



CIRKULARITA BATERIÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU JAKO PŘÍLEŽITOST PRO ČESKO

Jiří Báňa, Antonín Šimek,
Filip Křenek, Igor Blahušiak
odborná konzultace: Tomáš Kazda

Ř í j e n 2 0 2 4

EUROPEUM

Institut pro evropskou politiku EUROPEUM je neziskový, nepolitický a nezávislý think tank, který se zaměřuje na evropskou integraci a soudržnost. EUROPEUM přispívá k posilování demokracie, bezpečnosti, stability, svobody a solidarity napříč Evropou a aktivnímu vystupování České republiky v Evropské unii. EUROPEUM provádí původní výzkum, organizuje veřejné akce a vzdělávací aktivity a formuluje nové názory a doporučení ke zlepšení domácí a evropské politiky.



**Spolufinancováno
Evropskou unií**



**European
Climate
Foundation**

Obsah

Shrnutí.....	5
1. Elektrochemické články	8
1.1 Primární a sekundární články	8
1.2 Historický vývoj.....	9
2. Lithno-iontové baterie	9
2.1 Princip fungování Li-ion baterií.....	10
2.2 Základní části Li-ion baterií.....	11
2.3 Katodové materiály	12
2.3.1 LCO	13
2.3.2 LFP	14
2.3.3 NMC.....	14
2.3.4 LMO	14
2.3.5 NCA.....	15
2.4 Anodové materiály	17
2.4.1 Grafit	17
2.4.2 Křemík	18
2.4.3 LTO	18
2.5 Dodavatelský řetězec Li-ion baterií	19
2.6 Hodnotový řetězec Li-ion baterií	20
2.6.1 Těžba a rafinace surovin.....	21
2.6.2 Zpracování surovin a výroba dílčích komponent.....	23
2.6.3 Výroba Li-ion článků	24

2.6.4 Second life	26
3. Recyklace	28
3.1 Hodnotový řetězec recyklačního procesu	28
3.1.1 Předúprava baterií.....	30
3.1.2 Deaktivace baterií	30
3.1.3 Mechanická předúprava	31
3.2 Pyrometalurgie	32
3.3 Hydrometalurgie	33
3.3.1 Louhování v kyselině sírové.....	34
3.4 Přímá recyklace.....	35
3.5 Biolouhování	36
4. Regulační rámec dalšího využití baterií	36
4.1 Evropský právní rámec	36
4.1.1 Akt o kritických surovinách.....	36
4.1.2 Akt o průmyslu pro nulové čisté emise.....	37
4.1.3 Významné projekty společného evropského zájmu.....	38
4.1.4 Nařízení o bateriích	40
4.2 Česko.....	44
5. Zahraniční zkušenosti s recyklací baterií	46
5.1 Norsko.....	47
5.2 Finsko	49
5.3 Švédsko.....	49
5.4 Polsko.....	50
5.5 Maďarsko.....	51

6. Závěr a doporučení	53
7. Slovník technických pojmů	56
Seznam použité literatury.....	58

Shrnutí

Automobilový průmysl je považován za hnací motor české i evropské ekonomiky. V souvislosti s přechodem k elektromobilitě se však automobilky potýkají s tvrdou zahraniční konkurencí. Bateriový průmysl je rychle se rozvíjející odvětví s vysokou přidanou hodnotou. Významnou ekonomickou příležitostí skýtá nejen samotná výroba, ale všechny části hodnotového řetězce baterií – od těžby a zpracování kritických surovin, jako jsou kobalt, lithium, nikl a mangan, přes syntézu elektrodových materiálů a výrobu komponent, až po sestavení článků či montáž do bateriových modulů a packů. Ty jsou následně využívány jak v elektromobilech a spotřební elektronice, tak v rostoucí míře ve stacionárních úložištích. Komerčně dostupné baterie se liší především chemickým složením katodových materiálů (např. LCO, LFP, NMC, LMO a NCA), což ovlivňuje jejich výkon, kapacitu a bezpečnost. Každý z těchto materiálů se pak díky svým vlastnostem hodí na jiný typ aplikace.

Tím však životní cyklus baterií nekončí. **Pokud jde o baterie do elektromobilů, tak řada výrobců garantuje životnost 8 let nebo 160 000 km, v praxi je však i mnohonásobně vyšší.** S dnešními bateriemi lze běžně dosáhnout životnosti kolem 15-20 let či 500 000 km nájezdu. **Poté, co kapacita baterie klesne na cca 70 % původní kapacity, nastává možnost jejího sekundárního využití** (second life) v řadě nových aplikací, jako je ukládání energie z obnovitelných zdrojů nebo v průmyslových energetických systémech. Tento přístup prodlužuje životnost baterií (projekty v ČR např. počítají s další životností kolem 15 let), ale také snižuje environmentální zátěž, jelikož klesá potřeba těžby surovin a výroby nových baterií. Na samotném konci cyklu pak stojí recyklace, která v závislosti na zvolené technologii umožňuje získat až 90-95 % původních surovin, které mohou být následně znovu využity pro výrobu nových baterií.

V Evropě se v posledních letech intenzivně investuje do rozvoje všech těchto částí hodnotového řetězce, ovšem některé kroky stále chybí, nebo nejsou příliš rozvinuté v porovnání s asijskými zeměmi, jako je Čína a Jižní Korea.

V Evropě se prostředí pro výrobu lithium-iontových článků stále vyvíjí, evropský

Evropský podíl na celosvětové produkci by se z cca 6 % v roce 2020 měl zvýšit do roku 2025 zhruba na 8 % celosvětové produkce. V absolutních číslech se v období 2020-2025 celosvětová výroba Li-ion baterií téměř zdesetinásobí z kapacity 450 GWh na zhruba 4 TWh.

podíl na celosvětové produkci by se z cca 6 % v roce 2020 měl zvýšit do roku 2025 zhruba na 8 % celosvětové produkce. V absolutních číslech se v období 2020-2025 celosvětová výroba Li-ion baterií téměř zdesetinásobí z kapacity 450 GWh na zhruba 4 TWh. A s rozvojem výroby roste i množství odpadních baterií, které je potřeba recyklovat. Rozvoji v oblasti recyklace baterií brání především vysoká finanční náročnost mechanického zpracování, ale také odlišné složení katodových materiálů, rychle se měnící rozměry, typy pouzder a často chybějící označení složení, a s tím spojené

náklady na třídění a recyklaci.

V Česku, narozdíl od sousedních zemí, zatím velkokapacitní výroba baterií chybí. A vzhledem k dosud malé oblibě elektromobilů v ČR se jich po zdejších silnicích prohání jen nižší desítky tisíc. **Odpad z výroby a vysloužilé baterie jsou přitom nezbytné pro rozvoj odvětví recyklace.** Vzhledem k průměrnému stáří vozového parku je zároveň pravděpodobné, že v Česku bude řada elektromobilů končit svou životnost. ČR také disponuje významnými zásobami kritických materiálů potřebných pro výrobu baterií, technicky vzdělanou pracovní silou a zároveň je pevně integrované v hodnotových řetězcích automobilového průmyslu. Má tak řadu předpokladů pro růst bateriového odvětví, včetně sekundárního využití a recyklace. Aby využilo tento potenciál, může se Česko inspirovat v evropských

zemích, které jsou v tomto ohledu napřed, jako jsou Švédsko, Norsko nebo Finsko, či geograficky i ekonomicky bližší Polsko.

V rámci rozvoje hodnotového řetězce baterií je zapotřebí spolupráce veřejných i soukromých aktérů – od státní správy, přes výzkumné organizace, firmy až po veřejnost. Budování konsenzu napomůže jasná vládní politika se zřetelnými prioritami a funkční platformy pro spolupráci. **Z hlediska stability je důležitá zejména dlouhodobá podpora elektromobility.** Doporučujeme také posílit informační a diseminační aktivity na národní úrovni týkající se povinností aktérů souvisejících s evropským nařízením o bateriích (např. rozšířená odpovědnost výrobce, povinnost označování baterií prostřednictvím tzv. “bateriového pasu”, cíle recyklační účinnosti apod.), ale také možnostech podpory bateriového průmyslu např. financování z Inovačního fondu či projektů IPCEI, ale také např. označením strategických projektů v rámci evropských aktů o kritických surovinách a průmyslu pro čisté nulové emise, které pomohou urychlit povolovací proces pro strategické investiční projekty, včetně těch v hodnotovém řetězci baterií.

Při tvorbě a implementaci národní strategie v oblasti baterií je vhodné využít příležitosti plynoucí z působení českých aktérů na evropském trhu a přispět k odolnosti ekonomiky díky zavádění cirkulárních postupů, které pomáhají snížit závislost na externích dodávkách surovin. Je také vhodné vyhnout se dovozu (nekompletních) technologií z geopoliticky problematických zemí. V českém právním řádu je zapotřebí připravit podmínky pro sekundární využití baterií s cílem prodloužit jejich životnost, zvýšit ekonomickou hodnotu a snížit environmentální stopu. Rozvoj pilotních projektů v oblasti recyklace a opětovného využití je vhodné podpořit pobídkami z veřejných zdrojů. Mezi metodami recyklace je pak vhodné zvýhodňovat ty, které se vyznačují sníženými požadavky na energetické a chemické vstupy a do budoucna splňují potřebné recyklační cíle. **V oblasti přepravy odpadních baterií je nutné vyjasnit a harmonizovat**

právní úpravu na evropské úrovni, která nyní komplikuje přeshraniční spolupráci.

1. Elektrochemické články

Elektrochemický článek je základní jednotka, která přeměňuje chemickou energii na elektrickou, obvykle sestává z anody, katody a elektrolytu. Baterie je pak složením jednoho nebo více elektrochemických článků spojených dohromady, což umožňuje dosažení potřebného napětí a kapacity pro konkrétní aplikace. Elektrochemicky aktivní materiály zajišťují, že na jedné elektrodě probíhá oxidace (anoda) a na druhé redukce (katoda). Kladná a záporná elektroda tak fungují jednou jako anoda a podruhé katoda podle vybíjení nebo nabíjení článku. [1; 2]

1.1 Primární a sekundární články

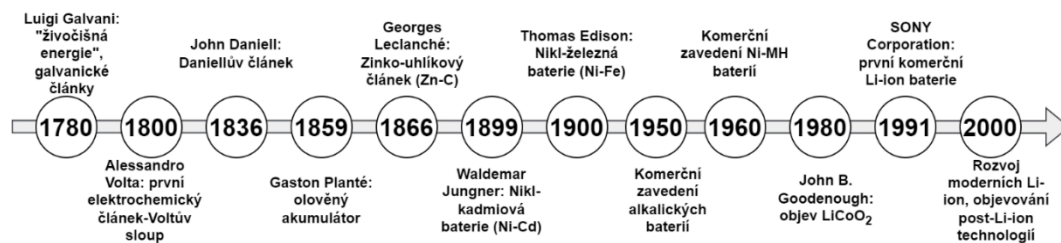
Elektrochemické články lze podle operačního principu rozdělit na: primární články (jednorázové baterie), sekundární články (nabíjecí baterie neboli akumulátory) a palivové články. Primární a sekundární články jsou detailněji popsány níže. Palivové články fungují na principu studeného spalování paliva, což vytváří elektrický proud. Palivové články lze pouze vybíjet a jejich funkce závisí na neustálém přívodu paliva a odvádění reakčních zplodin. [3; 4]

Primární články nelze dobíjet a po vyčerpání energie je nutné je zlikvidovat nebo recyklovat. Přeměňují chemickou energii na elektrickou, ale neumí ji akumulovat. Obvykle dosahují vysoké energetické hustoty, mají velkou kapacitu a jsou levnější než sekundární články. Primární články mají větší vnitřní odpor, menší rozměry a nižší hmotnost. Jsou často nazývány suché články, protože jejich elektrolyt není kapalný. Mezi nejrozšířenější patří alkalické baterie se zinkovou anodou a uhlíkovou katodou. Používají se například v hodinkách, hračkách a dálkových ovladačích. [2; 5; 6]

Sekundární články lze dobíjet, což umožňuje uchování elektrické energie ve formě chemické energie. Při změně směru proudu dochází ke změně chemických dějů na elektrodách, ale polarita celého článku zůstává stejná. Oproti primárním článkům umí akumulovat energii. Mají složitější design, větší hmotnost a vyžadují vyšší prvotní investici. Mezi nejčastější typy patří lithno-iontové (Li-ion, LIB), nikel-metalhydridové (Ni-MH) a nikel-kadmiové (Ni-Cd) baterie. Obecně mají sekundární články různý počet nabíjecích cyklů v závislosti na dané technologii, což ovlivňuje také jejich pořizovací cenu. [2; 5; 6]

1.2 Historický vývoj

Historie baterií sahá až do starověku, kdy byly poprvé objeveny primitivní elektrochemické články. Následující století přinesla další inovace, jako jsou olověné akumulátory, alkalické baterie a moderní lithno-iontové baterie. Tyto klíčové milníky a další významné události v historii baterií jsou uvedeny na obrázku 1. [7; 8]

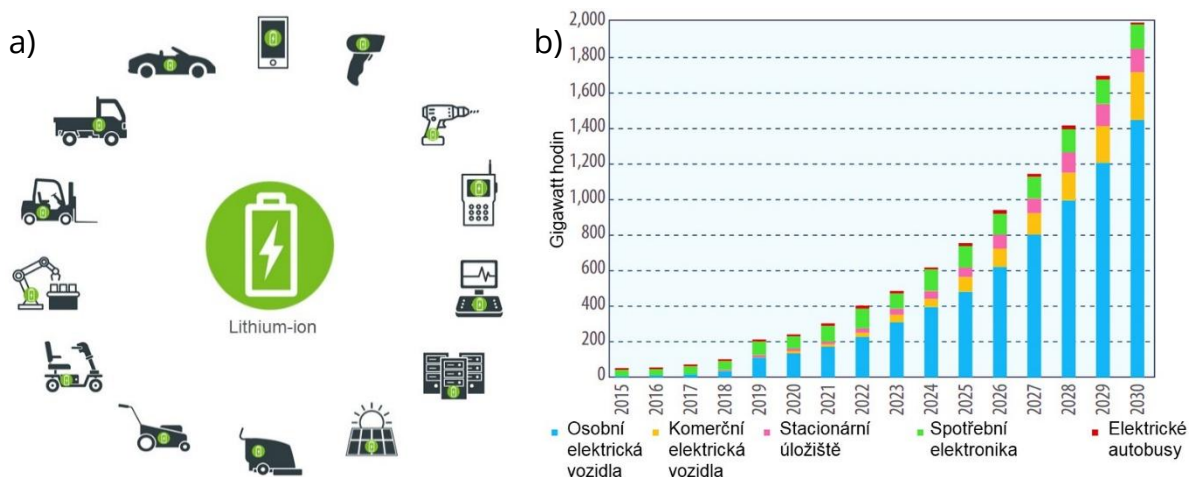


Obrázek 1: Časová osa významných milníků při vývoji baterií. Vytvořeno podle [7; 8]

2. Lithno-iontové baterie

Lithium-iontové baterie (Li-ion, též LIB z anglického Lithium-ion battery) uvedla na trh společnost SONY v roce 1991 jako baterii do digitální kamery. Jejich vývoj však začal už v 70. letech 20. století. Tehdy se komerčně vyráběly primární lithium-iontové články s kovovým lithiem pro hodinky a kalkulačky. Dnes jsou sekundární Li-ion články jedny z nejčastěji používaných. Tyto články zahrnují různé katodové

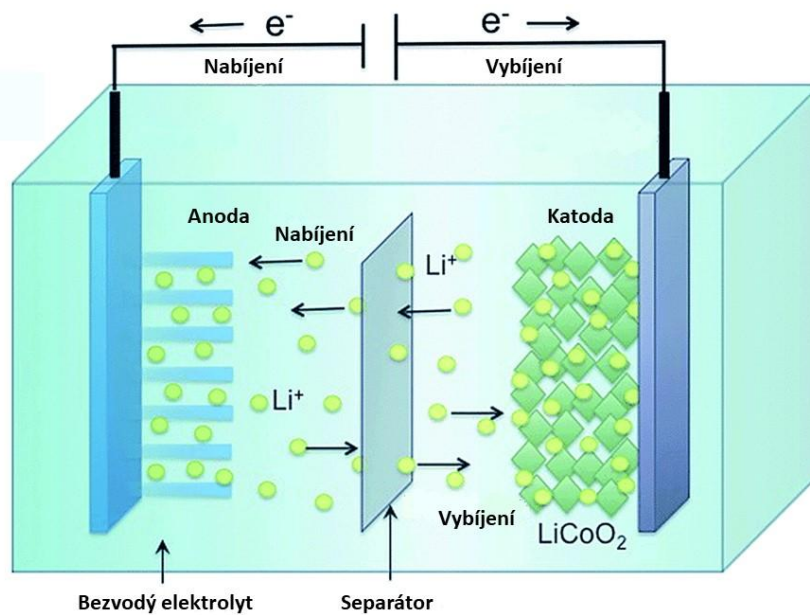
materiály, známé pod zkratkami NMC, LFP, NCA a další, které jsou rozebrány níže v textu. LIB se využívají nejen ve spotřební elektronice, jako jsou mobilní telefony, chytré hodinky a notebooky, ale také ve velkých stacionárních úložištích energie z obnovitelných zdrojů a pro balancování distribuční sítě. Na obrázku 2(a) je uvedeno několik aplikací, ve kterých se s LIB můžeme setkat. V posledních letech jsou také hojně využívány v elektrických vozidlech, čímž také dochází k jejich rapidnímu podílu na trhu, jak je uvedeno na obrázku 2(b). Poptávka po LIB se výrazně zvýšila z 19 GWh v roce 2010 na 285 GWh v roce 2019. Prognózy naznačují další nárůst na 2000 GWh do roku 2030, což představuje přibližně 8 % celosvětové dodávky energie. [9; 10; 11; 12]



Obrázek 2: (a) oblasti využití Li-ion baterií [9]; (b) nárůst Li-ion baterií na trhu, přeloženo z [10]

2.1 Princip fungování Li-ion baterií

Jak je uvedeno na obrázku 3, princip fungování LIB spočívá v opakovaném přenosu lithných iontů mezi anodou a katodou, tedy ve schopnosti elektrodových materiálů přijímat a uvolňovat nabité ionty. Na rozdíl od olověných baterií nedochází při nabíjení a vybíjení k chemickým reakcím mezi elektrodami a elektrolytem, ale pouze k přenosu lithných iontů mezi elektrodami společně s uvolňováním elektronů, čímž vzniká elektrický proud. [13]



