LCT) Pegmatites (Open-File Report No. 2013-1008), Open-File Report. USGS.
- Bradley, D., Munk, L., Jochens, H., Hynek, S., Labay, K., 2013. A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines (Open-File Report). USGS.
- Bradley, D.C., 2011. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle. *Earth-Sci. Rev.* 108, 16–33.
- Bradley, D.C., Jaskula, B.W., Munk, L., McCauley, A.D., Stillings, L.L., 2017. Lithium (No. 1802-K), Critical Mineral Resources of the United States – Economic and Environmental Geology and prospects for Future Supply. USGS.
- Breiter, K., 2012. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe. *Lithos* 151, 105–121.
- Breiter, K., 1997. Teplice rhyolite (Krušné hory Mts., Czech Republic) Chemical evidence of a multiply exhausted stratified magma chamber. *Bull. Czech Geol. Surv.* 72, 205–213.
- Breiter, K., Ďurišová, J., Dosbaba, M., 2017a. Quartz chemistry – A step to understanding magmatic-hydrothermal processes in ore-bearing granites: Cínovec/Zinnwald Sn-W-Li deposit, Central Europe. *Ore Geol. Rev.* 90, 25–35.
- Breiter, K., Ďurišová, J., Hrstka, T., Korbelová, Z., Hložková Vaňková, M., Vašinová Galiová, M., Kanický, V., Rambousek, P., Knésl, I., Dobeš, P., Dosbaba, M., 2017b. Assessment of magmatic vs. metasomatic processes in rare-metal granites: A case study of the Cínovec/Zinnwald Sn–W–Li deposit, Central Europe. *Lithos* 292–293, 198–217.
- Breiter, K., Korbelová, Z., Šešulka, V., Honig, S., 2016. New rock and mineral data from the Li (Sn, W, Nb, Ta) -deposit Cínovec-jih. *Geosci. Res. Rep.* 49.
- Buonassorte, G., Cameli, G.M., Fiordelisi, A., Parotto, M., Perticone, I., 1995. Results of geothermal exploration in Central Italy (Latium-Campania). *Proc. World Geotherm. Congr. Florence Italy* 18–31.
- Calamari, A., Cataldi, R., Dall’Aglia, M., Ferrara, G.C., 1976. Preliminary Report on the Cesano Hot Brine Deposit (Northern Latium), Italy. 2nd UN Sym-posium on Development and Use of Geothermal Resources 305–313.
- Cameron, E.N., Jahns, R.H., McNair, A.H., Page, L.R., 1949. Internal structure of granitic pegmatites. *Econ. Geol. Monogr.* 2 115.
- Carroll, H.R., Angelo, J.J., 1983. Adding lithium can improve melting-forming performance: Glass Industry. *Glass Ind.* 14–18.
- Černý, P., 1992. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research. *Appl. Geochem.* 7, 393–416.

- Coffey, D.M., Munk, L.A., Ibarra, D.E., Butler, K.L., Boutt, D.F., Jenckes, J., 2021. Lithium Storage and Release From Lacustrine Sediments: Implications for Lithium Enrichment and Sustainability in Continental Brines. *Geochem. Geophys. Geosystems* 22.
- Davis, J.R., Friedman, I., Gleason, J.D., 1986. Origin of the lithium-rich brine, Clayton Valley, Nevada, in: *Shorter Contributions to Isotope Research*, U.S. Geological Survey Bulletin. pp. 132–138.
- Disu, B., Rafati, R., Sharifi Haddad, A., Mendoza Roca, J.A., Iborra Clar, M.I., Soleymani Eil Bakhtiari, S., 2024. Review of recent advances in lithium extraction from subsurface brines. *Geoenergy Sci. Eng.* 241, 213189.
- Elders, W.A., Cohen, L.H., 1983. The Salton Sea geothermal field, California, as a near- field natural analog of a radioactive waste repository in salt. *Tech. Rep.* 146.
- Emsley, J., 2003. *Nature's building blocks—An A–Z guide to the elements*. Oxford University Press, Oxford.
- Engineering News Record, 1983. Dessicant Cool. Arrives Eng. News Rec. 18.
- Entler, S., Ficker, O., Havlíček, J., Horáček, J., Hron, M., Mlynář, J., Pánek, R., Řípa, M., Stöckel, J., Varju, J., Weinzettl, V., 2019. Budoucnost energetiky: jaderná fúze, Systémy pro jadernou energetiku. *Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., pro Kancelář Akademie věd ČR*.
- European Metals, 2025. *Cinovec Declared Strategic Deposit By Czech Government*. European Metals Holdings Limited.
- Evans, R.K., 2008. *An abundance of lithium: Raleigh, N.C.* North Carolina State University.
- Farahbakhsh, J., Arshadi, F., Mofidi, Z., Mohseni-Dargah, M., Kök, C., Assefi, M., Soozanipour, A., Zargar, M., Asadnia, M., Boroumand, Y., Presser, V., Razmjou, A., 2024. Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization. *Desalination* 575, 117249.
- Fletcher, I.R., Wilde, S.A., Libby, W.G., Rosman, K.J.R., 1983. Sm-Nd model ages across the margins of the Archean Yilgarn block, Western Australia-II: Southwest transect into the Proterozoic Albany-Fraser province. *Geol. Soc. Aust. J.* 30, 333–340.
- Flexer, V., Baspineiro, C.F., Galli, C.I., 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Sci. Total Environ.* 639, 1188–1204.
- Garrett, D.E., 2004. *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride*. Elsevier Ltd.
- Giggenbach, W.F., 1992. Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries. *Econ. Geol.* 87, 1927–1944.
- Glanzman, R.K., McCarthy, J.H., Rytuba, J.J., 1978. Lithium in the McDermitt Caldera, Nevada and Oregon. *Energy* 3 347–353.
- Goonan, T.G., 2012. Lithium use in batteries. *US Geol. Surv. Circ.* 14.
- Graham, J.D., Rupp, J.A., Brungard, E., 2021. Lithium in the Green Energy Transition: The Quest for Both Sustainability and Security. *Sustainability* 13, 11274.
- Habashi, F., 1997. *Handbook of Extractive Metallurgy*. Wiley-VCH.
- Hedenquist, J.W., Thompson, F.F.H., 1995. The ascent of magmatic fluid: discharge versus mineralization. In: *Chapter 13, Magmas, Fluids, and Ore Deposits*. Mineral. Assoc. Can.
- Hudson-Edwards, K.A., 2024. Geochemistry and mineralogy of wastes from lithium-bearing granite-pegmatite mining: resource potential and environmental risks. *Front. Geochem.* 2, 1378996.
- International Energy Agency, 2024a. *Recycling of Critical Minerals*. IEA.
- International Energy Agency, 2024b. *Global Critical Minerals Outlook 2024*. IEA.
- Jaskula, B.W., 2024. Lithium. *Miner. Commod. Summ.* 110–111.
- Jaskula, B.W., 2016. Lithium. *Miner. Commod. Summ.* 100–101.

