

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ŘÍZENÍ A EKONOMIKY PODNIKU



Bakalářská práce

Analýza životního cyklu baterií elektrických vozidel

Life Cycle Analysis of Batteries for Electric Vehicles

Autor: Petr Macháček

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Barbora Stieberová, Ph.D.

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Macháček** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **492186**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza životního cyklu baterií elektrických vozidel

Název bakalářské práce anglicky:

Life Cycle Analysis of Batteries for Electric Vehicles

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Historie, současnost a budoucnost elektromobility a směry vývoje elektrických baterií
3. Shrnutí principů a uvedení postupu metodiky LCA
4. Charakteristika aspektů životního cyklu baterií, problematika jejich recyklace a dalšího využití pro uchování energie
5. Srovnání dostupných LCA analýz baterií

Seznam doporučené literatury:

1. KOČÍ, Vladimír. Posuzování životního cyklu = Life cycle assessment – LCA. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 978-80-86832-42-5.
2. HAUSCHILD, Michael Z., Ralph K. ROSENBAUM, String Irving OLSEN a Editors. Life cycle Assessment, Theory and Practice. Montpellier: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-56474-6.
3. NEUBAUER, Jeremy S., Eric WOOD a Ahmad PESARAN, A Second Life for Electric Vehicle Batteries: Answering Questions on Battery Degradation and Value. SAE International Journal of Materials and Manufacturing [online]. 2015, 14.4.2015, 8(2), 544-553. doi:10.4271/2015-01-1306.
4. European Commission, Directorate-General for Environment, Towards the battery of the future, Publications Office, 2018. Dostupné z: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/674936>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Barbora Stieberová, Ph.D. ústav řízení a ekonomiky podniku FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **21.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **29.02.2024**

Ing. Barbora Stieberová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Petr Macháček

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Barboře Stieberové, Ph.D. za její cenné rady, trpělivost a čas v průběhu vytváření této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, přítelkyni a přátelům za veškerou podporu během celého svého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou životního cyklu baterií elektromobilů. V první části se práce zaměřuje na rozdělení elektrických vozidel dle typu pohonu. V kapitole o vývoji elektromobilů se práce zabývá jak historií, přítomností, tak budoucností elektromobility jak ve světě, tak v České republice. Následující část se věnuje popisu postupů a principů metodiky LCA. V další části se práce zabývá existujícími typy baterií a životnímu cyklu baterie elektrovozidla se zaměřením na možnosti využití druhého životního cyklu baterie. V poslední kapitole je provedeno porovnání dostupných LCA analýz baterií elektrických vozidel. Jsou zde uvedeny jak analýzy, které berou v úvahu druhý životní cyklus, tak i analýzy, které se následným cyklem nezabývají.

Klíčová slova

Elektromobilita, elektromobil, baterie, elektrické vozidlo, LCA analýza, životní cyklus baterie, recyklace, druhotné použití

Annotation

The theme of this bachelor thesis is the life cycle analysis of electric car batteries. In the first part, the thesis focuses on the division of electric vehicles according to the type of drive. In the chapter about the development of electric cars, the thesis deals with the history, present and future of electric mobility both in the world and in the Czech Republic. The following section describes the procedures and principles of the LCA methodology. In the next part, the work deals with existing types of batteries and the life cycle of an electric vehicle battery with a focus on the possibilities of using the battery for the second life. In the last chapter, the work is focused on the comparison of available LCA analyses of electric vehicle batteries. Both analyses that take into account the second life cycle and analyzes that do not deal with the subsequent cycle are presented and compared here.

Keywords

Electromobility, electric car, battery, electric vehicle, LCA analysis, battery life cycle, recycling, second life application

Obsah

Úvod	10
1. Elektrická vozidla	12
1.1. Dělení elektromobilů	12
1.1.1. BEV	12
1.1.2. Hybridy	13
1.1.3. FCEV	13
1.2. Vývoj elektromobilů	13
1.2.1. Historie elektromobilů ve světě	13
1.2.2. Historie elektrických vozidel v ČR	15
1.2.3. Současný stav elektromobility ve světě	16
1.2.4. Současný stav elektromobility v ČR	17
1.2.5. Budoucnost elektromobility ve světě	17
1.2.6. Budoucnost elektromobility v ČR	19
2. Akumulátory pro elektrická vozidla	21
2.1. Parametry baterií	21
2.1.1. Napětí článků a samotné baterie	21
2.1.2. Množství uložené energie	21
2.1.3. Kapacita baterie	21
2.1.4. Hustota energie	21
2.1.5. Specifický výkon	22
2.1.6. Energetická účinnost	22
2.1.7. Samovolné vybíjení	22
2.1.8. Teplota a chlazení baterií	22
2.1.9. Životnost baterie a počet nabíjecích cyklů	23
2.2. Vývoj baterií	23
2.3. Složení baterií	24
2.4. Aktuální typy baterií pro EV	24
2.4.1. Lithium titaničitan ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)	24
2.4.2. Lithium železo fosfát (LiFePO_4)	25
2.4.3. Lithium mangan oxid (LiMn_2O_4)	25
2.4.4. Lithium nikl mangan kobalt oxid (LiNiMnCoO_2)	25
2.4.5. Lithium kobalt oxid (LiCoO_2)	25
2.4.6. Lithium nikl kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO_2)	26
2.5. Budoucnost baterií pro EV	26

2.5.1. Lithium síra (LiS)	26
2.5.2. Lithium sodík (LiNa).....	27
2.5.3. Lithium kyslík (LiO ₂).....	27
2.5.4. Silikonové baterie.....	27
2.6. Degradace baterie.....	27
2.7. Životní cyklus baterií EV	28
2.7.1. Výroba baterie.....	29
2.7.2. Recyklace.....	31
2.7.2.1. Pyrometalurgický proces.....	32
2.7.2.2. Hydrometalurgický proces	33
2.7.2.3. Proces přímé recyklace	33
2.7.3. Repasování	34
2.7.4. Nové účely baterie	34
3. Popis metodiky life cycle assessment	36
3.1. Definice cíle a rozsahu.....	36
3.2. Inventarizační analýza	36
3.3. Hodnocení dopadů životního cyklu (LCIA)	37
3.4. Intepretace životního cyklu.....	37
3.5. Kategorie dopadu.....	37
4. Dostupné LCA analýzy baterií pro EV	39
4.1. Přehled LCA analýz	39
4.2. LCA analýza 1 (KOROMA et al., 2022, Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management).....	40
4.3. LCA analýza 2 – (KAMATH et al., 2020, Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications)	44
4.4. LCA analýza 3 – (BOBBA et al., 2018, Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows).....	46
4.5. LCA analýza 4 – (WANG et al., 2021, A comparative life cycle assessment on lithium-ion battery: Case study on electric vehicle battery in China considering battery evolution).....	49
4.6. LCA analýza 5 - (GENIKOMSAKIS et al., 2013, A Life Cycle Assessment of a Li-ion urban electric vehicle battery)	52
4.7. LCA analýza 6 - (WANG et al., 2020, Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles).....	53
4.8. LCA Analýza 7 - (QUAN et al., 2022, Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies).....	56
4.9. LCA analýza 8 - (DENG et al., 2017, Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles).....	59
4.10. Shrnutí kapitoly 4	60

5. Závěr.....	62
Seznam obrázků	64
Seznam tabulek.....	64
Seznam použitých zkratk.....	65
Seznam použité literatury	67

Úvod

Globální trh s automobily čeká v budoucí době řada změn. Vlády reagují na změny klimatu a snaží se o postupné vymýcení aut se spalovacími motory tvrdými opatřeními. Nelze nezmínit pojmy jako elektromobilita a bezemisní vozidla. Trh s elektromobily se rozvíjí raketovou rychlostí. Na začátku tisíciletí se prodávaly nízké tisíce elektromobilů celosvětově, avšak v posledních letech se na největších trzích, jako je například Čína, počty elektrických vozidel rok od roku zdvojnásobují. S tím ovšem přicházejí otázky, jako například, co s vysloužilými bateriemi.

Kapacita baterií elektromobilů postačuje v dnešní době na dojezd přibližně 300 až 500 kilometrů v závislosti na teplotě, jízdnímu profilu apod. Tak, jako u využívání smartphonů a laptopů, s časem degraduje kapacita dané baterie, proto dochází ke snižování dojezdu. Baterie se musí následně vyměnit za novou, protože zbytek elektromobilu zpravidla zdaleka nedosáhl konce své životnosti. Tyto použité baterie se následně sešrotují nebo pošlou na recyklaci. Teprve v posledních několika letech se začíná uvažovat nad tím, že tyto baterie, nepoužitelné už v elektromobilech, by mohly najít nové uplatnění.

Baterie sice nemají dostatečnou kapacitu na pohánění elektrických vozidel, mohly by ale být využity jako bateriové úložiště. Tyto úložiště z již použitých baterií by pak mohly najít úplně nové uplatnění v podobě domácích bateriových úložišť, které by byly spjaté s domácí výrobou elektřiny z obnovitelných zdrojů jako je vítr nebo slunce. Výhodou takových úložišť je jejich možná škálovatelnost a možné využití jako akumulace energie pro celé rozvodné sítě, kdy tyto úložiště budou vyrovnávat nerovnovážné stavy v rozvodné síti, konkrétně elektrický deficit.

Nejčastěji se u elektromobilů využívá lithiových baterií. Většina kovů obsažených v bateriových článcích je těžena státy, které jsou vůči západnímu světu politicky nestabilní. Proto je vyvíjen tlak na vytvoření nových typů baterií, které nebudou obsahovat zejména kobalt. S novými typy baterií se počítá až ke konci tohoto desetiletí, kdy zároveň se po celém světě objeví spousta vysloužilých baterií odebraných z elektromobilů z nynějšího rozmachu. Proto je potřeba klást mnohem větší důraz na recyklaci a možné využití použitých baterií z elektromobilů.

První kapitola se soustředí na rozdělení elektrických vozidel, jejich postupný technický vývoj a predikci růstu trhu elektromobilů jak v ČR, tak ve světě.

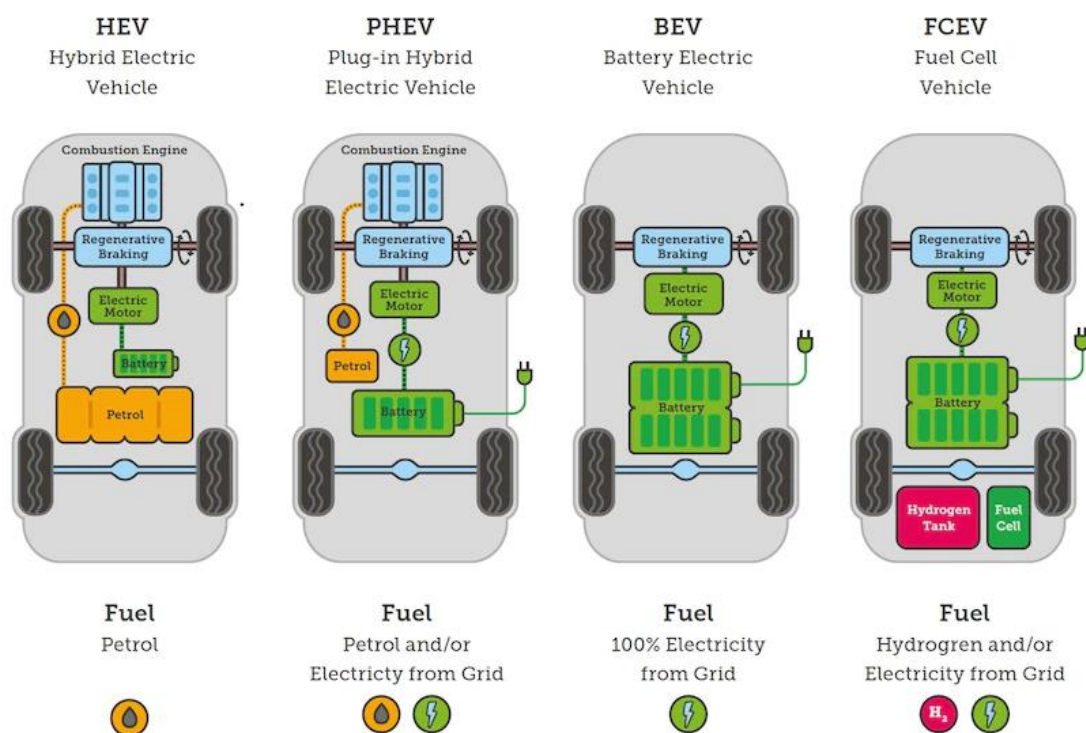
Druhá kapitola je zaměřena na parametry akumulátorů elektrických vozidel, jejich složení, využívané typy a možné bateriové alternativy do budoucnosti. Další kapitola se věnuje podstatě LCA studií a v poslední části jsou uvedeny a srovnány LCA studie věnované akumulátorům elektrických vozidel a jejich výsledky.

1. Elektrická vozidla

Tato kapitola se v první části věnuje základnímu rozdělení elektrických vozidel dle druhu využívané energie a v druhé části je zaměřena na vývoj elektrických vozidel, jejich minulost, aktuální stav elektromobility doplněný o grafy. Nakonec jsou uvedeny predikce elektromobility jak ve světě, tak v ČR.

1.1. Dělení elektromobilů

Elektromobil jako pojem označuje automobil, který pro pohon využívá energii dodanou z baterie a neobsahuje spalovací motor. Tyto vozidla mají zkratku BEV, z anglického battery electric vehicles. Další skupinou jsou tzv. hybridy využívající kombinaci spalovacího motoru s elektromotorem. Poslední, nejnovější skupinou jsou elektromobily s vodíkovými palivovými články. [1]



Obrázek 1: Rozdělení elektrických vozidel [1]

1.1.1. BEV

Vozidla nemají spalovací motor, k pohonu využívají elektromotor poháněný energií z baterie. Energie se do baterie může rekuperovat při jízdě, ale hlavní dobíjení probíhá po připojení vozidla do elektrické sítě. [2]

Energie je převedena ze stejnosměrné baterie do střídavého elektromotoru pomocí invertoru. Pro změnu rychlosti se využívá změna frekvence střídavého proudu posílaného do elektromotoru z měniče napětí. Při zpomalování se z elektromotoru stává alternátor a produkuje energii, kterou posílá zpátky do baterie přes měnič. Tyto vozidla nevypouští žádné výfukové emise. [2]

1.1.2. Hybridy

Spadají zde 2 typy EV. HEV je typ vozidel, které mají jak spalovací motor, tak elektromotor. Spalovací motor využívá energii z paliva v palivové nádrži a elektromotor zase energii z baterie. Hlavní rozdíl definující tuto kategorii je ten, že baterii lze dobít pouze spalovacím motorem, protože se na vozidle nevyskytuje žádný nabíjecí port. Druhým typem je PHEV. Tento typ využívá spalovacího motoru, tak elektromotoru. Rozdíl od HEV je ten, že vozidlo má nabíjecí port a baterie tudíž lze dobíjet z elektrické sítě. Vozidla jsou schopna alespoň 2 jízdních módů, a to čistě elektrický mód, kdy vozidlo pohání pouze elektromotor a hybridní mód, kdy je automobil poháněn oběma motory zároveň. [2]

1.1.3. FCEV

Jedná se o typ automobilu, který využívá palivové články pro přeměnu vodíku z vodíkové nádrže na elektrickou energii. Vodíková nádrž se pak doplňuje vodíkem, tento proces je podstatně rychlejší než dnešní nabíjení baterií BEV. [2]

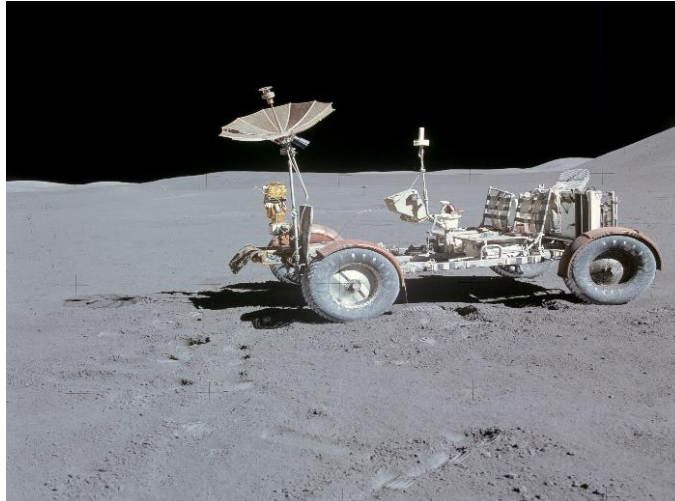
1.2. Vývoj elektromobilů

1.2.1. Historie elektromobilů ve světě

Jedny z prvních elektromobilů začaly vznikat ke konci 19. století. Tato první vozidla nebyla příliš odlišná od kočárů. Na rozdíl od palivem nebo párou poháněných automobilů byla tichá a nevypouštěla žádné výfukové plyny, proto si velice rychle našla oblibu u měšťanů. Elektrická vozidla se rychle rozšířila po celých Spojených státech amerických, kde tvořila až jednu třetinu veškerých automobilů. [3]

O komerční využití se pokusili v roce 1897 v New Yorku. Začínalo se s flotilou 2 elektrických taxíků, která se postupně rozšiřovala. Nabíjení se řešilo výměnou vybité baterie za nabitou. Těchto baterií bylo ovšem nedostatek a taxíky měly problémy s vysokou poruchovostí, což zapříčinilo špatnou pověst elektromobilů. Elektromobilům dále uškodil nástup fordu model T, který byl mnohem levnější a jednodušší, tudíž byl mnohem dostupnější pro širokou

veřejnost. V roce 1912 bylo představeno elektrické zapalování, které dále snížilo cenu nových palivem poháněných vozidel. Hřebíčkem do rakve tehdejších elektromobilů byl nález texaské ropy. Tento objev masivně snížil cenu paliva a zajistil jeho dostupnost v odlehlých částech Ameriky. [3] [4]



Obrázek 2: Lunární rover [3]

Přes 30 let nebylo potřeba alternativního paliva, neboť ropa byla stále velice levná a neustále se pracovalo na zlepšování spalování paliva uvnitř motoru. V šedesátých a sedmdesátých letech ovšem cena ropy značně vzrostla. S růstem ceny vzrostla i poptávka po elektrických vozidlech. Popularitě elektrických vozidel pomohl i program Apollo, protože lunární rover byl napájen z baterií. Mnoho automobilek se pustilo do vývoje malých, městských elektromobilů. Narazily ale na problémy jako nedostatečný dojezd a nízký výkon, proto zájem opět upadl. [3]



Obrázek 3: Tesla Roadster [3]

Změna přišla až s koncem tisíciletí, kdy změny v legislativě nutily výrobce do produkce automobilů s nízkými emisemi. Firma General Motors představila

první, sériově vyráběný elektromobil EV1. Ten byl velice úspěšný, protože nabízel nadčasový design a velice slušné parametry. V roce 2000 byla představena Toyota prius, jako první hybrid. V roce 2006 oznámila začínající automobilka Tesla, že vyvíjí elektrický sportovní automobil Tesla Roadster s dojezdem až 320 kilometrů. V následujících letech spadla cena baterií pro elektromobily o přibližně 50 %. [3] [4]

1.2.2. Historie elektrických vozidel v ČR

První elektrické vozidlo na českém území sestrojil Ing. František Křižík v roce 1895. Jednalo se o přestavěný kočár poháněný elektromotorem o síle 5 koní pohánějícím zadní nápravu. Kočár se místo volantu ovládal směrovou pákou. Po testovacích jízdách po Praze využil poznatky pro sestavení novějšího modelu, který se už ovládal klasickým volantem. Poté postavil další vozy, kde zkombinoval spalovací motor s elektromotorem za vzniku prvního hybridního automobilu na českém území. Dalším vynálezcem, který si sestavil vlastní hybrid, je Josef Sousedík. Vozidlo si sestavil v roce 1931 pro své vlastní potřeby a využíval ho denně. Vozidlo mělo maximální rychlost 70 km/h. [5]



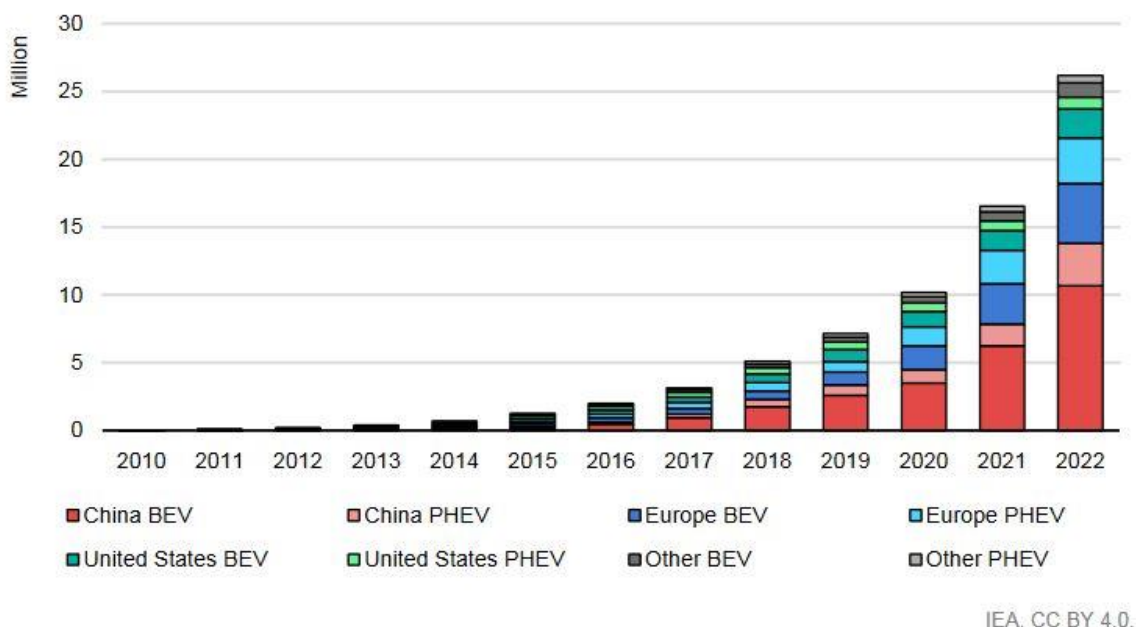
Obrázek 4: Elektromobil EMA [6]

Další vývoj elektromobilů byl pozastaven až do roku 1968, kdy československá vláda rozhodla o vývoji městského osobního elektromobilu. Tento vývoj byl zadán brněnskému Výzkumnému ústavu elektrických strojů točivých. První prototyp byl sestaven v roce 1969, ovšem jednalo se tehdy o testovací mulu, která neměla ani karoserii. Finální model s názvem EMA byl představen v roce 1970 na výstavě Člověk a automobil. Přes nízká očekávání elektromobil dosahoval kvalit západních elektromobilů. Elektromobil byl poháněn 2 elektromotory, jeden motor poháněl jedno kolo, EMA se proto obešla bez diferenciálu. Elektromobil také zvládal rekuperovat energii při brzdění.