Obrázek 3: Princip fungování Li-ion baterie. Přeloženo z [13]

Při vybíjení baterie elektrolyt přenáší kladně nabitě ionty lithia ze záporné elektrody (anody) ke kladné elektrodě (katodě) přes porézní separátor a elektrolyt. V anodě vznikají volné elektrony, které vytvářejí náboj na kladném proudovém kolektoru. Elektrický proud protéká z kladného kolektoru přes napájené zařízení do záporného kolektoru. Při nabíjení je proces opačný – ionty lithia se vracejí do záporné elektrody a elektrony z nabíjecího zařízení jsou dodávány do záporné elektrody. [13; 1]

2.2 Základní části Li-ion baterií

LIB se skládá z katody, anody, iontově vodivého elektrolytu a separátoru. Elektrody, které tvoří anodu i katodu, jsou obvykle směsí tří složek v kombinaci s proudovým kolektorem. Elektrodová hmota obsahuje aktivní materiál, vodivý materiál a pojivo. V kombinaci s rozpouštědlem je z těchto materiálů připravena pasta, která je následně nanášena na proudový kolektor. [14] Pojivo zajišťuje mechanickou fixaci aktivního materiálu k proudovému kolektoru stejně tak jako mezi jednotlivými zrny aktivního materiálu. Nejčastěji používaná pojiva jsou polyvinylidenfluorid (PVDF) pro katody a styren-butadienový kaučuk (SBR)

a karboxymethylcelulóza (CMC) pro anody. [15] Vodivé přísady, jako je uhlíková čern (carbon black), snižují vnitřní odpor elektrod a zvyšují jejich výkon. [16] Proudové kolektory slouží jednak jako mechanický nosič elektrodové hmoty, ale také slouží k odvodu náboje z elektrod. Musí být mechanicky stabilní, elektricky vodivé, chemicky odolné a lehké. Měď a hliník jsou tak běžně používané materiály pro anodové a katodové kolektory. [14; 11]

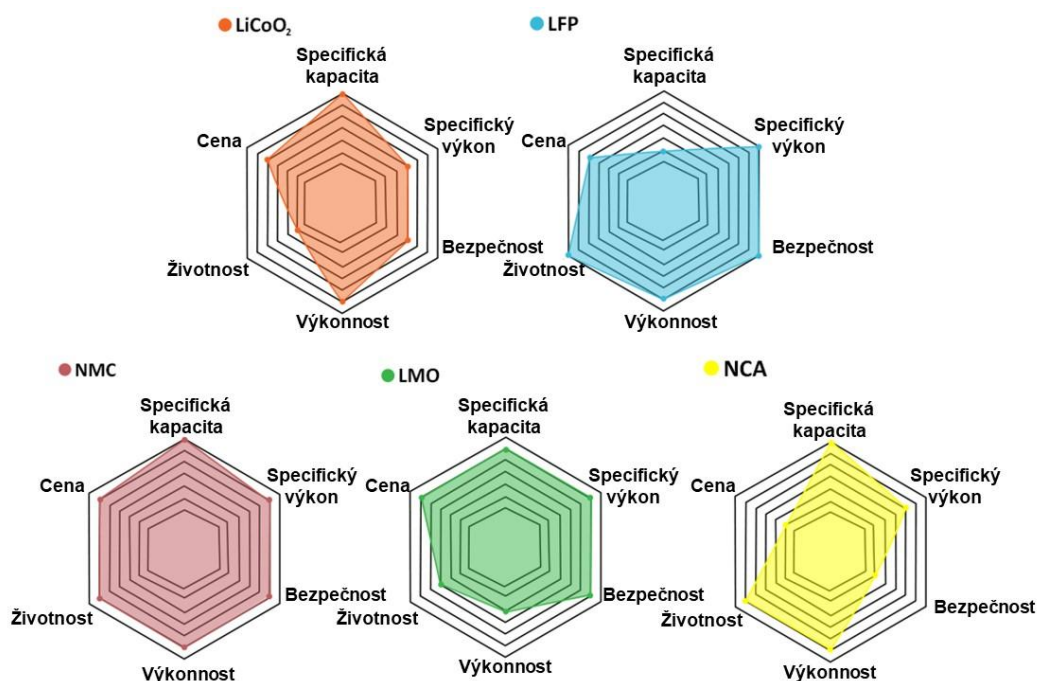
Separátor, který slouží jako porézní membrána zabraňuje fyzickému kontaktu mezi anodou a katodou. Separátor musí splňovat několik klíčových požadavků, jako je vysoká iontová vodivost, porézní struktura, příznivá smáčivost, chemická stabilita, minimální tloušťka, teplotní odolnost s minimální smrštivostí a nízká elektrická vodivost. Komerčně se využívají např. třívrstvé separátory z polyetylen (PE) a polypropylenu (PP) v uspořádání PP-PE-PP. Separátor je pak napuštěn iontově vodivým elektrolytem, který je složen z lithné soli (nejčastěji LiPF_6) rozpuštěné v definované koncentraci (molaritě) v organickém rozpouštědle nebo častěji ve směsi rozpouštědel (například ethylen karbonát, propylen karbonát a další). [14; 17]

2.3 Katodové materiály

Katodové materiály se obecně označují jako interkalační materiály, což je takové uspořádání vnitřní struktury, které dokáže uschovat hostitelské ionty. V případě LIB jsou hostujícími ionty Li^+ , které mohou do struktury katody být reverzibilně vkládány a opět odebírány. Hostitelské materiály (katodové materiály) jsou pak často chalkogenidy kovů, oxidy přechodných kovů a polyaniontové sloučeniny, které se dají rozdělit do několika krystalových struktur, jako jsou vrstevnaté, spinelové, nebo olivínové. [18]

Komerčně dostupné LIB se liší především chemismy (chemickým složením) katodových materiálů, což ovlivňuje jejich výkon, kapacitu a bezpečnost, jak je uvedeno na obrázku 4, kde jsou základní komerčně dostupné katodové materiály

(tedy chemie Li-ion baterií) porovnány v pavučinovém grafu. Mezi běžně používané materiály patří LCO, LFP, NMC, LMO a NCA). Každý z těchto materiálů se pak díky svým vlastnostem hodí na jiný typ aplikace. [19]



Obrázek 4: Porovnání jednotlivých katodových materiálů komerčně využívaných v LIB. Přeloženo a upraveno z [19]

2.3.1 LCO

Lithium-kobalt-oxid (LCO) je katodový materiál s vrstvenou strukturou, který byl prvním komerčně využívaným katodovým materiálem, který našel své uplatnění například v mobilních telefonech, noteboocích a dalších přenosných zařízeních. LCO vyniká vysokým vybíjecím potenciálem, vysokou energetickou hustotou, vynikající cyklickou stabilitou a snadnou syntézou. LCO se vyznačuje nízkou mírou samovybití, vysokým vybíjecím napětím proti lithiu a relativně dlouhou životností. Nicméně hlavní nevýhody LCO zahrnují vysoké výrobní náklady způsobené velkým zastoupením kobaltu, nízkou tepelnou stabilitou a rychlým poklesem kapacity při vybíjení nebo nabíjení vysokými proudy. Nízká tepelná stabilita může vést k uvolňování kyslíku a potenciálně nebezpečným reakcím při přehřátí, což může způsobit hoření článků. Kvůli těmto nevýhodám, přestože má

LCO vynikající vlastnosti, bylo vyvinuto mnoho alternativních katodových materiálů. [11; 20; 21]

2.3.2 LFP

LFP se vyznačuje olivínovou strukturou, která je výrazně stabilnější než vrstvená struktura LCO, což zajišťuje vysokou cyklickou stabilitu a bezpečnost. Materiál je tak chemicky odolný, méně náchylný k hoření a může odolávat teplotám až do 270 °C. Nicméně, tato struktura způsobuje nízkou iontovou difuzi a elektrickou vodivost. Nízká vodivost materiálu vyžaduje speciální přípravu a menší velikost částic. Hlavní výhody LFP zahrnují plochý napěťový profil, nízké náklady na materiál, dostatek surovin a menší environmentální dopad ve srovnání s jinými katodovými materiály. Navzdory svým nevýhodám, zůstává LFP atraktivní volbou a nalézá své uplatnění zejména ve stacionárních úložištích elektrické energie a v elektromobilitě. [22; 23]

2.3.3 NMC

Katodový materiál NMC je populární katodový materiál pro LIB díky své vysoké energetické hustotě, nízkým výrobním nákladům a šetrnosti k životnímu prostředí. Materiál byl odvozen z LCO s cílem snížit obsah kobaltu. Kombinace niklu, manganu a kobaltu zajišťuje vysokou teoretickou kapacitu a stabilní elektrochemické vlastnosti. Nikl zvyšuje kapacitu, mangan stabilizuje strukturu a kobalt zlepšuje elektrickou vodivost a difúzi iontů lithia. NMC111 (s poměrem niklu, manganu a kobaltu 1:1:1) byl prvním typem tohoto materiálu, ale postupně se vyvíjejí katody s nižším obsahem kobaltu jako NMC442, NMC523, NMC622 a NMC811, aby se snížily náklady a zvýšila udržitelnost. NMC dnes patří mezi nejrozšířenější materiály a využívá se v elektromobilitě, spotřebitelské elektronice a v mnoha dalších aplikacích. [24; 25]

2.3.4 LMO

Tento materiál opět vychází z LCO s cílem nahradit kobalt manganem, jelikož jeho cena je výrazně nižší. Ačkoliv disponuje větší teplotní odolností než LCO, jeho

značnou nevýhodou je menší kapacita a nízká životnost. Své uplatnění nalézá v levnějších aplikacích ve spotřební elektronice, případně ve starších typech hybridních a elektrických vozidel (EV). [26][27]

2.3.5 NCA

Katodové materiály využívající pouze nikl trpí značnou nestabilitou a rychlým poklesem kapacity. Katodový materiál NCA nahrazuje část atomů niklu atomy kobaltu a hliníku, čímž je docíleno vyšší stability. Tento materiál tak disponuje relativně vysokou kapacitou a využívá jej například automobilka Tesla v Modelu S, 3 a X. [26]

Tabulka 1: Porovnání komerčně využívaných katodových materiálů z hlediska ceny, použití a vlastností [24; 28]

Materiál	Cena [\$/kWh]	Použití	Výhody	Nevýhody
LFP	84,8	Ruční nářadí E-busy a e-mobily (Čína) Bateriové úložiště	Vysoká stabilita Dlouhá životnost	Nízká kapacita Nerentabilní recyklace
NCA	74,4	Elektromobily – Tesla	Vysoký výkon	Nižší bezpečnost
NMC	72,7 - 88,4	Elektromobily Spotřební elektronika Bateriové úložiště	Vysoká kapacita Dobrá životnost	Vyšší náklady na výrobu
LCO	123,6	Mobilní telefony (dříve) Drony Speciální aplikace	Snadná syntéza Vysoké vybíjecí napětí	Vysoká cena
LMO	76,4	Spotřební elektronika Starší elektromobily	Levný materiál	Nízká kapacita Nízká životnost

Tabulka 2: Porovnání základních vlastností komerčně využívaných katodových materiálů

Materiál	Vzorec	Teoretická kapacita [mAh/g]	Specifická kapacita [mAh/g]	Potenciál Li/Li ⁺ [V]	Gravimetrická hustota energie [Wh/Kg]
LCO	LiCoO ₂	274	145	3,9	550
LMO	LiMn ₂ O ₄	148	115	4,1	450-490
LFP	LiFePO ₄	170	160	3,4	540
NCA	LiNi _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂	279	180-199	3,7	670
NMC 111	LiNi _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33} O ₂	275	170-200	3,7	630

2.4 Anodové materiály

Stejně jako v případě katodových materiálů jsou i anodové materiály interkalačního typu. Historicky se jako záporná elektroda využívalo kovové lithium případně jeho slitiny kvůli vysoké teoretické kapacitě lithia. Růst dendritů lithia a tím snížená bezpečnost baterií vedla k výzkumu alternativních anodových materiálů, které lze rozdělit na materiály na bázi uhlíku, materiály na bázi křemíku, slitinové materiály a konverzní typy. Nejčastěji se ovšem setkáme s materiály na bázi uhlíku, které se obecně dají rozdělit na grafitické uhlíky (grafit) a na uhlíky ne-grafitické (tvrdý a měkký uhlík, nebo též amorfni uhlíky). V komerčních LIB se ovšem dnes nejčastěji využívá právě grafit, tudíž při volbě výsledné LIB se řídíme volbou katodového materiálu, kterých je na trhu celá řada. [29; 30]

2.4.1 Grafit

Grafit se řadí do skupiny grafitických uhlíků a vyniká svou relativně vysokou teoretickou kapacitou a nízkým potenciálem. Další výhodou grafitu je jeho relativně malá cena a vliv na životní prostředí, dlouhá životnost a snadná zpracovatelnost. Grafit je charakteristický svým paralelním uspořádáním

grafenových vrstev a při ideální lithiaci vzniká LiC_6 . Během lithiace grafitu ovšem dochází k objemové změně, která je v rozmezí 10-15 %. Tato objemová změna má pak za následek praskání aktivního materiálu a delaminaci, což společně s tvorbou pevné elektrolytové mezifáze (SEI = solid electrolyte interphase) vede k poklesu kapacity [29; 30]

2.4.2 Křemík

S cílem zvýšení kapacity je velmi intenzivně zkoumán křemík, jako nadějný kandidát pro anodové materiály. Křemík ve sloučenině $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ disponuje velkou teoretickou kapacitou, která je přibližně desetkrát větší než v případě grafitu. Tento materiál ovšem trpí značnou objemovou změnou až 300 %, díky čemuž je vyvíjen obrovský mechanický stres na anodový materiál a dochází tak k jeho poškozování a rapidnímu poklesu kapacity. Současný výzkum se tak zabývá přidáváním křemíku do již prostudovaného grafitu, čímž vzniká kompozit Si/C. Obecně je křemík zatím v nižším zastoupení v řádu jednotek, maximálně nižších desítek procent. Například společnost Samsung SDI nedávno představila anodový materiál se 7 % křemíku. [31; 32; 33]

2.4.3 LTO

Spinelový materiál $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) byl vyvinut s cílem nahradit grafit jakožto anodový materiál. LTO má ovšem v porovnání s grafitem výrazně vyšší redoxní potenciál, což vede k nižšímu pracovnímu napětí výsledného článku. Teoretická kapacita tohoto materiálu je v porovnání s grafitem přibližně poloviční. Značnou výhodou tohoto materiálu je ovšem minimální objemová změna během cyklování a s tím spojená dlouhá životnost, vysoký difúzní koeficient iontů Li^+ umožňující vysoké vybíjecí proudy vedoucí k vysoké hustotě výkonu a větší bezpečnost. LTO je možné komerčně zakoupit a své uplatnění nalézá zejména v aplikacích, kde je vyžadována bezpečnost, dlouhá životnost. [34]

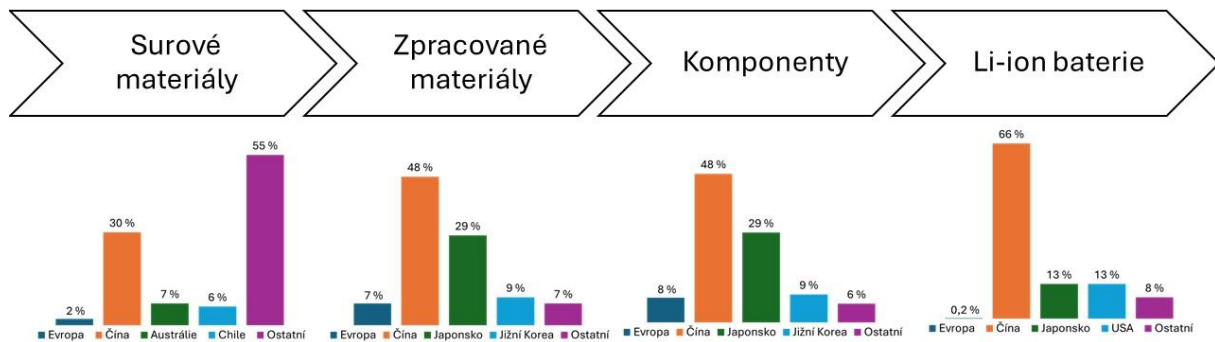
Tabulka 3: Porovnání základních vlastností komerčně využívaných anodových materiálů

Materiál	Teoretická kapacita [mAh/g]	Dosažitelná kapacita [mAh/g]	Potenciál Li/Li+ [V]
Grafit	372	300-360	0,1
Křemík	3579	1500-2000	0,4
LTO	175	150-170	1,55
Kovové lithium	3860	2000-3000	0

2.5 Dodavatelský řetězec Li-ion baterií

Na obrázku 5 jsou znázorněni klíčoví hráči v dodavatelském řetězci LIB. Dodavatelský řetězec zahrnuje těžbu surových materiálů, jako je kobalt, lithium, přírodní grafit, nikl, mangan, měď, železo, hliník, fosfor a další. Dalším krokem je rafinace a zpracování těchto materiálů, což zahrnuje zpracování materiálů na úroveň prekurzorů a následnou syntézu jednotlivých elektrodových materiálů (NMC, NCA, LCO, zpracování grafitu a další). Následuje výroba dílčích komponent LIB zahrnující výrobu kladných a záporných elektrod, výrobu separátorů a přípravu elektrolytů. Posledním krokem je pak samotná výroba bateriových článků.

Evropa v současné době těží pouze 2 % potřebných kritických surovin [35] a celkový podíl Evropy na celosvětové výrobě baterií byl ještě v roce 2019 méně než 1 %, v současnosti je to mezi 5-10 %. Čína dnes zcela dominuje ve všech krocích dodavatelského řetězce. Mezi významné hráče v oblasti surových a zpracovaných materiálů se řadí i Japonsko a Jižní Korea. V oblasti výroby bateriových článků pak významně vystupuje také USA. [35]

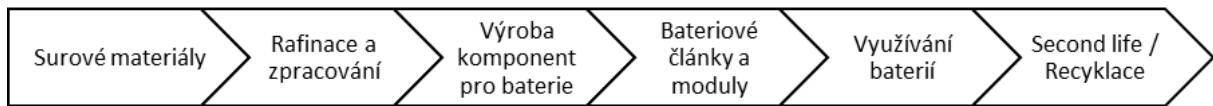


Obrázek 5: Dodavatelský řetězec Li-ion baterií. Přeloženo a upraveno z [35]

2.6 Hodnotový řetězec Li-ion baterií

Výroba baterií je velmi komplexní proces a zahrnuje celou řadu jednotlivých výrobních kroků. Ty mohou probíhat každý v jiné továrně, nebo mohou být sdruženy v rámci jedné výrobní jednotky. Mezi hlavní kroky patří výroba katodových a anodových materiálů, elektrolytů, separátorů a obalových materiálů, a následná montáž článků, modulů a bateriových packů. V Evropě se v posledních letech intenzivně investuje do rozvoje všech těchto částí hodnotového řetězce, ovšem některé kroky stále chybí, nebo nejsou příliš rozvinuté v porovnání se zeměmi z Asie, jako je Čína a Jižní Korea.

