



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

STUDIE EKOLOGICKÉHO DOPADU VÝROBY, PROVOZU A LIKVIDACE RŮZNÝCH TYPŮ AUTOMOBILŮ

STUDY OF THE ECOLOGICAL IMPACT OF PRODUCTION, OPERATION AND DISPOSAL OF VARIOUS
TYPES OF CARS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Kutnar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Jaššo, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Václav Kutnar

ID: 211510

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Studie ekologického dopadu výroby, provozu a likvidace různých typů automobilů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku ekologie výroby, provozu a likvidace vozidel. Provedte rešerši několika LCA analýz týkajících se automobilů a tyto mezi sebou porovnejte. Na základě zjištěných poznatků určete příslušné emisní faktory pro každý emisní zdroj v životním cyklu vozidla. Na základě pečlivě vybraných emisních faktorů proveďte LCA analýzu vozidel vyšší střední třídy s různými typy pohonů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Kamil Jaško, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V zájmu snížení emisí skleníkových plynů se státy zaměřily (mimo jiné) na automobilovou dopravu. Existují však různé druhy pohonu automobilů a každý z nich produkuje v různých částech svého životního cyklu jiné množství emisí, které se navíc v jednotlivých státech liší. Znalost přesných a srovnatelných hodnot je nezbytná pro rozhodování o tom, jak tyto emise co nejefektivněji a nejekonomičtěji snížit. Existující studie se často zaměřují pouze na jednu část životního cyklu a/nebo nejsou lokalizovány na konkrétní stát. Tato studie analyzuje celý životní cyklus vozidla a jeho paliva nebo energie pro vozidlo vyrobené, provozované a recyklované v České republice. Vychází z existujících studií doplněných o údaje státních orgánů, výrobců vozidel a vlastní výpočty. Bylo zjištěno, že v České republice má v porovnání s vozidlem se spalovacím benzínovým motorem (ICEVg) elektromobil (BEV) o 33 % nižší celkové emise skleníkových plynů a vozidlo s vodíkovými palivovými články (FCEV) o 19 % nižší. Vozidlo se spalovacím motorem má však nižší emise již při výrobě, a proto jsou jeho kumulativní emise nižší než u elektromobilu do 70 000 ujetých km a u vozidla s vodíkovými palivovými články do 111 000 km.

Klíčová slova

Analýza životního cyklu, bateriové elektrické vozidlo, emise skleníkových plynů, oxid uhličitý, spalovací motor, vodíkový pohon

Abstract

To reduce greenhouse gas emissions, countries have focused on (among other things) automobile transport. However, there are different car powertrains, and each produces a different amount of emissions from different parts of their lifecycles, which also vary from state to state. Knowing exact, comparable values is necessary for deciding how to reduce these emissions most efficiently and economically possible. Existing studies often focus on only one part of the life cycle and/or are not localized to a particular state. This study analyses the entire life cycle of a vehicle and its fuel or energy for a vehicle manufactured, operated, and recycled in the Czech Republic. It draws on existing studies, supplemented by data from state agencies, vehicle manufacturers, and our calculations. It was found that in the Czech Republic, compared to a vehicle with a petrol internal combustion engine (ICEVg), an electric vehicle (BEV) has 33% lower total GHG emissions, and a vehicle with hydrogen fuel cells (FCEV) 19% lower. However, an internal combustion engine vehicle has lower emissions from its production and as a result, its cumulative emissions are lower than an electric vehicle until 70,000 km driven and a hydrogen fuel cell vehicle until 111,000 km.

Keywords

Life cycle assessment, battery electric vehicle, greenhouse gas emissions, carbon dioxide, internal combustion engine, hydrogen engine

Bibliografická citace

KUTNAR, Václav. *Studie ekologického dopadu výroby, provozu a likvidace různých typů automobilů* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160380>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Kamil Jaško.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Václav Kutnar*

VUT ID studenta: *211510*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2023/2024*

Téma závěrečné práce: *Studie ekologického dopadu výroby, provozu a likvidace různých typů automobilů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 3.5.2024

podpis autora

Obsah

1. EKOLOGIE DOPRAVY	14
1.1 NĚKTERÉ Z POJMŮ VYSKYTUJÍCÍCH SE V PROBLEMATICE EKOLOGIE DOPRAVY	14
1.2 SVĚTOVÉ ZÁVAZKY NA SNÍŽENÍ EMISÍ SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ	15
1.3 UNIJNÍ ZÁVAZKY NA SNÍŽENÍ EMISÍ SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ V DOPRAVĚ	17
1.3.1 <i>Evropské emisní standardy (European Emission Standards)</i>	17
1.3.2 <i>Evropské výkonnostní normy pro emise CO₂ pro nové osobní automobily a lehké užitkové vozy (EU CO₂ emission performance standards for cars and vans)</i>	18
1.3.3 <i>Evropský zelený úděl (European Green Deal) a Fit For 55</i>	19
<i>Fit For 55</i>	20
2. VÝROBA	21
2.1 ŽIVOTNÍ CYKLUS VOZIDLA	21
2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI VOZIDLA	23
2.3 GLIDER.....	23
2.4 POWERTRAIN.....	25
2.4.1 <i>Motor s vnitřním spalováním</i>	25
2.4.2 <i>Výfukový systém, nádrž a další příslušenství</i>	27
2.4.3 <i>Skleníkové plyny vyprodukované výrobou spalovacího motoru</i>	28
2.4.4 <i>Elektromotor</i>	28
2.4.5 <i>Trakční baterie</i>	30
2.4.6 <i>Skleníkové plyny vyprodukované výrobou elektromotoru a akumulátoru</i>	33
2.4.7 <i>Samovybíjení baterie</i>	33
2.4.8 <i>Vodíkový pohon</i>	34
2.4.9 <i>Skleníkové plyny vyprodukované výrobou pohonné jednotky vozidla s vodíkovými palivovými články či vodíkovým spalovacím motorem</i>	37
2.5 CELKOVÉ EMISE SKLENÍKOVÝCH PLYNŮ Z PRODUKCE VOZIDLA.....	37
3. PROVOZ.....	39
3.1 BENZÍN.....	39
3.2 ELEKTRICKÁ ENERGIE	42
3.2.1 <i>Energetický mix v České republice</i>	42
3.2.2 <i>Ztráty při výrobě a v přenosové a distribuční síti</i>	44
3.3 NABÍJECÍ ZTRÁTY	45
3.4 VODÍK	45
3.4.1 <i>Neobnovitelné zdroje vodíku</i>	46
3.4.2 <i>Obnovitelné zdroje vodíku</i>	46
3.4.3 <i>Transport a tankování vodíku</i>	47
3.4.4 <i>Vodík v ČR</i>	48
4. KONEC ŽIVOTNÍHO CYKLU	49
4.1 LEGISLATIVA.....	49
4.2 RECYKLACE.....	50
5. PRAKTICKÁ ČÁST.....	53
5.1 POUŽITÉ VZTAHY.....	53