Bohužel Rada vzájemné hospodářské pomoci rozhodla o přesunutí výroby elektromobilů do Bulharska, tudíž se EMA sériové výroby nikdy nedočkala. [6]

1.2.3. Současný stav elektromobility ve světě

Prodeje elektrických vozidel v roce 2022 byly rekordní, svět se vzpamatoval z následků pandemie Covidu-19, dodavatelské řetězce už nebyly protahovány pomalou lodní dopravou a k tomu všemu skončila polovodičová krize. Pro porovnání v roce 2012 bylo prodáno celosvětově 120 000 kusů elektromobilů, tolik se jich v roce 2021 prodalo za jeden týden. Elektromobily tvořily v roce 2022 14 % celkového trhu s automobily, což je pětinasobný nárůst oproti roku 2019. Největšími tahouny byla Čína, kde se prodalo 4,4 milionu kusů elektrických vozidel a Evropa, kde se prodalo 2,7 milionu. Čína s Evropou dohromady stály za 85 % globálních prodejů elektromobilů. [7] [[8]



Obrázek 5: Počet EV ve světě v letech 2010 až 2022 [8]

1.2.4. Současný stav elektromobility v ČR

Větší počet osobních elektromobilů se v ČR začíná registrovat od roku 2011, kdy přesáhl 100 kusů za jeden rok. Počet registrovaných EV se neustále zvyšuje, i tak se jedná jen o nepatrné množství registrovaných vozidel v rámci veškerých registrovaných vozidel. Z celkového počtu 6,5 milionu osobních automobilů elektromobily tvoří pouze 0,22 % nebo v řeči kusů necelých 14 tisíc vozidel. Na Obrázku 6 je uveden graf ukazující trend podílu flotily osobních vozidel na alternativní pohony. V roce 2020 bylo 75 % nových EV nakupováno podnikateli a pokud se vezmou v potaz vozidla na alternativní pohony, tento podíl dosahoval až 95 %. [9] [10]

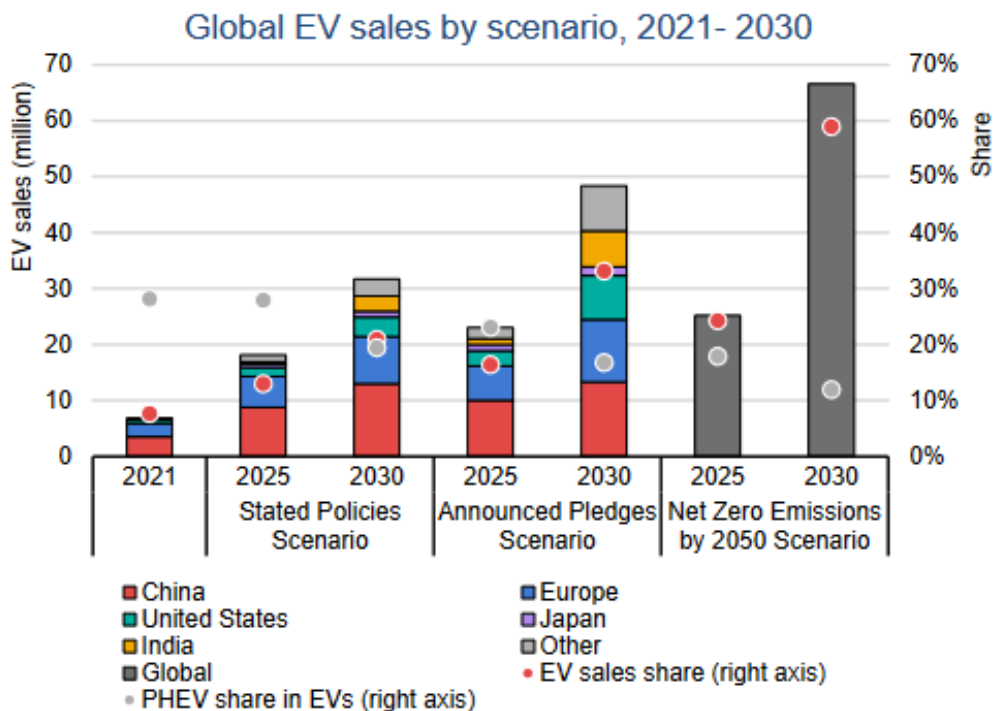


Obrázek 6: Podíl flotily osobních automobilů na alternativní pohony [9]

1.2.5. Budoucnost elektromobility ve světě

V roce 2022 jezdilo po cestách okolo 26,5 milionu elektrických vozidel, což je značný nárůst oproti 16,5 milionům v roce 2021. Vlády se více zaměřily na elektrifikaci pozemního transportu a představily cíle na snížení emisí až na úplnou bezemisnost automobilů. Vlády začaly využívat svou politickou moc na urychlení postavení nabíjecí infrastruktury. Přibližně jedné čtvrtiny automobilového trhu se v roce 2035 bude týkat 100 % prodej bezemisních vozidel nebo zákaz prodeje vozidel se spalovacím motorem. Čína nedávno představila ambice na vývoj nabíjecí infrastruktury dimenzované pro 20 milionů automobilů na alternativní pohon okolo roku 2025. Thajsko oznámilo

plány, že do roku 2030 budou 30 % domácí výroby automobilů tvořit bezemisní vozidla a do roku 2035 budou všechny nově registrovaná vozidla bezemisní. Vláda Spojených států představila první cíle, které zahrnují, aby polovinu prodaných automobilů v roce 2030 tvořila elektrická vozidla. Kanadská vláda nastavila cíl na prodej pouze bezemisních vozidel do roku 2035. Evropská unie připravila opatření na urychlení přechodu na bezemisní vozidla do roku 2035 společně s představením plánů na rozšíření dobíjecí infrastruktury. Chile je největší trh elektromobilů v Jižní Americe. V hlavním městě jezdí jedna z největších flotil elektrických autobusů mimo Čínu. Plány jsou velice podobné jako u jiných států. Do roku 2030 prodej pouze bezemisních lehkých vozidel, do roku 2035 prodej bezemisních vozidel hromadné dopravy. Další státy jako Japonsko a Indie razantně zvýšily dotace na elektromobily. [7] [8]



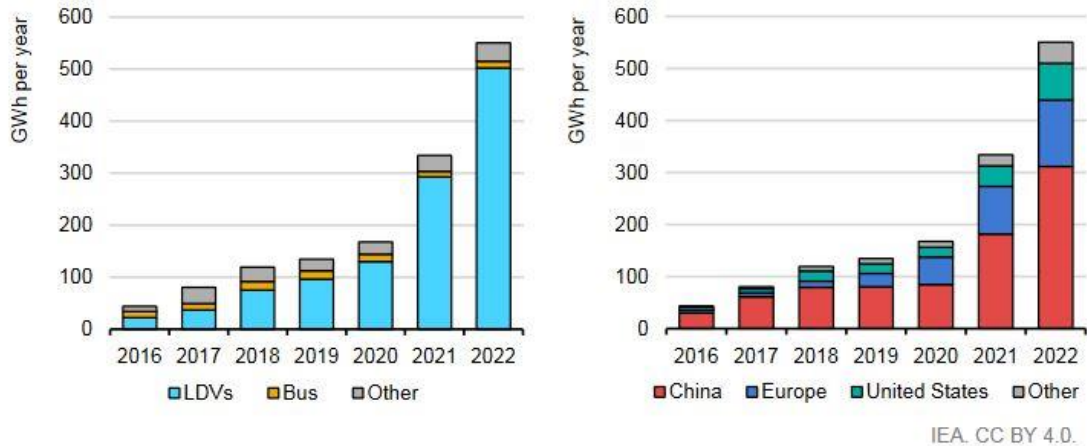
IEA. All rights reserved.

Notes: PHEV = plug-in hybrid electric vehicle. EV sales share = share of EVs (BEV+PHEV) out of total vehicle sales. PHEV share in EVs = share of PHEV sales out of EV (BEV+PHEV) sales. For the Net Zero Emissions by 2050 Scenario, only global values are reported. Sales of electric two/three-wheelers are not included in this figure.

Obrázek 7: Scénář globálních prodejů EV [7]

Poptávka po bateriích pro elektromobily se v roce 2022 zvýšila o 65 % oproti předešlému roku na hodnotu 550 gigawatt hodin. Průměrná kapacita baterie elektromobilů byla 55 kilowatthodin. Kapacita pro výrobu baterií byla dostatečná, bylo využito pouze 35 % kapacity továren na výrobu baterií, což je

pokles oproti roku 2021 o 8 %. Nízké využití továren je dáno strategickými investicemi do kapacity továren, aby uspokojily budoucí poptávku a také rozjezdem výrobních linek některých továren. Tento proces trvá obvykle 3 až 6 let. [7][8]



Notes: LDVs = light-duty vehicles, including cars and vans; In the left chart, "Other" includes medium- and heavy-duty trucks and two/three-wheelers. Battery demand refers to automotive lithium-ion batteries. This analysis does not include conventional hybrid vehicles.

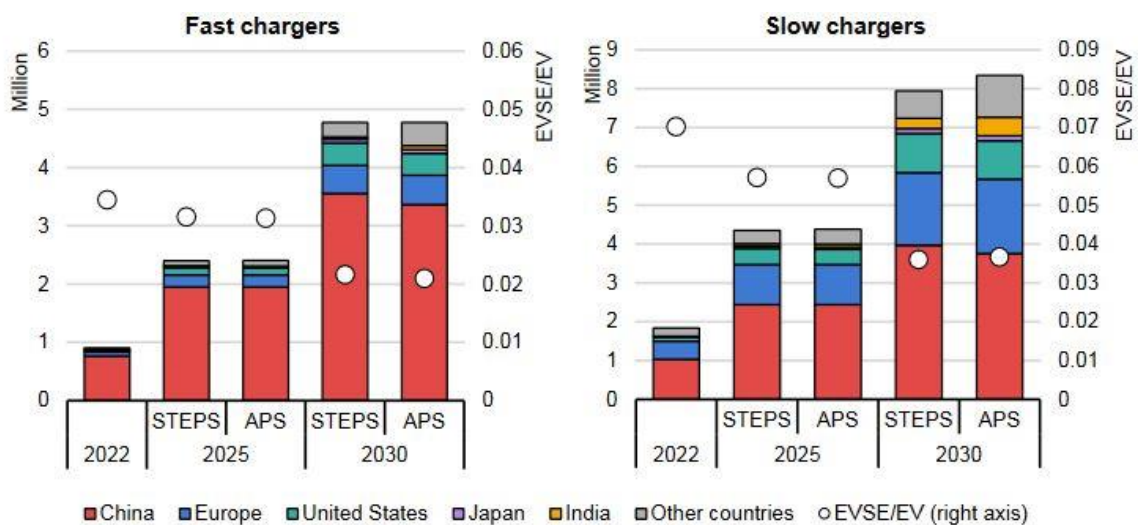
Source: IEA analysis based on EV Volumes.

IEA. CC BY 4.0.

Obrázek 8: Poptávka po bateriích pro EV dle typu vozidla a podle geografie [8]

1.2.6. Budoucnost elektromobility v ČR

Podle Obrázku 6 lze predikovat, že budou přibývat prodeje EV v České republice. Ministerstvo průmyslu a obchodu nechalo v roce 2018 připravit studii, která predikuje rozvoj elektromobility v ČR. Studie pracuje se 3 scénáři růstu. Očekávatelný scénář pracuje s daty z Národního akčního plánu čisté mobility, kdy se počítá s nasycením trhu v roce 2030. Tuto predikci lze vidět



Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario; EVSE = electric vehicle supply equipment. Regional projected EVSE stock data can be interactively explored via the [Global EV Data Explorer](#).

Obrázek 9: Počet dobíjecích stanic ve světě [8]

IEA. CC BY 4.0.

na Obrázku 10. Při porovnání s daty z webu Evropské komise za roky 2018 až 2022 je tato predikce velice přesná. Přestože se počítá s podporou prodeje vozidel pro fyzické osoby, lze očekávat udržení dominantního podílu nákupu EV podnikateli a právníckými osobami. S rostoucím podílem EV bude potřeba rozšířit dobíjecí infrastrukturu, kde se odhaduje růst na přibližně 20 tisíc dobíjecích stanic. [10]

V roce 2018 tvořily EV přibližně 0,035 % vozového parku a nové registrace tvořily 0,25 % přírůstku registrací. Pro rok 2025 se předpokládá, že EV budou tvořit 1,1 % všech vozidel a roční přírůstek bude tvořit necelých 10 %. A pro rok 2030 se počítá, že 3 % všech vozidel budou elektromobily a nové registrace budou tvořit přibližně 15 % všech nově registrovaných vozidel. [10]

Rok	Počet el. vozidel za rok	Počet el. vozidel celkem
2013	70	70
2014	230	300
2015	350	650
2016	350	1 000
2017	400	1 400
2018	700	2 100
2019	1 100	3 200
2020	2 000	5 200
2021	4 000	9 200
2022	8 000	17 200
2023	13 000	30 200
2024	17 000	47 200
2025	21 000	68 200
2026	24 000	92 200
2027	27 000	119 200
2028	30 000	149 200
2029	33 000	182 200
2030	35 000	217 200

Obrázek 10: Predikce EV v ČR [10]

2. Akumulátory pro elektrická vozidla

V současnosti se využívají různé druhy baterií pro elektrická vozidla. Některé typy baterií jsou vhodné na určité druhy použití, neboť svými parametry nevyhovují pro provoz v elektromobilech. Dříve se v elektromobilech nacházely olověné baterie a baterie typu NiMH. Využití si našly u vzniku elektromobilů na přelomu 19. století, ale postupně začaly technicky zastarávat a nahradily je lithiové baterie, které sice byly dražší, ale měly mnohem lepší poměr uskladněné energie oproti váze samotné baterie, což bylo rozhodující při výběru tohoto typu baterií. [11]

2.1. Parametry baterií

2.1.1. Napětí článků a samotné baterie

Všechny elektrické články mají nominální napětí, které udává přibližné napětí při dodávání elektrické energie. Články mohou být propojeny sériově, aby poskytovaly celkové požadované napětí. Akumulátory pro elektrická vozidla jsou obvykle specifikovány jako 6 V nebo 12 V a tyto jednotky jsou dále spojeny sériově k vytvoření požadovaného napětí. To se v praxi bude měnit. Při odběru proudu klesne napětí a při nabíjení se napětí zvýší. [12]

2.1.2. Množství uložené energie

Účelem baterie je ukládat energii. Množství energie uložené v baterii závisí na napětí a nabití. Pro množství uložené energie se používá jednotka watthodina, která vyjadřuje energii spotřebovanou při výkonu 1 watt po dobu 1 hodiny. [12]

2.1.3. Kapacita baterie

Přiřazuje se k ní velikost elektrického náboje, kterou může baterie uchovat a poskytnout. Používá se jednotka Ah (ampérhodina), což představuje elektrický náboj přenesený elektrickým proudem o velikosti 1 A po dobu 1 hodiny. Kapacita baterie, udávaná v Ah, je teoretická hodnota. Skutečná hodnota závisí na době vybíjení. Pro akumulátory elektromobilů se používá nominální hodnota kapacity pro pětihodinové vybíjení. [12]

2.1.4. Hustota energie

Hustota energie je množství elektrické energie uložené v každém kubickém metru objemu baterie. Běžně se udává v jednotkách $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$. Je to také důležitý parametr, protože lze podílem kapacity baterie (Wh) a její hustoty energie ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$) získat požadovaný objem baterie. Pokud je známý objem

baterie, může být tento objem (m^3) vynásoben hustotou energie baterie ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-3}$) pro získání hrubého odhadu množství dostupné elektrické energie. Objem baterie může mít značný vliv na design vozidla. [12]

2.1.5. Specifický výkon

Specifický výkon je množství energie, které lze získat na kilogram baterie. Je to velmi proměnlivá a spíše anomální veličina, protože výkon poskytnutý baterií závisí mnohem více na zátěži připojené k ní než na baterii samotné. I když mají baterie maximální výkon, není rozumné je provozovat na této maximální úrovni po dobu delší než několik sekund, protože by velice rychle klesala úroveň nabití a zároveň by provoz byl velice neefektivní. [12]

Normální jednotky je $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$. Některé baterie mají velmi dobrou specifickou energii, ale mají nízký specifický výkon. To znamená, že ukládají velké množství energie, ale mohou ji vydávat pouze pomalu. V případě elektrických vozidel by to znamenalo, že vozidlo by mohlo urazit velikou vzdálenost při velmi pomalé jízdě. [12]

2.1.6. Energetická účinnost

Toto je další velmi důležitý parametr a definuje se jako poměr elektrické energie dodané baterií k množství elektrické energie, která je potřebná k návratu do stavu před vybitím. Silný argument pro použití elektromobilů spočívá v účinném využití energie s následným snížením celkových emisí. Tudíž je vysoká energetická účinnost žádoucí. Jak bylo řečeno v předchozích sekcích, energetická účinnost se bude velmi lišit v závislosti na tom, jak je baterie použita. Pokud je baterie rychle nabíjena a vybíjena, energetická účinnost se výrazně snižuje. Nicméně slouží pro porovnávání baterií, podobně jako spotřeba paliva u spalovacích automobilů. [12]

2.1.7. Samovolné vybíjení

Většina baterií se pomalu vybíjí, přestože se zrovna nepoužívají. Tomuto jevu se říká samovybíjení. Jedná se o důležitou vlastnost, která způsobuje, že nelze baterie nechat bez nabíjení delší dobu. Rychlost samovybíjení se liší v závislosti na typu baterie a dalších faktorech jako je teplota. Vyšší teploty výrazně zvyšují samovybíjení. [12]

2.1.8. Teplota a chlazení baterií

Baterie běžně pracují při pokojové teplotě, avšak některé potřebují pro svůj provoz vyšší teploty a musí být nejprve zahřívány a poté chlazeny. U jiných

baterií se naopak výkon snižuje při nízkých teplotách, což je nežádoucí, ale lze tento problém řešit ohřevem baterie. Při výběru baterie musí návrhář brát v úvahu potřeby baterie ohledně teploty, ohřevu a chlazení a musí je zohlednit během návrhu vozidla. [12]

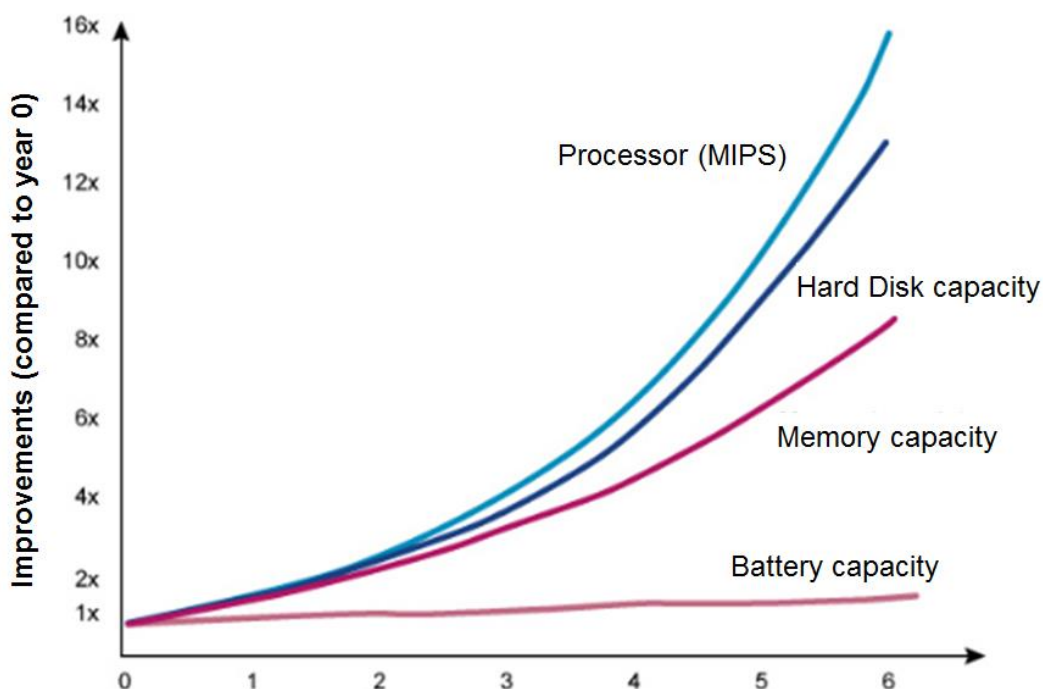
2.1.9. Životnost baterie a počet nabíjecích cyklů

Většina dobíjecích baterií vydrží jen několik stovek hlubokých cyklů do 20 % kapacity baterie. Nicméně, přesný počet závisí na typu baterie, stejně jako na detailech návrhu a na tom, jak je baterie používána. Tento parametr je velmi důležitý ve specifikacích dané baterie, protože odráží životnost baterie, což se zase odráží v nákladech na provoz elektromobilu. [12]

2.2. Vývoj baterií

Elektromobily jsou často kritizovány kvůli omezenému dojezdu na jedno nabití, což je dáno zejména stále pomalým vývojem baterií v porovnání s jinými elektronickými součástkami, které se každé dva roky zdvojnásobují v parametrech podle Moorova zákona. Omezení kapacity baterií se řeší již od dob dotykových telefonů, kdy bylo nutné zkrátit dobu nabíjení. [13]

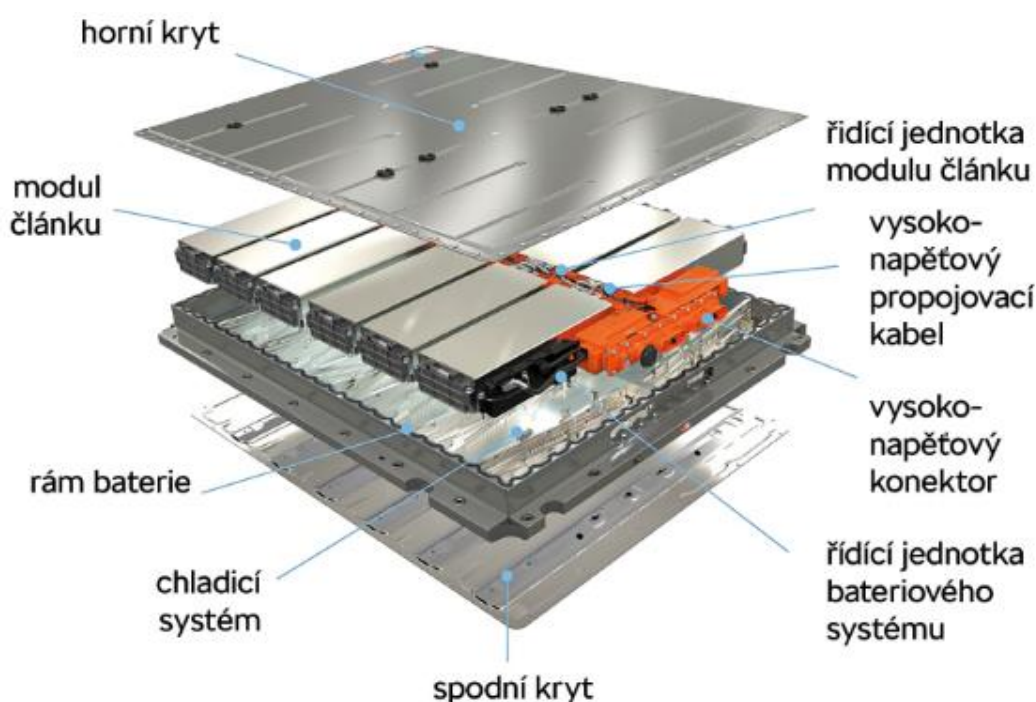
Nicméně v posledních letech se vývoj baterií zrychlil a jejich kapacita se výrazně zlepšila. Například první generace baterií od LG v roce 2010 umožňovala dojezd menší než 200 km a nabití na 80 % kapacity trvalo 60 minut, zatímco baterie třetí generace používané v roce 2020 umožňuje dojezd více než 500 km a nabíjení na 80 % kapacity trvá pouhých 30 minut. [14]