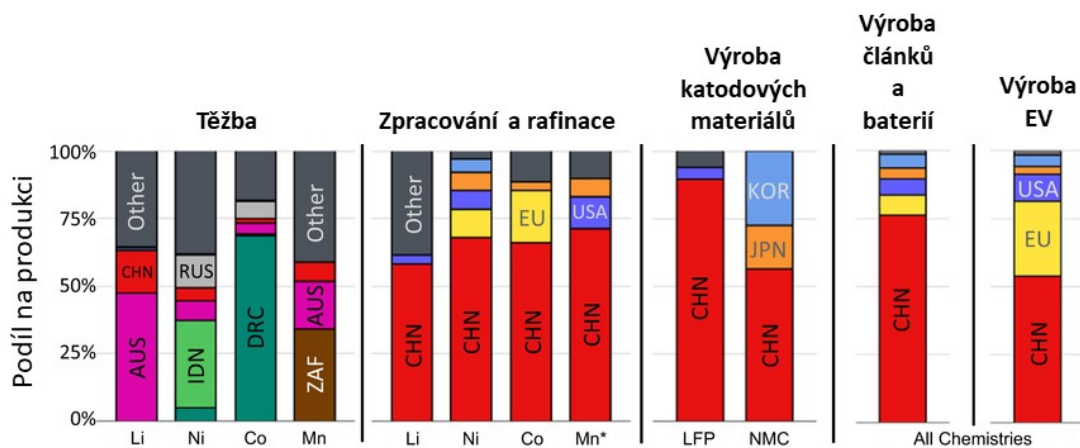
Hodnotový řetězec (value chain) začíná těžbou surových materiálů jako jsou lithium, kobalt, grafit, nikl, mangan a další. Následuje jejich zpracování a rafinace s cílem zajištění čistoty a kvality. A z nich jsou pak vyrobeny jednotlivé komponenty Li-ion baterie, jako je anoda, katoda, separátor a elektrolyt. Z dílčích komponent jsou následně sestaveny bateriové články, které jsou buď přímo využívány, nebo nastává jejich montáž do bateriových modulů, případně bateriových packů. Poté nastává období využívání baterií, které je v určitém bodě zakončeno buď možností druhého využití (second life), nebo nastává recyklace baterií, ze které jsou opět získány surové materiály, a dochází tak k uzavření řetězce.



Obrázek 6: Zjednodušený hodnotový řetězec Li-ion baterií

2.6.1 Těžba a rafinace surovin

Na obrázku 7 jsou uvedeny klíčové materiály (Li, Ni, Co a Mn) využívané v LIB a geografické rozložení těžby a rafinace. Evropa má výrazně omezené zdroje těchto surovin, a těžba je tak distribuována mezi relativně málo zemí ležících převážně mimo Evropu, kdežto jejich zpracování z větší části probíhá pouze v Číně. [36]



Obrázek 7: Geografické rozložení těžby a rafinace surovin společně s výrobou katodových materiálů, článků a EV. Přeloženo z [36]

Lithium

Lithium je vysoce reaktivní kov. Tato reaktivita vede k jeho absenci v čisté formě. Těžba lithia proto probíhá ze dvou hlavních zdrojů: solanek a tvrdých hornin. Solanky, nacházející se například v Argentině, Bolívii a Chile, nabízejí nižší náklady na těžbu a menší energetickou náročnost, avšak těžba je závislá na klimatických podmínkách a může negativně ovlivnit místní ekosystémy. Z lithiových solí se tento kov získává pomocí odpařovacích nádrží. Tvrdé horniny, jako spodumen, těžené zejména v Austrálii a Číně, umožňují rychlejší extrakci lithia, ale při vyšších nákladech a energetické náročnosti. Ekonomicky výhodnější je těžba ze solanek,

avšak těžba z rud poskytuje stabilnější produkci nezávislou na počasí. Poptávka po lithiu rapidně roste díky elektrickým vozidlům a úložištům k obnovitelným zdrojům energie, což vede k inovacím ve zpracování a zvýšenému zaměření na recyklaci baterií. [37; 38]

Celková světová produkce lithia byla v roce 2022 okolo 130 000 tun [40], největším světovým producentem byla Austrálie s 61 000 tunami a celkovým podílem 47 %, druhým největším pak Chile s 39 000 tunami. Pro srovnání, produkce v Portugalsku v roce 2023 se odhaduje na 380 tun [39]. Nicméně velkým problémem pro evropský hodnotový řetězec baterií je v současnosti skutečnost, že ačkoli se na evropské půdě nacházejí určitá ložiska pro těžbu, procesy rafinace jsou levnější v Číně, což vede k masové přepravě rudných koncentrátů do Číny za účelem rafinace, což zní také činí atraktivnější lokalitu pro výrobu lithiových baterií. Velká část australských lithiových koncentrátů se rovněž rafinuje v Číně, kde je k dispozici levná pracovní síla i inovativní technologie [41].

Česká republika disponuje zásoby lithia na Cínovci, kde se podle geologických odhadů nachází jedno z největších ložisek v celé Evropě, celosvětově se jedná asi o 1,5 % všech zásob této rudy. Nevýhodou jsou vysoké náklady na hlubinnou těžbu. Těžba cínu a wolframu, které se v této lokalitě také nachází, by měla tyto náklady snížit. V současnosti se počítá se začátkem těžby v roce 2026-2027, pokud firma Geomet získá stavební povolení v roce 2025. [42; 43; 44; 45]

Kobalt

Ložiska kobaltu jsou značně geograficky soustředěna v Demokratické republice Kongo, která vlastní asi polovinu známých světových ložisek s roční produkcí 170 000 tun [46]. Dalších asi 17 % známých ložisek se nachází v Austrálii, zbývající lokality jsou roztroušeny po celém světě a často se využívají jako koprodukt těžby mědi a niklu [47]. V roce 2021 činila těžba kobaltu ve Finsku 1084 tun, což je jediná provozovaná těžba tohoto kovu v EU [48]. V jeho rafinaci je opět dominantní Čína.

V Evropě operuje Belgická společnost Umicore, která se zabývá recyklací kovů a částečně zpracovává kobalt v Belgii a ve Finsku [49].

Nikl

Největším producentem niklu je Indonésie, která s 1 800 000 tunami tvoří 37 % celosvětové produkce. Druhý největší producent jsou pak Filipíny s 400 000 tunami [50]. Produkce niklu ve Finsku, největším producentem v EU, činí 42 100 tun. Nikl se dále těží také ve Francii, v Řecku a ve Španělsku [51].

Grafit

V Číně se těží 72 % světových zásob přírodního grafitu s roční produkcí 1 200 000 tun. Je také jeho největším zpracovatelem do podoby sférického grafitu používaného k výrobě bateriových anod, kde kontroluje až 99 % procent produkce. Čína produkuje také syntetický grafit s podílem 69 % světové produkce a je také největším producentem anod na bázi syntetického grafitu s podílem 97 % světové produkce [54]. Na konci roku 2023 však Čína zavedla restriktce na export grafitu [55]. V EU bylo v Rakousku a Německu vytěženo jen 670 tun grafitu. [52; 53]

2.6.2 Zpracování surovin a výroba dílčích komponent

Katodové materiály

Ve výrobě katodových materiálů je v Evropě významným hráčem BASF sídlící v Německu. Dále v Evropě působí společnost Umicore, která se specializuje na výrobu katodových materiálů a recyklaci použitých Li-ion baterií.

Elektrolyty

Výrobě elektrolytů se v Evropě vedle dalších chemikálií věnuje například francouzská firma Arkema. Společnost Solvay se specializuje na přípravu elektrolytových roztoků v Belgii. A v Česku se nachází původem japonská firma Central Glass Czech s.r.o., která zde rovněž vyrábí a prodává elektrolyty pro Li-ion baterie.

Separátory

Separátory pro Li-ion baterie vyrábí v Německu například Freudenberg Performance Materials. Další výrobcem je společnost Asahi Kasei, japonská firma s výrobními kapacitami v Evropě.

2.6.3 Výroba Li-ion článků

Na trhu se dnes setkáme se třemi hlavními druhy baterií: prismatické, pouch a cylindrické. Tyto základní konstrukční uspořádání jsou uvedeny na obrázku 8. Konstrukce bateriových článků se liší nejen vnějším tvarem a obalem, ale také vnitřním uspořádáním elektrod. U válcových a prismatických bateriových článků jsou elektrody společně se separátorem stočeny do spirály a následně zapouzdřeny do pevného obalu, který může být kovový či plastový. U článků typu pouch jsou jednotlivé elektrody zhotoveny ve formě listů, které jsou pak skládány jeden na druhý jako balíček karet a jsou vzájemně propleteny separátorem. Celé uspořádání je pak zapouzdřeno do měkkého polymerního obalu. [56]



Obrázek 8: Konstrukční uspořádání jednotlivých typů LIB. Přeloženo a upraveno z [57]

Prismatické články nabízejí lepší využití prostoru a vyšší kapacitu, ale jsou dražší na výrobu a méně mechanicky odolné. Články typu pouch jsou lehké a flexibilní s vysokou energetickou hustotou, avšak potřebují dodatečnou mechanickou ochranu a mají tendenci k nafouknutí. Cylindrické články jsou mechanicky odolné, snadno se vyrábějí a jsou standardizované, což usnadňuje jejich použití, ale mají horší využití prostoru a náročnější tepelné řízení. Každý typ konstrukce je vhodný

pro různé aplikace, prismatické a pouch články jsou často používány v elektrických vozidlech (prismatické např. BMW i3, VW ID.3, Hyundai Kona EV, čínské BYD, pouch např. Chevrolet Bolt EV) a menší spotřební elektronice (telefony, tablety, notebooky), zatímco cylindrické články se vyskytují spíše v bateriovém nářadí, elektronických cigaretách, ale také v některých notebookech a typech elektrických vozidel (např. Tesla Model 3).

Největší světoví výrobci Li-ion článků sídlí převážně v Asii. Na konci roku 2023 byla vedoucím výrobcem lithium-iontových článků společnost CATL z Číny s tržním podílem téměř 34 % a produkcí 242.7 GWh z celkových. Na druhém místě se umístila čínská společnost BYD s tržním podílem 16 %, následovaná jihokorejskou společností LG Energy Solution (dříve součástí LG Chem) s tržním podílem 15 %.

[58]

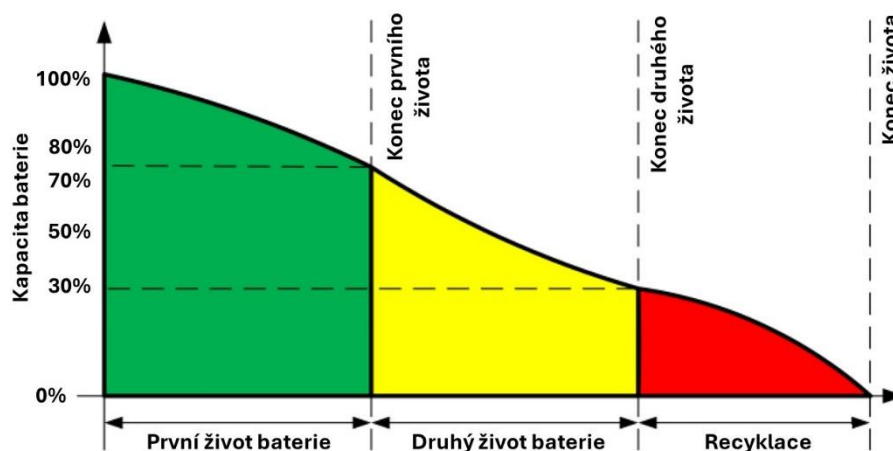
V Evropě se prostředí pro výrobu lithium-iontových článků stále vyvíjí. V roce 2020 činil evropský podíl kapacity LIB 6 % a podíl Číny 77 % a dle tehdejších prognóz se měl evropský podíl do roku 2025 zvýšit na 25 %. Zejména v důsledku zpoždění řady investičních projektů či jejich přesunu mimo Evropu se však tato ambice nenaplnila a v roce 2025 se bude Evropa na celosvětové výrobě LIB podílet jen zhruba 8 %. Mezi největší očekávané nárůsty kapacity v EU patří 100 GWh v rámci první fáze společnosti Tesla Inc. v Německu a LG v Polsku dosahující celkové kapacity 70 GWh a Northvolt AB ve Švédsku a Německu s celkovou kapacitou 48 GWh. V souvislosti se zpomalením prodeje elektrických vozidel ale řada firem v Evropě investice do nových bateriových kapacit nyní odkládá. [59, 60]

Montáž Li-ion článků do bateriových modulů a packů provádí v EU například německé BMW, které sestavuje packy pro elektrické a plug-in hybridy v několika závodech napříč Evropou. Dalším příkladem je americká Tesla, která staví Gigafactory Berlin v Německu, kde by v budoucnu měla být nejen montáž bateriových packů, ale i výroba samotných Li-ion článků. Volkswagen plánuje

výrobu baterií v německém Salzgitteru a španělské Valencii, koncern Stellantis v severní Itálii, Volvo doma ve Švédsku. Řada výrobců má rovněž výrobu v Číně.

2.6.4 Second life

Řada výrobců dnes garantuje životnost baterií do elektromobilů do 8 let stáří nebo 160 000 km, v praxi je však i mnohonásobně vyšší a závisí na typu baterie, vozidle, jeho používání a zejména nabíjení. Při šetrném zacházení lze dosáhnout životnosti v řádu desítek let a několikanásobného nájezdu. Po této době klesne kapacita baterie na 70-80 % své původní kapacity, jak ukazuje obrázek 9. V této fázi již nejsou vhodné pro elektromobilitu, kde je vysoká kapacita klíčová pro dosažení potřebného dojezdu a výkonu. Namísto toho, aby byly baterie okamžitě recyklovány, se využívají v tzv. second life aplikacích, což představuje inovativní přístup k udržitelnosti a efektivitě v oblasti energetiky, který získává stále větší pozornost. [61; 62; 63]



Obrázek 9: Využití baterie s ohledem na její zbývající kapacitu. Přeloženo z [61]

Second life baterie mohou být nasazeny v řadě nových aplikací, jako je ukládání energie v domácnostech, z obnovitelných zdrojů energie (například solárních a větrných elektráren), nebo v komerčních a průmyslových energetických systémech. Tento přístup nejenže prodlužuje životnost baterií, ale také významně přispívá ke snížení environmentální zátěže, jelikož se snižuje potřeba těžby surovin

a výroby nových baterií a prodlužuje užitná doba baterií, čímž klesá jejich emisní stopa z výroby na rok užívání. [61; 62]

Až když kapacita baterií klesne na přibližně 30 %, stávají se již nevhodnými i pro méně náročné aplikace a dochází k jejich recyklaci. Recyklační proces umožňuje získání cenných materiálů, které mohou být použity při výrobě nových baterií. Tímto způsobem je zajištěno maximální využití zdrojů a minimalizace odpadu. Sekundární využívání baterií nejen prodlužuje jejich životnost, ale také přispívá k ekonomickým úsporám a ochraně životního prostředí. [61; 62]

Z příkladů second life v Česku lze zmínit například polečnosti AERS a IBG Česko, které ve spolupráci se ŠKODA Auto vyvinuli kompaktní kontejnerové bateriové úložiště s kapacitou 328 kWh a výkonem až 300 kW. Toto úložiště využívá použité baterie z elektromobilů a plug-in hybridů Škoda (20 baterií z plug-in hybridních vozů SUPERB iV a OCTAVIA iV o kapacitě 13 kWh nebo pět baterií o kapacitě 82 kWh z modelu ENYAQ iV). [64]

Dalším příkladem je stacionární úložiště v Praze na Chodově. Toto úložiště spustila v roce 2022 Pražská energetika ve spolupráci se ŠKODA Auto. Úložiště má kapacitu 300 kWh a je složeno z použitých baterií z testovacích prototypů Škoda ENYAQ iV. Úložiště slouží jako doplňkový zdroj napájecího hubu, kde je celkem tedy 12 nabíjecích míst o kapacitě možnost 10x22 kW a 2x150 kW. Velkou výhodou této instalace je minimalizace rezervovaného příkonu pro nabíjecí hub (pouze 75 kW). [65]

Společnost 1PS Technology využívá vyřazené baterie z elektromobilu BMW i3. Baterie jsou nejprve důkladně testovány, nahradí se původní řídicí elektronika a vznikají tak úložiště o kapacitách od 18 kWh až po 80 kWh v závislosti na množství použitých článků a požadavků zákazníků. Využití těchto úložišť je primárně pro rodinné domy a firmy na ukládání elektrické energie vyrobené fotovoltaickým systémem. [66] Sklárna Moser využívá baterie z elektromobilů v kombinaci

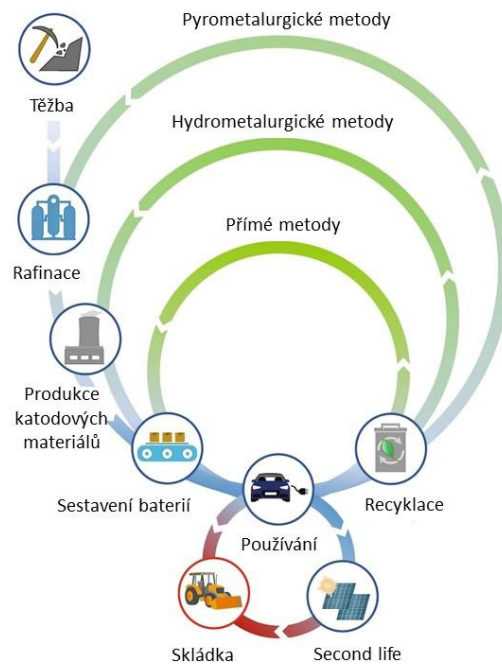
s fotovoltaickými panely. Jedná se o dvojici 300kWh bateriových úložišť, které slouží jako doplnění velké fotovoltaické instalace (více než 1000 panelů). [67]

ŠKODA Auto a ČEZ ESCO se chystají společně vybudovat v ČR 150 bateriových úložišť využívající vysloužilé baterie nebo baterie nevhodné pro využití v elektromobilech. Každé z nich bude obsahovat 5 modulů z vozů Škoda Enyaq iV s kapacitou pod 80 %. Úložiště budou sloužit k pokrytí energie ve špičkách a přispějí k rychlejšímu rozvoji nabíječek pro elektromobily. Sekundární životnost se očekává okolo 15 let [68]. Bateriová úložiště jsou dodávána také do zahraničí, například společnost Elevation v Nizozemsku. [69]

3. Recyklace

3.1 Hodnotový řetězec recyklačního procesu

Baterie jsou klíčovou součástí moderní technologie, umožňující ukládání a dodávání elektrické energie pro širokou škálu zařízení. V elektromobilech hrají zásadní roli jako hlavní zdroj energie, který nahrazuje spalovací motory a přispívá k ekologičtější dopravě. S rostoucím počtem baterií je však recyklace nezbytná pro minimalizaci environmentálního dopadu a zajištění udržitelného využívání kritických surovin. Je tedy nezbytné vyvinout metody pro bezpečnou a nákladově efektivní přepravu a zpracování vybitých baterií, stejně jako ekologické recyklační postupy. Recyklovaný materiál navíc musí splňovat kvalitativní normy, aby mohl být buď vrácen na původní trh baterií nebo našel alternativní využití. Recyklačních procesů existuje celá řada a jsou popsány v následujících podkapitolách. Hodnotový řetězec Li-ion baterií včetně vyznačených tras jednotlivých recyklačních procesů je uveden na obrázku 10.