5.1.1	BEV.....	53
5.1.2	ICEV – benzín i diesel.....	54
5.1.3	FCEV.....	55
5.2	PRÍMÉ SROVNÁNÍ VŠECH POHONŮ.....	57
5.3	VLIV SAMOVYBÍJENÍ BATERIE BEV.....	58
5.4	VLIV NABÍJECÍCH ZTRÁT.....	60
5.5	VLIV EMISNÍHO FAKTORU ELEKTRINY NA PROVOZ BEV.....	60
5.6	VLIV EMISNÍHO FAKTORU VODÍKU NA EMISE FCEV.....	61
5.7	PALIVO VOZIDEL SE SPALOVACÍM MOTOREM.....	62

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj koncentrace CO ₂ , metanu a prachu v atmosféře vzhledem ke globální teplotě. Data získána z arktického ledovce [1].	12
Obrázek 2: Flotilové emise jednotlivých uskupení automobilek pro rok 2020 [33]	19
Obrázek 3: Analýza životního cyklu	21
Obrázek 4: Životní cyklus vozidel s různými typy pohonu	22
Obrázek 5: Čtyřdobý zážehový motor s vnitřním spalováním [55]	26
Obrázek 6: Synchronní motor s vnějším buzením od firmy BMW [64]	29
Obrázek 7: Princip lithium-iontové baterie [62]	30
Obrázek 8: Proces výroby 24 kWh battery packu používaného v Nissan Leaf a Chevrolet Volt [72]	32
Obrázek 9: PEMFC palivový článěk [83]	34
Obrázek 10: Vodíkový spalovací motor firmem Yamaha a Toyota - 5.0L V8 450hp [89]	36
Obrázek 11: Atmosférická destilace ropy [92]	40

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výběr ze závazků přijatých v rámci Pařížské dohody [23].....	16
Tabulka 2: Evropské emisní standardy, benzínové motory. Hodnoty jsou v g/km, pokud není stanoveno jinak [24][25][26][28][29][30]	17
Tabulka 3: Evropské emisní standardy, naftové motory. Hodnoty jsou v g/km, pokud není stanoveno jinak [24][25][26][28][29][30]	18
Tabulka 4: Navrhované úrovně snížení výfukových emisí oxidu uhličitého. [36]	20
Tabulka 5: Poměr váhy některých materiálů a dopadad jejich produkce na životní prostředí [42]	23
Tabulka 6: Materiálové zastoupení článku NMC 811 [73].....	31
Tabulka 7: Energetická náročnost různých fází výroby 24 kWh battery packu používaného v Nissan Leaf a Chevrolet Volt [72].....	32
Tabulka 8: Typické materiálové složení vodíkových palivových článků a nádrže [43]	35
Tabulka 9: Emise GHG vyprodukované výrobou vozidla	38
Tabulka 10: Emise CO _{2ekv.} vyprodukované v jednotlivých fázích životního cyklu fosilních paliv. Nafta uvedena pro porovnání. [98]	41
Tabulka 11: Emise vybraných typů zdrojů elektrické energie. Hodnoty jsou uvedeny v gCO _{2ekv} /kWh [101]	43
Tabulka 12: Celková výroba elektrické energie v ČR napříč všemi zdroji a korespondující emise skleníkových plynů [100]	43
Tabulka 13: Ztráty při výrobě a distribuci elektrické energie [100]	44
Tabulka 14: Emisní faktor různých druhů výroby vodíku. Nejsou zahrnuty emise vyprodukované výstavbou výrobní infrastruktury. [103][111][112][113]	47
Tabulka 15: Vliv recyklace na emise skleníkových plynů – bez zohlednění bonusů z recyklačního procesu	52
Tabulka 16: Vliv recyklace na emise skleníkových plynů – včetně zohlednění bonusů z recyklačního procesu	52
Tabulka 17: Vybrané technické parametry vybraných vozidel [142][143][144][145][146].....	56
Tabulka 18: Flotilové limity výfukových emisí CO ₂	63
Tabulka 19: Průměrné budoucí hodnoty EF elektřiny v ČR.....	81