Obrázek 11: Vývoj elektronických součástek od roku 1991 [13]

2.3. Složení baterií

Akumulátorový systém obsahuje tisíce pospojovaných druhotných bateriových článků zapojených do série, aby bylo dosaženo nutného napětí na výstupu. V bateriovém článku se nachází katoda a anoda. Dále se zde nachází separátor oddělující tyto elektrody a elektrolyt, který umožňuje pohyb iontů lithia při nabíjecím a vybíjecím cyklu. Dohromady články vytvoří bateriový modul chránící články před poškozením. Tyto moduly se následně zapojují paralelně, aby vytvořily požadovanou kapacitu, pak se nazývají jako battery pack. V elektromobilech se může nacházet více battery packů, které tvoří bateriový systém vozidla. [7] [15]



Obrázek 12: Baterie modelu ENYAQ IV [16]

2.4. Aktuální typy baterií pro EV

V nově prodávaných elektrických vozidlech se nejčastěji vyskytují právě lithium-iontové akumulátory. Mají výbornou energetickou hustotu, téměř se samy nevybíjejí a mají dostatečnou kapacitu. Nejčastěji využívané technologie se liší materiálem katody. [11]

2.4.1. Lithium titaničitan ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Tento typ baterie je také označován jako LTO. LTO baterie se často využívají pro elektrické pohony, záložní zdroje a solární systémy využívané v pouličním osvětlení. Lithium-titanátové baterie umožňují rychlonabíjení a dodávají

vysoký proud při vybíjení. Tento typ baterie má výhodu vysoké bezpečnosti. Na druhou stranu jsou tyto baterie poměrně drahé a mají velmi špatnou hustotu energie. [17]

2.4.2. Lithium železo fosfát (LiFePO₄)

Lithium-fosfát je označován také zkratkou LFP a nabízí vysoký elektrochemický výkon spolu s nízkým vnitřním odporem. Hlavní výhodou baterie je schopnost dodávat velké proudy a její dlouhá životnost, stejně jako vysoká tepelná stabilita a skvělá bezpečnost. LFP baterie je navržena pro práci při plném nabití a je méně namáhaná než jiné typy lithium-iontových baterií při skladování za vysokého napětí po delší dobu. Samovybíjení baterie je rychlejší než u jiných typů lithium-iontových baterií, což může vést k problémům se stárnutím. LFP baterie nesnesou jakoukoliv vlhkost, což může negativně omezit počet nabíjecích cyklů baterie. [17]

2.4.3. Lithium mangan oxid (LiMn₂O₄)

Lithium-manganové baterie jsou označovány také jako LMO a využívají se pro elektrické nářadí, lékařské přístroje, a především pro hybridní a elektrická vozidla. Vzhledem k uspořádání minerálů vytvářejících strukturu baterie dochází ke zlepšení průchodu iontů na elektrody, což snižuje vnitřní odpor. Díky tomu se nabíjení stává rychlejším a při vybíjení lze dosáhnout vyššího proudu. Další výhodou této struktury je skvělá tepelná stabilita a vysoká bezpečnost, což se projevuje v delší životnosti baterie. [17]

2.4.4. Lithium nikel mangan kobalt oxid (LiNiMnCoO₂)

NMC je zkratka pro jeden z nejúspěšnějších lithium-iontových systémů. Tento systém využívá kombinaci niklu a manganu. Nikl má vysokou hustotu energie, ale nízkou tepelnou stabilitu, zatímco mangan vytváří strukturu, která snižuje vnitřní odpor, ale má nižší hustotu energie. Kombinací těchto kovů vzniká baterie NMC, která se využívá v různých elektrických nářadích a jiných elektrických zařízeních. Obvykle se pro katodu kombinuje jedna třetina niklu, jedna třetina manganu a jedna třetina kobaltu. Tato kombinace látek snižuje náklady na suroviny, protože se využívá menší množství drahého kobaltu. [17]

2.4.5. Lithium kobalt oxid (LiCoO₂)

Tento typ baterie je často označován zkratkou LCO a je oblíbený pro využití ve smartphonech, laptotech a tabletech. Katoda je z oxidu kobaltu a anoda z grafitového uhlíku. Během vybíjení se ionty lithia pohybují od anody ke katodě, přičemž katoda má složitou vrstvenou strukturu. Nevýhodami

kombinace LCO je omezená životnost, špatná tepelná stabilita a velmi omezené možnosti zatížení. [17]

2.4.6. Lithium nikl kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO₂)

Tento typ baterie se označuje také zkratkou NCA. NCA baterie se podobají NMC bateriím v některých vlastnostech, jako například vysoké hustotě energie při relativně malém výkonu a dlouhé životnosti. Na druhou stranu však vykazují horší bezpečnostní vlastnosti a jsou dražší na výrobu. [17]

Tabulka 1: Srovnání parametrů uvedených baterií [17]

Typ baterie	Napětí [V]	Hustota energie [Wh/kg]	Životnost [cykly]	Max teplota [°C]	Cena [\$/kWh]
LTO	2,4	50–80	3,000–7,000	300	1000
LFP	3,3	90–120	2000 i víc	270	580
LMO	3,7	100–150	300–700	250	420
NMC	3,7	150–220	1000–2000	210	420
LCO	3,6	150–200	500–1000	150	450
NCA	3,6	200-260	500	150	350

2.5. Budoucnost baterií pro EV

2.5.1. Lithium síra (LiS)

Lithium-sírný (LIS) akumulátor se zdá být nejslibnějším řešením do budoucna. Náklady na těžbu síry jsou mnohonásobně nižší než u jiných materiálů a světové zásoby síry se jeví jako dostatečné. Teoretická kapacita sirného akumulátoru je asi 10krát větší než kapacita lithiových akumulátorů při nižším napětí. Navíc má vysokou gravimetrickou hustotu energie. Nevýhodami jsou objemové změny během cyklů, které mohou dosahovat až 80 %. Tyto změny mohou způsobit kolaps bateriového systému. Rozpouštění síry během nabíjecích cyklů zapříčiňuje vznik nežádoucích polysulfidů, které se usazují na povrchu anody a snižují její kapacitu. Síra nevede dobře proud, proto je nutný přídavek aditiv, aby se zvýšila její vodivost. [18]

2.5.2. Lithium sodík (LiNa)

Mezi další prototypy patří sodíkové baterie. Výhodami sodi-iontových baterií je, stejně jako u LIS, snadná dostupnost sodíku, který je čtvrtým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře a dále levná těžba. Tyto baterie mají delší životnost v porovnání se současnými akumulátory. Nevýhodou je větší velikost iontů sodíku, což znamená nižší gravimetrickou hustotu uložené energie. Proto se spíše uvažuje o využití LINA baterií pro velkokapacitní zásobníky energie. [19]

2.5.3. Lithium kyslík (LiO₂)

Dalším typem je lithio-kyslíkový akumulátor, který byl poprvé představen v roce 2009. Mezi výhody se řadí nízká hmotnost, ekologická nezávadnost a velká teoretická hustota energie, která se může srovnávat s benzínem. Problémem je potřeba otevřeného designu baterie, aby byl zajištěn přívod kyslíku a s tím spojené filtrování venkovního vzduchu od jiných složek a částic. Zatím jsou prototypy tohoto typu pouze v laboratorních podmínkách a dosahují jen několika málo nabíjecích cyklů. Kromě toho je zapotřebí 100 % čistý kyslík, což způsobuje problémy s oxidem lithným, který se během nabíjení vytváří. Tento oxid není možné zpětně rozložit, a tak brání přívodu dalšího kyslíku během nabíjení a výrazně snižuje kapacitu akumulátoru. [20]

2.5.4. Silikonové baterie

Několik společností se rozhodlo zkoumat využití silikonu jako materiálu pro budoucí akumulátory. Hlavním motivem je nahrazení grafitové anody, která je často využívána, kvůli vyšší kapacitě silikonu a až 8x rychlejšímu nabíjení. Nicméně zatím jsou zde problémy, které brání masovému nasazení této technologie. Patří mezi ně rapidní degradace elektrody způsobená nadměrnými, až trojnásobnými, změnami struktury a objemu během procesu lithiace/delithiace. Dále nestabilita na rozhraní elektrody a elektrolytu a nízká elektrická vodivost materiálu. [21]

2.6. Degradace baterie

Proces stárnutí baterie lze rozdělit na dvě části. Stárnutí baterie podle počtu nabíjecích cyklů a na degradaci baterie v rámci stárnutí. Přesněji, kolik let je baterie provozována. Každá z těchto částí se podílí jiným způsobem na stárnutí a zhoršování parametrů baterie. Degradace parametrů podle počtu cyklů je ovlivněna podmínkami při využívání elektromobilu. Jedná se o provozní teplotu baterie, velikost nabíjecích proudů (rychlost nabíjení), konstantní režim jízdy. Stárnutí baterie je ovlivněno skladovacími podmínkami, tedy jestli

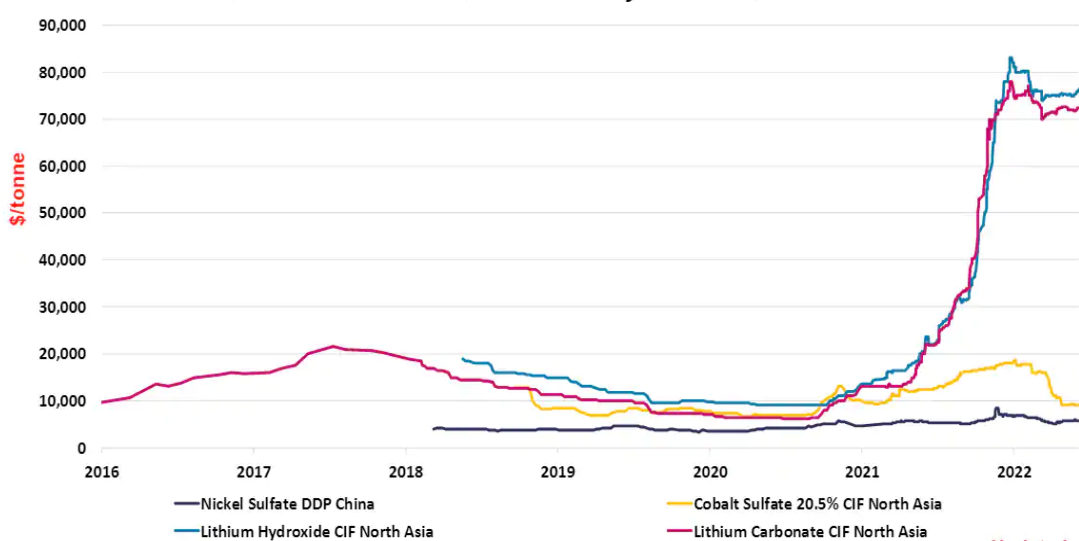
je elektromobil vystaven vysokým nebo nízkým teplotám, nadměrné vlhkosti a jak dlouho není elektromobil v provozu. Stárnutí baterie je nejvíce viditelné na snížení kapacity baterie a na změnách vnitřního odporu baterie, který ovlivňuje, jak vysoké proudy budou baterií procházet a tudíž, jak moc se baterie bude zahřívat. Snížení kapacity akumulované energie baterie ovlivňuje možnosti budoucího využití v druhém životní, cyklu. Zhoršování parametrů baterie je nejspíše největší problém vyskytující se u myšlenky druhého životního cyklu nepoužitelných baterií z EV. Vzhledem k tomu, že o znovupoužití baterií se začalo diskutovat teprve nedávno, neexistuje dostatek dat ohledně baterií vyřazených z elektrických vozidel. Tyto data se teprve musí naměřit a díky nim se následně zpřesní stávající matematické modely na předpověď životnosti baterií. Jedná se o nákladnou činnost, která brzdí rozvoj tohoto odvětví, ale je důležitá pro bezpečný provoz daných baterií. [22] [23]

2.7. Životní cyklus baterií EV

S rostoucím podílem elektrických vozidel na silnicích bude přibývat baterií, které budou již nevhodné k dalšímu použití v elektromobilech. Tyto baterie jsou po konci životnosti v Evropských zemích recyklovány, ale v jiných částech světa je běžná likvidace nebo skládkování. Baterie neztratily veškerou kapacitu, ta se nachází okolo 80 % své původní hodnoty. Tudíž by mohly najít uplatnění v odvětvích, kde nezávisí na energetické hustotě. Obecně se takové uplatnění nazývá anglickým názvem second life cycle of batteries. Jedná se o snahu celkového prodloužení životnosti baterií, lepšího zacházení se vzácnými materiály a snížení dopadu na životní prostředí. [24] [25]

Pricing of Key Li-Ion Battery Metals

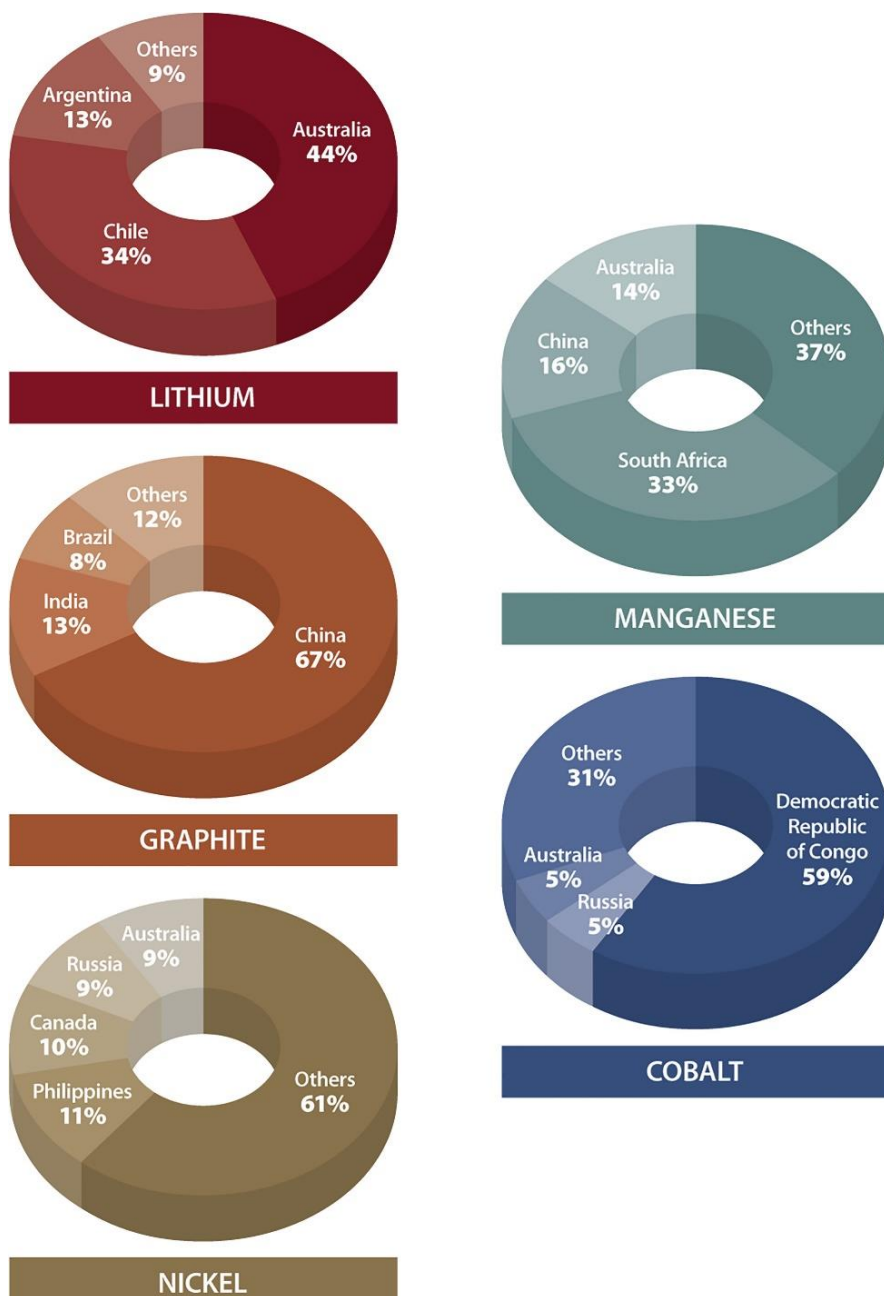
Nickel Sulfate, Cobalt Sulfate, Lithium Hydroxide, Lithium Carbonate



Obrázek 13: Ceny klíčových kovů v bateriích [26]

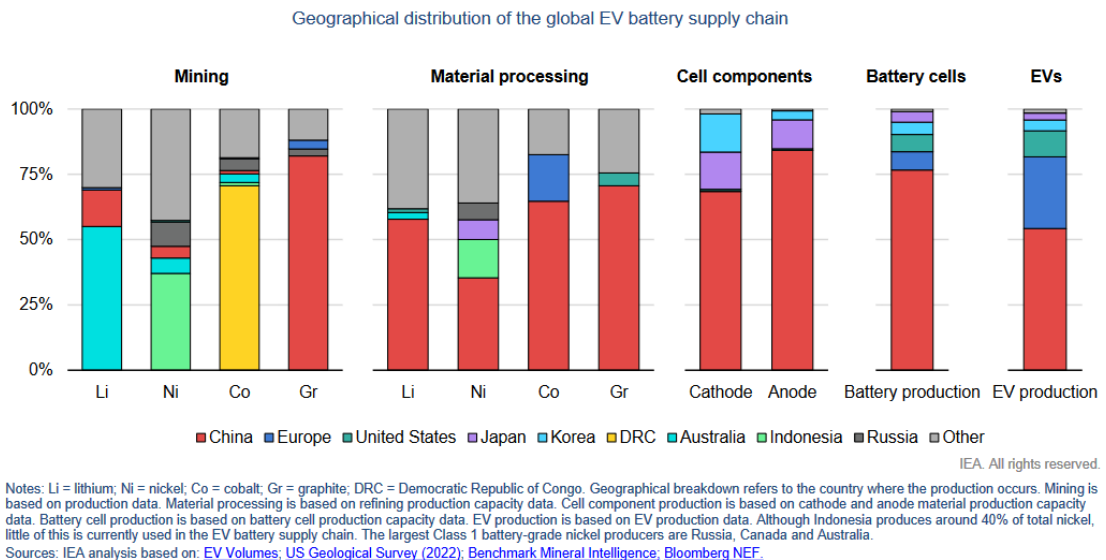
2.7.1. Výroba baterie

Baterie elektrického vozidla je jedna z nejdůležitějších částí celého elektromobilu. Akumulátor nejvíce ovlivňuje nejdůležitější parametry vozidla, jako jsou dojezd vozidla na úplné nabití a finální cenu vozidla. Počátek životního cyklu baterie začíná v dolech těžbou kovů. Největší naleziště lithia jsou v Austrálii a Chile. Demokratická republika Kongo má největší zásoby kobaltu a v Číně a v Jižní Africe se nachází naleziště manganu. Podíl jednotlivých producentů materiálů pro baterie lze vidět na Obrázku 14. [22]



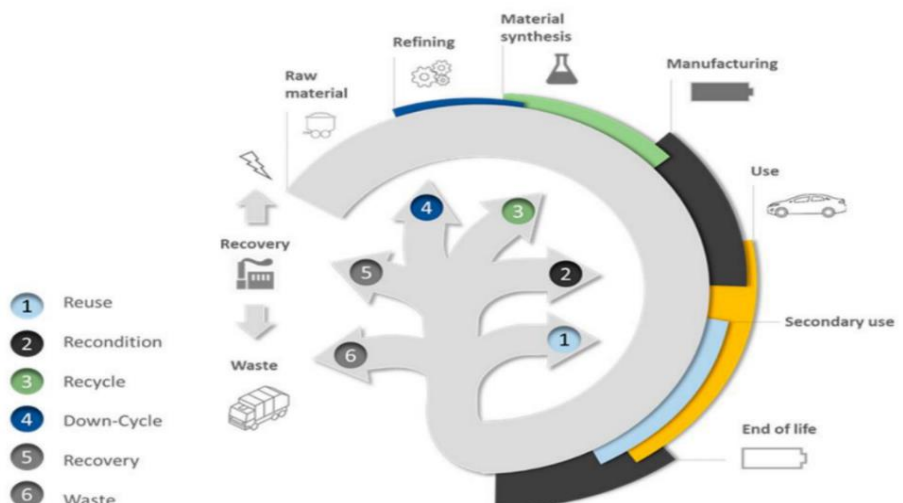
Obrázek 14: Světová produkce hlavních materiálů pro lithiové baterie [22]

Samotná výroba článků akumulátoru probíhá v dnešní době hlavně v Číně, USA, Koreji a Japonsku. Vyrobené baterie nacházejí uplatnění v různorodých aplikacích po celém světě. Nejvíce se uplatňují v oblasti elektromobility. [22]



Obrázek 15: Geografické rozložení výrobního řetězu baterií pro EV [7]

V elektrickém vozidle se ale životnost článků nevyužije naplno. Baterie degraduje a ovlivňuje dojezd vozu. Celkový dojezd snižuje jízdní komfort uživatele elektromobilu. Již samotní výrobci elektronicky ovlivňují využití baterie tak, aby ke snížení kapacity došlo co nejpозději. Nejčastěji snižují využitelnou kapacitu baterie tak, aby nedocházelo ke kompletnímu vybití baterie. Při snížení kapacity baterie pod kritickou úroveň jsou vyměněny za nové baterie. Použité baterie jsou testovány, aby bylo zjištěno, že nejsou nijak závadné, a tedy vhodné pro další využití. Při poškození baterií se recyklují bez dalšího využití, nerecyklovatelné části jsou zlikvidovány. Kompletní životní cyklus baterie při využití myšlenky second life si lze prohlédnout na Obrázku 16. [22]