Obrázek 10: Hodnotový řetězec Li-ion baterií včetně vyznačených recyklačních cest. Přeloženo a upraveno z [70]

Recyklace LIB je komplikována několika faktory. Patří mezi ně rozdíly v chemickém složení katod (např. LFP, NCA, NMC) a s tím spojené náklady na třídění a recyklaci. Mění se také rozměry baterií, typy pouzder a často chybí přesné označení jejich složení. Aktivní materiály, obvykle ve formě prášku naneseného na kovových fóliích, vyžadují během recyklace vzájemné oddělení. Většina výrobců používá pro anodu grafit, ale kromě probíhajícího výzkumu jiných materiálů a směsí se široce používá také křemík. [71]

Při zpětném využití baterie elektromobilu nemůže být modul použit přímo po demontáži z vozidla kvůli nesourodým vlastnostem jednotlivých článků. Jde hlavně o rozdíly ve zbytkových kapacitách článků, kdy při cyklování může docházet k přebíjení nebo podbíjení, což může vést k dalším problémům. Při repasování se využívají různé techniky, např. vybíjecí a nabíjecí testy nebo měření vnitřního odporu, které odhalí baterie nevhodné pro další využití. [71]

Rozvoji v oblasti recyklace baterií nyní brání především vysoká finanční náročnost procesu mechanického zpracování. Ceny technologií se pohybují i nad 25 mil. EUR

a při zatím nejistém výskytu použitých baterií jde o rizikovou investici. V praxi dochází k tomu, že rozjeté projekty s dotačními tituly jsou z důvodu udržitelnosti nuceny skupovat baterie, čímž deformují jejich cenu na trhu. Dalším aspektem je delší životnost baterií oproti původním předpokladům.

Mnohé z nabízených technologií jsou postaveny na jedno-druhovém vstupu s dlouhou dobou přestavitelnosti. Není tak možné stávající technologie využívat flexibilně pro odpadní baterie s různými chemismy. Vstupy ze sběru jsou dnes velmi často kontaminovány různými druhy baterií, což znehodnocuje kvalitu výstupních produktů. Podle zkušeností dodavatelských firem však technologie za posledních 15 let zaznamenaly velký pokrok a dochází ke zlepšování.

3.1.1 Předúprava baterií

Pro účinnou recyklaci LIB jsou nezbytné předběžné úpravy, které zahrnují odstranění vnějšího pláště a extrakci cenných složek. Vzhledem k nebezpečí, které představují použité LIB, jako je úraz elektrickým proudem, riziko požáru, až riziko výbuchu, je zajištění bezpečného a účinného oddělení součástí prvořadé. Procesy předúpravy se proto zaměřují na deaktivaci, demontáž a separaci. Ke zmírnění rizik vyplývajících z reaktivity se používají postupy, jako je vybíjení, zmrazení kapalným dusíkem, nebo zpracování v inertní atmosféře. Průmyslové závody často dávají přednost metodám zmrazování nebo inertní atmosféry z důvodu jejich účinnosti.

3.1.2 Deaktivace baterií

Ponoření do vody: Tato metoda je jednou z nejběžnějších. Baterie jsou umístěny do kontejneru s vodou, což pomáhá minimalizovat riziko vznícení. Při ponoření se baterie postupně deaktivují. Voda pomáhá udržovat teplotu baterií na bezpečné úrovni a brání případnému šíření požáru. Pro urychlení deaktivace lze taktéž použít roztoky soli (NaCl). Nevýhodou této metoda může být, že v případě baterie s hermeticky uzavřeným pouzdrem nemusí dojít k plnému vybití. V praxi pak dochází k zanesení vody do dalšího procesu recyklace až na úroveň

12% hmotnosti. A současně dochází ke „znehodnocení“ elektrolytu a jeho rozpouštědel.

Termální deaktivace: Tento postup zahrnuje zvýšení teploty baterie, což lze provést například použitím speciálních pecí. Metoda způsobí, že se vnitřní komponenty rozloží. Nese však riziko vznícení baterie a ztrátu cenných surovin, jako je grafit, elektrolyt a plasty.

Drcení: Baterie se často drtí pod vodní sprchou, aby se eliminovalo nebezpečí vznícení. Baterie lze taktéž drtit v inertní atmosféře, což využívá například firma Duesenfeld či Recupyl. Další možností je pak drcení v superkritickém CO₂.

Spalování: Spalování je metoda využívaná při pyrometalurgickém procesu. Jejím výsledkem je struska a slitina kovů, grafit, elektrolyt a plasty jsou však ztraceny. Tuto metodu provádí například firma Umicore.

Zmražení: Metoda využívající kapalný dusík pro bezpečné rozdrcení při nízké teplotě. Metoda je bezpečná a bezemisní, ale vyžaduje určité vybavení. Jako alternativu lze využít suchý led. Tato metoda může pracovat při kvalitním zmrazení i s kovovým lithiem.

Při mechanickém drcení se získává tzv. black mass (černá hmota) obsahující kritické materiály, které jsou na baterii nejhodnotnější, jako je kobalt, nikl, lithium a mangan. Prostřednictvím různých recyklačních metod se pak z této hmoty získávají prvky v čisté podobě.

3.1.3 Mechanická předúprava

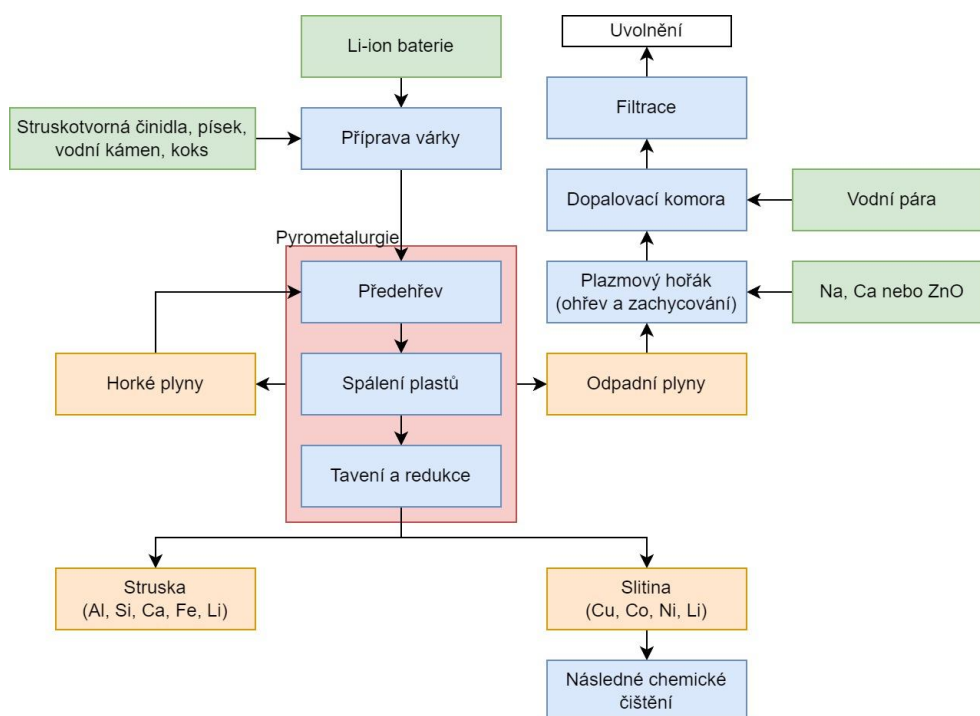
V průmyslu se dává přednost mechanické předúpravě před ruční demontáží, zejména u demontáže velkých LIB používaných v elektrických vozidlech (EV) na menší moduly nebo jednotlivé články. Separační techniky zahrnují chemické i fyzikální metody. Drcení a třídění usnadňují separaci hliníkové fólie, měděné fólie, oceli, separátoru, katodových a anodových komponent a dalších polymerních materiálů především pomocí gravitační separace a flotace. Prosévání a síťování

dále napomáhá oddělit součásti stejné velikosti částic. Složky s nízkou hustotou se skládají především ze separátorů, plastů a hliníkové fólie. Při flotaci, která využívá rozdílů ve smáčivosti, se odděluje hydrofobní grafit a hydrofilní katodové materiály. [72]

3.2 Pyrometalurgie

Pyrometalurgie je metoda využívající zejména vysokoteplotní tavení v šachtové peci. Vznikají při něm slitiny mědi, kobaltu, železa a niklu, zatímco prvky jako lithium, hliník a mangan přecházejí do strusky. Vzniká při ní velké množství toxických plynů, přičemž k čištění zplodin se používají čistící a filtrační systémy. Zjednodušené blokové schéma pyrometalurgického procesu od belgické společnosti Umicore je uvedeno na obrázku 11. [73]

Pyrometalurgické procesy nejsou schopny lithium, hliník a mangan přímo recyklovat. Tento proces se zaměřuje především na recyklaci kovů, jako jsou měď, kobalt a nikl. Grafit a plasty jsou při procesu spáleny. Účinnost pyrometalurgických procesů je obvykle nižší než 50 %, Nemožnost recyklovat grafit, který tvoří 12-21 % hmotnosti baterií, organické látky (~15 %) a plasty (~7 %) z něj do budoucna činí nevyhovující metodu s nízkou recyklační účinností. [74] A konečně, pyrometalurgie je při recyklaci baterií LFP neúčinná s obtížným čištěním odpadních plynů. Pyrometalurgickou recyklací se zabývají např. firmy Accurec a Redux v Německu.

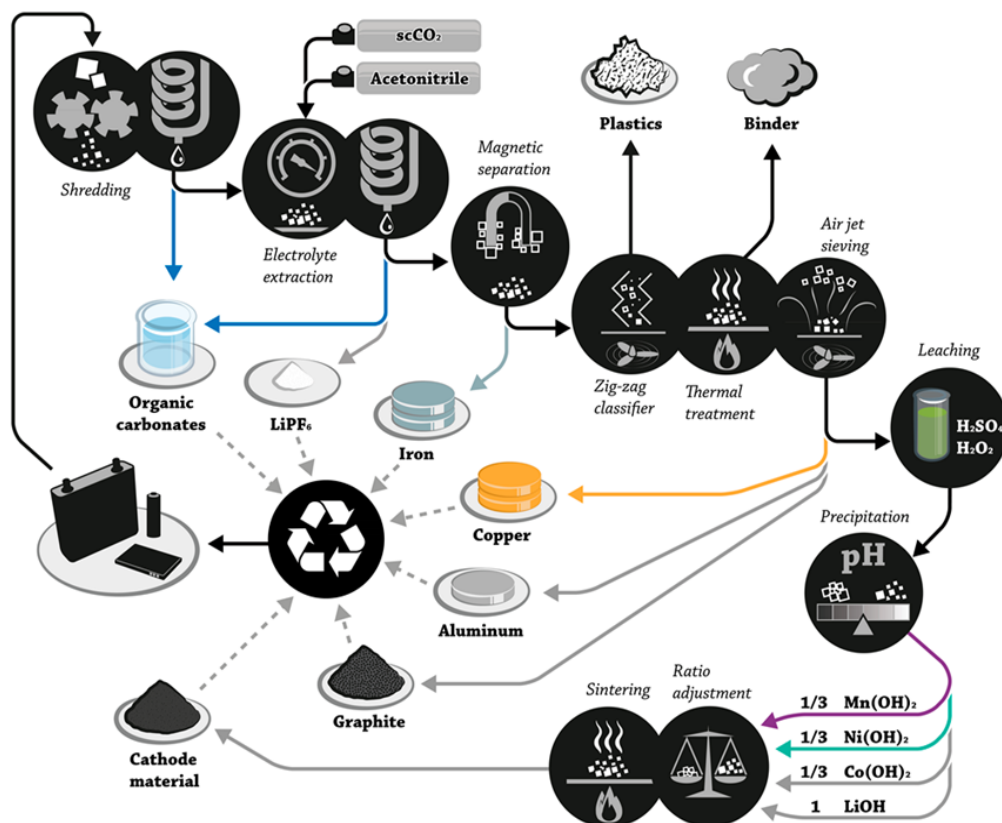


Obrázek 11: Pyrometalurgický proces firmy Umicore. Přeloženo a upraveno z [73]

3.3 Hydrometalurgie

Nejmodernější hydrometalurgické metody mají díky obnově elektrolytu a grafitu účinnost až 90-95 %, a mohou tak splnit cíle recyklační účinnosti 70 % hmotnosti LIB do roku 2030. [75]

Baterie jsou nejprve rozebrány v inertní atmosféře, aby se odpařily elektrolytové rozpouštědla, která jsou následně kondenzována. Rozdrcený materiál prochází dalším zpracováním: železné části jsou odstraněny magnetickou separací a elektrody izolovány proudem vzduchu. Zahřátí na 400-600 °C odstraní pojivo a oddělí proudové kolektory od částic aktivního materiálu. Grafitový anodový materiál a měděné/hliníkové proudové kolektory jsou extrahovány pomocí sít a fyzikálně-chemických procesů. Lithium, kobalt, mangan a nikl jsou pak louženy v minerálních kyselinách. Nejčastěji používanou je kyselina sírová. Výstup loužení jsou pak sírany kovů, které se mohou dále srážet na hydroxidy. [76]



Obrázek 12: Recyklační proces společnosti Duesenfeld [76]

Hlavními výhodami hydrometalurgického přístupu je výtěžek materiálů s vysokou čistotou, obnova většiny komponent z LIB, provoz při nízkých teplotách a nižší emise CO_2 ve srovnání s pyrometalurgickými metodami. Mezi nevýhody však patří potřeba třídění akumulátorů dle jednotlivých technologií a třídění výstupních komponent, což zvyšuje potřebu skladovacích prostor a náklady na proces. Kvůli podobným vlastnostem kovů (Ni, Co, Mn) je rovněž obtížná jejich separace z roztoku kyselin. Je zde také vysoká spotřeba chemikálií a nutnost úpravy odpadních vod. [77] Firmy zaměřující se na hydrometalurgii v EU jsou například Hydrovolt ve Švédsku, Morrow Batteries v Norsku a Recupyl ve Francii.

3.3.1 Louhování v kyselině sírové

Z hydrometalurgických procesů si největší pozornost získalo loužení pomocí kyseliny sírové (H_2SO_4). Tento proces je schopný účinně loužit všechny typy katodových materiálů. Účinnost loužení se liší, přičemž měď (anodový proudový kolektor) vykazuje nejnižší účinnost, následují lithium, kobalt, nikl a mangan. [78]

Koncentrace kyseliny, poměr pevné látky ke kapalině a reakční teplota se mohou lišit, což vede k různým výsledkům. Účinné loužení Co, Ni a Mn může dosáhnout více než 90% účinnosti. Optimální podmínky loužení obvykle zahrnují koncentraci H_2SO_4 1 mol/l, poměr pevné látky k kapalině 1:10 a teplotu 90 °C udržovanou po dobu jedné hodiny. [79]

Tyto sírany jsou rozpustné ve vodě a je třeba je vysrážet do nerozpustné formy. Vzhledem k tomu, že vlastnosti Mn, Co a Ni jsou velmi podobné, je obtížné tyto prvky účinně oddělit. Pomocí NaOH však lze s rostoucím pH kovy postupně vysrážet v pořadí Ni>Co>Mn.

3.4 Přímá recyklace

Přímá recyklace je udržitelná recyklační technologie, která zachovává složení a strukturální integritu elektrodových materiálů a zabraňuje jejich rozpadu na elementární látky. Klíčové procesy, jako je relithiace a obnovení krystalové mřížky pomocí kalcinace, se používají bez velké závislosti na silných kyselinách nebo alkáliích. Cílem této metody je dodávat recyklované elektrodové materiály zpět výrobcům baterií se sníženými energetickými a chemickými vstupy, což podporuje udržitelný recyklační ekosystém. [80]

Nedílnou součástí přímé regenerace je předseparační úprava, která zajišťuje aktivní materiály požadované čistoty. Předúprava zahrnuje třídění baterií podle chemického složení a demontáž spojenou se separací jednotlivých elektrod. Následuje samotná separace aktivních materiálů od proudových kolektorů odstraněním pojiva pomocí rozpouštědel. [81] Pokud se recyklují i pojiva z použitých rozpouštědel, účinnost přímé recyklace se pohybuje mezi 90-100 %.

[81]

3.5 Biolouhování

Účinnost biometalurgických procesů závisí na schopnosti mikroorganismů přeměňovat nerozpustné sloučeniny na rozpustné. Tento proces dosahuje nízké účinnosti loužení kobaltu i lithia, a to i při prodloužené době loužení a použití katalyzátorů. Navzdory ekologickému charakteru a mírným provozním podmínkám omezuje pomalá kinetika a nízká hustota buničiny průmyslovou životaschopnost těchto procesů. Zvýšená hustota buničiny sice může zlepšit účinnost loužení, proces však zůstává časově náročný, což brání jeho širokému průmyslovému využití. Ačkoli jsou tedy biometalurgické metody likvidace LIB slibné z hlediska úspory energie, stále existují překážky pro praktické průmyslové využití. [82]

4. Regulační rámec dalšího využití baterií

4.1 Evropský právní rámec

Snahy o podporu udržitelné evropské produkce baterií začaly vytvořením Evropské bateriové aliance [83] v roce 2017. Na tuto iniciativu navázala Evropská komise o rok později Evropským strategickým plánem pro baterie. Právní rámec na evropské úrovni lze rozdělit dle fází dodavatelského řetězce na oblast: zdrojů kritických surovin; výzkumu, vývoje a výroby; a opětovného využití a recyklace baterií.