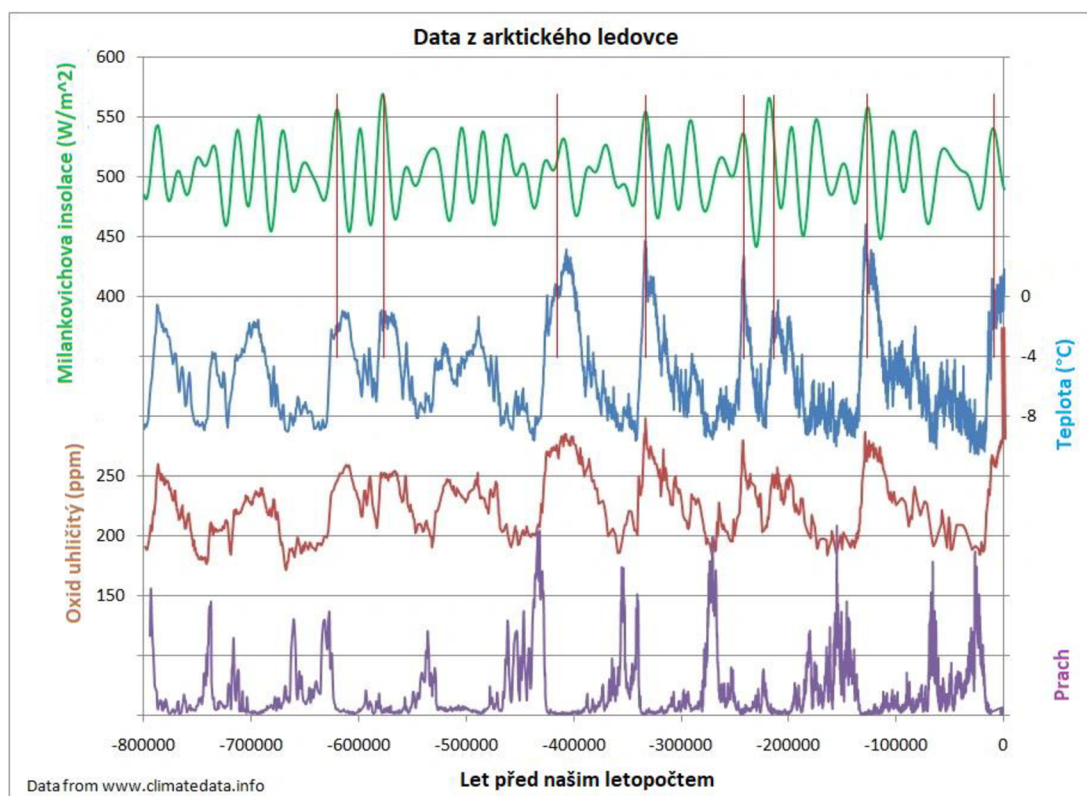
Seznam grafů

Graf 1: Rozložení vyprodukovaných emisí CO ₂ globálně [7]	14
Graf 2: Rozložená vyprodukovaných emisí CO ₂ napříč sektory EU [8]	14
Graf 3: Typické rozložení hmotnosti mezi materiály použitými ve spalovacím motoru a převodovce [45]	27
Graf 4: Typické rozložení hmotnosti mezi materiály použitými ve spalovacím motoru a převodovce dle GREET2022 [61]	27
Graf 5: Celkové emise GHG pro ICEV, FCEV a BEV	58
Graf 6: Vliv samovybíjení trakční baterie elektromobilu	59
Graf 7: Vliv nabíjecích ztrát na celkové kumulativní emise GHG u BEV	60
Graf 8: Vliv EF elektřiny na celkové kumulativní emise GHG u BEV. ICEVd pro referenci	61
Graf 9: Vliv EF vodíku na emise GHG u FCEV	62

ÚVOD

Již od dob, kdy člověk poprvé začal chovat hospodářská zvířata a začaly se objevovat první náznaky zemědělství, přetváří životní prostředí ke svým potřebám. Tyto činnosti mu obvykle přináší určitý primární užitek (v tomto případě například potravu), avšak mívají i druhotné efekty – kupříkladu nutné odlesnění ploch pro pastvu, nutnost zásahů do biodiverzity za účelem omezení predátorů ohrožujících hospodářská zvířata a další. Určitým problémem je, že ač primární užitek je obvykle pro člověka zřetelný ihned, druhotné efekty již tak být nemusí a jejich dopad může být zřejmý až s odstupem času a v širších souvislostech.

Po většinu historie lidstva byl člověk indiferentní k těmto druhotným faktorům. Pouze až v několika posledních desetiletích se lidstvo jako takové začalo postupně více a více věnovat dopadu jeho činnosti na životní prostředí, a to ať v lokálním tak především globálním hledisku.



Obrázek 1: Vývoj koncentrace CO₂, metanu a prachu v atmosféře vzhledem ke globální teplotě. Data získána z arktického ledovce [1].

Klimatická změna je vývoj klimatu probíhající v určitém časovém měřítku po dlouhou dobu jednostranně, tedy k ochlazení nebo oteplení. Měřítko může být od desetiletí po miliony let.[2] Příčiny změn mohou být různé a často cyklické. Jedná se o širokou paletu vlivů od změn intenzity slunečního záření, periodických změn parametrů oběžné dráhy země okolo slunce (Milankovičovy cykly), změn albeda zemského povrchu, vulkanická aktivita či koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. [1][3]

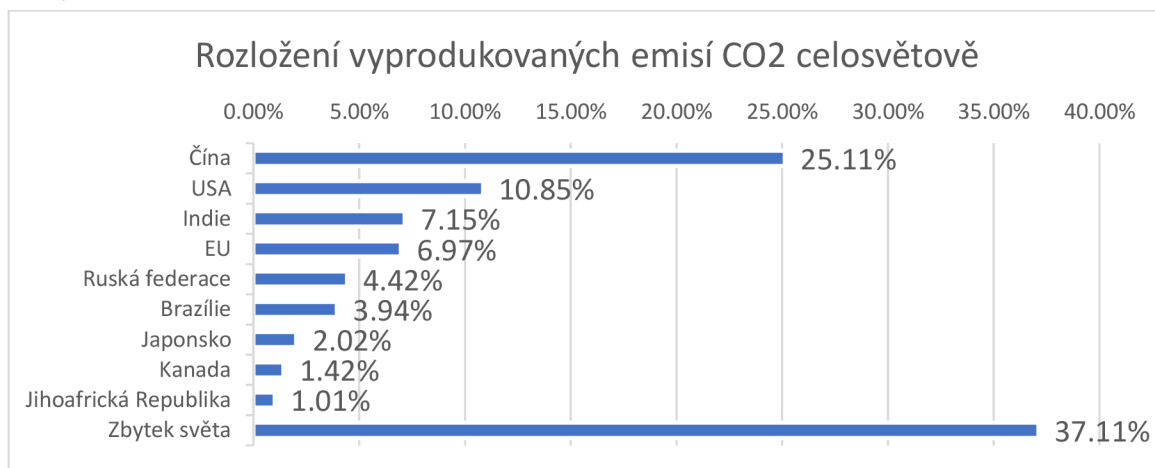
Díky vědecké činnosti však bylo zjištěno, že aktuální vývoj klimatu neodpovídá předchozím cyklům; že dochází k neočekávaným změnám, jejichž jeden z následků je zvyšování průměrné globální teploty. Tento jev je zřetelný v neposlední řadě proto, že vzhledem k předchozím klimatickým cyklům by země měla začít přecházet z dlouhodobého teplotního maxima směrem k nižším teplotám a eventuálně k další době ledové. Tento fenomén je obecně označován jako globální oteplování. Podle aktuálních poznatků je pak právě tato divergence od předchozích cyklů způsobena především antropogenní činností [4].

Jedním z hlavních činitelů způsobující zvyšování globální teploty je nadměrné produkování skleníkových plynů. Skleníkové plyny jsou obecně kriticky důležité pro funkci atmosféry a klimatu, avšak jejich nadměrná koncentrace v atmosféře může vést ke změnám klimatických procesů. V atmosféře nejvíce zastoupeným skleníkovým plynem s celkově největším vlivem na klima je vodní pára, následovaná oxidem uhličitým, metanem, oxidem dusným, freony a ozónem [3]. Mnohé státy a nadnárodní organizace si na základě těchto zjištění postupně začaly uvědomovat možné riziko a začaly přicházet s návrhy a závazky, jak omezit emitování těchto plynů lidskou činností a předejít tak potenciálně vážným dopadům na klima a život na zemi jako takový.