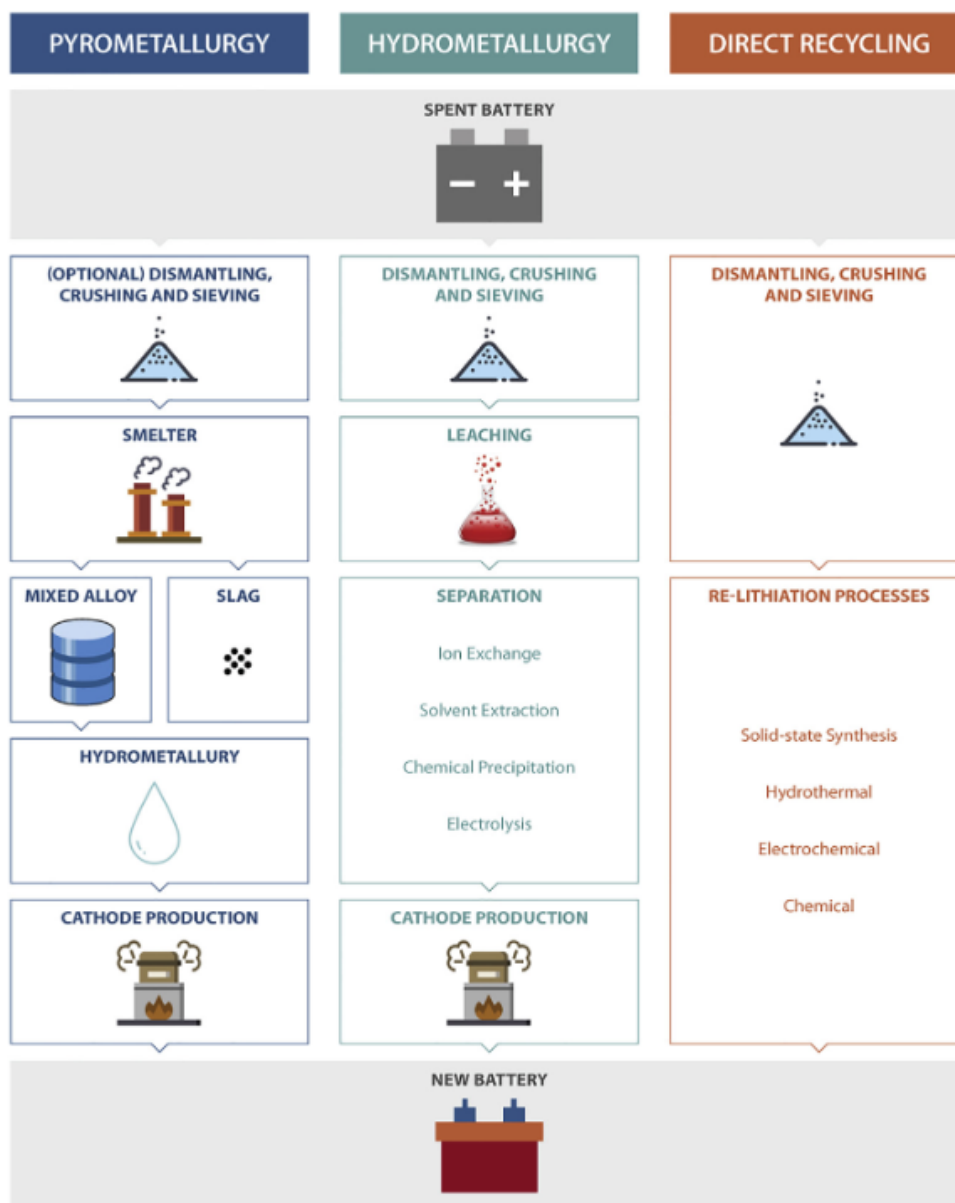


Obrázek 16: Životní cyklus baterie [21]

2.7.2. Recyklace

Recyklace lithiových baterií je technologicky a energeticky velmi náročná. Vždy záleží na přesném složení baterie. Problém s lithiovými bateriemi je ten, že se nesmí skladovat na skládkách, protože by časem mohly kontaminovat okolí toxickými látkami, hrozí dokonce hoření a možný výbuch. [27]

Recyklace byla úspěšně implementována pro olověné akumulátory a nikel-metal-hydridové (NiMH) baterie. Například v USA i v Evropě se míra recyklace olověných baterií blíží k 100 %. Sběr těchto baterií je finančně podpořen, to ale neplatí pro lithiové akumulátory. Míra recyklace malých baterií využívaných ve spotřební elektronice je velice nízká, protože sběr lithiových baterií prakticky neexistuje. Recyklace lithiových baterií se potýká s většími výzvami než její předchůdci, olověnými akumulátory nebo NiMH. Existuje mnoho druhů katod využívajících různé prvky nebo dokonce jejich kombinaci a tento počet ještě naroste vzhledem k probíhajícím výzkumům v této oblasti. Přisun použitých baterií pro recyklační firmy výrazně kolísá a zahrnuje baterie s různými typy katod. Pokud recyklační firma nedokáže získat čistý a kvalitní materiál, bude zisk z recyklace nízký a nekonzistentní. Protože katodové materiály tvoří přibližně 40 % materiálové hodnoty typických baterií, je recyklace těchto materiálů zvláště důležitá. Recyklace dalších bateriových materiálů, jako jsou anody, fólie a elektrolyty, dále zvyšuje marži recyklačního procesu, což zlepšuje udržitelnost recyklačního ekosystému. Tři různé technologie recyklace baterií jsou znázorněny na Obrázku 17. První dvě metody jsou zavedené a začínají fungovat na průmyslové úrovni, zatímco třetí je v současné době na úrovni laboratorních a pilotních projektů. Nové přístupy v těchto třech kategoriích jsou předmětem rozsáhlého vývoje v průmyslu a akademické sféře. [22] [28]



Obrázek 17: Recyklační technologie [22]

2.7.2.1. Pyrometalurgický proces

Pyrometalurgický proces je vysokoteplotní tavící proces, který obvykle probíhá ve dvou krocích. Nejprve jsou baterie spáleny v peci, kde se látky rozloží a organické materiály, jako jsou plasty a separátory, jsou spáleny. Poté jsou vytvořeny nové slitiny pomocí redukce uhlíkem. V následujících krocích jsou kovy odděleny tak, aby bylo možné získat čisté materiály. V tomto procesu jsou s největší efektivitou získávány pouze drahé kovy jako kobalt, nikl a měď. Anoda a elektrolyt jsou zoxidovány a jsou využity jako zdroj energie pro proces. Lithium je zachyceno ve strusce a může být získáno pomocí dalšího zpracování (což přináší náklady a spotřebu energie). Nedávný nárůst hodnoty lithia umožnil jeho získání některým recyklačním firmám. Hliník slouží jako redukční činidlo v peci a snižuje spotřebu paliva. Pyrometalurgické recyklační

procesy doposud vykazují relativně ziskovou činnost díky vysokému obsahu kobaltu v lithiových bateriích používaných v přenosných elektronických zařízeních. Jak se baterie využívané v elektromobilech přesouvají směrem k nižšímu obsahu kobaltu, bude klesat atraktivita těchto procesů. Hlavní výhody pyrometalurgických procesů jsou jednoduchý a vyspělý proces, není potřeba třídění jednotlivých složek baterie a výstupní materiály jsou základními kameny pro výrobu nových baterií. Mezi nevýhody patří vznik CO₂ a vysoká spotřeba energie během tavení. Dále slitina vyžaduje další zpracování, což zvyšuje celkové náklady na recyklaci a při recyklaci se získá zpět pouze 30 % hmotnosti baterie. V neposlední řadě není tato metoda příliš perspektivní, protože se průmysl přesouvá ke sníženému obsahu kobaltu v bateriích a jeho postupnému nahrazování jinými prvky. [22]

2.7.2.2. Hydrometalurgický proces

V tomto procesu se získávají materiály pomocí luhování v kyselinách nebo zásadách. Tyto materiály se následně koncentrují a očišťují. U lithiových baterií jsou ionty v roztoku odděleny různými technologiemi (iontovou výměnou, extrakcí rozpouštědly chemickým srážením, elektrolýzou) a sráženy jako různé sloučeniny. Mezi hlavní výhody hydrometalurgického procesu patří získání materiálů s vysokou čistotou. Další výhody jsou, že lze získat většinu složek z baterií, nízkoteplotní provoz a nižší emise CO₂ v porovnání s pyrometalurgickým procesem. Mezi nevýhody hydrometalurgických procesů se řadí třídění částí baterií, které vyžaduje zvýšený skladovací prostor a přidává se do procesních nákladů a složitosti. Dále výzvy při separaci některých prvků v roztoku, kvůli jejich podobným vlastnostem, což může vést ke zvýšeným nákladům a v neposlední řadě výdaje na čištění odpadní vody. [22]

2.7.2.3. Proces přímé recyklace

Přímá recyklace je způsob získávání materiálu, při kterém jsou aktivní složky baterií s lithium-iontovými bateriemi přímo získány a obnoveny, přičemž si zachovávají původní složení. V tomto procesu jsou složky baterie odděleny především pomocí fyzikálních metod separace, magnetické separace a mírné tepelné úpravy, aby nedocházelo k chemickému rozpadu aktivních složek, které jsou hlavním cílem získávání. Aktivní složky jsou poté vyčištěny a povrchové defekty jsou opraveny opětovným lithiováním nebo hydrotermálními procesy. Nicméně katody mohou být směsí více než jedné aktivní složky a jejich oddělení nemusí být ekonomicky nebo technicky proveditelné. Navíc katody obsahující vícero složek nelze zatím oddělit a představují tak významné výzvy při třídění. Hlavní výhody tohoto přímého

recyklačního přístupu zahrnují relativně jednoduchý proces. Dále aktivní složky mohou být přímo znovupoužity po regeneraci. Přímá recyklace přináší významně nižší emise a méně sekundárního znečištění ve srovnání s pyrometalurgií a hydrometalurgií. Mezi hlavní nevýhody přímého recyklování patří potřeba přesného třídění na základě přesné chemie aktivních složek. Dále obtíže s garancí čistoty materiálů a nedotčení krystalové struktury, která nemusí splňovat přísné standardy požadované bateriovým průmyslem. Přímá recyklace je zatím neověřená technologie, která existuje pouze v laboratorním měřítku. [22]

2.7.3. Repasování

Při úspěšném zvládnutí testování se převezde na repasování do další továrny, kde se zjišťuje úbytek kapacity baterie. Při vysokém výsledku okolo 88% původní kapacity se baterie znovu využije ve stejném odvětví jako při prvotní části životního cyklu. Nejčastěji jako záložní baterie, při výměně poškozených baterií. Předpokládá se, že počet baterií na konci svého životního cyklu dosáhne mezi lety 2025 až 2033 50 % poptávky po nových bateriích pro EV. Dle nákladově-přínosové analýzy od M. Foster, 2014 [28] zahrnující vysoké počáteční náklady na postavení nové továrny na repasování, provozních, dopravních a manipulačních nákladů umožňuje repasování použitých baterií ušetřit až 40 % nákladů na pořízení nových baterií. I kdyby byly náklady na postavení továrny desetinásobné, repasování by bylo stále ekonomicky výhodné. Repasování zahrnuje diagnostiku, částečné rozložení battery packů, výměnu poškozených buněk nebo modulů a následné opětovné sestavení do nových battery packů. [22] [29]

Spiers New Technologies, americký startup sídlící v Oklahomě, nabízí kompletní služby týkajících se baterií přes opravu, repasování a změnu účelu baterií pro výrobce automobilů. Global Battery Solutions opravuje elektroniku již od roku 1958 a nedávno se firma v Michiganu začala zabývat opravou baterií pro EV. GBS nabízí opravu, repasování, přeměnu baterií pro jiný účel a recyklaci, v závislosti na stavu degradovaných baterií. Firma uvádí, že renovované baterie mohou snížit náklady na výměnu o více než 70 %. [22]

2.7.4. Nové účely baterie

Baterie, které nedosahují takovýchto hodnot, ale mají kapacitu aspoň dvě třetiny původní hodnoty se využijí při jiných účelech. Tento proces začíná rozebráním bateriových systémů na bateriové packy, moduly nebo články. Jednotlivé komponenty jsou překontrolovány a podle potřeby opraveny. Poté

jsou části znovu smontovány podle budoucí potřeby a prodány společnostem starajících se o využití těchto baterií. Takovéto baterie mají široký záběr možných využití. U domácností můžou nalézt uplatnění pro ukládání elektrické energie z domácích obnovitelných zdrojů. Výhoda znovupoužitých baterií je jejich škálovatelnost, tudíž můžou najít uplatnění při vyrovnávání špiček rozvodné sítě, popřípadě by je bylo možné využít pro tzv. start ze tmy při blackoutech. Na konci druhého životního cyklu jsou baterie již dále nepoužitelné a jejich oprava by se nevyplatila, z tohoto důvodu se následně recyklují a materiály se následně využívají pro výrobu nových baterií. Recyklace je v EU povinná, ale protože se ekonomicky stále nevyplácí, v jiných částech světa se mnohdy nevyužívá. [22] [29]

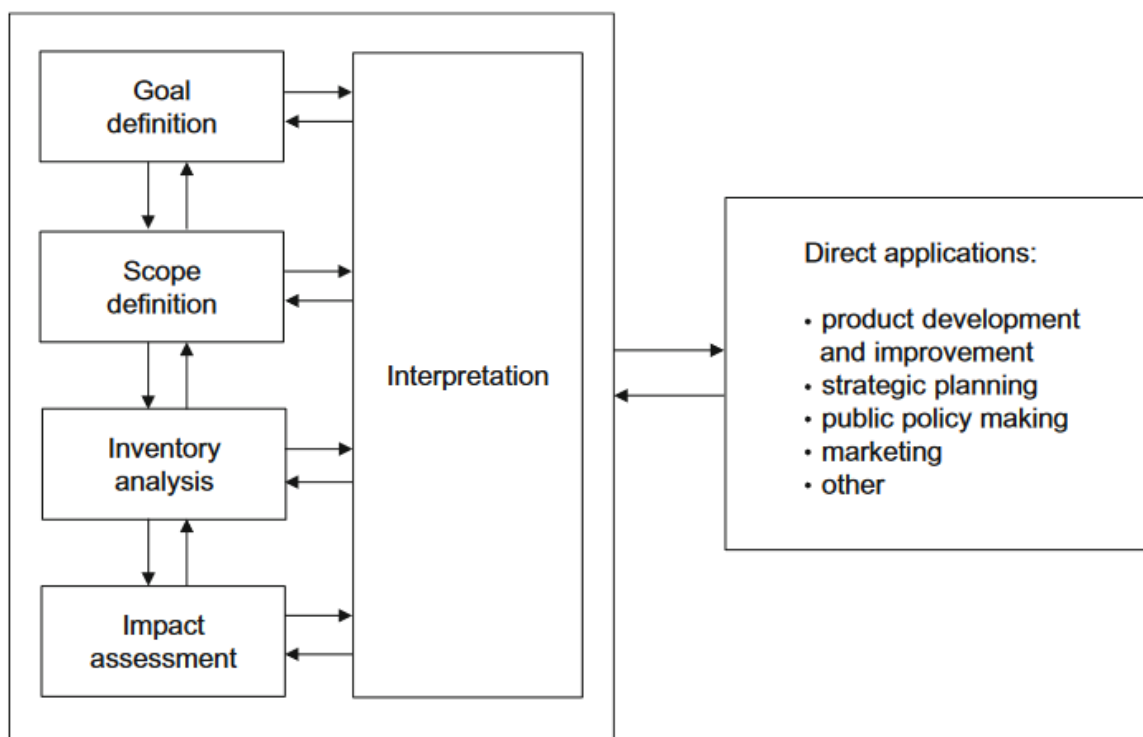
Jako příklad možného využití jsou přepracované baterie od Nissanu použity v systému xStorage. XStorage Home je integrovaný solární a úložný systém energie pro domácnosti, který lze škálovat, takže lze využít pro napájení podniků s vysokými nároky na spotřebu energie. Největším bateriovým úložištěm s využitím druhotných baterií v Evropě je Amsterdam ArenA (4 MW; 4 MWh), která využívá 280 baterií Nissan LEAF pro záložní účely. Jako další příklad GM využil 5 kusů baterií z chevroletu volt pro napájení datového centra společnosti v Milfordu v Michiganu. [22]

Při myšlence second life se nesmí opomenout, že prodlužováním životního cyklu baterií se šetří nejen financemi, vzácnými materiály, ale i energií, která by byla spotřebována při výrobě nových baterií. Ruku v ruce s tím jde snížení vypouštění emisí poškozujících životní prostředí. Více než polovina těchto emisí během životního cyklu baterie se týká procesu výroby baterie. [30]

3. Popis metodiky life cycle assessment

Metoda LCA se používá pro hodnocení dopadů produktů na životní prostředí a zahrnuje všechny fáze životního cyklu produktu nebo výrobního systému. Tato metoda zahrnuje vstupující materiály, energie a dopravu potřebnou pro výrobu produktu, jeho používání, a nakonec i recyklaci nebo likvidaci. [30]

LCA se dělí na 4 jednotlivé fáze. První je definování cílů a rozsahu, další je inventarizační analýza a následné hodnocení dopadů a na závěr se výsledky interpretují. [31]



Obrázek 18: Proces LCA převzatý ze standardů ISO 14040 [31]

3.1. Definice cíle a rozsahu

Definice cílů a rozsahu je prvním krokem, který zahrnuje přesné stanovení hranic systému, jeho rozhraní mezi výrobním systémem a jeho okolím, dále stanovení důvodů, proč a pro koho se provádí studie a jak budou výsledky využity. Součástí je rovněž stanovení funkce, funkční jednotky a referenčního toku. Dále je nutné určit klíčové předpoklady a metodiku hodnocení. [32] [33]

3.2. Inventarizační analýza

Druhá fáze zahrnuje inventarizační analýzu, což znamená shromažďování dat a následné vytvoření soupisu všech elementárních toků spojujících výrobní

system se životním prostředím. Jedním z největších výzev této fáze je alokace dat, protože jeden výrobní systém může vytvářet více produktů. Alokace se vyskytuje při nemožnosti přiřazení toků k jednotlivým produktům. [32] [33]

Obvykle se používá specializovaný software pro modelování produktového systému. Výsledkem je inventarizační tabulka, která popisuje jednotlivé fáze životního cyklu a jejich dopady na životní prostředí vztahující se ke specifické funkční jednotce. Funkční jednotka je definována jako funkce, kterou produkt plní během uživatelské fáze svého životního cyklu. [32] [33]

3.3. Hodnocení dopadů životního cyklu (LCIA)

Hodnocení dopadů životního cyklu se v třetí fázi zaměřuje na kvantifikaci negativních dopadů na životní prostředí, které byly identifikovány v inventarizační analýze. Tato fáze se skládá z tří částí: klasifikace, charakterizace a normalizace. [33]

Klasifikace se věnuje rozdělení negativních dopadů do jednotlivých kategorií podle toho, jakým způsobem ovlivňují životní prostředí. Charakterizace je proces, při kterém jsou negativní dopady kvantitativně vyhodnoceny a převedeny na ekvivalentní jednotky pomocí charakterizačních faktorů. Tímto způsobem vznikají indikátory kategorií dopadu, které umožňují porovnání produktových systémů. Normalizace se provádí pouze v některých případech a slouží ke zjištění, jak se daný produktový systém porovnává s ostatními produktovými systémy z hlediska regionálních nebo politických preferencí. Výsledkem LCIA fáze je charakterizační profil, který obsahuje indikátory kategorií dopadu vyjádřené v konkrétních hodnotách a ekvivalentních jednotkách. [32],[33]

3.4. Interpretace životního cyklu

Interpretace, čtvrtá fáze hodnocení dopadů životního cyklu, zahrnuje celkové zhodnocení významu všech zjištění v kontextu stanovených cílů a účelů studie. Součástí této fáze je také provedení kontroly výsledků, analýza citlivosti a sestavení závěrečné zprávy. [34]

3.5. Kategorie dopadu

Různé problémy životního prostředí jsou způsobeny elementárními toky produktového systému, které jsou výsledkem lidské činnosti. Tyto problémy jsou klasifikovány do kategorií dopadu a existují dva základní typy rozdělení. První typ rozdělení je založen na geografickém rozsahu a zahrnuje globální, regionální a lokální dopady. Globální dopady zahrnují například globální

oteplování, úbytek stratosférického ozonu a toxicitu persistentních látek. Regionální dopady jsou obvykle difuzně šířené látky, které působí na stejném místě jako jejich zdroj, jako je například eutrofizace, acidifikace a vznik fotooxidantů. Lokální dopady jsou způsobeny bodovým zdrojem znečištění a působí v maximálním dosahu několika kilometrů. Tyto lokální dopady mohou zahrnovat ekotoxicitu, úbytek obnovitelných zdrojů, produkci odpadů, využívání krajiny, hluk a humánní toxicitu. [34]

Další kategorizace dopadů zahrnuje surovinové a intervenční účinky elementárních toků. Surovinové dopady zahrnují úbytek potřebných surovin, zatímco intervenční dopady jsou účinky toků elementů, které ovlivňují životní prostředí. Důležité je také zohlednit časový rámec studie, protože různé dopady se projevují v čase odlišně. Vliv nových technologií a společenských změn může mít na tyto dopady velký vliv. Kategorie dopadu se rozlišují zejména podle dopadů na zdraví člověka, ekosystémy a úbytek surovin. Některé látky mohou mít negativní dopady v rámci více kategorií najednou. [34]

4. Dostupné LCA analýzy baterií pro EV

Za posledních několik let byly provedeny nižší desítky LCA analýz se zaměřením na baterie EV, frekvence v posledních letech stoupá a tyto analýzy se začínají zaměřovat i na druhou životní fázi použitých baterií. V této kapitole budou představeny vybrané dostupné LCA analýzy za posledních několik let a shrnuty jejich výsledky.