4.1.1 Akt o kritických surovinách

Oblast surovin je regulována zejména Evropským aktem o kritických surovinách (European Critical Raw Materials Act, CRMA), vztahujícím se mj. na lithium, kobalt a nikl [84], jež se používají při výrobě baterií do elektrovozidel. Cílem CRMA je nejenom zvýšit a diverzifikovat dodávky kritických surovin do EU, ale rovněž i posílit cirkulární přístup a podpořit výzkum a vývoj v oblasti efektivního využívání

surovin a vývoje substitutů. CRMA reaguje na očekávaný nárůst poptávky po kritických surovinách a jmenované tři suroviny potřebné na výrobu baterií proto označuje za strategické kritické suroviny [85], vyznačující se komplexními požadavky na produkci a potenciálně vyššími riziky v oblasti dodávek.

S cílem posílit autonomii EU stanovuje CRMA do roku 2030 u kritických surovin minimální cíle pokrytí 10 % roční spotřeby EU z domácí těžby a 40 % zpracování v rámci EU. Alespoň 25 % roční spotřeby by také mělo být pokryto domácí recyklací a poptávka po žádné strategické surovině by neměla v žádné fázi být kryta z více než 65 % jen jednou mimoevropskou zemí. Tyto cíle hodlá EU podpořit také vytvořením „Klubu pro kritické suroviny“, sdružujícím partnerské země, jež chtějí podpořit globální dodavatelské řetězce a dalšími kroky v oblasti obchodní politiky, jako je posílení Světové obchodní organizace, boj proti neférovým obchodním praktikám a rozšíření sítě dohod o volném obchodu a udržitelných investicích.

4.1.2 Akt o průmyslu pro nulové čisté emise

Bateriové technologie a jejich podpora jsou rovněž zahrnuty do tzv. aktu o průmyslu pro nulové čisté emise. [86] Akt má podporovat investice do výrobních kapacit klíčových produktů, které zajišťují cíle EU v oblasti klimatické neutrality, mezi něž se řadí i baterie. Zároveň by měl zajistit vytvoření společného právního rámce pro průmysl pro nulové čisté emise v EU a pokrytí 40 % domácích potřeby čistými technologiemi vyráběnými v EU do roku 2030.

Cílem je zvýšení investiční jistoty a koordinace stanovením cílů a mechanismů monitorování. Akt má také za cíl snížení administrativní zátěže při rozvoji projektů pro čisté technologie, usnadnění přístupu na trhy, podpora inovací, zlepšování dovedností pro vytváření kvalitních pracovních míst v oblasti čistých technologií a koordinace průmyslových partnerství.

4.1.3 Významné projekty společného evropského zájmu

K rozvoji bateriových technologií a výroby přispívají i tzv. významné evropské projekty společného zájmu (Important Project of Common European Interest, IPCEI). Jedná se o projekty týkající se baterií a inovací v oblasti baterií [87]. Jejich cílem je inovace v oblasti opětovného využití a recyklace baterií. Na podporu výroby baterií byly vytvořeny dva IPCEI zahrnující celkem 59 společností ze 12 členských zemí, kterým byla poskytnuta veřejná podpora ve výši 6,1 mld. eur, s cílem zajistit více než 13,8 mld. eur soukromých investicí [87].

IPCEI pro baterie, koordinovaný Francií, se zaměřuje na celý hodnotový řetězec baterií, od těžby a zpracování surovin, výroby pokročilých chemických materiálů, konstrukce bateriových článků a modulů a jejich integrace do inteligentních systémů až po recyklaci a opětovné využití použitých baterií. Inovace mají být zaměřeny na zlepšení environmentální udržitelnosti, snížení stopy CO₂ a množství odpadu a také na vyvinutí ekologicky šetrné a udržitelné demontáže, recyklace a rafinace v souladu se zásadami oběhového hospodářství.

IPCEI pro evropské bateriové inovace (EuBatIn), koordinovaný Německem, který má za cíl zabývat se celým hodnotovým řetězcem baterií od těžby surovin až po recyklaci a likvidaci v rámci oběhového hospodářství s důrazem na udržitelnost. Má přispět nad rámec prvního IPCEI k vývoji celé řady nových technologií, včetně různých chemických technologií článků, nových výrobních postupů a dalších inovací v hodnotovém řetězci baterií.

Tabulka 4: Přehled evropských IPCEI v oblasti baterií

Název	Datum schválení	Počet zúčastněných zemí	Počet účastníků se společností	Objem státní pomoci v mld. eur	Objem soukromých investic v mld. eur
IPCEI pro baterie	9.12.2019	7 (BE, FI, FR, DE, IT, PL, SE)	17	3,2	5
EuBatIn	26.1.2021	12 (AT, BE, HR, FI, FR, DE, EL, IT, PL, SK, ES, SE)	40+	2,9	8,8

IPCEI jsou financovány prostřednictvím z rozpočtů jednotlivých členských států a každý z nich odpovídá za výběr projektových žádostí. Zároveň tato skutečnost ovšem znamená, že pro účast mohou být překážkou limity veřejných rozpočtů. IPCEI podléhají schválení Evropské komise, která zkoumá, zda sledují převažující evropský zájem a zda by projekty nebyly realizovány bez příspěví států. Česko se v oblasti baterií ani jednoho IPCEI neúčastní, na rozdíl například od oblastí mikroelektroniky a komunikačních technologií.

Většina veřejné podpory v rámci těchto dvou významných evropských projektů připadá na největší evropské země. Na Německo, Francii a Itálii připadá v rámci IPCEI pro baterie 87 % státní podpory a v rámci IPCEI EuBatIn 83 %. [88] Mezi evropskými zeměmi tak mohou panovat nerovné podmínky, což dále komplikuje skutečnost, že účastnické společnosti si samy zajišťují veřejné financování z různých zdrojů (vnitrostátní, evropské nebo jejich kombinace). Proces zajištění financování přitom může trvat až 3,5 roku a z důvodu nezajištění financí byla jedna společnost z IPCEI pro baterie dokonce vyloučena. Společnosti z některých zemí tak mohou mít k IPCEI snazší přístup a některé z nich se mohou potýkat se zpožděním, než se mohou na projektech reálně podílet a spolupracovat na nich. [88]

4.1.4 Nařízení o bateriích

Regulaci v oblasti opětovného využití a recyklace zajišťuje nařízení o bateriích z roku 2023 [89], které vstoupilo v platnost 17. srpna 2023 a od roku 2025 ruší směrnici o bateriích [90]. Nařízení stanovuje nová pravidla pro celý životní cyklus baterií – od návrhu, výroby až po zpětný odběr, další využití a recyklaci. Vztahuje se na baterie v mobilních telefonech, automobilech, elektrokolech, elektrických vozidlech a průmyslové baterie. Cílem je, aby splňovaly přísnější požadavky na výkon, odolnost a bezpečnost, což zahrnuje jejich konstrukci, výrobu, používání i likvidaci, ale aby se zároveň minimalizovala environmentální zátěž. S cílem podpořit recyklaci a opětovné použití materiálů proto nařízení stanovuje zejména cíle pro obsah recyklovaných prvků v bateriích a hodnoty pro minimální účinnost recyklace:

Tabulka 5: Podíly recyklovaných prvků v bateriích

Lhůta, do které má být cíle dosaženo	Min. podíl recyklovaných prvků v bateriích			
	Kobalt	Olovo	Lithium	Nikl
2031	16 %	85 %	6 %	6 %
2036	26 %	85 %	12 %	15 %

Tabulka 6: Přehled povinnosti v oblasti recyklační účinnosti a míry materiálového využití

Lhůta pro dosažení cíle	Recyklační účinnost z průměrné hmotnosti Li baterii	Min. míra materiálového využití pro prvek			
		Kobalt	Měď	Lithium	Nikl
Současnost	50 %	x	x	x	x
31.12.2025	65 %	x	x	x	x
31.12.2027	65 %	90 %	90 %	50 %	90 %
31.12.2030	70 %	90 %	90 %	70 %	90 %
31.12.2031	70 %	95 %	95 %	80 %	95 %

S cílem zlepšit účinnost a efektivitu sběru odpadních baterií pak nařízení posiluje systém rozšířené odpovědnosti výrobců (EPR), který jim ukládá finanční a provozní odpovědnost za sběr, zpracování a recyklaci. Cílem je motivovat výrobce k navrhování udržitelnějších výrobků a podpořit rozvoj recyklační infrastruktury.

Výrobci baterií do elektromobilů budou povinni zavést systém zpětného odběru a transportu do zpracovatelských závodů a od roku 2025 bezplatně odebírat baterie od koncových uživatelů. Nařízení také stanovuje cíle pro sběr přenosných baterií (63 % do konce roku 2027 a 73 % do konce roku 2030) a cíl sběru baterií z lehkých dopravních prostředků jako jsou elektrokola nebo elektrické koloběžky (51 % do konce roku 2028 a 61 % do konce roku 2031).

Nařízení také od roku 2025 ukládá povinnosti v oblasti kontroly (due dilligence) tržním subjektům s čistým obratem vyšším než 40 mil. eur v předešlém finančním roce. Jde zejména o stanovení postupů kontroly pro subjekty uvádějící baterie na trh v oblasti surovin, sociálních a environmentálních rizik a systému pro kontrolu a transparentnost v dodavatelském řetězci, dokumentujícím suroviny, dodavatele a zemi původu od těžby až po obsah suroviny v dané baterii. Tržním subjektům

také vzniká povinnost řízení rizik, kdy bude nutné identifikovat rizika nepříznivých dopadů v dodavatelském řetězci a implementovat odpovědnou strategii

Vedle toho nařízení zavádí požadavek na jasné označování informací o bateriích, které pomohou spotřebitelům při informovaném výběru a zajistí správné zacházení a likvidaci. To zahrnuje mj. informace o složení, výkonu a recyklovatelnosti baterií. Rozsah požadovaných informací se bude postupně zvyšovat.

- Baterie elektromobilů musí od roku 2024 obsahovat systém řízení, který obsahuje informace o stavu (state of health) a očekávané životnosti baterie.
- Od roku 2025 bude povinné uvádět symbol pro samostatný sběr baterií.
- Od roku 2026 bude povinné uvádět štítek s obecnými informacemi např. o výrobci, kapacitě baterie, obsažených nebezpečných látkách a kritických surovinách.
- Od roku 2027 bude povinné uvádění QR kódu zpřístupňujícího tzv. bateriový pas, v bateriích do elektromobilů i informace o uhlíkové stopě pro každý model baterie.

Bateriový pas bude obsahovat informace o modelu baterie a specifické údaje o dané baterii během celé její životnosti. Samotný pas zaniká se zánikem baterie. Bude mít formu QR kódu spojeného s baterií a konkrétním tržním subjektem. Musí být bezplatně dostupný a kompatibilní s jinými digitálními pasy výrobků v EU. Bude obsahovat několik vrstev informací:

- Veřejně přístupné informace o modelu baterie, např. materiálové složení, informace o uhlíkové stopě, původu surovin, obsahu recyklovaného materiálu, zaručené kapacitě, původním výkonu, očekávané životnosti, době záruky apod.
- Informace týkající se modelu baterie přístupné pouze osobám s oprávněným zájmem a Komisi - např. podrobné složení, čísla dílů,

informace pro demontáž (např. postup, varování, potřebné nástroje) a bezpečnostní informace.

- Informace přístupné oznámeným subjektům, orgánům dozoru nad trhem a Komisi: výsledky protokolů o zkouškách prokazujících soulad se stanovenými požadavky;
- Informace týkající se jednotlivé baterie přístupné pouze osobám s oprávněným zájmem, jako např. hodnoty parametrů výkonnosti a životnosti, informace o technickém stavu baterie, o statusu baterie (např. původní, nově využitá.) a informace a údaje vyplývající z používání baterie (např. počet cyklů nabití a vybití).

Uvedené informace bude možné využít pro usnadnění výměny baterie nejen v autorizovaných, ale i nezávislých servisech, ke snížení rizika neodborného provedení demontáže baterie či zvýšení informovanosti subjektů provádějících recyklaci nebo repase baterií. Toto opatření má za cíl podpořit další využití baterií v rámci second-life a jejich lepší recyklaci. Zavedení pasu může také zlepšit informovanost spotřebitelů a motivovat je k ekologičtějším rozhodnutím, odpovědnému využívání zdrojů a podpoře recyklace baterií. Výzvou je však otázka praktického sběru dat, ochoty jejich sdílení, ochrany a interoperability dat a přístupu k nim. [91]

V současnosti vzniká několik iniciativ na implementaci bateriového pasu, např. projekty Global Battery Alliance, Battery Pass, CIRPASS, BatWoMan nebo BATRAW.

Nařízení má nejen přispět k přechodu k oběhové ekonomice a snížení emisí skleníkových plynů, ale rovněž vytvořit rovné podmínky pro výrobce na trhu s bateriemi. Jeho úspěch však mohou významně ovlivnit externí faktory jako cena surovin, závislost na mezinárodních konkurentech, zejména Číně, a také atraktivita investování v Evropě ve srovnání například s USA. [92]

Nařízení se zabývá také otázkou přepravy odpadních baterií. Zpracování odpadních baterií může být prováděno v jiných členských státech nebo mimo EU, pokud je v souladu s nařízeními o přepravě odpadů a o vývozu odpadů, přičemž však použitá baterie může být klasifikována jako nebezpečný odpad. Přeprava baterií, jakožto nebezpečného odpadu, se však řídí právním předpisy jednotlivých členských států, u nichž nelze v jednotlivých případech vyloučit rozdílnou právní úpravu či interpretaci. Nařízení také umožňuje kontrolu přepravy použitých baterií, u nichž existuje podezření, že se jedná o odpadní baterie. Stanovené podmínky však mohou znamenat praktickou překážku při recyklaci a zpracování odpadních baterií v jiném členském státě, než je stát původu. V oblasti nakládání s odpadními bateriemi tedy existuje prostor pro zlepšení stávající právní úpravy. [93, 94, 95]

Poměrně přísné limity ohledně účinnosti extrakce navíc způsobují, že tržní subjekty budou muset využívat hydrometalurgickou recyklaci místo jiných dostupných metod, jelikož od roku 2030 bude nutné recyklovat minimálně 70 % hmotnosti baterií. A k dosažení tohoto cíle jsou vhodné právě hydrometalurgické metody s účinností až 95 %. Mezi jejich nevýhody však patří náročnost na skladovací prostory, chemikálie a celková finanční nákladnost procesu, která se následně promítá do cen recyklace. Tržní subjekty tak mohou být motivovány k provádění recyklace v zemích mimo EU, zejména v Asii. Zde ovšem vyvstávají jiné překážky v oblasti obchodních pravidel a dohod o volném obchodu mezi příslušnými zeměmi a Unií.

4.2 Česko

Kromě evropských nařízení se na baterie vozidel v rámci ČR vztahuje zejm. zákon č. 542/2000 Sb. o výrobcích s ukončenou životností, který stanovuje povinnosti např. v oblasti:

- Uvádění baterií nebo akumulátorů na trh nebo do oběhu;

- Označování baterií nebo akumulátorů;
- Informací pro konečné uživatele;
- Zpětného odběru baterií nebo akumulátorů; a
- Zpracování odpadních baterií nebo akumulátorů.

V oblasti recyklace a zpracování baterií zákon nařizuje využití nejlepších dostupných technik v zařízeních, která dosahují požadované recyklační účinnosti, a v zásadě zakazuje spalování a skládkování baterií. Zákon se zabývá i převozem odpadních baterií přes hranice a stanovuje povinnosti zpracovatelů odpadních baterií. Platí přitom, že odpadní baterie nebo akumulátory mohou být převezeny přes hranice ke zpracování a recyklaci v souladu s předpisy EU upravujícími přepravu odpadů a se zákonem o odpadech. České zákony rovněž odkazují na nařízení o přepravě a vývozu odpadů, která ovlivňují přeshraniční přepravu baterií k recyklaci. [96, 97, 98] V rámci mezinárodně-právní úpravy pak mohou být zejména netříděné baterie či baterie obsahující nebezpečné látky považovány za nebezpečný odpad. [99]

Detailnější úprava věnující se podrobněji některému ze způsobů zpracování odpadních baterií na konci životního cyklu, ať už by se mělo jedná o opravy, repase, opětovné použití, využití na jiný účel či recyklace, ovšem na národní úrovni stále chybí. V této souvislosti je důležité zmínit, aktualizaci Národního akčního plánu čistá mobilita (NAP CM), která byla zveřejněna na podzim 2024. [100] Hlavním cílem plánu je urychlení obměny a modernizace vozového parku v silniční dopravě a změna struktury osobní i nákladní dopravy směrem k energeticky účinnějším druhům dopravy. V oblasti baterií aktualizace NAP CM obsahuje tato opatření:

- Podpora second-life a dalšího využití baterií s cílem zjednodušení regulačního rámce do roku 2026. Cílem opatření je nastavení technických požadavků a podpory pro optimální využití baterií v rámci celého životního cyklu. Toho má být dosaženo mj. snížením legislativních požadavků na

bateriové systémy pro ukládání energie, umožnění jejich sdílení v rámci agregačních bloků a vyjasněním technických požadavků na články v rámci second-life a dalšího využití, vč. povinného testování parametrů těchto baterií.

- Podpora pro zpětnou logistiku a recyklaci baterií, kde má být rovněž do roku 2026 zjednodušen regulační rámec. K naplnění tohoto cíle by měla být analyzována pravidla pro skladování a přepravu baterií a zvažuje se i vytvoření metodiky pro posouzení baterií pro další využití po mimořádných událostech, jako jsou např. autonehody.
- Nastavení podmínek pro technologie Vehicle to Grid (V2G) a Vehicle to Home (V2H) do roku 2025. Cílem je zajistit, aby dobíjecí body přispívaly k flexibilitě energetického systému a většímu podílu elektřiny z obnovitelných zdrojů. Toho má být dosaženo vyjasněním právního prostředí, které umožní zavádět technologie do praxe, a to z technického, daňového i uživatelsky přívětivého pohledu. Zároveň mají být definovány podmínky pro technická řešení nabíjení pomocí těchto technologií v budovách.