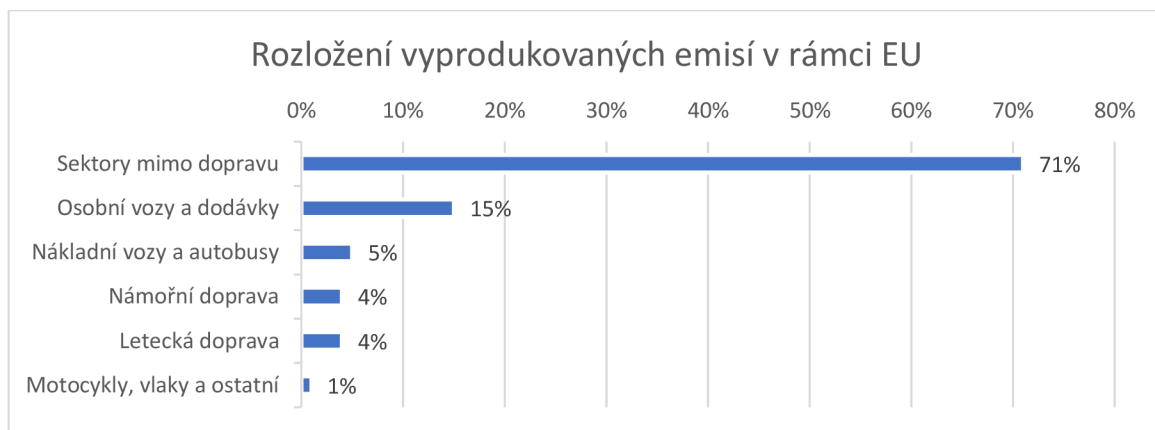
Jedním z celosvětově hlavních producentů skleníkových plynů je doprava [5]. Konečným cílem této práce bude právě vyhodnocení vlivu celého životního cyklu vozidel s různými pohony na množství vyprodukovaných skleníkových plynů, a přeneseně i na zemské klima jako takové.

1. EKOLOGIE DOPRAVY

Celosvětově bylo v roce 2021 lidskou činností vyprodukováno 37,9 miliard tun oxidu uhličitého [6]. Rozložení těchto emisí mezi jednotlivé státy je patrné z grafu 1. Rozložení vyprodukovaných emisí v rámci EU je pak vyobrazeno v grafu 2. Z dat je zřejmé, že Unijní osobní automobilová doprava a dodávky se na celosvětových emisích CO₂ podílejí ze 1,35 %.



Graf 1: Rozložení vyprodukovaných emisí CO₂ globálně [7]



Graf 2: Rozložená vyprodukovaných emisí CO₂ napříč sektory EU [8]

1.1 Některé z pojmů vyskytujících se v problematice ekologie dopravy

V literatuře zabývající se tématem ekologie dopravy se vyskytuje několik pojmů, jejichž význam je často špatně interpretován a je na místě je zde označit a vysvětlit. Jejich misinterpretace může vést k nepochopení či chybným závěrům.

CO₂ ekv – zjednodušeně řečeno se jedná o množství CO₂, které má ke skleníkovému jevu atmosféry stejný ekvivalentní příspěvek jako dané množství příslušného plynu vztažené obvykle k časovému horizontu 100 let (GWP₁₀₀). Pro přesnější definice pak lze citovat kupříkladu normu ČSN EN 16214-1, ve které je popsán jako „jednotka porovnávající časový integrál radiačně absorpčního účinku skleníkového plynu a oxidu uhličitého“.

GWP – Global Warming Potential neboli „Potenciál globálního oteplování“. Jedná se o měřítko, kolik tepla v atmosféře zachytí určitý plyn v poměru ku oxidu uhličitému [9].

Cradle-to-Grave – česky „Od kolébky do hrobu“. Tento přístup vyhodnocování dopadu zvažuje každou fázi životního cyklu produktu. Od vytěžení potřebných surovin přes jednotlivé fáze jejich zpracování a následné výroby a montáže přes užívání až po konec života produktu a jeho recyklaci či likvidaci [10].

W-T-T – Well-to-Tank neboli „Od zdroje do nádrže“. Tento přístup se užívá pro vyhodnocování dopadu paliv užívaných ve vozidlech na životní prostředí. U tohoto přístupu se vyhodnocují emise vyprodukované od těžby, rafinace, zpracování, transportu a plnění paliva do nádrže či akumulátoru vozidla. Emise vyprodukované spotřebou paliva se neuvažují [11].

W-T-W – Well-to-Wheel neboli „Od zdroje ke kolům“. Podobný přístup jako u W-T-T, nicméně zde se již počítá i s emisemi vyprodukovanými spotřebou paliva ve vozidle [11].

Uhlíková intenzita – Udává, jaké množství emisí (typicky CO₂ nebo CO₂ ekv) je vyprodukováno za každý vyrobený výrobek nebo vykonanou službu. Příklad: uhlíková intenzita výroby elektřiny určitého státu je 536 gCO₂ ekv/kWh [12].

1.2 Světové závazky na snížení emisí skleníkových plynů

Jedním ze závazků na snížení emisí je Rámcová úmluva OSN změně klimatu (UNFCCC), což je mnohostranná úmluva o ochraně klimatického systému a omezení globálního oteplování. Tato úmluva byla podepsána 196 státy + EU jako celkem v červnu 1992 v Rio de Janeiro [13]. V rámci úmluvy se strany zavázaly k inventarizaci svých emisí skleníkových plynů, k sestavení a zrealizování národních programů zaměřených na redukci emisí, podporovat rozvoj relevantních technologií a vědeckého výzkumu a vzájemně komunikovat a spolupracovat. Na základě této smlouvy se nepravidelně každý rok či každý druhý rok pořádá konference smluvních stran, kde se projednávají dosažené výsledky a projednávají aktualizace stanovených cílů.

Ze závěrů UNFCCC pak vychází Kjótský protokol – rámcová úmluva OSN o změně klimatu, který byl přijat v roce 1997 [14]. Země této úmluvy se zavázaly, že ke konci prvního kontrolního období (2008–2012) sníží své emise skleníkových plynů nejméně

o 5,2 % oproti roku 1990 [15]. Pro následující druhé kontrolní období (2013–2020) byly přijaty další závazky, přičemž 28 států EU se zavázalo ke snížení emisí skleníkových plynů o 20 % oproti roku 1990. K této druhé fázi se však připojila pouze část signatářů úmluvy.

V návaznosti na dříve schválený Kjótský protokol byla dne 22.4.2016 podepsána 177 státy Pařížská dohoda. V nynější době je pak signatářů již 195, a v rámci této dohody musí všechny ratifikující státy předložit vlastní závazky na snížení emisí skleníkových plynů [16]. Vyspělé státy navíc vytvořily mechanismus, pomocí kterého je každý rok alespoň 100 mld. USD přerozdělených mezi rozvojové země za účelem podpory jejich aktivit ke snížení emisí. Je nutné však podotknout, že závazky přijaté v Pařížské dohodě nejsou vymahatelné, a od dohody lze odstoupit (viz USA 1.6.2017 [17] až 20.1.2021).