4.1. Přehled LCA analýz

Tabulka 2: Srovnání jednotlivých studií

Studie	Uvažované fáze	Funkční jednotka	2nd life use	LCC	Typ baterie	Renovace	Recyklace	Primary data
1 Koroma et al. 2022 [35]	Výroba BEV a baterie, užití, recyklace, renovace	Provoz BEV po dobu 12 let, nájezd 12000 km, baterie s 54,6kWh	ne	ne	NMC 111 články	ano	ano	Secondary LCA sources
2 Kamath et al. 2020 [37]	3 scénáře, PV storage, firming and peak shaving	Uložená kWh	ano	ano	LIB (Ford Focus – Kim et al., 2016)	Bez detailů (data pro baterii Kim et al)	ne	Secondary LCA sources
3 Bobba et al. 2018 [39]	Výroba, užití, předělání, druhotné užití a recyklace	Průměr bilance systému	ano	ne	LMO/NMC	ano	ano	JRC lab/ Secondary LCA sources
4 Wang et al. 2021 [42]	Výroba transport sběr recyklace/skladka	Lithiová baterie o váze 300 kg (NCM 111, 523, 622, 831)	ne	ano	NMC	ne	ano	Secondary LCA sources
5 Genikomsakis et al. 2013 [48]	Výroba baterie, užití v autě druhotné užití	Časový faktor 11 let	ano	ne	LFP	ano	ne	Secondary LCA sources

6 Wang et al. 2020 [50]	Extrakce surovin výroba kompo nent výroba baterie užití recyklace	Dopady na 1 ujetý kilometr vozidla	ne	ne	NMC/ LIO	ne	ano	Secondar y LCA sources
7 Quan et al. 2022 [53]	Výroba, První použití v autě, úprava baterie, druhotné užití, recyklace	Nominál ní kapacita baterie o velikosti 1 kWh	ano	ne	LFP/ NMC	ano	ano	Secondar y LCA sources, Pro úpravu baterie data ze 2 čínských projektů
8 Deng Et al. 2017 [56]	Extrakce surovin zpracová ní a výroba baterie užití recyklace	Dopady na 1 ujetý kilometr vozidla	ne	ne	LIS/ NMC	ne	ano	Own data/ Secondar y LCA sources

4.2. LCA analýza 1 (KOROMA et al., 2022, Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management)

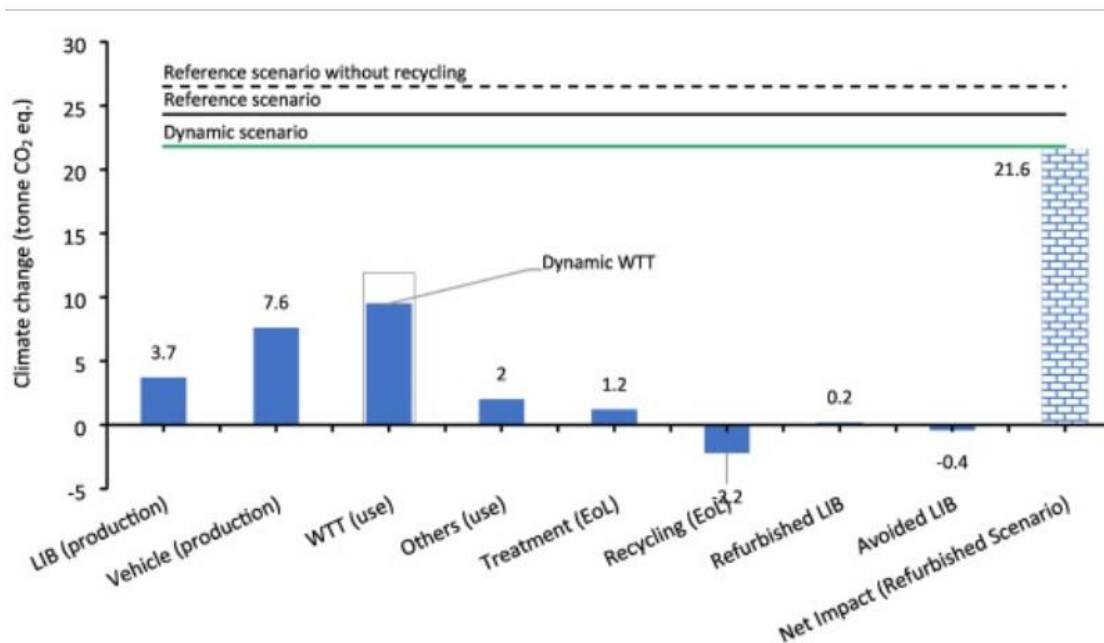
Tato analýza bere v úvahu budoucí změny v energetickém odvětví, slábnoucí účinnost baterie, její repasování a recyklaci, aby bylo možné zjistit celkový vliv elektromobilu na životní prostředí. Analýza se zabývá celým životním cyklem elektromobilu a zahrnuje také renovaci baterie, už se ale nezabývá samotným druhotným využíváním baterie pro rezidenční užití. Při renovaci baterie byla vyměněna polovina komponent s očekávanou životností 5 let. Uvažují se 4 scénáře [35]:

- Referenční scénář: Těžba materiálů – Výroba materiálů a BEV – BEV užití (stávající energetický mix) – Recyklace (EOL treatment and recycling)

- Dynamický scénář: Těžba materiálů – Výroba materiálů a BEV – BEV užití (budoucí energetický mix) – Recyklace (EOL treatment and recycling)
- Scénář renovace baterie pro využití v budovách (Refurbishment scenario): Těžba materiálů – Výroba materiálů a BEV – BEV užití (budoucí energetický mix) - LIB renovace (50 % LIB článků) – Ušetření baterie pro využití v budovách – Recyklace (EOL treatment and recycling) [35]

Funkční jednotkou byl: provoz evropského (B-segment) BEV s 54,6 kWh baterií s životností 12 let a při nájezdu 160000 km. [36] Výroba automobilu, montáž bateriového celku (pack), užití a recyklace se předpokládá v Evropě. Výroba LIB článku v Jižní Koreji. Data pro LCA studii pocházejí ze sekundárních zdrojů (článků, technických zpráv apod, Well-to-tank fáze (WTT) je modelována s průměrným každoročním evropským mixem od roku 2020 do roku 2031. Průměrná spotřeba BEV byla vypočítána na 21.6 kWh/100 km, což zahrnovalo i snížení kapacity baterie. Uvažuje se lineární snížení kapacity baterie s poklesem 1,045 v závislosti na počtu nabíjecích cyklů. Uvažuje se nabíjení každé tři dny. Ve fázi užití jsou zahrnuty i další dopady spojené s údržbou vozu, výstavbou silnic a další emise (prach, opotřebení brzd a pneumatik), vše bylo modelováno s použitímecoinvent databáze. Baterie pro rezidenční užití, která se ušetří (avoided LIB) byla vyráběna v Evropě v roce 2031. Uvažuje se v základním scénáři 50 % využití článků, je provedena i citlivostní analýza pro jiná procenta. [35]

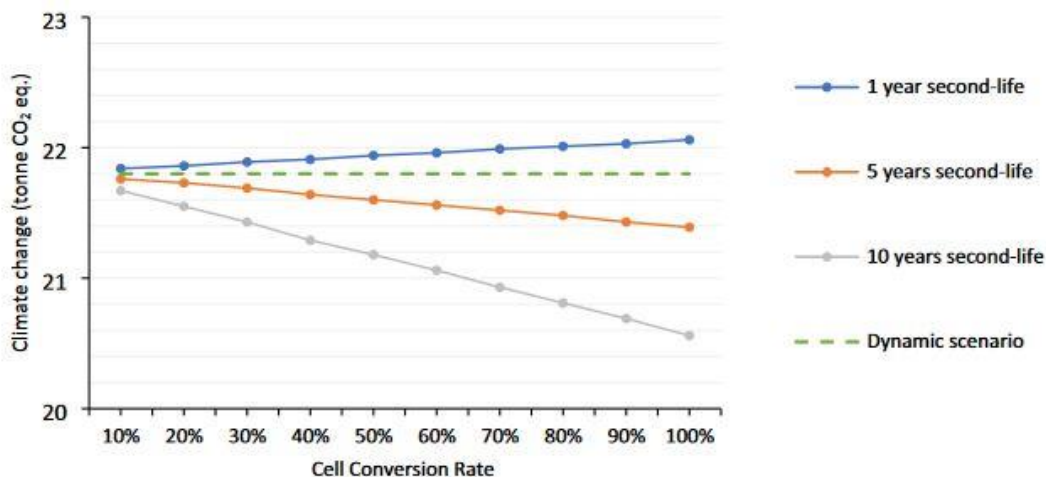
Celková výše dopadu klimatických změn odpovídá 26.5 tunám CO₂-ekv./automobil. (referenční scénář bez recyklace). Recyklace BEV (včetně) baterie snížila vliv elektromobilu na klima přibližně o 8,3 %. Při uvažování dynamického scénáře (zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie) poklesl vliv na klima ještě o 9,1 %, Pro vliv repasování baterie bylo zaznamenáno snížení CO₂-ekv. celkových emisí menší než 1 %. [35]



Obrázek 19: Life cycle climate change impacts of a battery electric vehicle with a refurbished battery [35]

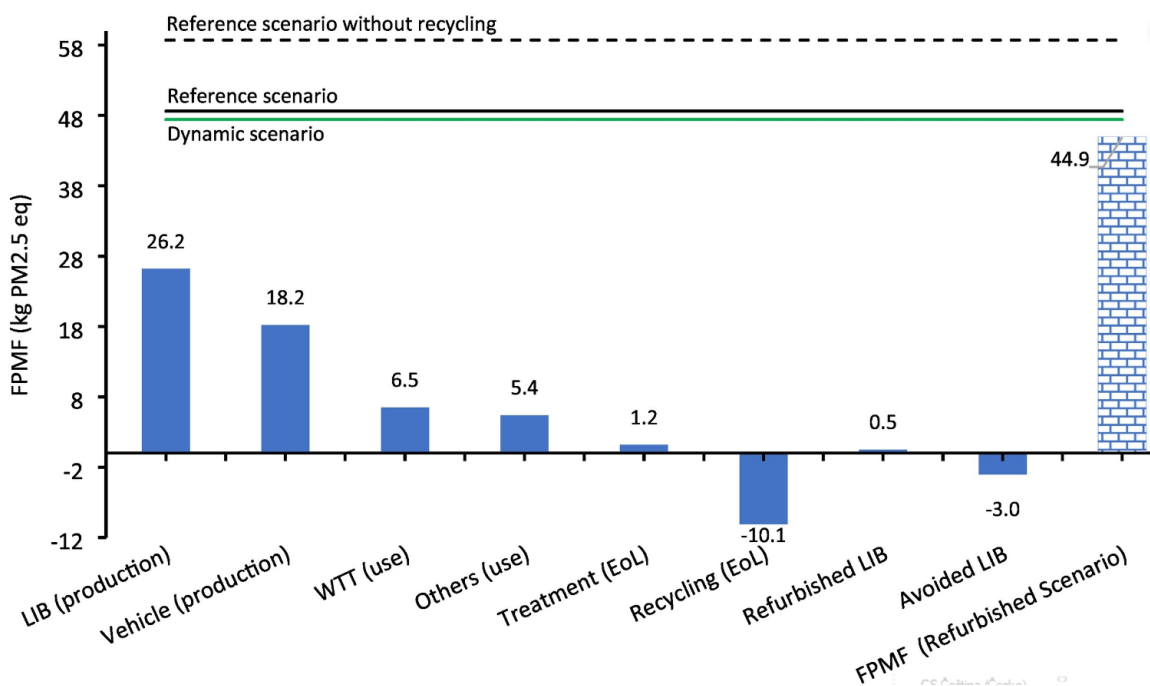
GWP lithiové baterie: bateriové články – 64,9 % (zejména materiál pro katodu – hliník měď a elektrická energie), 22 % bateriový pack, 4,3 % chladicí systém, BMS 8,8 %. V článku jsou také uvedeny podíly GWP pro závěsný systém baterie. [35]

Úbytek účinnosti baterie zvyšuje spotřebu energie elektromobilu, což vede ke zvýšení vlivů na klima během užívání o 7,4 % (dynamický scénář) až 8,1 % (referenční scénář). Proto je zapotřebí zahrnout úbytek účinnosti baterie a změny ve složení budoucího energetického mixu při odhadu vlivů elektromobilů na klima. Kdyby se tyto aspekty nezahrnuly, výsledky by mohly být nespolehlivé. Vyšší snížení vlivu na klima pro druhotné využití by mohlo být docíleno delší dobou druhotného využití a výměnou menšího množství komponent v baterii. Maximálního snížení emisí CO₂ ekv. bylo dosaženo při 100 % renovaci baterií a jejich předpokládanému použití po dobu deseti let v second life užití. [35]

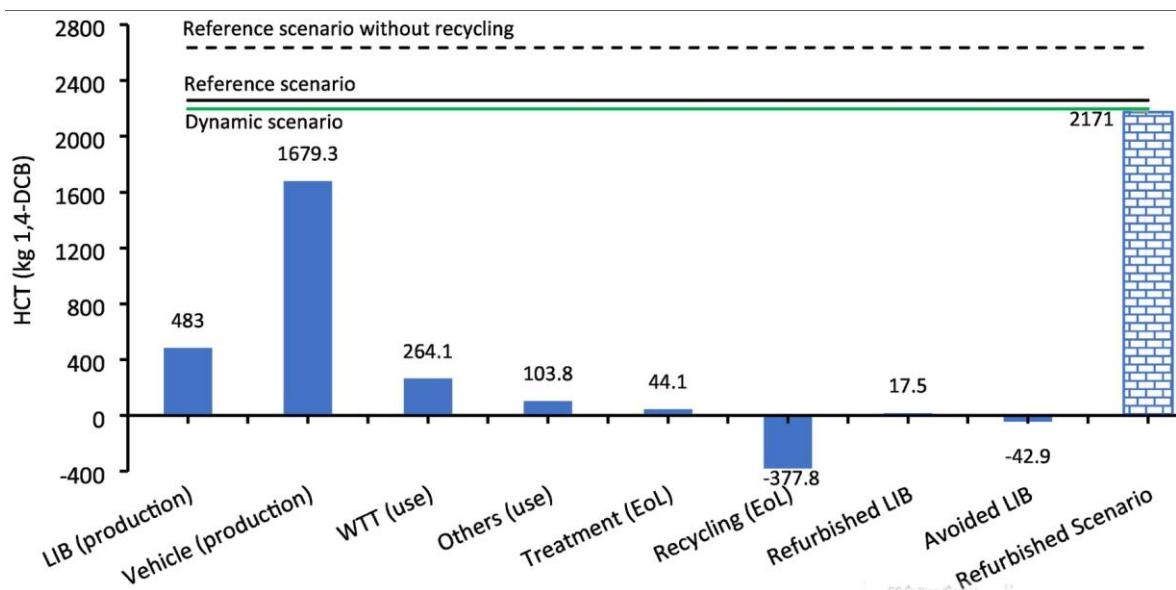


Obrázek 20: Porovnání snížení oxidu uhličitého při různé konverzi článků [35]

Studie ještě uvádí výsledky v dalších kategoriích dopadu: Fine particulate matter formation (FPMF), Mineral Resource Scarcity (MRS) potential, Human non-Carcinogenic Toxicity (HnCT), Human Carcinogenic Toxicity (HCT). [35]



Obrázek 21: Fine particulate matter formation (FPMF) [35]



Obrázek 22: Human Carcinogenic Toxicity (HCT) [35]

4.3. LCA analýza 2 – (KAMATH et al., 2020, Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications)

Tato práce porovnávala cenu elektřiny v dolarech/kWh LCOE (levelized cost of electricity – LCOE jsou stanoveny jako podíl ročních nákladů a roční spotřeby elektřiny) a emise uhlíku spojené s používáním SLBs a nových LIBs ve Spojených státech pro 3 scénáře úložiště energie [37]:

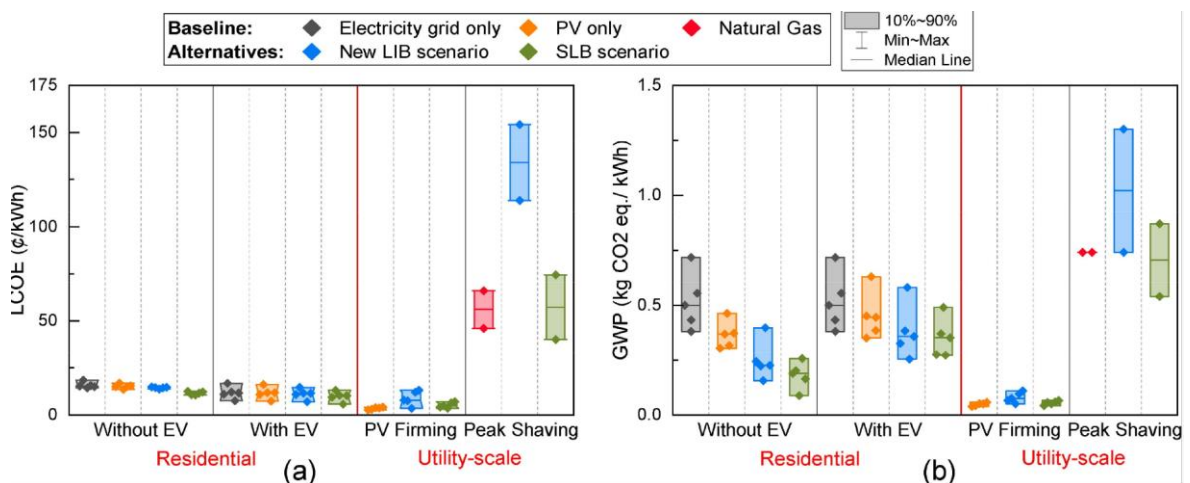
- První scénář je rezidenční úložiště energie s fotovoltaikou na střeše
- Druhý scénář je stabilizování užitné energie ze solárních panelů
- Třetí scénář využívá tyto baterie pro vyrovnávání špiček v elektrické síti v porovnání s plynovou elektrárnou. [37]

Pro každý scénář byla použita jiná funkční jednotka. Pro použití v budovách byla funkční jednotkou dodávka elektřiny pro potřebu domu bez nebo s nabíjením elektrovozu po dobu 10 let. Pro scénář 2 (PV firming), bylo funkční jednotkou dodávka jedné kWh po dobu 10 let a pro třetí scénář (peak shaving) to byla dodávka 1 kWh odpovídající 1 kWh poptávky ve špičce. Aby bylo možné srovnání, byla v prvním scénáři také použit přepočet na 1kwh. [37]

Pro aplikaci rezidenčního úložiště energie (R) byla požadována kapacita renovované baterie ve výši 15–20 kWh s fotovoltaickou střechou (R2), zatímco pro novou lithiovou baterii byla požadována kapacita 5–15 kWh (R2n). Lokality s vyšším slunečním zářením vyžadovaly nejvyšší kapacity baterií k uchování

přebytku vyrobené elektrické energie z fotovoltaiky. Pro rezidenční úložiště energie s nabíjením elektrických vozidel (REV) byla požadována podobná kapacita druhotné baterie ve výši 15–20 kWh (REV2), zatímco požadovaná kapacita pro nové baterie byla 5–20 kWh (REV2n). Požadavek na kapacitu baterií se při přidání nabíjení elektrických vozidel zásadně nezměnil, protože dodatečný požadavek na elektřinu nastával v noci (v době s nízkými cenami energie). Požadavek na kapacitu v Los Angeles však byl 20 kWh pro renovované i nové lithiové baterie, protože nákup elektřiny musel být snížen kvůli vysokým cenám energie ve špičkách. [37]

Data o GWP (globální oteplovací potenciál) a CED (spotřeba energie) pro bateriový obal (30 % +/- 20 %) a výrobu packu (100 %) nové lithiové baterie ze studie Kim et al. 2016, [38] byla použita k získání inventáře baterií druhého života. Inventář baterií první uživatelské fáze pro elektromobil byl založen na GWP ze stejné studie. [37]



Obrázek 23: Výsledky jednotlivých scénářů pro LCOE (a) a potenciál globálního oteplování (b) (Rezidenční scénář uvažuje nabíjení a nenabíjení baterií – electric vehicle charging [37])

Druhotné baterie snížily náklady elektřiny (LCOE) o 12–57 % a emise uhlíku o 7–31 % ve srovnání s novými bateriemi v těchto aplikacích, s vyšším rozdílem při scénářích 2 a 3. Druhotné baterie snížily pro rezidenční použití v porovnání se systémem bez baterií (pouze solární elektrárna) náklady elektřiny (LCOE) o 15–25 % a emise uhlíku o 22–51 %, což činí tyto renovované baterie atraktivní pro domácí použití. [37]

Pro porovnání při využití druhotných baterií nedocházelo ke snižování nákladů ani emisí uhlíku pro aplikace ve službách (utility-level) ve všech scénářích. Zatímco použití renovovaných baterií pro posílení fotovoltaického systému zvyšovalo LCOE (náklady na elektřinu vyrobenou na celou dobu životnosti) a

GWP (potenciál globálního oteplování) ve srovnání s neposílenou fotovoltaikou, snižování LCOE a GWP při použití druhotných baterií pro redukci špičkové spotřeby elektřiny (peak shaving) ve srovnání s plynovými elektrárnami záviselo na profilu spotřeby elektřiny a zdrojích produkce. [37]

4.4. LCA analýza 3 – (BOBBA et al., 2018, Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows)

Analýza se zabývá životním cyklem baterie od výroby přes úpravu pro bateriové úložiště, jejím opětovným využitím a následnou recyklací. Pracuje se se 3 scénáři [39]:

- Scénář A nahrazuje nově vyrobené baterie pro domy připojené k síti s instalovanými solárními panely.
- Scénář B počítá se solárními panely, domem připojeným k síti, bez existující baterie
- Scénář C je samostatně stojící dům se solárními panely, bez baterie, ale s dieselovým generátorem doplňujícím panely [39]

Tyto scénáře byly porovnány s referenčním scénářem, při kterém bylo využito nové baterie pro dané použití. Dopady na životní prostředí zahrnovaly výrobu baterie, její využívání v daném systému a následnou recyklaci baterie. U renovovaných baterií se dopady na životní prostředí týkaly výroby baterie, využívání v elektromobilu, předělání a opravu baterie, následné použití pro ukládání energie a na konci druhého životního cyklu její recyklace. Změny charakteristik baterie během životního cyklu v elektromobilu nebyly v této studii zahrnuty, protože nejsou přímo spjaté s druhotným použitím dané baterie. Dále nebyl zahrnut odpad z nepoužitelných, vyměněných komponent při předělávání baterií. Životnost nových baterií je delší než předělaných baterií, aby bylo možné porovnat scénáře, tak se funkční jednotkou pro referenční i zkoumaný scénář stala průměrná energetická bilance systému, ve kterém baterie ukládají energii. [39]

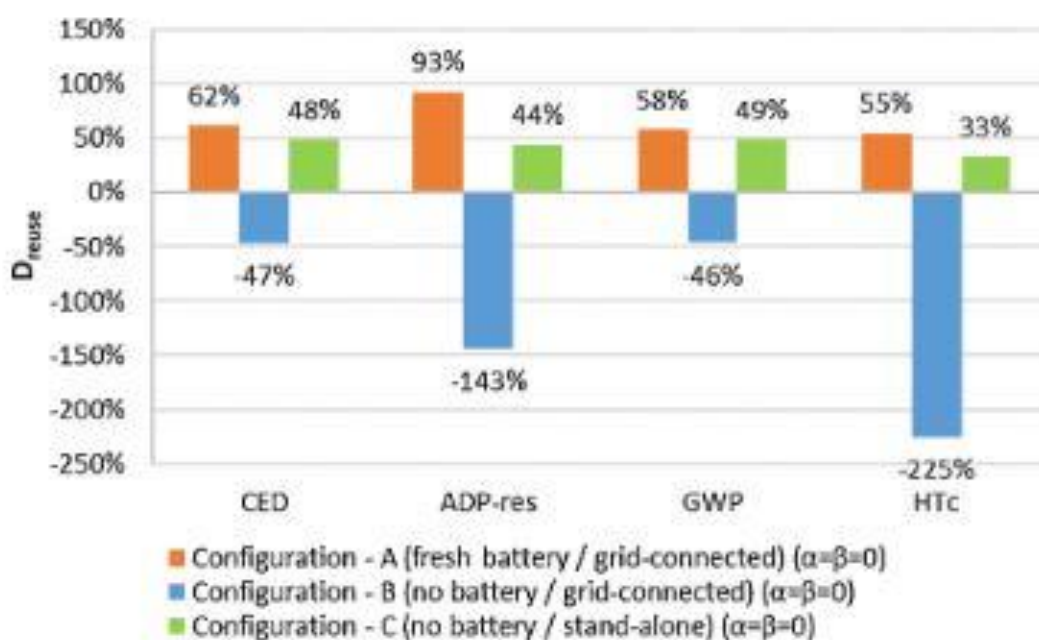
Hodnocený systém se nachází v Nizozemsku. Pro posouzení environmentálního dopadu výroby baterií pro elektromobily i pro výpočet energetických toků systému se používají primární data. Pro modelování výroby baterie byla použita baterie z plug-in hybridu he Mitsubishi Outlander, jemuž skončila životnost v roce 2016, za dobu života najel 136,877 km,

kapacita baterie zůstala na 81.31% nominální kapacity (11.4 kWh – 300 V, 38 Ah). [39]

Při hodnocení environmentálního dopadu se při výpočtu dopadů elektřiny použité v připojeném domě zohledňuje energetický mix EU. Pro recyklaci LMO/NMC se uvažuje pyrometalurgický proces, neboť je v současnosti nejčastěji používaný v Evropě. Renovace dalších komponent, jako jsou pouzdro a BMS (battery management system), které jsou tříděny před pyrometalurgickým procesem, je modelováno pomocí hodnot uváděných v práci Chancerel et al., 2016 [39] [40]