- Jaskula, B.W., 2005. Lithium. *Miner. Commod. Summ.* 98–99.
- King, M., Kellye, R., Abbey, D., 2012. Feasibility study reserve estimation and lithium carbonate and potash production at the Cauchari-Olaroz salars. *Lithium Am.*, Technical Report 43–101.
- London, D., 2008. Pegmatites: Ottawa, Ontario, Canada, Mineralogical Association of Canada. *Can. Miner. Gist Spec. Publ.* 10, 347.
- Lowenstein, T., Risacher, F., 2009. Closed basin brine evolution and the influence of Ca–Cl inflow waters. Death Valley and Bristol Dry Lake, California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquat. Geochem.* 15, 71–94.
- Ma, X., Meng, Z., Bellonia, M.V., Spangenberg, J., Harper, G., Gratz, E., Olivetti, E., Arsenault, R., Wang, Y., 2025. The evolution of lithium-ion battery recycling. *Nat. Rev. Clean Technol.* 1, 75–94.
- Marazuela, M.A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., Palma, T., 2019. Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Sci. Total Environ.* 651, 668–683.
- McKibben, M.A., Williams, A.E., Elders, W.A., Eldridge, C.S., 1987. Saline brines and metallogenesis in a modern sediment-filled rift: the Salton Sea geothermal system, California, USA. *Appl. Geochem.* 2, 563–578.
- McLennan, S.M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem. Geophys. Geosystems* 2.
- Mitchell, P.B., Hadzi-Pavlovic, D., 2000. Lithium treatment for bipolar disorder. *Bull. World Health Organ.* 78, 515–517.
- Motts, W.S., Matz, D.B., 1970. Reconnaissance geology of Clayton Playa, Nevada, in: *Geology and Hydrology of Selected Playas in the Western United States: U.S. Air Force Cambridge Research Lab Oratories, Hauscom Field, Bedford, Mass., Final Report.* pp. 214–236.
- Neff, J., Lee, K., DeBlois, E.M., 2011. Produced water: overview of composition, fates, and effects, in: K. Lee, J. Neff (Eds.), *Produced Water: Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies.* Springer 3–54.
- Neupane, G., Wendt, D.S., 2017. Assessment of Mineral Resources in Geothermal Brines in the US. 42nd Workshop O Geotherm. Reserv. Eng. Stanf. Univ.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal fluids, Chemistry and Exploration Techniques.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Norton, J.J., 1973. Lithium, cesium, and rubidium – The rare alkali metals, in: *United States Mineral Resources, U.S. Geological Survey Professional Paper.* pp. 365–378.
- Obradović, J., Djurdjević-Colson, J., Vasić, N., 1997. Phytogenic lacustrine sedimentation – Oil shales in Neogene from Serbia, Yugoslavia. *J. Paleolimnol.* 18, 351–364.
- Partington, G.A., McNaughton, N.J., Williams, I.S., 1995. A Review of the Geology, Mineralization, and Geochronology of the Greenbushes Pegmatite, Western Australia. *Econ. Geol.* 616–635.
- Peiró, L.T., Méndez, G.V., Ayres, R.U., 2013. Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. *JOM* 65, 986–996.
- Propulsion Quebec, 2019. *Lithium-ion Battery Sector: Developing a Promising Sector for Quebec's Economy.* KPMG Propuls. Quebec.
- Remy, H., Škramovský, S., 1971. *Anorganická chemie, 2. české vydání.* ed. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha.
- Rickwood, P.C., 1981. The largest crystals: *American Mineralogist* 66, 885–907.
- Romer, R.L., Kroner, U., 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization—Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting. *Gondwana Res.* 31, 60–95.