Ačkoliv bývá na záměru snižování emisí shoda napříč všemi signatáři, existují určité rozdíly v názoru na rychlost snižování emisí a horizontu do kdy těchto cílů má být dosaženo. Západní země s rozvinutou ekonomikou obecně směřují k ambicióznějším cílům v bližším horizontu, kdežto rozvíjející se země v některých případech směřují spíše k nižším cílům se vzdálenějším termínem [18]. Tyto země argumentují tím, že tyto závazky budou mít negativní efekt na výkon jejich hospodářství, a že také chtějí mít šanci dosáhnout životní úrovně již rozvinutých států. Například Čína, ačkoliv se zavázala k dosažení uhlíkové neutrality do roku 2060 [19], zároveň předpokládá že k samotnému snižování vyprodukovaných emisí skleníkových plynů bude docházet až (nejpozději) od roku 2030, a do té doby se budou její emise dále zvyšovat [20]. Tyto faktory musí brát v potaz státy s rozvinutým hospodářstvím, protože dosahování ambicióznějších klimatických cílů tím, že budou přesouvat těžký průmysl a znečišťující výrobu do rozvojových zemí s méně rozvinutým hospodářstvím a energetickou soustavou nemusí mít v globálním měřítku zamýšlený efekt. Zboží vyrobené v těchto zemích může mít ještě vyšší uhlíkovou stopu než to samé zboží vyrobené v rozvinuté zemi. Tabulka 1 zobrazuje závazky některých signatářských států. Ve sloupci „Závazek (2030)“ je hodnota udávající o kolik procent se mají snížit jejich emise skleníkových plynů.

Česká republika v tuto chvíli své závazky neplní [21], podobně jako většina ostatních států světa [22].

Tabulka 1: Výběr ze závazků přijatých v rámci Pařížské dohody [23]

Stát	Závazek (2030)	Stát	Závazek (2030)
Čína	-65 % oproti r. 2005	Jižní Korea	-40 % oproti r. 2018
USA	-50 % oproti r. 2005	Indonésie	-31,89 % oproti statu quo
UE 27	-55 % oproti r. 1990	Saúdská Arábie	-19 až +24 % oproti r. 2019
Indie	-45 % oproti r. 2005	Kanada	-40 až -45 % oproti r. 2005
Rusko	-30 % oproti r. 1990	Brazílie	-50 % oproti r. 2005
Japonsko	-46 % oproti r. 2013	JAR	-0,1 až -23 % oproti r. 2019

1.3 Unijní závazky na snížení emisí skleníkových plynů v dopravě

Na úrovni Evropské unie již platí nebo je v procesu schvalování hned několik předpisů a nařízení, jejichž cílem je postupné snižování emisí vyprodukovaných v silniční dopravě. Každá se k problematice staví trochu jiným způsobem, avšak jejich společným cílem je směřovat evropskou individuální mobilitu k upuštění od užívání spalovacích motorů a k přechodu na bezemisní zdroje pohonu.

1.3.1 Evropské emisní standardy (European Emission Standards)

Testování dle této normy spočívá v měření množství emisí vyprodukovaných pohonnou jednotkou vozu při jeho provozu. Z počátku se k regulaci emisí využívalo, a doposud i využívá *European Emission Standards*, jinak známe jako normy EURO 1 až 7. Tyto byly zavedeny v roce 1992 a nejdříve se soustředily především na emise pevných částic a oxidu uhelnatého; limity na exhalace oxidů dusíku u revize EURO 1 [24] a 2 [25] byly nastaveny relativně volně.

To se však s nástupem dalších verzí této normy postupně měnilo, a v dnešní době jsou již na poměrně přísné úrovni. Norma EURO 6d [26] požaduje nejvýše 0,08, respektive 0,06 g/km vypuštěných oxidů dusíku pro benzínové a naftové osobní vozy. Plánovaná poslední revize normy – EURO 7 [26] má ponechat limity oxidů dusíku na stejné úrovni, a zpřísnovat se mají pouze limity pro emise pevných částic. Sledované přitom mají být nejen emise výfukové, ale i emise z otěru pneumatik a brzd, přičemž u EV se má jednat o přísnější limit než u ICEV. Dále se stanovují požadavky na životnost trakčních baterií EV a PHEV. Baterie budou muset mít po ujetí 100 000 km nejméně 80 % své původní kapacity a po ujetí 160 000 nejméně 72 %. Norma by měla vejít v platnost 30 měsíců po jejím schválení v případě osobních vozidel a dodávek a 48 měsíců v případě nákladních vozidel a autobusů.

Tabulka 2: Evropské emisní standardy, benzínové motory. Hodnoty jsou v g/km, pokud není stanoveno jinak [24][25][26][28][29][30]

Verze	Datum	CO	NO _x	HC+NO _x	PM	PN[#/km]
Euro 1	1992	2,72/3,16	-	0,97/1,13	0,14/0,18	-
Euro 2	1996	1	-	0,7	0,8	-
Euro 3	2000	0,66	0,5	0,56	0,05	-
Euro 4	2005	0,5	0,25	0,3	0,025	-
Euro 5a/b	2009/2011	0,5	0,18	0,23	0,005/0,0045	-/6·11 ¹¹
Euro 6b/d	2014/2020	0,5	0,08	0,17	0,0045	6·11 ¹¹

Tabulka 3: Evropské emisní standardy, naftové motory. Hodnoty jsou v g/km, pokud není stanoveno jinak [24][25][26][28][29][30]

Verze	Datum	CO	THC	NMHC	NO _x	HC+NO _x	PM	PN [#/km]
Euro 1	1992	2,72/ 3,16	-	-	-	0,97/,13	0,14/ 0,18	-
Euro 2	1996	1	-	-	-	0,7	0,8	-
Euro 3	2000	0,66	0,2	-	0,5	0,56	0,05	-
Euro 4	2005	0,5	0,1	-	0,25	0,3	0,025	-
Euro 5a/b	2009/ 2011	0,5	0,1	0,068	0,18	0,23	0,005/ 0,0045	-/6·11 ¹¹
Euro 6b/d	2014/ 2020	0,5	0,1	0,068	0,08	0,17	0,0045	6·11 ¹¹

1.3.2 Evropské výkonnostní normy pro emise CO₂ pro nové osobní automobily a lehké užitkové vozy (EU CO₂ emission performance standards for cars and vans)

S úmyslem snížit emise oxidu uhličitého vyprodukovaného silniční dopravou přišla Evropská komise v roce 2009 s direktivou 443/2009 [31], která stanovila flotilové limity produkce CO₂. Při homologaci každého vozidla či jeho varianty se musí nezávislou laboratoří změřit jeho emise CO₂. Následně se sečtou emise všech vozidel prodaných určitou automobilkou či sdružením automobilek, a vydělí se počtem prodaných vozidel. Pakliže pak emise přepočtené na vozidlo přesahují určitou mez, musí výrobci platit Evropské unii pokuty za každý nadbytečný gram – tzv. excess emission premium [32]. Původně byl limit stanoven na 130 g/km pro osobní vozy a 175 g/km CO₂ pro nákladní vozy, což odpovídá průměrné spotřebě 5,6, respektive 7,5 l/km benzínu [32] nebo 4,8 a 6,5 l/km v případě naftových motorů. V roce 2014 přišla první revize této regulace, která stanovila limity na 95 g/km pro osobní vozy a 147 g/km pro užitkové vozy. Toto odpovídá spotřebě 4,1 l/km benzínu či 3,5 l/km nafty pro osobní vozy, a 6,3 l/km benzínu či 5,5 l/km nafty pro užitkové vozy.