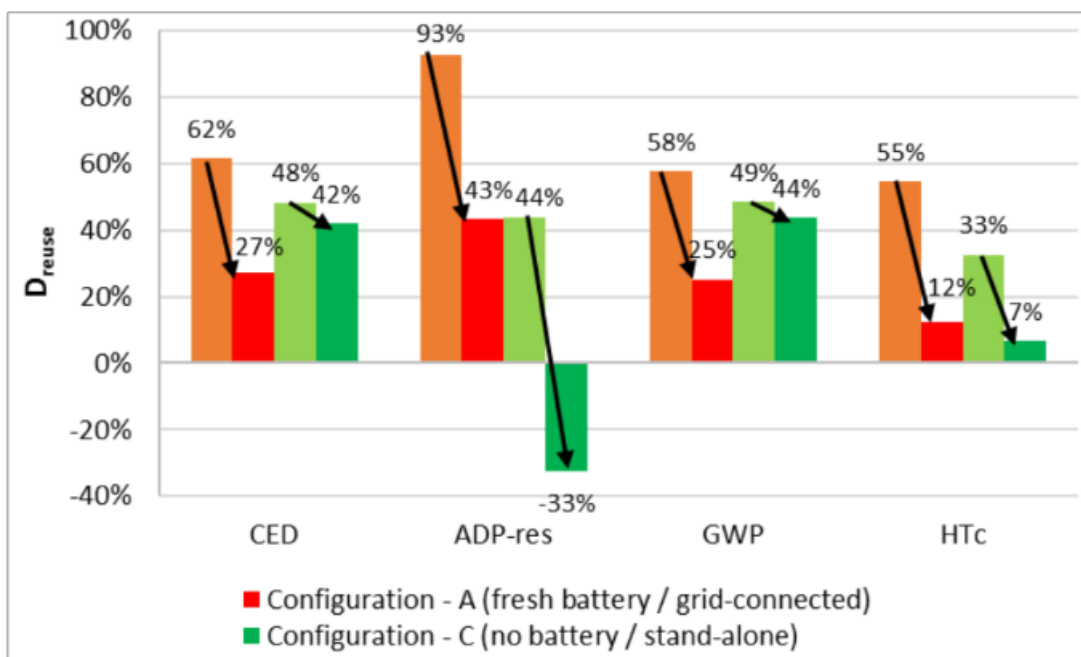
Nahrazení nové baterie LMO/NMC baterií z elektrického vozidla, která má po prvním životě reziduální kapacitu 81,31 % (Scénář A), snižuje všechny kategorie dopadů. Navíc, environmentální přínosy jsou nejvyšší pro kategorie dopadů, které záleží hlavně na výrobní fázi (tj. ADP-res – potenciál vyčerpání abiotických zdrojů). Přesněji řečeno, použití opětovně využitých baterie v rezidenčním domě umožňuje snížení ADP-res o 93 % ve srovnání s referenčním scénářem, ve kterém je použita nová baterie. Při použití opětovně využitých baterie v domě bez existující baterie (Scénář B) jsou zaznamenány zvýšené environmentální dopady ve všech hodnocených kategoriích dopadů. Například GWP se za celý životní cyklus zvýší o 46 % ve srovnání s referenčním scénářem. To je převážně způsobeno opětovným využitím baterie z elektrického vozidla, potřebou nových komponentů baterie a energetickými ztrátami způsobenými efektivitou baterie. V samostatném domě s diesellovým generátorem (Scénář C) přináší použití opravené baterie výhody ve všech hodnocených kategoriích dopadů, i když opětovně využitá baterie nenahrazuje novou baterii. Dochází ke snížení GWP během životního cyklu o 49 %. [39]

Studie ještě udává výsledky v následujících kategoriích dopadu: kumulativní celkovou spotřebu energie v životním cyklu (CED – cumulative energy demand) a míru toxicity způsobující rakovinu u člověka (HTc – Human Toxicity). Tyto výsledky jsou vidět na Obrázku 24. [39]



Obrázek 24: Výsledky kategorií dopadu jednotlivých scénářů [39]

Ve studii byla rovněž provedena analýza citlivosti při různém procentu alokace dopadů výroby baterie mezi primárním (elektrické auto) a sekundární využití baterie. Na následujícím grafu je vidět změna dopadů při alokaci (0 %) na alokaci (25 %) pro scénář A a C. Ve studii jsou ještě uvedeny výsledky citlivostní analýzy při uvažování různého procenta kapacity baterie, podle Neubauer et al., 2011 [41] je při 70 % původní kapacity baterie životnost 1,3 roku, při 90 % původní kapacity je životnost 5,3 roku. [39]



Obrázek 25: Změny dopadů na životní prostředí při změně alokace výroby baterie [39]

4.5. LCA analýza 4 – (WANG et al., 2021, A comparative life cycle assessment on lithium-ion battery: Case study on electric vehicle battery in China considering battery evolution)

Studie se zabývá životním cyklem lithium-iontových baterií elektromobilů v Číně a odhaduje environmentální dopady každého typu baterie. Kromě toho objasňuje, jak vývoj baterií ovlivní ekonomický efekt recyklace baterií v Číně. Studie porovnává referenční scénář, kdy baterie po konci životnosti končí na skládce se scénářem, při kterém se baterie recykluje. Fáze užití baterie není zahrnuta, předpokládá se stejná. Renovace a druhotné užití baterie není vůbec uvažováno. [42]

Tato studie se zaměřujeme na typ baterií NCM používaných v osobních elektromobilech s průměrnou hmotností 298 kg (China Automotive Technology and Research Center, 2018 [43]). V této studii se jedná o funkční jednotku a předpokládá se průměrná hmotnost baterií elektromobilů 300 kg. [42]

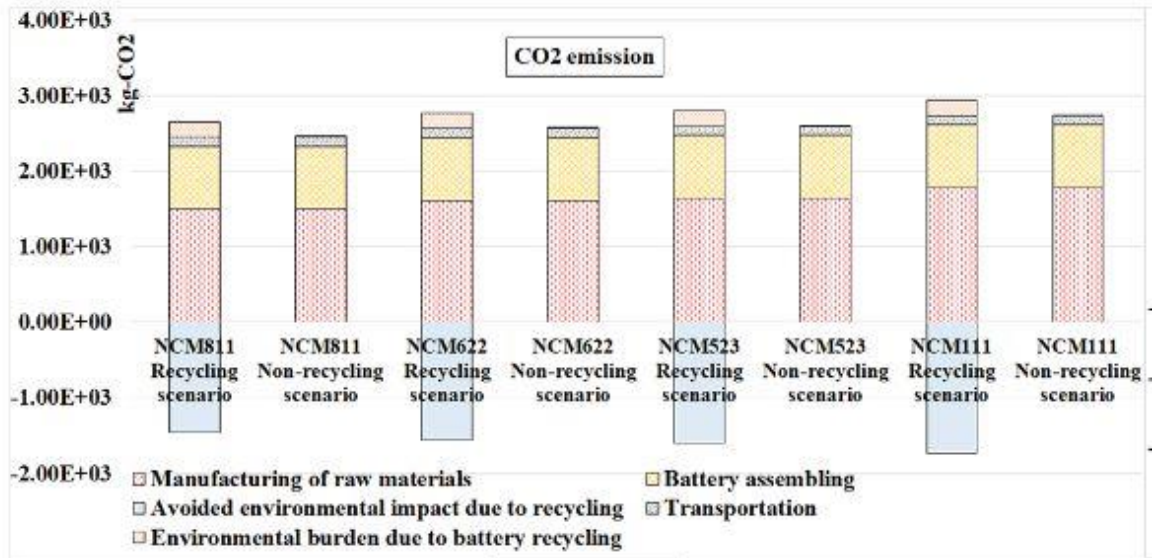
Složení baterií vychází z předchozích studií. Hlavně z Dai et al., 2018 [44] a Li et al., 2014 [45] pro podrobné složení katody. Složení NCM 523 bylo odhadnuto podle složení NCM 111, NCM 622, a NCM 811. Poměr Ni-Co-Mn v katodě je 5:2:3, proporce lithia pak průměr podílu lithia v NCM 111, NCM

622 a NCM 811. Pro rám se předpokládá hliník (v některých studiích je ocel) a jako isolační materiál slouží vláknitý materiál. Na rozdíl od jiných studií, kde není zahrnut. Pro každou součást baterie (materiál pro katodu, materiál pro anodu, elektrolyt, separátor, ...) je předpokládán jiný výrobce a stanovena odpovídající vzdálenost konkrétního dodavatele od výroby bateriového celku (uvažován největší výrobce baterií v Číně). Data pro recyklaci jsou převzata z Wang et al., 2013 [46], anoda se předpokládá, že se prodá jako stavební materiál, i když do budoucna se bude také recyklovat. [42]

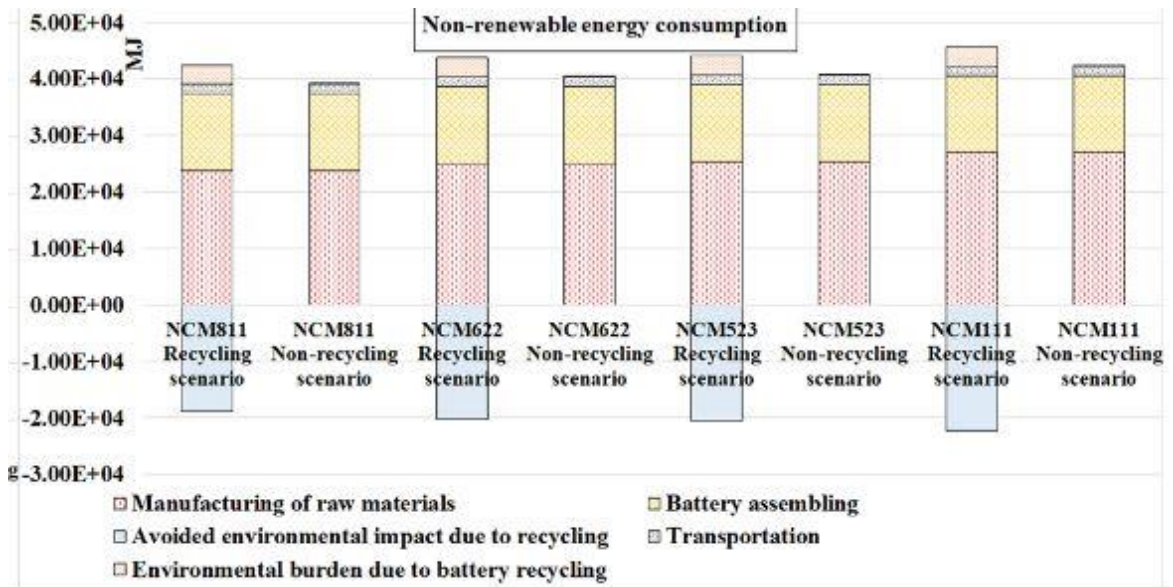
Stanovené kategorie dopadu jsou tyto: Změna klimatu (kgCO_2), čerpání zdrojů (v kg antimonu), zábor půdy (m^3), výše neobnovitelných zdrojů energie (MJ). [42]

Studie ukázala, že s vývojem baterií se snižuje jejich environmentální dopad. Novější typ NMC 811 vytvořil během svého životního cyklu 2460 kg oxidu uhličitého oproti 2740 kg baterie NMC 111, přičemž emise CO_2 způsobené výrobou baterie klesly z 65 % na 61 %. Vyčerpání zdrojů kleslo z 12,7 kg na 6,82 kg , přičemž téměř veškerý dopad nastal během zpracování surových materiálů pro baterie. Spotřeba neobnovitelné energie klesla z 42 400 MJ na 39 100 MJ, přičemž spotřeba energie během opracování surovin pro baterie klesla z 64 % na 61 %. Během výrobního procesu baterií bylo spotřebováno 32-35 % energie. Objem skládky se však nezměnil a zůstal stabilní na úrovni 0,3 m^3 . 94 % objemu skládky tvořily baterie a zbytek byl tvořen odpadem vzniklým při zpracování surovin pro baterie. Pokud by baterie byly vhodně recyklovány, mohl by se jejich environmentální dopad v rámci životního cyklu dramaticky snížit, emise by klesly na přibližně 1200 kg CO_2 , potřebné místo na skládce pro nerecyklovatelný materiál by se snížilo o třetinu a spotřeba neobnovitelné energie by klesla skoro o polovinu na 23,5 MJ. [42]

Recyklace se však v Číně může týkat jen 30 % baterií, protože v současné době je 70 % automobilů a způsoby jejich recyklace formálně neorganizované a tudíž nezjistitelné. Je proto nezbytné proces recyklace v Číně podporovat vládními programy. [42]



Obrázek 26: Porovnání emisí CO2 u baterií [42]



Obrázek 27: Porovnání spotřeby primární energie [42]

Je obtížné odhadnout náklady na práci při recyklaci jedné konkrétní baterie, aniž by se znalo roční množství recyklovaných baterií a počet zaměstnanců recyklační společnosti. Proto tato studie využívá průměrné náklady na práci navržené předchozími studiemi k reprezentaci nákladů na práci (Green & Low Carbon Development Foundation, 2018 [47]). V důsledku toho se zjistilo, že ziskovost recyklace baterií klesá s vývojem baterií Li-ion. To je způsobeno tím, že v budoucnosti bude možné recyklovat méně kobaltu z baterií. Nicméně recyklační průmysl baterií Li-ion je stále ziskový a zisk z recyklace jedné jediné odpadní baterie Li-ion se pohybuje mezi 2992 až 5353 CNY (9 až 16 tisíc korun). [42]

4.6. LCA analýza 5 - (GENIKOMSAKIS et al., 2013, A Life Cycle Assessment of a Li-ion urban electric vehicle battery)

Práce se zabývá životním cyklem Li-ion baterie ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ anoda a LiFePO_4 katoda) a možným druhotným využitím baterií pro inteligentní budovy ve Španělsku. Analýza počítá se 3 scénáři [48]:

- Referenční scénář zahrnuje životní cyklus baterie a následné nahrazení baterie pro aplikaci v inteligentních budovách novou baterií se stejnými hodnotami, jako měla původní
- Scénář 1 zahrnuje pro aplikaci v inteligentních budovách využití nové baterie s hodnotami přizpůsobenými pro použití v chytrých budovách (15 kWh)
- Scénář 2 počítá s druhotným použitím původní baterie pro aplikaci v inteligentních budovách [48]

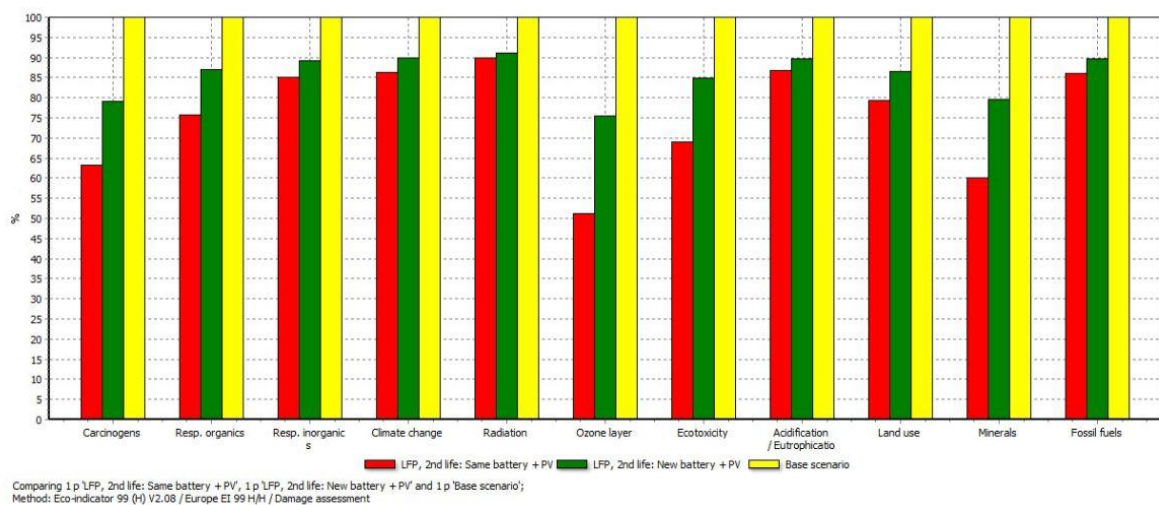
Vzhledem k tomu, že se jedná o studii zaměřenou na hodnocení kombinovaného využití baterie v elektromobilitě a ve využití v chytrých budovách, funkční jednotkou pro analýzu výsledků je časový faktor, protože je společný pro obě aplikace. Jedná se o dobu 11 let. (7 let je doba provozu automobilu, který ujede 40 km denně a jezdí 365 dní v týdnu). LCA data pro výrobu baterie jsou ze studie Majeau-Bettez, 2011 [49], nanočástice LiFePO_4 jsou vyrobeny hydrotermální syntézou. Provoz elektromobilu se uvažuje v Bilbao a počítá se se Španělským energetickým mixem. [48]

Technologie LFP nastavuje životnost u elektromobilů na 2000 až 2500 nabíjecích cyklů, což vychází na 7 let životnosti a konečném stavu kapacity baterie na přibližně 80 %. Tato studie počítá s optimistickými 2500 cykly a snížením kapacity z 30 Ah na 24 Ah při prvotním cyklu. Při dalším využití je životnost dalších 1000 až 2000 cyklů, než klesne kapacita na 60 %, při kterých už je nepoužitelná. Tato studie pro druhotné použití počítá s 1500 cykly což znamená denní spotřebu 10kWh po dobu 4 let. Dále studie počítá s poklesem účinnosti baterie 80 % pro prvotní a 75 % pro druhotné použití. Pro referenční scénář je použita baterie se stejnou výrobní technologií s hustotou 90 W/kg a kapacitou 15kWh, aby po celý svůj životní cyklus byla schopna dodávat denně 10 kWh, tyto údaje určují váhu baterie na 161,3kg. [48]

Kromě životnosti a počtu cyklů existují další proměnné, které ovlivňují pokles kapacity lithiových baterií, nejdůležitější z nich jsou pracovní teplota a napětí

článku. Ztráta kapacity souvisí také s nárůstem impedance, což se projevuje ztrátou výkonu a ztrátou lithia kvůli pevné elektrolytové mezifázi. Tento proces se obvykle objevuje na záporné elektrodě (grafitové anodě) během nabíjení baterie. Tato vrstva na začátku chrání elektrodu před rozkladem rozpouštědla při použití vysokých napětí, ale postupně vede k postupné ztrátě kapacity baterie v důsledku zahušťování pevné elektrolytové mezifáze. [48]

Referenční scénář počítá s vyprodukováním 30 tun oxidu uhličitého ekvivalentu za 20 let. Při použití vhodnější nové baterie klesne hodnota o 9,63 % a při repasování původní baterie a následném použití v inteligentní budově klesne hodnota o 16,3 % oproti referenčnímu scénáři. [48]



Obrázek 28: Porovnání dopadů jednotlivých scénářů [48]

4.7. LCA analýza 6 - (WANG et al., 2020, Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles)

Studie porovnává dopady NMC a LIO (Li-O₂) baterií na životní prostředí.

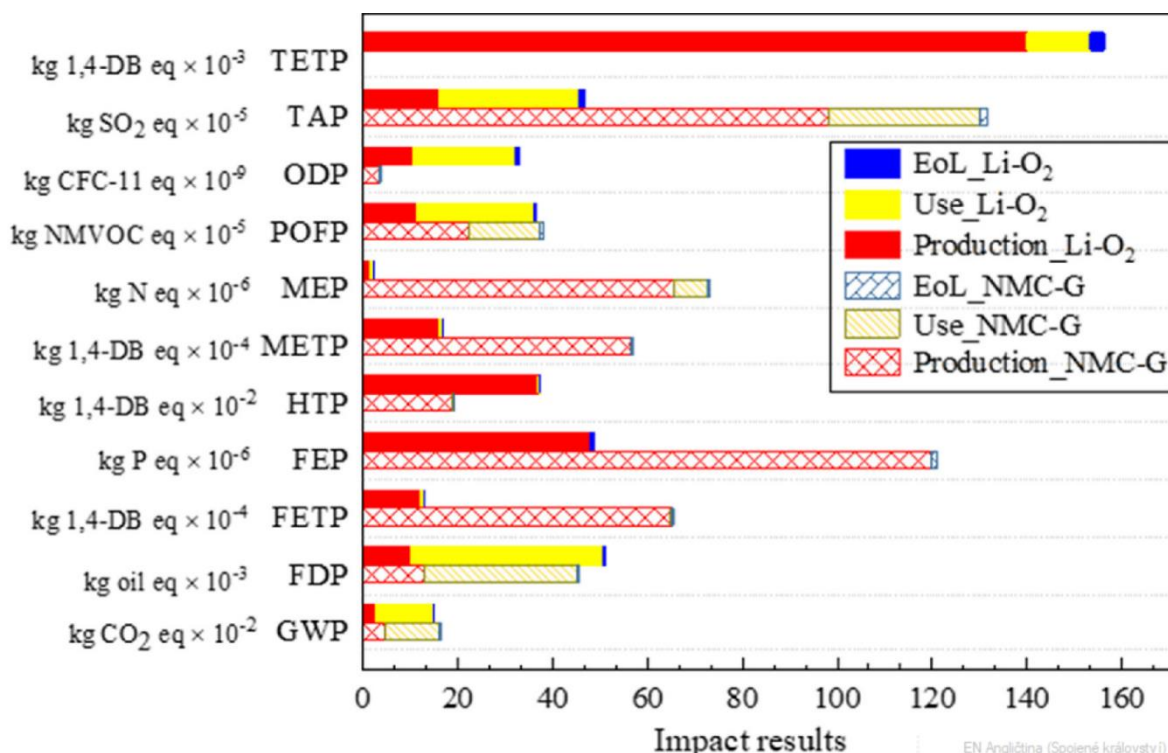
- Referenční scénář zahrnuje NMC baterii o kapacitě 63,8 kWh a hmotnosti 531 kg navrženou pro pohon středně velkého elektromobilu s dojezdem na jedno nabití 320 km (data o složení z literatury - Deng et al., 2017 [51])
- Zkoumaný scénář zahrnuje LIO baterii (lithiová anoda, textilní kostra z nanotrubiček s katalyzátorem z nano-vloček disulfidu molybdenitu pro kyslíkovou katodu, a LiClO₄ TEGDME elektrolyt) o síle 120 kW pro pohon středně velkého elektromobilu se stejným dojezdem jako v referenčním scénáři. Kapacita této baterie je 63,5 kWh a váha 267 kg bez započítání kyslíkové bomby (55 kg) a předpokládaná životnost

baterie je nájezd 200000 km. Bateriový systém na konci životnosti Li-O₂ je recyklován prostřednictvím hydrometalurgického procesu, který byl modelován pro recyklaci LIB baterií nové generace (Deng et al., 2017 [51])

Funkční jednotka této LCA studie je velikost dopadu na ujetou vzdálenost jednoho kilometru elektromobilem. [50]

Pro LCA analýzu byla použita metoda ReCiPe midpoint (H) zahrnující 13 kategorií dopadu: global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), fossil depletion potential (FDP), photochemical oxidant formation potential (POFP), particulate matter formation potential (PMFP), freshwater eutrophication potential (FEP), terrestrial acidification potential (TAP), marine eutrophication potential (MEP), marine ecotoxicity potential (METP), freshwater ecotoxicity potential (FETP), terrestrial ecotoxicity potential (TETP), metal depletion potential (MDP), and human toxicity potential (HTP). [50]