- Rossi, J.E., 2010. NI 42-101 technical report Stage II (south lens) resource estimate, Kings Valley Project, Orovada, Humboldt County, Nevada, USA (No. NI 42-101). Geosystems International Stage.
- Rotko, G., Knapik, E., Piotrowski, M., Marszałek, M., 2024. Oilfield Brine as a Source of Water and Valuable Raw Materials—Proof of Concept on a Laboratory Scale. *Water* 16, 1461.
- Sanders, Jr., T.H., 1980. Al-Li-X alloys-An overview. Presented at the The Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, pp. 62–67.
- Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E., Rombaut, A., 2022a. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. *Geothermics* 101, 102385.
- Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E., Rombaut, A., 2022b. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. *Geothermics* 101, 102385.
- Stanley, C.J., Jones, G.C., Rumsey, M.S., Blake, A.C., Stirling, J.A.R., Carpenter, G.J.C., Whitfield, P.S., Grice, J.D., Lepage, 2007. Jadaritee, $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$, a new mineral species from the Jadar basin, Serbia. *Eur. J. Mineral.* 19, 575–580.
- Štemprok, M., Šulcek, Z., 1969. Geochemical profile through an ore-bearing lithium granite. *Econ. Geol.* 64, 392–404.
- Swain, B., 2017. Recovery and recycling of lithium: a review. *Sep. Purif. Technol.* 388–403.
- The Royal Swedish Academy of Sciences, 2019. Press release: The Nobel prize in Chemistry 2019. NobelPrize.org.
- Vávra, V., 2013. Cínvaldit. Atlas Minerálů Výuková Pom.
- Vikström, H., Davidsson, S., Höök, M., 2013. Lithium availability and future production outlooks. *Appl. Energy* 110, 252–266.
- Ye, Q., Luo, C., Wen, H., Chen, Y., Yu, W., 2025. Smectite as the lithium-rich mineral precursor: Key to lithium enrichment in claystone from Central Yunnan, Southwest China. *Ore Geol. Rev.* 180, 106586.
- Zhao, Y., Long, P., Zhang, H., Hu, Y., Cui, Z., Zhang, Y., Zhang, M., Wang, Q., Hu, S., 2025. The occurrence characteristic and dissolution mechanism of lithium-rich sediments in Salt Lake Mahai of Qaidam Basin, NW China. *Sci. Rep.* 15, 4291.
- Zhou, M., Li, B., Li, J., Xu, Z., 2021. Pyrometallurgical Technology in the Recycling of a Spent Lithium Ion Battery: Evolution and the Challenge. *ACS EST Eng.* 1, 1369–1382.
- Zimák, J., 2021. Zimák, J. (2021): Ložiska nerostných surovin (on-line učební text).

Odkazy na internetové zdroje, ze kterých byly použity fotografie/grafy:

- Obr. 1: Encyclopædia Britannica. *Lithium*. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/lithium-chemical-element#/media/1/343644/127834>.
- Obr. 2: International Energy Agency, 2024b. Recycling of Critical Minerals. (IEA). Dostupné z: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3af7fda6-8fd9-46b7-bede-395f7f8f9943/RecyclingofCriticalMinerals.pdf>.
- Obr. 3:
- Vandall, T. K., 2015. Spodumene. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-719329.html>.
 - Lavinsky, R., 2009. Spodumene (Var: Kunzite). Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-259658.html>.
- Obr. 4:
- Ra'ike – Vlastní dílo, CC BY-SA 3.0, Lepidolite from Brazil. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4127245>.
 - Sánchez, L.M.B., 2005. Amblygonit. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Amblygonit#/media/Soubor:Mineral_Ambligonit_a_GDFL032.jpg.
- Obr. 5:
- Weinrich Minerals, Inc, 2012. Elbaite. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-455150.html>.
 - Vandall, K., 2022. Eucryptite. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-1264654.html>.
 - Verbelen, Y., 2013. Hectorite. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-576500.html>.
- Obr. 6:
- Boisson, J.M., 2018. Montebasite. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-868029.html>.
 - Scapin, G., 2020. Zabuyelite. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-1034882.html>.
- Obr. 7:
- Černý, J., 2010. Zinnwaldite, Quartz (Var: Smoky Quartz). Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-356478.html>.
 - Hupperich, L. 2013. Zinnwaldite, Quartz. Dostupné z: <https://www.mindat.org/photo-551551.html>.
- Obr. 17: Benchmark Mineral Intelligence, 2025. Lithium Prices. Dostupné z: <https://www.benchmarkminerals.com/lithium/lithium-prices/chart>.