Výše uvedené hodnoty představují specifické průměrné emise CO₂ výrobce, vztažené k souhrnné váze všech prodaných vozidel. V nařízení 2019/631 [32], Příloha I, část A, odst. 1 je definován vztah pro výpočet specifických emisí pro každý jednotlivý automobil. Ze vztahu vyplývá, že se zvyšující se hmotností vozidla se i zvyšuje maximální limit vypouštěných emisí CO₂, a stejně tak se limit snižuje se snižující se vahou.

	Target gap	New car fleet average CO ₂ (in g/km)								
		Dec 2021		2021		Compliance credits		Status 2021	Target 2021	Target gap
		WLTP	NEDC	WLTP	NEDC	EC	SC	WLTP	WLTP	WLTP
Tesla-Honda-JLR	-54%	31	26	65	54	0.0	0.0	65	143	-78
Volvo	-23%	77	64	102	85	0.0	0.0	102	132	-30
BMW Group	-6%	98	84	116	99	0.2	0.0	116	124	-8
Mercedes-Benz	-5%	105	94	116	103	0.0	0.0	116	122	-6
Kia	-4%	91	78	105	91	0.0	0.0	105	110	-5
Ford	-4%	110	89	120	97	0.2	5.7	115	120	-5
AVERAGE	-3%	101	84	115	95	0.0	0.6	114	118	-4
Hyundai	-2%	96	83	107	92	0.0	0.0	107	110	-3
Renault-Nissan-Mitsubishi	0%	94	80	110	94	0.0	0.0	110	111	-1
VW Group	0%	110	92	119	99	0.0	0.0	119	120	-1
Stellantis	0%	109	86	119	93	0.0	0.3	118	118	0
Mazda-Subaru-Suzuki-Toyota	0%	117	93	119	95	0.0	2.6	116	116	0

Notes: EC = eco-innovations, SC = super-credits; all CO₂ values are estimates, see methodology section.

Obrázek 2: Flotilové emise jednotlivých uskupení automobilek pro rok 2020 [33]

Za každý gram emitovaného CO₂ nad stanovenou mez musí automobilky platit zmiňované *premium*. Toto bylo pro rok 2021 stanoveno jako 95 EUR za každý gram. Za účelem snížení těchto pokut se mohou seskupovat to tzv. *pools*, pro které platí tyto limity společně. Příkladem budiž Tesla-Honda-Jaguar/Land Rover [33], kdy tyto automobilky nakupují tzv. superkredity od Tesly, která produkuje výhradně elektromobily. Díky tomuto jsou pak jejich celkové emise nižší a nemusí platit pokuty za nadbytečné emise [33].

V roce 2019 přišla nová verze této direktivy, která pak snižuje tento limit o 15 % k roku 2025, a o 37,5 % k roku 2030. Toto bude znamenat limit CO₂ na úrovni 58,38 g/km, což odpovídá průměrné spotřebě 2,5 l/km u benzínových osobních vozů a 2,1 l/km u vozů s dieselovým pohonem [32].

1.3.3 Evropský zelený úděl (European Green Deal) a Fit For 55

15.1.2020 byla po předchozím odsouhlasení premiéry všech členských zemí EU Evropským parlamentem podpořena Evropská zelená dohoda (European green deal, dále jen EGD). Tato dohoda je soubor politických iniciativ evropské komise, jejichž hlavním cílem je dosáhnout toho, aby Evropa v roce 2030 produkovala o 55 % méně skleníkových plynů oproti roku 1990, a v roce 2050 byla klimaticky neutrální. Prostřednictvím prosazování ekologického financování a investic, ekologizace vnitrostátních rozpočtů, podpory inovací a vzdělávání chce EU zajistit dodávky čisté energie, zavést oběhové hospodářství, transformovat zemědělství směrem k šetrnému k životnímu prostředí a v neposlední řadě urychlit přechod k udržitelné mobilitě. [34][35]

Fit For 55

Ačkoliv jsou v EGD jasně stanoveny cíle, kterých je nutné dosáhnout, nejsou zde popsány jednotlivá opatření, která bude nutné zavést pro jejich dosažení. Proto byl Evropskou komisí vytvořen balíček Fit For 55, který tyto opatření specifikuje a lze jej považovat jako určitou formu prováděcí vyhlášky k EGD [34]. Účelem tohoto balíčku je dosáhnout snížení produkce skleníkových plynů v roce 2030 o 55 % oproti roku 1990.

V rámci tohoto balíčku bylo Evropskou komisí navrženo několik opatření, týkajících se rychlosti snižování výfukových emisí CO₂, úpravy systému superkreditů a možného zohlednění syntetických paliv [36].

Tabulka 4: Navrhované úrovně snížení výfukových emisí oxidu uhličitého. [36]

	2025		2030		2035		2040	
	Auta	Už. vozy	Auta	Už. vozy	Auta	Už. vozy	Auta	Už. vozy
TL_Low	15 %		40 %	35 %	60 %	55 %	80 %	
TL_Med	15 %		50 %	40 %	70 %	70 %	100 %	
TL_High	15 %		60 %	50 %	100 %		100 %	

V červenci roku 2022 byla zvolena cesta nejprísnějšiho schématu snižování emisí CO₂ (TL_High), systém superkreditů byl zpřísněn a omezen svým účinkem a byla přijata nezávazná podmínka, která požaduje po komisi vypracování možného schématu zohlednění syntetických paliv.

Oproti původnímu návrhu však nebylo přijato usnesení, že se od roku 2035 taxativně zakazuje prodej vozidel se spalovacím motorem – ve schválené verzi tyto vozy musí mít výfukové emise CO₂ rovné 0 g/km, a za každý gram nad tuto úroveň se budou platit pokuty 95 EUR. Dále bylo rozhodnuto, že v roce 2026 bude provedena revaluace dosavadního vývoje a stávající závazky a cíle budou moci být upraveny s ohledem na v té době aktuální situaci.