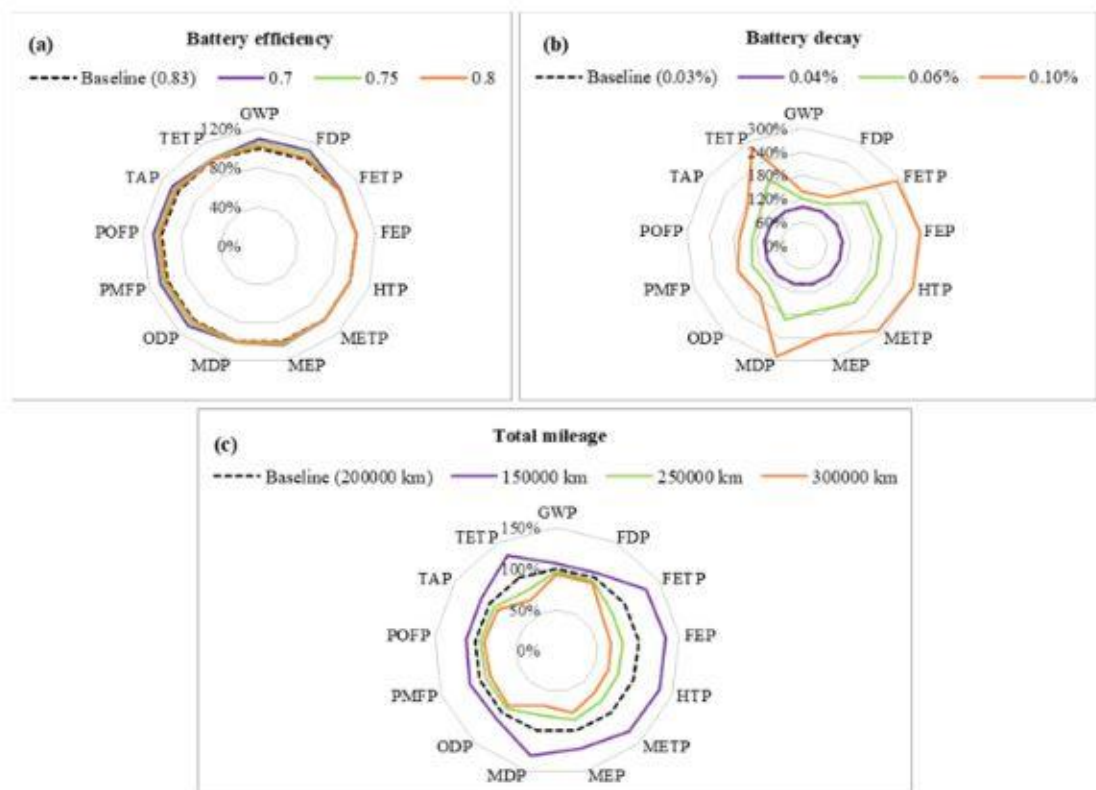
Výsledky ukazují, že bateriový systém LIO má ve většině kategorií nižší environmentální zátěž ve srovnání s baterií NMC kromě FDP, HTP, ODP a TETP, zejména kvůli TEGDME použitém v elektrolytu Li-O₂ bateriového článku. Emise skleníkových plynů u bateriového systému LIO vychází na 149 g CO₂ na



Obrázek 29: Porovnání dopadů LIO a NMC na jednotlivé kategorie dopadů na životní prostředí [50]

kilometr (27,5 g/km výroba baterie, 121 g/km fáze užití), což představuje pokles o 9,5 % ve srovnání s baterií NMC. LIO baterie může významně snížit dopady v následujících kategoriích: MEP, FETP, METP, TAP, a FEP hlavně díky poklesu těžkých kovů (hořčík, nikl a kobalt). [50]

Ve studii byla také provedena citlivostní analýza vlivu pěti klíčových parametrů – poměr přístupnosti pro uživatele (0,75 – 0,9), účinnost baterie (0,7-0,8), míra úbytku kapacity baterie (0,04-0,1 %), celkový počet ujetých kilometrů (150000–300000 km) a dojezd na jedno nabití (250–400 km) - na LCA výsledky. Ze studie vyplývá, že faktorem s největším dopadem je míra úbytku kapacity baterie, která může vést k změnám vlivu na životní prostředí v rozmezí 100 % až 200 %. [50]



Obrázek 30: Porovnání změn dopadů na životní prostředí při změně parametrů studie [50]

Baterie LIO může být udržitelným řešením pro budoucí použití v elektromobilech s vyšším dojezdem a nižšími environmentálními dopady ve srovnání s konvenční baterií NMC. Pro budoucí LCA analýzu by měla být studována rovněž otevřená struktura baterií LIO, kde je ovšem potřeba sofistikovaný filtr vzduchu. Také by se další studie mohly zaměřit na citlivostní analýzu vlivu složení baterií na životní prostředí v průběhu životního cyklu. Rovněž recyklační proces LIO baterií by měl být podrobněji analyzován, aby byly k dispozici relevantnější data pro LCA analýzu. [50]

V závěru byla studie srovnána se studií Zackrisson et al., 2016 [52], která byla zaměřena na prototyp baterie s Li-air článkem, uvažovala laboratorní data. Ta uvádí 26 g CO₂, ekv. km⁻¹ (v dlouhodobém horizontu) a 296 g CO₂, ekv. km⁻¹ (pro současnou technologii). [50]

4.8. LCA Analýza 7 - (QUAN et al., 2022, Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies)

Studie porovnávala dopady LFP a NMC baterií na životní prostředí, v úvahu bylo bráno druhotné využití baterií a porovnávaly se i dopady různých recyklačních procesů. Analýza brala v úvahu 4 scénáře [53]:

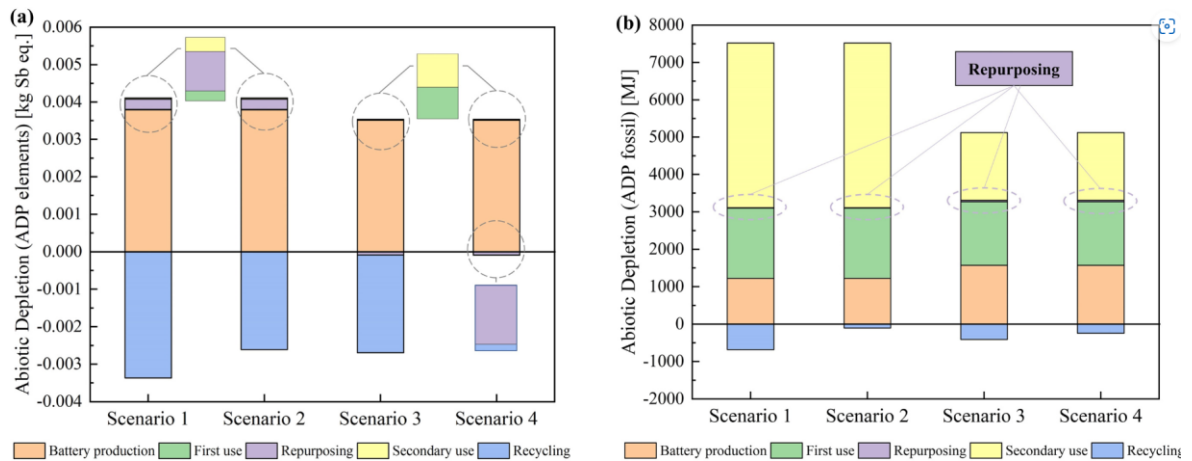
- Scénář 1 využíval baterii LFP o kapacitě 23,5 kWh a váze 203,1 kg, kompletní životní cyklus, úpravu baterie pro druhotné využití, druhotné využití ukončené hydrometalurgickou recyklací
- Scénář 2 využíval baterii LFP o kapacitě 23,5 kWh a váze 203,1 kg, kompletní životní cyklus, úpravu baterie, druhotné využití ukončené přímou recyklací
- Scénář 3 využíval baterii NMC o kapacitě 23,5 kWh a váze 164,99 kg, kompletní životní cyklus, úpravu baterie, druhotné využití ukončené hydrometalurgickou recyklací
- Scénář 4 využíval baterii NMC o kapacitě 23,5 kWh a váze 164,99 kg, kompletní životní cyklus, úpravu baterie, druhotné využití ukončené pyrometalurgickou recyklací [53]

Funkční jednotkou je nominální kapacita bateriového packu o velikosti 1 kWh. Tato funkční jednotka byla použita v souvisejících studiích LCA (Matheys et al., 2007 [54]; Wu et al., 2021 [55]). Všechny výsledky byly převedeny na FU, aby bylo možné porovnat výsledky vlivu na životní prostředí různých baterií. [53]

Materiálové složení pro LFP a NCM baterie bylo získáno z Dai et al., 2018 [44]. Data pro úpravu baterie pro druhotné použití byla získána ze dvou čínských projektů (provincie Hebei a město Zhuhai). Studie obsahuje detailní vstupní údaje pro LCA analýzu pro různé recyklační postupy. Pro fáze užití je uvažován čínský energetický mix. [53]

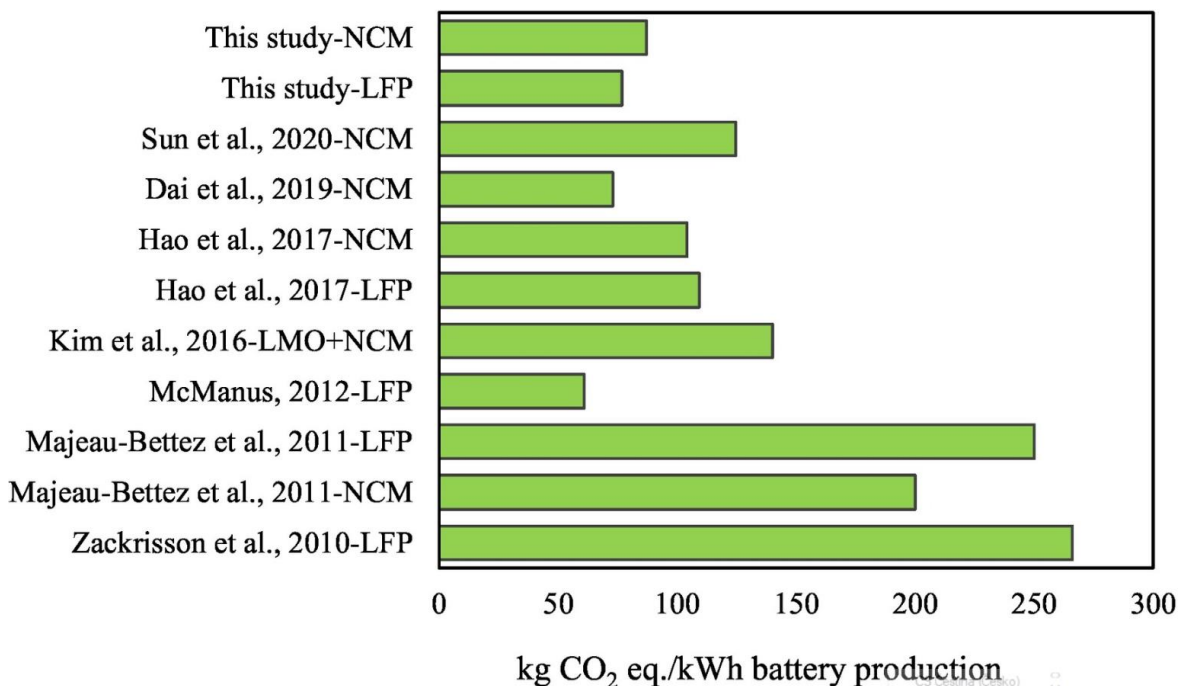
Při porovnání potenciálu čerpání zdrojů (abiotic depletion potential) byla baterie NCM mírně šetrnější než baterie LFP. Díky nižší energetické hustotě

baterie LFP bylo potřeba více katodového materiálu. U baterií LFP hydrometalurgické nebo přímé fyzické recyklace kompenzovaly určité množství ADP. Nicméně u baterií NCM poskytovala přínosy pro minerální zdroje pouze hydrometalurgie, zatímco pyrometalurgie zanedbatelně snižovala environmentální dopady. Ocel, měď a hliník v bateriích NCM nebyly dobře recyklovány pyrometalurgií. Kromě toho bylo spotřebováno množství uhlíkatu lithného pro regeneraci katodového materiálu. [53]



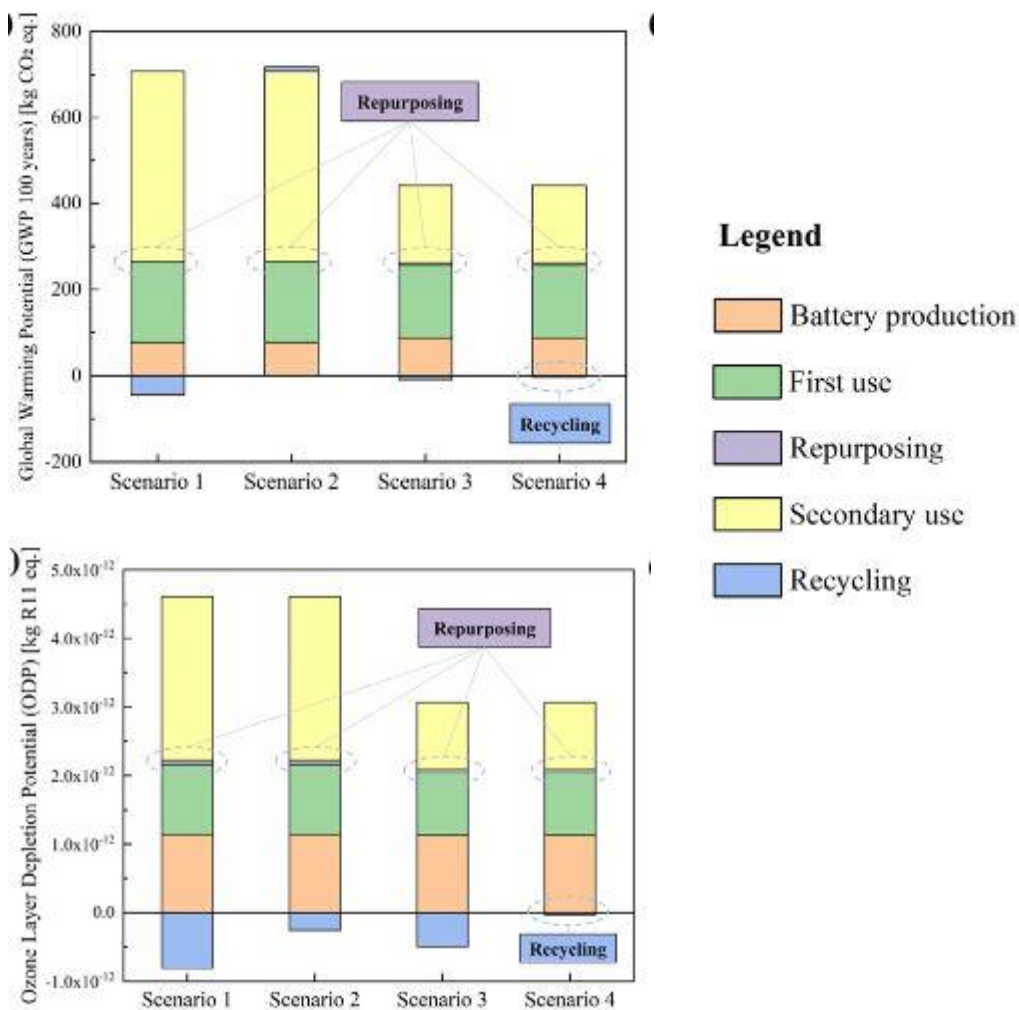
Obrázek 31: ADP při jednotlivých scénářích [53]

Na následujícím obrázku jsou porovnány hodnoty kg CO₂eq/kWh při výrobě baterií s hodnotami dostupných studií. Je vidět, že hodnoty se blíží nejvíce studii Dai et al, 2018 [44], ze které vycházejí. [53]



Obrázek 32: Porovnání hodnot CO₂eq/kWh [53]

Hodnoty GWP byly pro všechny 4 scénáře v celém životním cyklu výroby baterie, užití a úpravy baterie pro druhotné použití velmi podobné. Lišily se až během druhotného využití baterií LFP s nejvyšším GWP ve studii 441 kg CO₂ ekv., což představuje zhruba 41 % celého životního cyklu (uvažoval se čínský energetický mix). GWP baterie NCM během druhotného použití bylo mnohem nižší, pouze 181 kg CO₂ ekv. Samotné repasování se na GWP prakticky nepodílelo. Studie se dále zbývala TAP, EP a ODP. Výsledky LCA naznačují, že baterie NCM měla lepší celkový environmentální výkon než baterie LFP, ale kratší životnost, kdy LFP umožnila při druhotném použití 3275 cyklů, což je 2,4násobek hodnoty NCM baterie. Hydrometalurgické procesy recyklace pro LIB byly vůči životnímu prostředí nejšetrnější ve srovnání s pyrometalurgií a přímou fyzickou recyklací. Během citlivostní analýzy se zjistilo, že optimalizací nabíjení a vybíjení baterií o 10 %, lze snížit environmentální zátěž až o 17 % u NMC a až o 27 % u LFP baterií. [53]



Obrázek 33: Porovnání GWP a ODP u jednotlivých scénářů během životního cyklu [53]

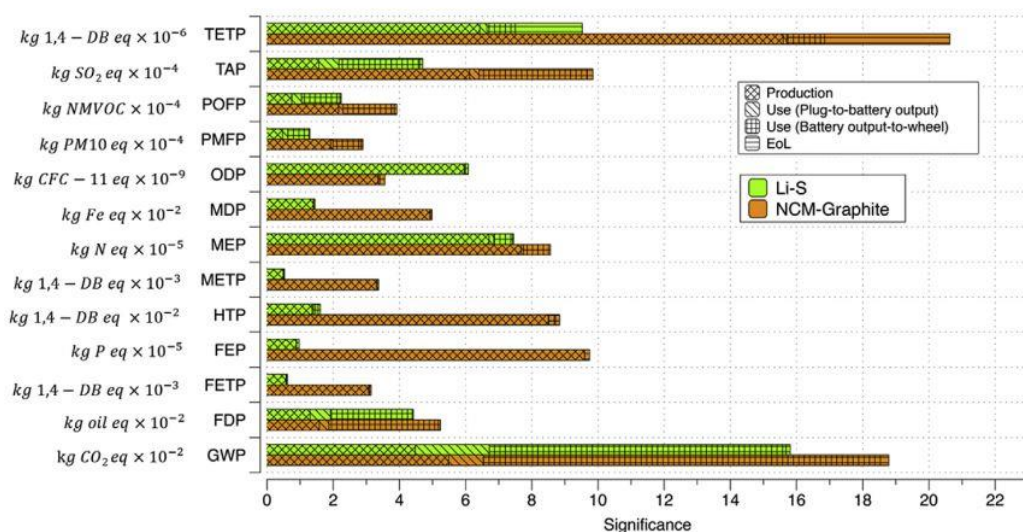
4.9. LCA analýza 8 - (DENG et al., 2017, Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles)

Práce porovnává dopady LIS baterie a NCM baterie. Jsou využity 2 scénáře:

- Scénář 1 obsahuje baterii LIS o výkonu 120 kW, váze 279 kg a kapacitě 61,3 kWh pro elektromobil střední velikosti s dojezdem 320 km
- Scénář 2 obsahuje baterii NCM o váze 531 kg a kapacitě 63,8 kWh pro elektromobil střední velikosti s dojezdem 320 km [56]

Funkční jednotkou je dopad na jeden ujetý kilometr středně velkého elektrického vozidla poháněného baterií LIS. Na základě současné výkonové úrovně baterie LIS v laboratorních podmínkách a naměřené míry poklesu kapacity je celková ujetá vzdálenost vozidla 200 000 km během životního cyklu baterie LIS. Tato studie kvantitativně hodnotí environmentální dopady materiálové spotřeby, spotřeby energie, odpadů a emisí přímo spojených s jednotlivými fázemi životního cyklu baterie LIS. V konečné fázi je recyklace baterie zařízena hydrometalurgickým procesem, přičemž tato studie nebere v potaz dopady recyklace, protože recyklované materiály nemusí splňovat vysoké standardy kvality pro výrobu baterií. [56]

Výsledky hodnocení environmentálního dopadu ukazují, že LIS baterie je ekologičtější než konvenční baterie NCM s 9-90 % nižším dopadem podle kategorie. Zejména emisemi skleníkových plynů u bateriového systému LIS vychází na 158 g CO₂ na kilometr, což představuje pokles o 10 % ve srovnání s baterií NMC. LIS baterie dále významně snižuje FETP, METP, TAP a FEP díky vynechání těžkých kovů, jako je mangan, nikl a kobalt. Jediná kategorie, v které LIS zaostává je ODP. Na výrobu LIS baterie je také potřeba méně energie. [56]



Obrázek 34: Porovnání dopadů LIS a NMC na jednotlivé kategorie dopadů na životní prostředí [56]

Z citlivostní analýzy je třeba poznamenat, že zvýšení dojezdu z 320 km na 400 km na jedno nabití zvýší dopady GWP a FDP o 9 % Nicméně za těchto okolností se GWP a FDP konvenční baterie NCM zvýší o 11 %. Zároveň zvýšení výroby LIS na průmyslovou úroveň s procesem sestavení puchýřkových článků sníží dopady v těchto dvou kategoriích o 13 %. V důsledku toho použití baterie LIS namísto konvenční baterie NCM zvýší dojezd a současně sníží dopady na životní prostředí v budoucnu. [56]

Environmentální dopady baterie LIS lze dále snížit prostřednictvím vylepšeného recyklačního procesu. V současné době neexistuje zavedený recyklační systém pro LIS baterie z důvodu ekonomické proveditelnosti. Nicméně ekonomický potenciál recyklace baterie LIS by mohl být velmi slibný. Na rozdíl od konvenčních lithiových baterií postavených na oxidu lithném se v baterii LIS používá čistý lithný kov. [56]

4.10. Shrnutí kapitoly 4

V této kapitole bylo shrnuto a porovnáno 8 LCA studií zaměřených na analýzu životního cyklu baterií využívaných v elektromobilech s bližším zaměřením na druhotné využití a recyklaci. Nejstarší studie byla z roku 2013 a nejnovější z roku 2022. Porovnání bylo zaměřeno také na skutečnost, jaké fáze životního cyklu byly u baterií zkoumány, například jestli byl do dopadů na životní prostředí uvažován i transport baterií od výrobce apod. Předmětem analýzy bylo i srovnání funkčních jednotek u každé studie. Jednalo se například o uloženou energii v kWh nebo dopady na životní prostředí na ujetý 1 km, ale i

jednotku časovou. U studií bylo zjišťováno, zda jsou ve studiích uvažovány fáze jako recyklace baterií, jejich renovace a jestli je uvažováno jejich druhotné využití v alternativních aplikacích. Dále bylo zjišťováno, jestli se studie zabírá LCC neboli stanovením celkových nákladů během životního cyklu, a nakonec jestli studie využívaly primární, vlastní data nebo byla využita data z jiných studií.

Data pro LCA analýzy v publikovaných studiích nepochází většinou z primárních zdrojů, zejména ve fázi recyklace a ve fázi výroby se opírají o několik málo studií s laboratorními nebo modelovanými daty.

Pouze 2 studie obsahovaly LCC data (Wang et al., 2021 [42], Kamath et al. 2020 [37]), recyklační fáze byla zahrnuta v 7 studiích, renovace baterie byla v 5 studiích (Koroma et al., 2022 [35], Kamath et al., 2020 [37], Bobba et al., 2018 [39], Genikomsakis et al., 2013 [48], Quan et al., 2022 [53]) a zaměření na druhotné použití 4 studie (Kamath et al., 2020 [37], Bobba et al., 2018 [39], Genikomsakis et al., 2013 [48], Quan et al., 2022 [53]).

Obsahové srovnání jednotlivých studií je uvedeno v následující závěrečné kapitole.