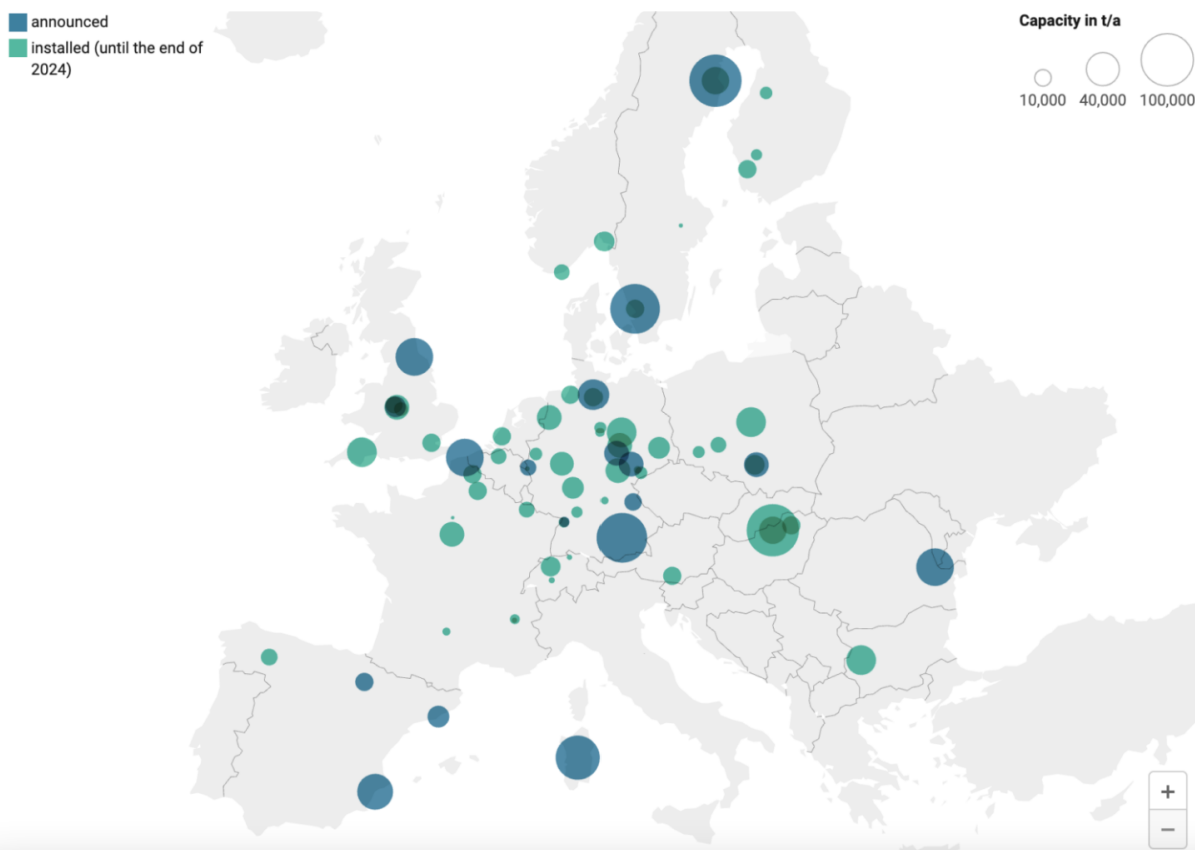
5. Zahraniční zkušenosti s recyklací baterií

Český bateriový průmysl je ve srovnání s evropskou i celosvětovou konkurencí zatím relativně pozadu. Na rozdíl od dalších zemí, včetně sousedů ze střední a východní Evropy, se do Česka zatím nedaří přitáhnout výrobu baterií v objemu nad 1GWh ročně (tzv. gigafactory). Ze zemí Visegrádské čtyřky je v tomto ohledu ČR dokonce poslední. Odpad z potenciální bateriové výroby je přitom důležitým vstupem pro odvětví recyklace. Elektromobilita v Česku se zároveň rozvíjí pomalu a dlouhá životnost baterií znamená nedostatečné množství odpadních baterií, aby se český ekosystém recyklace elektromobilních baterií mohl rozvíjet.

Česko přitom disponuje zásobami některých kritických materiálů potřebných pro výrobu baterií. A s vysokým průměrným stářím zdejšího vozového parku je navíc pravděpodobné, že v ČR bude řada elektromobilů končit svou životnost. Aby využilo potenciál tohoto rychle se rozvíjejícího odvětví, může se ČR inspirovat v jiných členských státech EU, kde úspěšně probíhá rozvoj v oblasti recyklace lithium-iontových baterií.

Recycling sites for lithium-ion batteries in Europe

Update with new data from 2024



Obrázek 13: Recyklace LIB v Evropě, aktualizace 08/2024; zdroj: batteriesnews.com [101]

5.1 Norsko

Norsko se v roce 2021 stalo první zemí na světě, kde prodej elektrických vozidel (EV) přesáhl 50 %, přičemž o rok později bylo téměř 80 % všech nových vozidel elektrických. [102] Dle aktuálních plánů by do roku 2025 měla být všechna nová osobní vozidla, lehké dodávky a nové městské autobusy s nulovými emisemi.

Do roku 2030 by pak měly mít nulové emise všechny těžší dodávky, 75 % nových dálkových autobusů a 50 % nových nákladních vozidel.

Široká adopce EV má za následek, že v Norsku již několik let probíhá také recyklace a opětovné využití baterií na konci jejich životnosti. Děje se tak díky jasné vládní politice, orientaci na elektromobilitu a podpoře celého spektra aktérů hodnotového řetězce skrze státní aparát. Vládní daňová podpora a další politiky umožnily vybudovat v zemi kritickou masu baterií, které je možné následně využít pro recyklaci nebo opětovné využití. Norská vláda se v současnosti snaží vybudovat kompletní hodnotový řetězec v oblasti baterií – od primárních surovin a výroby až po zpětný odběr a recyklaci. Vláda například finančně podporuje společnosti recyklující baterie. [103; 104]

Dle propočtů by v období let 2025–2030 měly v Norsku existovat velice příznivé podmínky pro recyklaci baterií EV, a to zejména s ohledem na počet dostupných baterií na konci životnosti, které bude možné recyklovat. Např. v roce 2025 by měla být k dispozici kapacita pro recyklaci nebo opětovné použití z baterií EV v celkové kapacitě 0,6 GWh a v roce 2030 by tato kapacita měla vzrůst na asi 2,2 GWh. [105]

Pro zpracování odpadních baterií bylo založeno již několik podniků, z nichž největší – nejen v Norsku, ale i v celé Evropě – Hydrovolt disponuje kapacitou cca 12 000 tun bateriových modulů ročně čili asi 25 000 baterií EV. Podnik plně funguje od roku 2022. [106] Další společnost, Batteriretur, odebírá a shromažďuje použité baterie EV. Firma je následně dodává podniku Hydrovolt, který z nich zpracovává a recykluje na jedné straně hliník, a na straně druhé mangan, kobalt a nikl, které se používají na výrobu nových baterií ve Švédsku.

Otevření dalšího zařízení ve městě Ausenfjellet oznámila společnost Stena Recycling na léto 2024. Toto zařízení by mělo být schopné zpracovat cca 3 000 tun baterií ročně, což odpovídá cca 7 000 baterií EV. [107] Zařízení se bude zabývat nejen recyklací, ale rovněž i opětovným použitím odpadních baterií.

5.2 Finsko

Obdobně jako v Norsku, tak i ve Finsku nepochybně jasná vládní politika a podpora z veřejných zdrojů přispívají k rozběhu recyklace a opětovného využití baterií. Významnou podporu zde získal i výzkum a vývoj, výsledkem čehož bylo například vyvinutí nové metody recyklace baterií s významně nižšími dopady na životní prostředí.

Finsko jako jedna z prvních zemí na světě v roce 2021 přijala národní strategii pro baterie. Majoritně státem vlastněná společnost Fortum vyvinula díky grantu ve výši 1,9 mil. EUR technologii umožňující nízkouhlíkovou recyklaci 80 % baterií. [108] V dubnu 2023 pak stejná společnost spustila závod na recyklaci s kapacitou asi 10 000 baterií EV. [109] Tato společnost také staví další závod na hydrometalurgickou recyklaci. Navíc získala speciální povolení na dovoz baterií ze Švédska a Norska, což výrazně zjednodušuje přepravu baterií na konci životnosti považovaných za nebezpečný odpad. [110]

Mezi další společnosti, které se ve Finsku zabývají recyklací baterií elektrických vozidle patří Eurajoen Romu, nebo společnost Cactus, která využívá baterie z aut modelu Tesla S na účely uskladnění energie. Většina finských aktérů se v rámci bateriového hodnotového řetězce v současnosti koncentruje v oblasti produkce primárních surovin. [111]

5.3 Švédsko

Švédsko lze označit za tahouna v recyklaci baterií. Společnost Northvolt ve spolupráci s firmou ABB vybudovaly závod ve městě Skellefteå s kapacitou 125 000 tun lithium-iontových baterií ročně. Závod spuštěný v roce 2023 má sloužit jako zdroj surovin pro sousedící gigafactory s plánovanou výrobní kapacitou 60 GWh ročně. K recyklaci využívá hydrometalurgické procesy, aby tak pokryl až 50 % potřeb sousedící gigafactory co do lithia, niklu, kobaltu a manganu do roku 2030. [112] Tento závod je nejenom největším evropským závodem na recyklaci baterií,

ale rovněž i prvním velkým závodem, který recykluje lithium. Kromě zmíněných kovů závod recykluje i měď, hliník a plasty a vrací je zpět do výrobních toků.

Zároveň v zemi funguje od roku 2023 i další závod na recyklaci baterií ve městě Halmstad, vlastněný společností Stena Recycling, která navázala spolupráci se společností BASF. Jeho aktuální kapacita recyklace 10 000 tun se má navyšovat podle poptávky až na desetinásobek. [113] Závod zároveň slouží na recyklaci baterií z výrobního závodu společnosti Freyr Battery v Norsku a dále má zpracovávat materiál z recyklačních závodů společnosti Stena ve Švédsku, Dánsku, Polsku, Finsku, Německu a Itálii. [114] Spolupráce se společností BASF funguje na základě dodávek černé hmoty z halmstadského závodu do recyklační linky BASF v německém Schwarzheide, kde se z ní následně chemicky získává nikl, kobalt, mangan a lithium. Kapacita závodu by měla být celkem 15 000 tun baterií a bateriového šrotu ročně. [115]

5.4 Polsko

V relativně nižším stádiu rozvoje oproti skandinávským zemím jsou snahy v oblasti recyklace a opětovného využití baterií v Polsku. I zde je ovšem v plánu výstavba prvního závodu a lze sledovat snahu i o rozvoj v oblasti výzkumu a vývoje.

Ve městě Zawiercie by měl vzniknout první recyklační závod AE Elemental. Společnost Elemental Holding, zabývající se recyklací kovů a elektroodpadů, hodlá ve spolupráci s americkou firmou Ascend Elements postavit závod na recyklaci až 28 000 baterií EV ročně. Výstavba by měla začít na podzim 2024 a závod by měl být uveden do provozu od roku 2026. Záměr podpořila částkou až 25 mil. euro Evropská banka pro obnovu a rozvoj, přičemž finančně se na něm podílí také polské Národní centrum pro výzkum a vývoj. Na projektu spolupracují také partneři z Taiwanu a Španělska. V další fázi projekt počítá s expanzí do Německa, kde by měl vyrůst další závod ke zpracování až 58 000 baterií EV ročně. [116]

Plán na vybudování zařízení v Zawiercie doplňuje snahy Polska stát se lídrem v elektromobilitě, zhmotněné například v návrzích vlastního elektromobilu nebo skutečnosti, že například v roce 2020 bylo Polsko největším evropským vývozcem elektrických autobusů. [117, 118] Koncern Stellantis, kterému patří výrobní závod ve městě Tychy, zde hodlá produkovat hybridní a elektrická vozidla. Navíc švédská společnost Northvolt buduje v Gdaňsku největší evropskou továrnu pro systémy na ukládání elektrické energie v Evropě.

5.5 Maďarsko

Oproti ostatním uvedeným zemím lze v Maďarsku pozorovat odlišný přístup k rozvoji hodnotového řetězce v oblasti baterií elektromobilů. Maďarský model je charakteristický řízením shora a budování bateriového průmyslu za pomoci zahraničního know-how s dosud nízkým důrazem na vlastní výzkum a vývoj či recyklaci a opětovné využití. Ostatně, závody na recyklaci baterií plánují v zemi stavět rovněž zahraniční společnosti. Udržitelnost maďarského modelu rozvoje hodnotového řetězce proto budí obavy a zůstává otázkou, zda spíše nepřispívá k uvíznutí země v pasti ekonomiky středních příjmů.

Maďarsko se etablovalo jako významný aktér v produkci baterií na celosvětové úrovni – k listopadu 2023 disponovalo výrobní kapacitou 87 GWh ročně, což ho řadilo dokonce na čtvrté místo celosvětově, za Čínu, USA a Německo. [119] Kapacita by měla vzrůst o dalších 30 GWh ročně po spuštění závodu společnosti SK Innovation; plný náběh výroby se očekává ve druhé polovině 2024. V zemi má své závody na výrobu baterií řada výrobců z Číny (BYD, CATL, EVE Power, Sunwoda), Japonska a Jižní Koreje (Samsung SDI, SK Innovation). Tento rychlý rozvoj je ovšem nezřídka kritizován, jelikož je vedený shora, bez konzultace zúčastněných osob a doprovázen obavami v oblasti životního prostředí a geopolitických rizik. Tento fakt se odráží i ve skutečnosti, že 50 % maďarské populace v roce 2023 podporovalo zákaz výstavby všech nových závodů na

produkcí baterií. Jednou z reakcí na tento stav bylo přijetí nařízení, které umožňovalo organizování příslušných veřejných slyšení bez účasti veřejnosti. [120]

Jakkoliv se Maďarsko soustředí na výrobu baterií, jeho pozice v oblastech výzkumu a vývoje či recyklace a zpětného využití je doposud poměrně slabá. Samotná recyklace neprobíhá – s ohledem na finanční faktory popsané v rámci části věnující se analýze evropské legislativy – na maďarském území, ale zpravidla v asijských zemích. V plánu je vybudování recyklačního závodu slovinské společnosti Andrada Group ve městě Alsózsolca s kapacitou 10 000 tun baterií ročně. [121] Termín spuštění dosud není dosud stanoven, ale společnost v mezičase oznámila, že našla pro své záměry ještě vhodnější lokaci ve městě Sósút, což by ovšem nemělo znamenat opuštění původně zvažované lokality, ale spíše rozvoj obou lokací. [122]

Tento maďarský přístup však s sebou může nést významná rizika, kdy kombinace chybějících komparativních výhod a zdrojů v zemi, importovaného know-how, závislosti na geopoliticky problematických partnerech a přímé státní podpory v kombinaci s laxní regulací nevytváří vhodnou základnu pro dlouhodobé přínosy rozvoje pro Maďarsko či Evropu. [123]

6. Závěr a doporučení

Automobilový průmysl bývá označován za motor české ekonomiky. Tvoří 9 % českého HDP, 26 % zpracovatelského průmyslu a přímo zaměstnává 180 000 lidí. S roční produkcí ve výši 1,4 milionu aut je Česko třetím největším výrobcem v EU a 11. největším na světě. V oblasti elektromobility však zatím zaostává. I přesto, že se v ČR ročně vyrobí 180 000 elektrických vozidel (bateriových a plug-in hybridů), tak valná většina z nich jde na export a po zdejších silnicích se jich prohání jen nižší desítky tisíc. **Zároveň se do ČR, na rozdíl od sousedních zemí, včetně střední a východní Evropy, zatím stále nedaří přitáhnout velkokapacitní výrobu baterií.** Ze zemí Visegrádské čtyřky je v tomto ohledu ČR dokonce poslední. **Bateriový průmysl přitom představuje odvětví s vysokou přidanou hodnotou a významným ekonomickým potenciálem.** Nejen výroba samotná, ale také přidružený výzkum, vývoj, sekundární využití a recyklace baterií představují příležitost, kterou však Česko zatím nedokáže plnohodnotně využít.

Česko přitom disponuje významnými zásobami kritických materiálů potřebných pro výrobu baterií, technicky vzdělanou pracovní silou a zároveň je pevně integrované v hodnotových řetězcích automobilového průmyslu. A s vysokým průměrným stářím zdejšího vozového parku je navíc pravděpodobné, že v ČR bude řada elektromobilů končit svou životnost. Česko tak má řadu předpokladů pro růst bateriového průmyslu, včetně recyklace elektromobilních baterií. Aby využilo potenciál tohoto rychle se rozvíjejícího odvětví, může se ČR inspirovat v jiných státech EU a zároveň využít některá doporučení plynoucí z této analýzy.

- **V rámci rozvoje hodnotového řetězce baterií je nutné dosáhnout širokého konsenzu a spolupráce veřejných i soukromých aktérů – státní správy, výzkumných organizací, firem i veřejnosti.** Budování konsenzu

napomůže jasná vládní politika se zřetelně nastavenými prioritami a vytvoření funkčních platforem pro propojování aktérů.

- **Při tvorbě a implementaci národní strategie v oblasti baterií elektrických vozidel je nutné využít všechny příležitosti plynoucí z působení českých aktérů na evropském trhu** a zároveň přispět k budování strategické autonomie EU, včetně odolnosti vůči externím šokům v dodavatelských řetězcích a ochraně bezpečnosti. Za tímto účelem je vhodné vyhnout se dovozu (nekompletních) technologií z geopoliticky problematických zemí.
- **Vývoj v regulační oblasti na národní úrovni zaostává za technologickým pokrokem.** Při snaze o regulaci je nutné zvážit přínosy a dopady na technologický rozvoj, aby nebylo negativně ovlivněno inovační prostředí a konkurenceschopnost firem. Příkladem nevhodné regulace by mohla být snaha o standardizaci před dozráním technologie.
- **Rozvoj pilotních projektů v oblasti recyklace a opětovného využití baterií EV na konci životnosti** je vhodné podpořit pobídkami z veřejných zdrojů. Při volbě jejich formy se doporučuje volit takové pobídky, které nebudou vytvářet prostředí vhodné pro růst korupce, nesníží standardy ochrany životního prostředí a občanské participace a umožní rozvoj všech částí hodnotového řetězce, včetně výzkumu, vývoje a inovací.
- **V rámci českého právního řádu je nutné urychlit přípravu podmínek pro usnadnění second-life baterií,** které mohou být využity na ukládání energie v domácnostech, podporu obnovitelných zdrojů nebo v komerčních průmyslových a energetických systémech. Sekundární využití významně prodlužuje životnost baterií a přispívá k ekonomickým úsporám a ochraně životního prostředí, jelikož baterie lze v méně náročných aplikacích využívat až do okamžiku, kdy jejich kapacita klesne na cca 30 %.