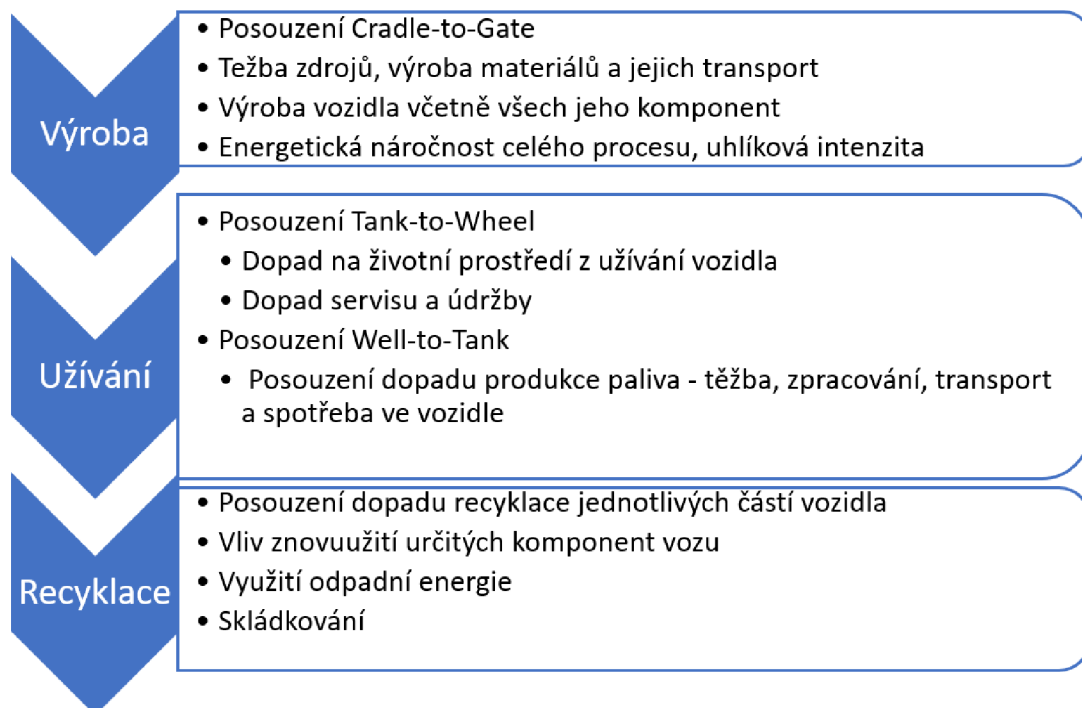
Tento balíček pak schválen dne 14.2.2023 Evropským parlamentem [37] a dne 28.3.2023 Evropskou radou [38]. Ve finální verzi nařízení byl schválen dodatek zaručující možnost prodeje či registrace vozů se spalovacími motory i po roce 2035, pakliže bude zajištěno, že budou schopné provozu pouze na syntetické palivo.

2. VÝROBA

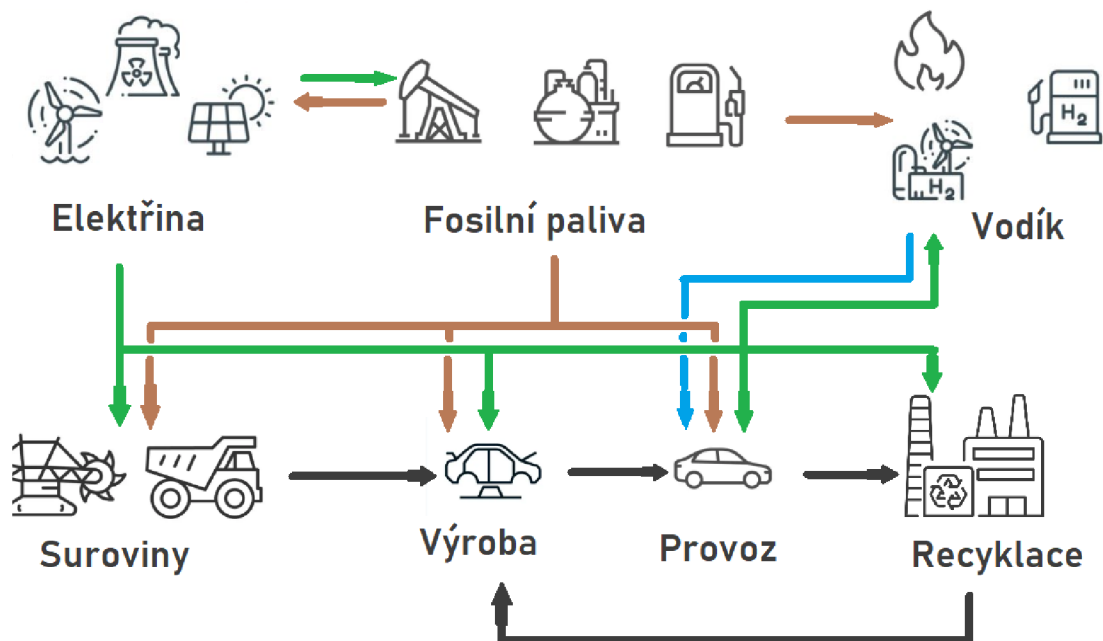
Pro co nejpřesnější vyhodnocení dopadu užívání určitého výrobku na životní prostředí je nutné odpovídajícím způsobem zanalyzovat všechny fáze jeho životního cyklu. Za tímto účelem se využívá metoda life cycle assessment (LCA, česky posouzení životního cyklu). Tato metoda umožňuje identifikovat, kvantifikovat a posoudit dopad celého životního cyklu ve všech relevantních oblastech, jako například emise plynů, využívání přírodních zdrojů, produkce odpadů, a další [39]. Každá LCA má svůj určený rozsah – jasně se definuje co je předmětem analýzy, co jejím předmětem není (případně jaké faktory v analýze nebudou zahrnuty) a jakým způsobem či metodou bude provedeno vyhodnocení.

2.1 Životní cyklus vozidla

Při posuzování životního cyklu automobilů se tato metoda zaměřuje na fázi výroby vozidla, jeho užívání, životní cyklus používaného paliva či paliv a konec života a recyklaci.