5. Závěr

Počet registrovaných elektromobilů stoupá exponenciální rychlostí. Je to dáno zejména novými opatřeními vlád po celém světě, které se snaží potlačit veškeré automobily se spalovacími motory. S nástupem elektromobilů ale vyvstávají nové problémy, zejména co s vysloužilými bateriemi. V dnešní době (2023) se nejedná o až tak závažný problém, baterií na konci své životnosti v elektromobilech není mnoho, protože svou životnost končí baterie vyrobené okolo roku 2014/2015. V té době jezdilo po silnicích lehce přes 1,5 milionu elektromobilů, dnes už to bude odhadem přes 30 milionů. Konec životnosti většiny baterií se odhaduje okolo roku 2030. Je tedy potřeba vyřešit, jak co nejlépe naložit s takovým množstvím baterií, které už opětovně nepůjdou použít v elektromobilech.

Elektromobily v dnešní době využívají lithiové baterie, které mají hlavní vliv na celkový dojezd vozidla na jedno nabití. Bohužel, během svého životního cyklu tyto baterie postupně ztrácejí svou kapacitu a tím snižují dojezd elektromobilu. Je proto předpokládáno, že po ztrátě přibližně 15 % až 20 % původní kapacity bude baterie vyměněna za novou. V Evropě se díky povinnosti zpětného odkupu budou postupně použité baterie kupit u automobilek, které s nimi budou muset dále nakládat. V jiných částech světa (Čína) tento zpětný odběr není povinný a baterie mnohdy končí na skládkách, kde se pomalu rozpadají, znečišťují životní prostředí a ohrožují živé organismy výbuchem bateriových článků.

Ze studií lze pozorovat postupný vývoj baterií, kdy starší studie sledovaly většinou baterie typu LFP a až novější se zabývaly dnes nejrozšířenějšími NMC bateriemi. V neposlední řadě se začaly objevovat studie, ve kterých se porovnávaly NMC baterie s novými typy baterií (LIO a LIS), které jsou zatím pouze na úrovni laboratorních pokusů a bude chvíli trvat, než se podaří vyřešit největší problémy daných baterií, aby bylo možné je nasadit do běžných elektromobilů a mohly se stát novým mainstreamem v oblasti baterií pro EV.

Postupný vývoj baterií se nejen podepsal na jejich technických vlastnostech, jako je například lepší poměr uložené energie vůči váze samotné baterie (NMC při stejné kapacitě váží přibližně o 20 % méně, než LFP baterie), tak na jejich ekologických dopadech. Nejnovější studie přináší velmi slibné výsledky ohledně ekologických dopadů LIS i LIO baterií během svého životního cyklu, největší zásluhou na výsledcích má nepřítomnost těžkých kovů v samotných

bateriích, tyto výsledky mohou být nakonec ještě lepší, pokud se podaří rozběhnout sériová výroba daných baterií.

Co se týká samotného životního cyklu baterie pro elektromobil, studie rozhodně prokázaly, že už samotná recyklace sníží dopady baterie na životní prostředí. Při správné recyklaci se emise CO₂ snížily přibližně o polovinu, spotřeba primární energie klesla taky skoro o polovinu. V Evropě není s recyklací problém, protože je zpětný odkup daný zákony. V Asii tyto zákony neexistují a jen přibližně 30 % baterií se správně recykluje, do budoucna by to mohl být obrovský problém, protože jen v Číně se nachází 60 % všech registrovaných elektromobilů z celého světa.

LCA studie, které se zabývaly i druhým životním cyklem, prokázaly, že využití repasovaných baterií místo výroby nových baterií v různých aplikacích, ať už jako bateriové úložiště pro běžné domácnosti nebo jako vyrovnávací úložiště elektrických špiček v síti, snížilo ekologickou zátěž ve většině kategorií dopadů na životní prostředí. Tyto studie byly z různých částí světa z různých klimatických podmínek. Navíc se prokázalo, že samotná fáze repasování/předělání baterie pro nový účel má minimální dopad na životní prostředí v rámci celého, dvojitého životního cyklu baterie. Studie počítaly s bateriemi ve špatném technickém stavu, kdy by se musela měnit až polovina komponent příslušné baterie, protože stále není dostatek studií zabývajících se daným tématem. Proto všechny studie měly robustní citlivostní analýzy, které se například věnovaly poklesu efektivity baterie v rámci stárnutí nebo podílu OZE na energetickém mixu.

Většina dat, která byla využita v jednotlivých LCA studiích, nebyla z primárních zdrojů, zejména fáze recyklace a výroby baterií se opírají o několik málo studií s laboratorními nebo modelovanými daty.

Rozdílné konce životního cyklu baterie z elektromobilu jsou jedním z aspektů ovlivňujících celkový dopad na životní prostředí během životního cyklu baterie, mezi další patří daný typ baterie z chemického hlediska nebo také energetický mix výroby elektřiny v daném státě. Studie ukázaly, že konec životního cyklu je nezanedbatelný aspekt. Je tudíž potřeba s koncem životnosti baterie naložit nejlépe, jak to dnešní technologie dovolují. Proto, jak ukázaly studie, je potřeba aplikovat myšlenku second life. Navíc, čím více studií se provede, tím lépe se dokážou zpřesnit výsledky a navrhnout ještě vhodnější možnosti aplikací už jednou použitých baterií.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení elektrických vozidel [1]	12
Obrázek 2: Lunární rover [3]	14
Obrázek 3: Tesla roadster [3]	14
Obrázek 4: Elektromobil EMA [6]	15
Obrázek 5: Počet EV ve světě v letech 2010 až 2021 [7]	16
Obrázek 6: Podíl flotily osobních automobilů na alternativní pohony [9]	17
Obrázek 7: Scénář globálních prodejů EV [7]	18
Obrázek 8: Poptávka po bateriích pro EV dle typu vozidla a podle geografie [7]	19
Obrázek 9: Počet dobíjecích stanic ve světě [7]	19
Obrázek 10: Predikce EV v ČR [10]	20
Obrázek 11: Vývoj elektronických součástek od roku 1991 [24]	21
Obrázek 12: Baterie modelu ENYAQ iV [33]	24
Obrázek 13: Ceny klíčových kovů v bateriích [32]	28
Obrázek 14: Světová produkce hlavních materiálů pro lithiové baterie [19]	29
Obrázek 15: Geografické rozložení výrobního řetězu baterií pro EV [7]	30
Obrázek 16: Životní cyklus baterie [21]	30
Obrázek 17: Recyklační technologie [19]	32
Obrázek 18: Proces LCA převzatý ze standardů ISO 14040 [11]	36
Obrázek 19: Life cycle climate change impacts of a battery electric vehicle with a refurbished battery [35]	42
Obrázek 20: Porovnání snížení oxidu uhličitého při různé konverzi článků [35]	43
Obrázek 21: Výsledky jednotlivých scénářů [35]	43
Obrázek 22: Human Carcinogenic Toxicity (HCT) [35]	44
Obrázek 23: Výsledky jednotlivých scénářů pro LCOE (a) a potenciál globálního oteplování (b) (Rezidenční scénář uvažuje nabíjení a nenabíjení baterií – electric vehicle charging [37]	45
Obrázek 24: Výsledky kategorií dopadu jednotlivých scénářů [39]	47
Obrázek 25: Změny dopadů na životní prostředí při změně alokace výroby baterie [39]	49
Obrázek 26: Porovnání emisí CO ₂ u baterií [42]	51
Obrázek 27: Porovnání spotřeby primární energie [42]	51
Obrázek 28: Porovnání dopadů jednotlivých scénářů [48]	53
Obrázek 29: Porovnání dopadů LIO a NMC na jednotlivé kategorie dopadů na životní prostředí [50]	54
Obrázek 30: Porovnání změn dopadů na životní prostředí při změně parametrů studie [50]	55
Obrázek 31: ADP při jednotlivých scénářích [53]	57
Obrázek 32: Porovnání hodnot CO ₂ eq/kWh [53]	57
Obrázek 33: Porovnání GWP a ODP u jednotlivých scénářů [53]	58
Obrázek 34: Porovnání dopadů LIS a NMC na jednotlivé kategorie dopadů na životní prostředí [56]	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání parametrů uvedených baterií [17]	26
Tabulka 2: Srovnání jednotlivých studií	39

Seznam použitých zkratek

- ADP - Potenciál vyčerpání abiotických zdrojů (Abiotic Depletion Potential)
- BEV - Elektromobily na baterie (Battery Electric Vehicles)
- CED - Kumulativní spotřeba energie (Cumulative Energy Demand)
- EoL – Konec životni (End of Life)
- EP – Eutrofizační potenciál (Eutrophication Potential)
- EV - Elektrická vozidla (Electric Vehicles)
- FCEV - Elektromobily s palivovými články (Fuel Cell Electric Vehicles)
- FDP - Potenciál vyčerpání fosilních paliv (Fossil Depletion Potential)
- FEP - Potenciál eutrofizace sladkých vod (Freshwater Eutrophication Potential)
- FETP - Potenciál ekotoxicity sladkých vod (Freshwater Ecotoxicity Potential)
- FPMF – Vznik jemného částicového materiálu (Fine Particulate Matter Formation)
- GWP - Potenciál globálního oteplování (Global Warming Potential)
- HCT - Potenciál lidské karcinogenní toxicity (Human Carcinogenic Toxicity)
- HEV - Hybridní elektromobily (Hybrid Electric Vehicles)
- HnCT - Potenciál lidské nekarcinogenní toxicity (Human non-Carcinogenic Toxicity)
- HTP - Potenciál lidské toxicity (Human Toxicity Potential)
- LCA - Posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment)
- LCC - Náklady životního cyklu (Life Cycle Cost)
- LCO - Lithium-kobaltový oxid (Lithium Cobalt Oxide)
- LCOE – Vyrovnávací cena elektřiny (Levelized cost of electricity)
- LCIA - Posuzování dopadů životního cyklu (Life Cycle Impact Assessment)
- LFP - Lithium-železný fosfát (Lithium Iron Phosphate)
- LIB - Lithium-iontová baterie (Lithium-ion Battery)
- LIO - Lithium-kyslíkový (Lithium Oxygen)
- LIS - Lithium-síra (Lithium Sulfur)
- LMO - Lithium-iontový manganový oxid (Lithium-ion Manganese Oxide)
- LTO - Lithium-titanový oxid (Lithium Titanium Oxide)
- MDP - Potenciál vyčerpání kovů (Metal Depletion Potential)
- MEP - Potenciál eutrofizace mořských vod (Marine Eutrophication Potential)
- METP - Potenciál ekotoxicity mořských vod (Marine Ecotoxicity Potential)
- MRS - Potenciál nedostatku nerostných surovin (Mineral Resource Scarcity)
- NCA - Lithium-niklový kobaltový hliník (Lithium Nickel Cobalt Aluminum)
- NMC - Lithium-niklový manganový kobaltový oxid (Lithium Nickel Manganese

Cobalt Oxide)

ODP - Potenciál vyčerpání ozonové vrstvy (Ozone Depletion Potential)

PHEV - Plug-in hybridní elektromobily (Plug-in Hybrid Electric Vehicles)

PMFP - Potenciál tvorby částicového znečištění (Particulate Matter Formation Potential)

POFP - Potenciál tvorby fotochemických oxidantů (Photochemical Oxidant Formation Potential)

PV – Fotovoltaika (Photovoltaics)

SLB - Baterie v druhém životě (Second Life Battery)

TAP - Potenciál acidifikace půdy (Terrestrial Acidification Potential)

TEGDME – Triethylenglykol dimethylether (Triethylene Glycol Dimethyl Ether)

TETP - Potenciál ekotoxicity půdy (Terrestrial Ecotoxicity Potential)

Seznam použité literatury

- [1] HROMÁDKO, Jan. Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. 1. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1
- [2] Types of Electric Cars and Working Principles | PT. Omazaki. PT. Omazaki Envirokal Prakarsa [online]. 27. 9. 2019 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.omazaki.co.id/en/types-of-electric-cars-and-working-principles/>
- [3] Department of Energy [online]. Washington DC [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>
- [4] Edison Tech Center [online]. 2014 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <http://edisontechcenter.org/ElectricCars.html>
- [5] ČERVENKA, Jan. První český elektromobil z roku 1895 měl hybridní pohon, který používá BMW i3. Eon.cz [online]. 2019, 25. 6. 2019 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/energy-globe/temata-a-novinky/prvni-cesky-elektromobil-vznikl-v-roce-1895-a-mel-hybridni-pohon-ktery-pouziva-bmw-i3/>
- [6] Tuzemský elektromobil EMA předběhl dobu o desítky let. Elektrina.cz [online]. 14. 12. 2018 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/elektromobil-ema>
- [7] International Energy Agency (IEA) [online]. 2022 [cit. 2022-11-19]. Dostupné z: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- [8] International Energy Agency (IEA) [online]. 2023 [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>
- [9] European Alternative Fuels Observatory. European Commission [online]. 2023 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/czech-republic/vehicles-and-fleet>
- [10] Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility. Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. 6.5.2020 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/>
- [11] HANIFI, A., F. TOHA a S. AHMAD. Electric Vehicle Battery Modelling and Performance Comparison in Relation to Range Anxiety. *Procedia Computer Science* [online]. 2015, 1999, (76), 250-256 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S187705091503851X?token=D3DDBB60B7A4D7E5ADCFOF16AF76ADD63BAFAC2CA1DAF934B48B5D31CF0176C32B14CF612A1ABD7A5116AA510DEED96C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230111100844>
- [12] Electric vehicle technology explained [online]. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2012 [cit. 2023-05-08]. ISBN 978-111-9942-733. Dostupné z: <http://www.iqytechnicalcollege.com/BAE%20685Electric%20Vehicle%20Technology.pdf>

- [13] Improvements in battery and computing technologies. [online]. Vancouver: Cadex Electronics, 2021 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-002-introduction>
- [14] Automotive Battery. LG Chem [online]. Seoul, Jižní Korea: LG, 2020 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.lgchem.com/product/PD00000148>
- [15] K. Young, C. Wang, L. Y. Wang, and K. Strunz, Electric Vehicle Battery Technologies. 2015.
- [16] Seznamte se s MEB, základem modelu ENYAQ iV. *Skoda-storyboard* [online]. Mladá Boleslav: Škoda Auto, 2020 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/modely-cs/enyaq-cs/seznamte-se-s-meb-zakladem-modelu-enyaq-iv/>
- [17] *Types of Lithium-ion* [online]. Vancouver: Cadex Electronics, 2021 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [18] MARUŠINEC, Jaromír. Elektromobilita v České republice. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016 [cit.2023-05-04]. Dostupné z http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2016/Perspektivy_emobility_Amper_2016/02_Maru%C5%A1inec_AMPER_2016.pdf
- [19] SLATER, Michael D., Kim DONGHAN, Lee EUNGJE a Christopher S. JOHNSON. Sodium-ion batteries. *Advanced functional materials* [online]. 2012, 23(8) [cit. 2023-05-04]. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201200691>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201200691>
- [20] LIBICH, Jiří, Marie SEDLAŘÍKOVÁ, Jiří VONDRÁK a Martin FRK. Akumulátory lithium-vzduch [online]. Brno, 2014 [cit.2023-05-05]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/akumulatory-lithium-vzduch--lithium-air-batteries/>
- [21] OZANAM, Francois a Michel ROSSO. Silicon as anode material for Li-ion batteries. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 2016, (213), s. 2-11 [cit. 2023-05-05].DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.04.016>. ISSN 0921-5107. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510716300435>
- [22] 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. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511930474X>
- [23] A Second Life for Electric Vehicle Batteries: Answering Questions on Battery Degradation and Value. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* [online]. 2015, 14.4.2015, 8(2), 544-553 [cit. 2022-12-03]. ISSN 1946-3987. Dostupné z: doi:10.4271/2015-01-1306
- [24] Sustainability Assessment of Second Life Application of Automotive Batteries (SASLAB). *Publications Office of the European Union* [online]. 2018 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/743e967a-b187-11e8-99ee-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>

- [25] *Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage* [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Second%20life%20EV%20batteries%20The%20newest%20value%20pool%20in%20energy%20storage/Second-life-EV-batteries-The-newest-value-pool-in-energy-storage.pdf>
- [26] GRAHAMS, Evans. A reckoning for EV battery raw materials. In: S&P Global Mobility [online]. 2022 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.spglobal.com/mobility/en/research-analysis/a-reckoning-for-ev-battery-raw-materials.html>
- [27] European Commission, Directorate-General for Environment, *Towards the battery of the future*, Publications Office, 2018. Dostupné z: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/674936>
- [28] FOSTER, Meaghan, Paul ISELY, Charles Robert STANDRIDGE a Md Mehedi HASAN. Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. *Journal of Industrial Engineering and Management* [online]. 2014, 7(3), 698-715 [cit. 2023-06-25]. ISSN 2013-0953. Dostupné z: doi:10.3926/jiem.939
- [29] BEAUDET, Alexandre, François LAROUCHE, Kamyab AMOUZEGAR, Patrick BOUCHARD a Karim ZAGHIB. *Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials* [online]. In: . 20. July 2020 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5837#B1-sustainability-12-05837>
- [30] ROMARE, Mia a Lisbeth DAHLLÖF. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries* [online]. In: . [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/transporter/c243-the-life-cycle-energy-consumption-and-co2-emissions-from-lithium-ion-batteries-.pdf>
- [31] HORNE, Ralph E., Tim GRANT a Karli VERGHESE. *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects* [online]. Victoria: CSIRO Publishing, 2009. ISBN 9780643094529;0643094520
- [32] Hauschild, Michael Z., Ralph K. ROSENBAUM, String Irving OLSEN a Editors. *Life cycle Assessment, Theory and Practice*. Montpellier: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-56474-6
- [33] KOČÍ, Vladimír. *Posuzování životního cyklu Life Cycle Assessment - LCA*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 978-80-86832-42-5.
- [34] KOČÍ, Vladimír. *Environmentální dopady: posuzování životního cyklu*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-858-0.
- [35] KOROMA, Michael Samsu, Daniele COSTA, Maeva PHILIPPOT, Giuseppe CARDELLINI, Md Sazzad HOSEN, Thierry COOSEMANS a Maarten MESSAGIE. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. *Science of the Total Environment* [online]. 2022, (831) [cit. 2023-07-07]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:/10.1016/j.scitotenv.2022.154859
- [36] Report – Vehicles in use, Europe 2019. *ACEA* [online]. Belgie, 2019 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-in-use-europe-2019/>

- [37] KAMATH, Dipti, Siddharth SHUKLA, Renata ARSENAULT, Hyung Chul KIM a Annick ANCTIL. Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications. *Waste Management* [online]. 2020, (113), 497-507 [cit. 2023-07-10]. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:/10.1016/j.wasman.2020.05.034.
- [38] KIM, Hyung Chul, Timothy J. WALLINGTON, Renata ARSENAULT, Chulheung BAE, Suckwon AHN a Jaeran LEE. Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis [online]. 2016, 50(14), 7715-7722 [cit. 2023-07-21]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.6b00830
- [39] BOBBA, Silvia, Fabrice MATHIEUX, Fulvio ARDENTE, Gian Andrea BLENGINI, Maria Anna CUSENZA, Andreas PODIAS a Andreas PFRANG. Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows. *Journal of Energy Storage* [online]. 2018, (19), 213-225 [cit. 2023-07-10]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:/10.1016/j.est.2018.07.008.
- [40] European Commission, Joint Research Centre, Marwede M, Mathieux F, Talens Peiró L, Chancerel P. Feasibility study for setting-up reference values to support the calculation of recyclability / recoverability rates of electr(on)ic products. Publications Office; 2016., [cit. 2023-07-10] Dostupné z: doi:/10.2788/901715
- [41] NEUBAUER, Jeremy a Ahmad PESARAN. The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications. In: *Journal of Power Sources* [online]. 2011, s. 10351-10358 [cit. 2023-07-21]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2011.06.053
- [42] WANG, Shuoyao a Jeongsoo YU. A comparative life cycle assessment on lithium-ion battery: Case study on electric vehicle battery in China considering battery evolution. *Waste Management & Research* [online]. 2021, 39(1), 156-164 [cit. 2023-07-08]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X20966637
- [43] China Automotive Technology and Research Center: Yearbook of Energy-Saving and New Energy Vehicle of 2018. Beijing: Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [44] DAI, Q., J. C. KELLY, J. DUNN a P.T. BENAVIDES. Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model. In: Argonne National Laboratory [online]. USA: Argonne National Laboratory, 2018 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: https://greet.es.anl.gov/publication-update_bom_cm
- [45] LI, Bingbing, Xianfeng GAO, Jianyang LI a Chris YUAN. *Life Cycle Environmental Impact of High-Capacity Lithium Ion Battery with Silicon Nanowires Anode for Electric Vehicles* [online]. 2014, **48**(5), 3047-3055 [cit. 2023-07-08]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es4037786
- [46] WANG, Q., Z. YANG a S. ZHOU. Method to recycle waste ternary LiB [online]. In: . Čína, 2013 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/41/ea/42/a4791803692bfe/CN103219562A.pdf>

- [47] Research on the Power Battery Recycling Mechanism and Policy for Shenzhen. In: Green & Low Carbon Development Foundation [online]. 2018 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-ctp-20180710/%E6%B7%B1%E5%9C%B3%E5%B8%82%E5%8A%A8%E5%8A%9B%E7%94%B5%E6%B1%A0%E5%9B%9E%E6%94%B6%E5%88%A9%E7%94%A8%E6%9C%BA%E5%88%B6%E4%B8%8E%E6%94%BF%E7%AD%96%E7%A0%94%E7%A9%B6.pdf>
- [48] GENIKOMSAKIS, Konstantinos N., Christos S. IOAKIMIDIS, Alberto MURILLO, Atanaska TRIFONOVA a Dragan SIMIC. A life cycle assessment of a Li-ion urban electric vehicle battery. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27) [online]. IEEE, 2013, 2013, 1-11 [cit. 2023-07-09]. ISBN 978-1-4799-3832-2. Dostupné z: doi:10.1109/EVS.2013.6914907
- [49] MAJEAU-BETTEZ, Guillaume, Troy R. HAWKINS a Anders Hammer STRØMMAN. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles [online]. 2011, **45**(10), 4548-4554 [cit. 2023-07-09]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es103607c
- [50] WANG, Fenfen, Yelin DENG a Chris YUAN. Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, 264 [cit. 2023-07-09]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.121339
- [51] DENG, Yelin, Jianyang LI, Tonghui LI, Xianfeng GAO a Chris YUAN. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources* [online]. 2017, 343, 284-295 [cit. 2023-07-09]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2017.01.036
- [52] ZACKRISSON, Mats, Kristin FRANSSON, Jutta HILDENBRAND, Gorazd LAMPIC a Colm O'DWYER. Life cycle assessment of lithium-air battery cells. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **135**, 299-311 [cit. 2023-07-09]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.104
- [53] QUAN, Jiawei, Siqi ZHAO, Duanmei SONG, Tianya WANG, Wenzhi HE a Guangming LI. Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies. *Science of The Total Environment* [online]. 2022, (819) [cit. 2023-07-09]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153105
- [54] MATHEYS, Julien, Wout VAN AUTENBOER, Jean-Marc TIMMERMANS, Joeri VAN MIERLO, Peter VAN DEN BOSSCHE a Gaston MAGGETTO. Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2007, **12**(3), 191-196 [cit. 2023-07-13]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1065/lca2007.04.322
- [55] WU, Haohui, Yuchen HU, Yajuan YU, Kai HUANG a Lei WANG. The environmental footprint of electric vehicle battery packs during the production and use phases with different functional units. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2021, **26**(1), 97-113 [cit. 2023-07-13]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-020-01836-3
- [56] DENG, Yelin, Jianyang LI, Tonghui LI, Xianfeng GAO a Chris YUAN. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources* [online]. 2017, 343, 284-295 [cit. 2023-07-09]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2017.01.036