- Pro minimalizaci environmentálního dopadu a zajištění udržitelného využití surovin je nutné **vyvinout metody pro bezpečnou a nákladově efektivní přepravu a zpracování baterií**, jakož i ekologické recyklační procesy. Zejména v oblasti přeshraniční přepravy odpadních baterií je nutné vyjasnit a harmonizovat právní úpravu na evropské úrovni, aby bylo možné naplnit cíle v oblasti recyklace.
- Mezi metodami recyklace je vhodné zvýhodňovat ty, které se vyznačují **sníženými požadavky na energetické a chemické vstupy**, jako je například přímá recyklace.
- Pro podporu inovací v oblasti recyklace a dalšího využití baterií se jeví v případech, kdy inovace nelze dosáhnout pomocí tržních mechanismů, jako **nezbytná veřejná podpora**. Aktuální nastavení pravidel státní pomoci, IPCEI a dostupného veřejného financování ovšem výrazně komplikuje účast v celoevropských projektech a podávání žádostí o podporu. Doporučujeme proto provedení revize příslušných pravidel jak na evropské, tak na národní úrovni.
- Pro zlepšení informovanosti aktérů o možnostech financování projektů v rámci hodnotového řetězce baterií doporučujeme **posílit informační a diseminační aktivity na národní úrovni**, např. o možnostech využití Inovačního fondu, a kapacity pro pomoc při hledání vhodného titulu pro malé a střední podniky v rámci tzv. one-stop-shopu Evropské bateriové aliance.

7. Slovník technických pojmů

Článek – Základní jednotka baterie, která obsahuje anodu, katodu, elektrolyt a separátor. (překlad z AJ, kde se používá “cell” pro akumulátory).

Baterie – Spojením jednoho či více článků dostaneme baterii. Správné označení je akumulátor.

Bateriový modul – Sada článků spojených sériově či paralelně (či obojí) pomocí elektroniky.

Black mass – Černá hmota získaná mechanickým drcením baterií obsahující kritické materiály (nikl, kobalt, lithium, mangan), slouží jako vstup pro recyklaci.

Anoda – Záporná elektroda (nejčastěji grafit).

Katoda – Kladná elektroda (např. NMC) obsahující lithium, kov (Ni, Mn, Co nebo Fe) a kyslík.

Separátor – Iontově propustná fólie oddělující katodu a anodu, zamezuje vzniku vnitřnímu zkratu mezi elektrodami.

Nominální napětí – Průměrná hodnota napětí udávána výrobcem v katalogovém listu.

Skutečné napětí – Napětí naměřené mezi kladným a záporným pólem baterie a odpovídá stupni nabití/vybití baterie.

Gravimetrická kapacita – Kapacita na jednotku hmotnosti ($\text{Ah}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Volumetrická kapacita – Kapacita na jednotku objemu ($\text{Ah}\cdot\text{l}^{-1}$).

Proudová zatížitelnost – Označována též „C-rate“, což je parametr vyjadřující velikost proudu použitého k nabíjení/vybíjení baterie. Pro příklad budeme-li vybit baterii o kapacitě 1 Ah proudem 1 A (1 C), dojde k jejímu vybití za jednu hodinu. 2C nabije/vybije baterii za 30 minut.

Úroveň nabití – Udává, jak moc je baterie nabitá (SOC = State of Charge).

Úroveň vybití – Udává, jak moc je baterie vybitá (DOD = Depth of Discharge).

Stav života – Vyjadřuje poměr mezi původní a současnou kapacitou a reflektuje tak stárnutí akumulátoru (SOH = State of Health).

Vnitřní odpor baterie – S rostoucím odporem se zvyšují ztráty (převážně ve formě tepla) při nabíjení/vybíjení.

Nabíjecí napětí – Napětí, kterým je baterie nabíjena. Obvykle to bývá 4,2V.

Nabíjecí proud – Proud, kterým je baterie nabíjena. Vyšší proud nabíjí baterii rychleji, ale zhoršuje životnost.

Vybíjecí proud – Proud, kterým je baterie vybíjena. Důležitý parametr při volbě vhodného akumulátoru pro aplikace, které například vyžadují vyšší výkon.

Battery Management System (BMS) – Elektronický systém, který spravuje a monitoruje stav baterie. Reguluje nabíjení a vybíjení a chrání baterii, případně bateriový modul.

Thermal Management System (TMS) – Systém udržující optimální provozní teplotu baterie.

Seznam použité literatury

- [1] Basic principles. UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. *Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)* [online]. 2004-2024 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/basic_principles.php
- [2] KUMAR, R., Katerina AIFANTIS a Pu HU, ed. *Rechargeable Ion Batteries* [online]. Wiley, 2023 [cit. 2024-07-01]. ISBN 9783527350186. Dostupné z: doi:10.1002/9783527836703
- [3] *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku* [online]. FCC PUBLIC [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/co-je-to-elektrochemicky-zdroj--12911>
- [4] LIBRETEXTS. *CHEMISTRY-Electrochemical Cells* [online]. [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <https://chem.libretexts.org/@go/page/41636>
- [5] DIFFERENCEBETWEEN.NET. *Difference Between Primary Cell and Secondary Cell* [online]. [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <http://www.differencebetween.net/science/difference-between-primary-cell-and-secondary-cell/>
- [6] MONTY, Barak, ed. *Electrochemical power sources: primary and secondary batteries*. IET, 1980.
- [7] BELLIS, Mary. THOUGHTCO. *History and Timeline of the Battery* [online]. 2019 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/battery-timeline-1991340>
- [8] BOBBY. UPS BATTERY CENTER. *History Of Batteries: A Timeline* [online]. 2014, 03.06.2014 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <https://blog.upsbatterycenter.com/history-batteries-timeline/>
- [9] ISMAT, Jahan. INVENTUS POWER. *Li-ion Battery Regulations* [online]. 2020 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <https://news.inventuspower.com/blog/li-ion-battery-regulations>
- [10] UNITED NATIONS. *FRONTIER TECHNOLOGY ISSUES: Lithium-ion batteries: A pillar for a fossil fuel-free economy?* [Online]. 2021. Dostupné také z: https://www.un.org/development/desa/dpad/wp-content/uploads/sites/45/publication/FTI_July2021.pdf

- [11] NITTA, Naoki, Feixiang WU, Jung Tae LEE a Gleb YUSHIN. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today* [online]. 2015, 18(5), 252-264 [cit. 2024-04-08]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [12] GHAFARI, A, V BAYAT, A AKBARI a A GHASEMI YEKLANGI. Current and future prospects of Li-ion batteries: A review. *Nano Science Technology* [online]. 2023, (8), 24-43 [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://jnanoscitech.com/wp-content/uploads/2023/07/Volum-8-paper-2.pdf>
- [13] QI, Wen, Joseph G. SHAPTER, Qian WU, Ting YIN, Guo GAO a Daxiang CUI. Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries: principle, recent progress and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2017, 5(37), 19521-19540 [cit. 2024-07-01]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/C7TA05283A
- [14] COSTA, C.M., J.C. BARBOSA, R. GONÇALVES, H. CASTRO, F.J. Del CAMPO a S. LANCEROS-MÉNDEZ. Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials* [online]. 2021, 37, 433-465 [cit. 2024-04-11]. ISSN 24058297. Dostupné z: doi:10.1016/j.ensm.2021.02.032
- [15] ZHANG, Lan, Xiangkun WU, Weiwei QIAN, Kecheng PAN, Xiaoyan ZHANG, Liyuan LI, Mengmin JIA a Suojiang ZHANG. Exploring More Functions in Binders for Lithium Batteries. *Electrochemical Energy Reviews* [online]. 2023, 6(1) [cit. 2024-04-29]. ISSN 2520-8489. Dostupné z: doi:10.1007/s41918-023-00198-2
- [16] SONG, Hyeonjun, Yeonjae OH, Nilüfer ÇAKMAKÇI a Youngjin JEONG. Effects of the aspect ratio of the conductive agent on the kinetic properties of lithium ion batteries. *RSC Advances* [online]. 2019, 2019-12-11, 9(70), 40883-40886 [cit. 2024-04-29]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C9RA09609D
- [17] DENG, Da. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering* [online]. 2015, 3(5), 385-418 [cit. 2024-04-15]. ISSN 2050-0505. Dostupné z: doi:10.1002/ese3.95
- [18] ABDEL-HAFIEZ, Mahmoud, Li Fen SHI, Jinguang CHENG, et al. From Insulator to Superconductor 3 Nanoribbons: A Series of Pressure-Driven Transitions in Quasi-One-Dimensional TiS₃ Nanoribbons. *Nano Letters* [online]. 2024, 2024-05-08, 24(18), 5562-5569 [cit. 2024-07-01]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/acs.nanolett.4c00824

- [19] SALGADO, Rui Martim, Federico DANZI, Joana Espain OLIVEIRA, Anter EL-AZAB, Pedro Ponces CAMANHO a Maria Helena BRAGA. The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries. *Molecules* [online]. 2021, 26(11) [cit. 2024-07-01]. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules26113188
- [20] CHEN, Huiyang, Jiawei CHEN, Wenguang ZHANG, et al. Enhanced cycling stability of high-voltage lithium metal batteries with a trifunctional electrolyte additive. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2020, 2020-11-3, 8(42), 22054-22064 [cit. 2024-07-01]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/D0TA07438A
- [21] BASCH, Angelika, Liliana DE CAMPO, Jörg H. ALBERING a John W. WHITE. Chemical delithiation and exfoliation of Li_xCoO_2 . *Journal of Solid State Chemistry* [online]. 2014, 220, 102-110 [cit. 2024-07-01]. ISSN 00224596. Dostupné z: doi:10.1016/j.jssc.2014.08.011
- [22] RAMASUBRAMANIAN, Brindha, Subramanian SUNDARRAJAN, Vijila CHELLAPPAN, M. V. REDDY, Seeram RAMAKRISHNA a Karim ZAGHIB. Recent Development in Carbon-LiFePO₄ Cathodes for Lithium-Ion Batteries: A Mini Review. *Batteries* [online]. 2022, 8(10) [cit. 2024-07-01]. ISSN 2313-0105. Dostupné z: doi:10.3390/batteries8100133
- [23] ZHANG, Wei-Jun. Structure and performance of LiFePO₄ cathode materials: A review. *Journal of Power Sources* [online]. 2011, 196(6), 2962-2970 [cit. 2024-07-01]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.113
- [24] MURDOCK, Beth E., Kathryn E. TOGHILL a Nuria TAPIA-RUIZ. A Perspective on the Sustainability of Cathode Materials used in Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials* [online]. 2021, 11(39) [cit. 2024-07-30]. ISSN 1614-6832. Dostupné z: doi:10.1002/aenm.202102028
- [25] SAAID, Farish Irfal, Muhd Firdaus KASIM, Tan WINIE, et al. Ni-rich lithium nickel manganese cobalt oxide cathode materials: A review on the synthesis methods and their electrochemical performances. *Heliyon* [online]. 2024, 10(1) [cit. 2024-07-01]. ISSN 24058440. Dostupné z: doi:10.1016/j.heliyon.2023.e23968
- [26] GUAN, Peiyuan, Lu ZHOU, Zhenlu YU, Yuandong SUN, Yunjian LIU, Feixiang WU, Yifeng JIANG a Dewei CHU. Recent progress of surface coating on cathode materials for high-performance lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry* [online]. 2020, 43, 220-235 [cit. 2024-07-01]. ISSN 20954956. Dostupné z: doi:10.1016/j.jechem.2019.08.022

- [27] YI, Ting-Feng, Yan-Rong ZHU, Xiao-Dong ZHU, J. SHU, Cai-Bo YUE a An-Na ZHOU. A review of recent developments in the surface modification of LiMn_2O_4 as cathode material of power lithium-ion battery. *Ionics* [online]. 2009, 15(6), 779-784 [cit. 2024-07-01]. ISSN 0947-7047. Dostupné z: doi:10.1007/s11581-009-0373-x
- [28] TURCHENIUK, Kostiantyn, Dmitry BONDAREV, Glenn G. AMATUCCI a Gleb YUSHIN. Battery materials for low-cost electric transportation. *Materials Today* [online]. 2021, 42, 57-72 [cit. 2024-07-30]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2020.09.027
- [29] NZEREOGU, P.U., A.D. OMAH, F.I. EZEMA, E.I. IWUOHA a A.C. NWANYA. Anode materials for lithium-ion batteries: A review. *Applied Surface Science Advances* [online]. 2022, 9 [cit. 2024-07-01]. ISSN 26665239. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsadv.2022.100233
- [30] HOSSAIN, Md. Helal, Mohammad Asaduzzaman CHOWDHURY, Nayem HOSSAIN, Md. Aminul ISLAM a Md Hosne MOBARAK. Advances of lithium-ion batteries anode materials—A review. *Chemical Engineering Journal Advances* [online]. 2023, 16 [cit. 2024-07-01]. ISSN 26668211. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceja.2023.100569
- [31] ASHURI, Maziar, Qianran HE a Leon L. SHAW. Silicon as a potential anode material for Li-ion batteries: where size, geometry and structure matter. *Nanoscale* [online]. 2016, 8(1), 74-103 [cit. 2024-07-01]. ISSN 2040-3364. Dostupné z: doi:10.1039/C5NR05116A
- [32] XU, Yu Hong, Ge Ping YIN a Peng Jian ZUO. Geometric and electronic studies of $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ for silicon anode. *Electrochimica Acta* [online]. 2008, 54(2), 341-345 [cit. 2024-07-01]. ISSN 00134686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2008.07.083
- [33] LEE, Stan. THELEC. *Samsung SDI mulling MK Electron, Dongjin Semichem for silicon anode* [online]. 2021 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: <https://thelec.net/news/articleView.html?idxno=3142>
- [34] JULIEN, Christian M. a Alain MAUGER. Fabrication of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) as Anode Material for Li-Ion Batteries. *Micromachines* [online]. 2024, 15(3) [cit. 2024-07-01]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi15030310
- [35] BLAGOEVA, Darina, Claudiu C. PAVEL, Dominic WITTMER, Jaco HUISMAN a Francesco PASIMENI. Materials dependencies for dual-use technologies

- relevant to Europe's defence sector. *EUR 29850 EN* [online]. Evropská Komise, 2019 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: doi:10.2760/570491
- [36] CHENG, Anthony L., Erica R. H. FUCHS, Valerie J. KARPLUS a Jeremy J. MICHALEK. Electric vehicle battery chemistry affects supply chain disruption vulnerabilities. *Nature Communications* [online]. 2024, 15(1) [cit. 2024-07-30]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-024-46418-1
- [37] Lithium Element Facts. CHEMICOOOL. *Chemiclo Periodic Table* [online]. 2012 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.chemicool.com/elements/lithium.html>
- [38] SGS MINERALS SERVICE. *Hard rock lithium processing* [Online]. Mongolsko, 2010. Dostupné také z: <https://www.sgs.com/-/media/sgscorp/documents/corporate/brochures/sgs-min-wa109-hard-rock-lithium-processing-en.cdn.en.pdf>
- [39] *Mineral Commodity Summaries 2024* [online]. U.S. Geological Survey, 2024 [cit. 2024-07-02]. ISBN 978-1-4113-4544-7. Dostupné z: doi:10.3133/mcs2024
- [40] FILIPENCO, Daniil. Five major lithium-producing countries in the world. *Development aid* [online]. 2023 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.developmentaid.org/news-stream/post/170661/five-major-lithium-producing-countries>
- [41] CHEN, Stephen. China cracks cheap lithium production in electric car breakthrough. *South China Morning Post* [online]. 2019 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3010200/china-cracks-cheap-lithium-production-electric-car-breakthrough>
- [42] ODBOR KOMUNIKACE. *Těžba lithia na Cínovci bude v českých rukou. ČEZ získá 51 procent ve společnosti Geomet* [online]. MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. 2020 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/tezba-lithia-na-cinovci-bude-v-ceskych-rukou--cez-ziska-51-procent-ve-spolecnosti-geomet--253714/>
- [43] O cínovci. *GEOMET* [online]. (c) 2016-2020 [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://geomet-cz.com/ocinovci.php>
- [44] Kauza lithium. *Kurzycz* [online]. [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: https://wiki.kurzy.cz/Kauza_lithium

- [45] Těžba lithia na Cínovci by mohla začít koncem roku 2026. *Novinky.cz* [online]. 2023, 16. 5. 2023 [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/ekonomika-tezba-lithia-na-cinovci-by-mohla-zacit-koncem-roku-2026-40431758>
- [46] US GEOLOGICAL SURVEY. Leading countries based on reserves of cobalt worldwide in 2023. *Statista* [online]. 2024 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/264930/global-cobalt-reserves/>
- [47] HITZMAN, Murray W., Arthur A. BOOKSTROM, John F. SLACK a Michael L. ZIENTEK. *Cobalt—Styles of Deposits and the Search for Primary Deposits* [online]. 2017. Dostupné také z: <https://pubs.usgs.gov/of/2017/1155/ofr20171155.pdf>
- [48] KONNUNAHU, Jukka, Pasi EILU, Tuomo TÖRMÄNEN, et al. A mining industry overview of cobalt in Finland: exploration, deposits and utilization. *Geoenergy* [online]. 2023, 2023-01-23, 1(1), geoenergy2023-016 [cit. 2024-07-02]. ISSN 2755-1725. Dostupné z: [doi:10.1144/geoenergy2023-016](https://doi.org/10.1144/geoenergy2023-016)
- [49] Umicore to acquire cobalt refinery and cathode precursor operations in Finland. *Umicore* [online]. 2019 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.umicore.com/en/media/press/umicore-to-acquire-cobalt-refinery-and-cathode-precursor-operations-in-finland/>
- [50] PISTILLI, Melissa. Top 9 Nickel-producing Countries (Updated 2024). *Investingnews* [online]. 2024 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/base-metals-investing/nickel-investing/top-nickel-producing-countries/>
- [51] *Nickel in the European Union*. 2004. Dostupné také z: https://www.ap3i.or.id/~file/nickel_in_the_european_union-9220e-2525_4621.pdf
- [52] U. S. GEOLOGICAL SURVEY. *GRAPHITE (NATURAL): Mineral Commodity Summaries* [Online]. 2024. Dostupné také z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-graphite.pdf>
- [53] GORDON, Katie, ed. Graphite Production Across the Globe. *The Assay* [online]. 2023 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.theassay.com/articles/analysis/graphite-production-across-the-globe/>

- [54] Infographic: China controls three-quarters of graphite anode supply chain. *Benchmark minerals* [online]. 2023 [cit. 2024-07-03]. Dostupné z: https://source.benchmarkminerals.com/article/infographic-china-controls-three-quarters-of-graphite-anode-supply-chain?mc_cid=fa15bb4f77&mc_eid=72d0981fff
- [55] BENSON, Emily a Thibault DENAMIEL. *China's New Graphite Restrictions* [online]. CSIS. 2023 [cit. 2024-07-03]. Dostupné z: <https://www.csis.org/analysis/chinas-new-graphite-restrictions>
- [56] SCHRÖDER, Robert, Muhammed AYDEMIR a Günther SELIGER. Comparatively Assessing different Shapes of Lithium-ion Battery Cells. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, 8, 104-111 [cit. 2024-07-01]. ISSN 23519789. Dostupné z: [doi:10.1016/j.promfg.2017.02.013](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.013)
- [57] MURASHKO, Kirill. *Thermal modelling of commercial lithium-ion batteries* [online]. Lappeenrantaensis, 2016 [cit. 2024-07-01]. Dostupné z: [doi:10.13140/RG.2.1.3930.0723](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3930.0723). Thesis. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland.
- [58] VENDITTI, Bruno a Sam PARKER. Ranked: The Top 10 EV Battery Manufacturers in 2023. *Visualcapitalist* [online]. 2024 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.visualcapitalist.com/ranked-the-top-10-ev-battery-manufacturers-in-2023/>
- [59] YU, Alice a Mitzi SUMANGIL. Top electric vehicle markets dominate lithium-ion battery capacity growth. *S&P Global* [online]. 2021 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/blog/top-electric-vehicle-markets-dominate-lithium-ion-battery-capacity-growth>
- [60] IEA. *Lithium-ion battery manufacturing capacity, 2022-2030* [online]. 2022 [cit. 2024-10-24]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/lithium-ion-battery-manufacturing-capacity-2022-2030>.
- [61] ILLA FONT, Carlos Henrique, Hugo Valadares SIQUEIRA, João Eustáquio MACHADO NETO, João Lucas Ferreira dos SANTOS, Sergio Luiz STEVAN, Attilio CONVERTI a Fernanda Cristina CORRÊA. Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: A Short Review and Perspectives. *Energies* [online]. 2023, 16(2) [cit. 2024-07-01]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: [doi:10.3390/en16020953](https://doi.org/10.3390/en16020953)

- [62] SHAHJALAL, Mohammad, Probir Kumar ROY, Tamanna SHAMS, Ashley FLY, Jahedul Islam CHOWDHURY, Md. Rishad AHMED a Kailong LIU. A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues. *Energy* [online]. 2022, 241 [cit. 2024-07-02]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2021.122881
- [63] CANALS CASALS, Lluç, Maite ETXANDI-SANTOLAYA, Pere Antoni BIBILONI-MULET, Cristina CORCHERO a Lluís TRILLA. Electric Vehicle Battery Health Expected at End of Life in the Upcoming Years Based on UK Data. *Batteries* [online]. 2022, 8(10) [cit. 2024-07-02]. ISSN 2313-0105. Dostupné z: doi:10.3390/batteries8100164
- [64] ERS a IBG Česko ve spolupráci se Škoda Auto vyvinuli kontejnerové bateriové úložiště za použití second-life baterií z elektromobilů. *AERS* [online]. [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://www.aers.cz/aktuality/aers-a-ibg-cesko-ve-spolupraci-se-skoda-auto-vyvinuli-kontejnerove-bateriove-uloziste-za-pouziti-second-life-baterii-z-elektromobilu>
- [65] Druhý život baterií. *Škoda Storyboard* [online]. 2022, 3. 11. 2022 [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/e-mobilita-cs/druhy-zivot-baterii/>
- [66] Bateriové úložiště i3. *1PS Technology* [online]. [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://1ps.technology/cs/bateriove-uloziste-i3/>
- [67] Vysloužilé baterie z českých elektromobilů nacházejí uplatnění jako úložiště energie. *AUTOKLASTR* [online]. [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://autoklastr.cz/cs/vyslouzile-baterie-z-ceskych-elektromobilu-nachazeji-uplatneni-jako-uloziste-energie/>
- [68] BĚHAL, Ondřej. Škoda a ČEZ připravily pro vysloužilé baterie z elektroaut příjemný důchod: 15 let práce v úložišti. *Autosalon.tv* [online]. 2023, 15. 6. 2023 [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://www.autosalon.tv/novinky/auto-profi/skoda-a-cez-pripravily-pro-vyslouzile-baterie-z-elektroaut-prijemny-duchod-15-let-prace-v-ulozisti>
- [69] LIEBREICH, Jiří. Škoda Auto se spojuje s ČEZ. Použité baterie z elektromobilů poslouží k napájení domácností. *E15* [online]. 2023, 15. 6. 2023 [cit. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/skoda->

auto-se-spojuje-s-cez-pouzite-baterie-z-elektromobilu-poslouzi-k-napajeni-domacnosti-1398838

- [70] UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Pathways toward realizing the promise of all-solid-state batteries. *Phys.org* [online]. 2020 [cit. 2024-07-02]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2020-03-pathways-all-solid-state-batteries.html>
- [71] GAINES, Linda. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies* [online]. 2014, 1-2, 2-7 [cit. 2024-07-02]. ISSN 22149937. Dostupné z: [doi:10.1016/j.susmat.2014.10.001](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001)
- [72] FAN, Ersha, Li LI, Zhenpo WANG, Jiao LIN, Yongxin HUANG, Ying YAO, Renjie CHEN a Feng WU. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. *Chemical Reviews* [online]. 2020, 2020-07-22, 120(14), 7020-7063 [cit. 2024-07-02]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: [doi:10.1021/acs.chemrev.9b00535](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00535)
- [73] WANG, Songli, Yang TIAN, Xiaofeng ZHANG, Bin YANG, Fei WANG, Baoqiang XU, Dong LIANG a Lipeng WANG. A Review of Processes and Technologies for the Recycling of Spent Lithium-ion Batteries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 2020-03-01, 782(2) [cit. 2024-07-02]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/782/2/022025](https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/2/022025)
- [74] YI, Chenxing, Yue YANG, Tao ZHANG, Xiqing WU, Wei SUN a Longsheng YI. A green and facile approach for regeneration of graphite from spent lithium ion battery. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, 277 [cit. 2024-07-02]. ISSN 09596526. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jclepro.2020.123585](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123585)
- [75] DAVIS, Krystal a George P. DEMOPOULOS. Hydrometallurgical recycling technologies for NMC Li-ion battery cathodes: current industrial practice and new R&D trends. *RSC Sustainability* [online]. 2023, 2023-11-03, 1(8), 1932-1951 [cit. 2024-07-02]. ISSN 2753-8125. Dostupné z: [doi:10.1039/D3SU00142C](https://doi.org/10.1039/D3SU00142C)
- [76] NOWAK, Sascha a Martin WINTER. The Role of Sub- and Supercritical CO₂ as “Processing Solvent” for the Recycling and Sample Preparation of Lithium Ion Battery Electrolytes. *Molecules* [online]. 2017, 22(3) [cit. 2024-07-02]. ISSN 1420-3049. Dostupné z: [doi:10.3390/molecules22030403](https://doi.org/10.3390/molecules22030403)
- [77] CHEN, Mengyuan, Xiaotu MA, Bin CHEN, Renata ARSENAULT, Peter KARLSON, Nakia SIMON a Yan WANG. Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion

- Batteries. *Joule* [online]. 2019, 3(11), 2622-2646 [cit. 2024-07-02]. ISSN 25424351. Dostupné z: doi:10.1016/j.joule.2019.09.014
- [78] LAROUCHE, François, Farouk TEDJAR, Kamyab AMOUZEGAR, Georges HOULACHI, Patrick BOUCHARD, George P. DEMOPOULOS a Karim ZAGHIB. Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond. *Materials* [online]. 2020, 13(3) [cit. 2024-07-02]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13030801
- [79] GUIMARÃES, L.F., A.B. BOTELHO JUNIOR a D.C.R. ESPINOSA. Sulfuric acid leaching of metals from waste Li-ion batteries without using reducing agent. *Minerals Engineering* [online]. 2022, 183 [cit. 2024-07-02]. ISSN 08926875. Dostupné z: doi:10.1016/j.mineng.2022.107597
- [80] WU, Jiawei, Mengting ZHENG, Tiefeng LIU, et al. Direct recovery: A sustainable recycling technology for spent lithium-ion battery. *Energy Storage Materials* [online]. 2023, 54, 120-134 [cit. 2024-07-02]. ISSN 24058297. Dostupné z: doi:10.1016/j.ensm.2022.09.029
- [81] JI, Yi, Edwin E. KPODZRO, Chad T. JAFVERT a Fu ZHAO. Direct recycling technologies of cathode in spent lithium-ion batteries. *Clean Technologies and Recycling* [online]. 2021, 1(2), 124-151 [cit. 2024-07-02]. ISSN 2770-4580. Dostupné z: doi:10.3934/ctr.2021007
- [82] LV, Weiguang, Zhonghang WANG, Hongbin CAO, Yong SUN, Yi ZHANG a Zhi SUN. A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* [online]. 2018, 2018-02-05, 6(2), 1504-1521 [cit. 2024-07-02]. ISSN 2168-0485. Dostupné z: doi:10.1021/acssuschemeng.7b03811
- [83] EUROPEAN BATTERY ALLIANCE. *EBA250* [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.eba250.com/>
- [84] Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future. In: *European Commission - Press release*. 2023, IP/23/1661.
- [85] An EU critical raw materials act for the future of EU supply chains. *European Council* [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/>

- [86] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2024/1735 ze dne 13. června 2024, kterým se zřizuje rámec opatření pro posílení evropského ekosystému výroby technologií pro nulové čisté emise a mění nařízení (EU) 2018/1724. In: *Official Journal of the European Union*. 2024, 32024R1735.
- [87] Approved IPCEIs in the Batteries value chain. EUROPEAN COMMISSION. *Competition Policy* [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis/batteries-value-chain_en
- [88] Průmyslová politika EU v oblasti baterií [online]. Evropský Účetní dvůr, 2023 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-15/SR-2023-15_CS.pdf
- [89] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/1542 ze dne 12. července 2023 o bateriích a odpadních bateriích, o změně směrnice 2008/98/ES a nařízení (EU) 2019/1020 a o zrušení směrnice 2006/66/ES. In: *Official Journal of the European Union*. 2023, 32023R1542.
- [90] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/66/ES ze dne 6. září 2006 o bateriích a akumulátorech a odpadních bateriích a akumulátorech a o zrušení směrnice 91/157/EHS. In: *Official Journal of the European Union*. 2006, 32006L0066.
- [91] RIZOS, Vasileios a Patricia URBAN. Implementing the EU Digital Battery Passport [online]. Brusel: BatRaw, 2024 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-03/1qp5rxiz-CEPS-InDepthAnalysis-2024-05_Implementing-the-EU-digital-battery-passport.pdf
- [92] LAURENT, Maëlle. Recycling electric car batteries: European plan introduced. *BEEV* [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: https://www.beev.co/en/blog/electric-cars/recyclage-des-batteries-de-voiture-electrique-le-plan-europeen-instaure/#elementor-toc_heading-anchor-2
- [93] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1013/2006 ze dne 14. června 2006 o přepravě odpadů. In: *Official Journal of the European Union*. 2006, 32006R1013.
- [94] Nařízení Komise (ES) č. 1418/2007 ze dne 29. listopadu 2007 o vývozu některých odpadů určených k využití, uvedených v příloze III nebo IIIA nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1013/2006, do některých zemí, na které

- se nevztahuje rozhodnutí OECD o kontrole pohybů odpadů přes hranice. In: *Official Journal of the European Union*. 2007, 32007R1418.
- [95] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic. In: *Official Journal of the European Union*. 2008, 32008L0098.
- [96] Zákon č. 541/2020 Sb. ze dne 20. října 2020 o odpadech. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2020, částka 222.
- [97] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1013/2006 ze dne 14. června 2006 o přepravě odpadů. In: *Official Journal of the European Union*. 2006, 32006R1013.
- [98] Nařízení Komise (ES) č. 1418/2007 ze dne 29. listopadu 2007 o vývozu některých odpadů určených k využití, uvedených v příloze III nebo IIIA nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1013/2006, do některých zemí, na které se nevztahuje rozhodnutí OECD o kontrole pohybů odpadů přes hranice. In: *Official Journal of the European Union*. 2007, 32007R1418.
- [99] Basilejská úmluva o kontrole pohybu nebezpečných odpadů přes hranice států a jejich zneškodňování. *Sdělení č. 6/2015 Sb. m. s.*
- [100] Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR [online]. 2024 [cit. 2024-10-24]. Dostupné z: <https://www.mpo.gov.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/cista-a-udrzitelna-doprava--vlada-schvalila-aktualizaci-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility---282792/>
- [101] Battery recycling in Europe continues to pick up speed: Recycling capacities of lithium-ion batteries in Europe. *Batteries News* [online]. 2024 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: <https://batteriesnews.com/battery-recycling-in-europe-continues-to-pick-up-speed-recycling-capacities-of-lithium-ion-batteries-in-europe/>
- [102] KLESTY, Victoria. REUTERS. *Tesla in pole position in Norway's race to EV goal* [online]. 2023, 3.1.2023 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/hitting-record-electric-cars-sales-norway-near-80-2022-2023-01-02/>
- [103] BUSINESS NORWAY. *Its world record in electric cars is creating a battery recycling revolution in Norway* [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z:

<https://businessnorway.com/articles/closing-the-recycling-gap-norways-circular-battery-economy>

- [104] ENOVA. [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.enova.no/about-enova/>
- [105] FIGENBAUM, Erik. *From Market Penetration to Vehicle Scrappage: The Movement of Li-Ion Batteries through the Norwegian Transport Sector* [online]. Institute of Transport Economics-Norwegian Centre for Transport Research, 2020.
- [106] NORTHWOLT. *Europe's largest electric vehicle battery recycling plant begins operations* [online]. 2022 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://northvolt.com/articles/hydrovolt/>
- [107] HAMPEL, Carrie. ELECTRIVE. *Stena Recycling to open battery value chain hub in Norway* [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.electrive.com/2024/06/06/stena-recycling-to-open-battery-value-chain-hub-in-norway/>
- [108] TEIVAINEN, Aleksi. Finland sparks positive change for batteries. *Good News from Finland* [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.goodnewsfinland.com/en/articles/news-spotlight/2021/finland-sparks-positive-change-for-batteries/>
- [109] KAURANEN, Anne. Finland's Fortum begins battery material recovery from EV 'black mass'. *Reuters* [online]. 2023 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/finlands-fortum-begins-battery-material-recovery-ev-black-mass-2023-04-25/>
- [110] SMALLEY, Megan. Fortum receives permit to export lithium-ion batteries from Sweden, Norway. *Recycling today* [online]. 2021 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: <https://www.recyclingtoday.com/news/fortum-permit-export-lithium-ion-batteries-sweden/>
- [111] RÖNKKÖ, Pasi, Jukka MAJAVA, Tatu HYVÄRINEN, Ilari OKSANEN, Pekka TERVONEN a Ulla LASSI. The circular economy of electric vehicle batteries: a Finnish case study. *Environment Systems and Decisions* [online]. 2024, 44(1), 100-113 [cit. 2024-09-03]. ISSN 2194-5403. Dostupné z: doi:10.1007/s10669-023-09916-z

- [112] Closing the loop on batteries. *Northvolt* [online]. 2022 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: <https://northvolt.com/articles/revolt/>
- [113] Stena Recycling opens industry scale battery recycling plant in Europe. *Stena Recycling* [online]. 2023 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: <https://www.stenarecycling.com/news-insights/newsroom/2023/stena-recycling-opens-industry-scale-battery-recycling-plant-in-europe/>
- [114] RANDALL, Chris. Stena opens new battery recycling plant in Sweden. *Electrive* [online]. [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: <https://www.electrive.com/2023/03/30/stena-opens-new-battery-recycling-plant-in-sweden/>
- [115] BASF and Stena Recycling partner to recycle EV batteries. *Recycling today* [online]. 2024 [cit. 2024-09-04]. Dostupné z: <https://www.recyclingtoday.com/news/basf-and-stena-recycling-partner-to-recycle-ev-batteries/>
- [116] ASCEND ELEMENTS. *Ascend Elements and Elemental Strategic Metals Establish AE Elemental, an Electric Vehicle Battery Recycling JV in Poland* [online]. [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://ascendelements.com/ascend-elements-and-elemental-strategic-metals-establish-ae-elemental-an-electric-vehicle-battery-recycling-jv-in-poland/>
- [117] HARPER, Jo. DW. *Poland's hard road to electric cars* [online]. 2020 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.dw.com/en/will-polands-electric-vehicle-revolution-stall-before-it-starts/a-54607278>
- [118] WILCZEK, Maria. Poland to build EU's first electric car battery recycling plant. *Notes from Poland* [online]. 2021 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://notesfrompoland.com/2021/04/10/poland-to-build-eus-first-electric-car-battery-recycling-plant/>
- [119] EDITORIAL STAFF. Hungary – the future paradise for EV battery manufacturers? *Sustainable BUS* [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/news/hungary-battery-plants-ev-projects/>
- [120] HIVATALOS LAPJA, Magyarország. *Magyar Közlöny* [online]. In: . 2023 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z:

<https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/79dc6517729cbce68fb360f8b1864cdb529a2f8a/megtekintes>

- [121] MTI-HUNGARY TODAY. Booming Automotive Industry: New Battery Recycling Plant in Northern Hungary. *Hungary Today* [online]. 2023 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://hungarytoday.hu/booming-automotive-industry-new-battery-recycling-plant-in-northern-hungary/>
- [122] *Andrada Group News* [online]. 2024 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: <https://www.andrada.hu/pressroom>
- [123] DÓRA, Gyorffy. Diverging Paths to Zero-Emissions Mobility: The political economy of building an EV battery industry in Hungary and Sweden. In: *Annual research conference* [online]. 2023 [cit. 2024-09-03]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/economy_finance/arc2023/documents/papers/Gyorffy%20D.%20-%20Diverging%20Paths%20to%20Zero-Emissions%20Mobility%20The%20political%20economy%20of%20building%20an%20EV%20battery%20industry%20in%20Hungary%20and%20Sweden%20.pdf