Obrázek 3: Analýza životního cyklu



Obrázek 4: Životní cyklus vozidel s různými typy pohonu

2.2 Rozsah analýzy v rámci práce (Scope)

Cílem této práce je porovnat celkové vyprodukované emise skleníkových plynů za celý životní cyklus vozidel s různými druhy pohonu. Zvažovány budou následující faktory:

- Výroba vozidla – materiálové a energetické vstupy pro glider, pohonnou jednotku a trakční baterii.
- Životní cyklus paliva – jeho primární extrakce, zpracovatelský řetězec, transport a spotřebu včetně ztrát ve všech částech cyklu.
- Recyklace vozidla – energetická náročnost a návratnost, znovuvyužití některých částí. Životnost vozidla bude odpovídat průměrnému konečnému věku a nájezdu vozidel v ČR. Úroveň recyklačního průmyslu bude uvažována pro předpokládaný stav v době konce životnosti vozidla.
- Analyzované druhy pohonu budou benzínový a naftový spalovací motor, vodíkový pohon s palivovými články a bateriové elektrické vozidlo.
- Výroba, provoz i recyklace bude probíhat v České republice.

Co v práci zahrnuto nebude:

- Spotřební materiál a drobné opravy jako pneumatiky, brzdy či podvozkové díly
- Výměna trakční baterie elektromobilu či vozidla s vodíkovým pohonem
- Extrémní povětrnostní podmínky
- Vliv jízdního stylu

2.3 Základní části vozidla

Každé vozidlo bez ohledu na typ pohonu se skládá ze značného množství komponentů. V ideálním případě by se provedlo posouzení výroby každého jednotlivého z těchto komponent, nicméně kvůli omezením daným především nedostatkem adekvátně přesných dat ve většině dosavadních prací dochází k určitým aproximacím. Je to do značné míry dáno roztržitostí dodavatelských řetězců, kdy každý výrobce může mít jinou strukturu subdodavatelů dislokovanou po světě a jiný podíl vlastní výroby. Nejčastějším případem je, že se vozidlo rozdělí na glider a powertrain [40][41][42][43][44]. V powertrain je obsaženo pohonné ústrojí – motor či motory, převodovka, nádrž a baterie. V glideru jsou pak zahrnuty téměř všechny ostatní komponenty vozidla, tedy karoserie, podvozek, skla, čalounění a další.

Existují i další přístupy, kdy se kupříkladu powertrain dále dělí na motor, převodovku, katalyzátor, nádrž či baterie a tyto komponenty se posuzují zvlášť. V jiných pracích se zase objevuje podrobnější rozdělení glideru na podvozek, karoserii, čalounění atd. Tyto podrobnější přístupy však nejsou příliš obvyklé, a často mají svoji zvýšenou podrobnost založenou na přesných informacích přímo od výrobce, nebo využívají svých vlastních simulovaných automobilů, ke kterým mají veškerá potřebná data [45][46][47].

Složení glideru se pro obdobné vozy s různými druhy pohonu uvažuje totožné. Powertrain se pak liší odpovídajícím způsobem [43].

2.4 Glider

Pro posouzení glideru je nutné znát jeho materiálové složení. V ideálním případě jsou k dispozici data přímo od výrobce. Většina výrobců se nicméně k poskytování těchto informací staví odmítavě. Pokud tato data nejsou k dispozici, vychází se obvykle z datasetů obsažených v rozsáhlých spravovaných databázích typu Ecoinvent či GREET, často doplněných o vlastní získaná data. Na základě těchto informací lze získat materiálové složení obvyklé pro určitý typ výrobku a další informace.

Tabulka 5: Poměr váhy některých materiálů a dopad jejich produkce na životní prostředí [42]

Materiál	Poměr hmotnostního zastoupení [%]	GWP [%]
Ocel	30,6	22,6
Plasty	17,7	9,6
Železo	11,7	,6
Pevnostní ocel	10,2	7,5
Hliník	5	30
Textil	4,6	18,4

Po zjištění materiálového složení glideru se vypočte dopad výroby daného množství materiálů na životní prostředí. Na obrázku 6 je patrné relativní zastoupení různých materiálů v glideru vozidla nižší střední třídy a dopad jejich produkce na emise skleníkových plynů (GWP). Z obrázku je patrné, že ačkoliv hliníkové slitiny mohou poskytovat díky jejich nižší váze úspory ve spotřebě paliva, jejich výroba je energeticky značně náročná. Taktéž textilní prvky jsou značně náročné na potřebnou energii, a oproti hliníkovým slitinám zde ani není výhoda jejich nižší váhy [40].

Komponenty spadající do náplně či běžné údržby jako pneumatiky či náplně mívají celkově jen malý dopad a v některých pracích se považují za nepodstatné, či jsou zahrnuty do glideru [40]. Dalším posuzovaným faktorem je kompletace glideru. Kompletace je energeticky náročná a hlavní roli zde hraje uhlíková intenzita použité elektrické energie.

Autoři doposud vypracovaných LCA přistupují ke stanovení množství emisí CO_2_{ekv} při výrobě glideru různě. V mnoha případech jsou využívána aproximovaná data z GREET či Ecoinvent, dle tvrzení autorů doplněná o vlastní data [40][42][47][85]. Nicméně, pouze práce institutu Ricardo pro Evropskou Komisi [42] uvádí hodnoty použité ve výpočtech, odpovídající 6 až 6,5 $\text{tCO}_2_{\text{ekv}}$. ([40] str. 107, obr. 5.60). U jiných prací není zřejmé, jaká data byla pro výpočet použita [43][48]. Práce, které využívají podrobnějšího rozdělení glideru mohou mít určitou referenční hodnotu, která je však bez znalosti metody výpočtu a/nebo výsledných hodnot pro glider jen omezená [44][46].

Práce F. Sato a T. Nakata (2020) poskytuje detailní náhled na spotřebu energie výrobou vozidla z hlediska jednotlivých materiálů a výrobních procesů. Nicméně, nerozlišuje se zde mezi jednotlivými částmi vozidla (to je zde bráno jako celek a analyzují se spíše samotné materiály), ani mezi různými druhy pohonu [49].

V práci R. Kawamoto a kol. (2019), odkazujícím se na studii Life Cycle Assessment Society of Japan, se předpokládá, že hmotnost glideru představuje průměrně 76,8 % celkové hmotnosti vozidla, přičemž materiálové složení glideru a powertrain se předpokládá obdobné. To při průměrné hmotnosti vozidla segmentu C (nižší střední třídy, 1330 kg) představuje produkci 4,219 $\text{t CO}_2_{\text{ekv}}$ na každý glider a 1,274 $\text{t CO}_2_{\text{ekv}}$ na každý benzínový motor a převodovku (4,130 $\text{kg CO}_2_{\text{ekv/kg}_{\text{vůz}}}$ – bez baterie) [50]. Qiao, Zhao a kol. (2016) ve své práci uvádějí produkci 6137,3 $\text{kg CO}_2/\text{kg}_{\text{glider}}$ pro glider vozidla se spalovacím motorem a 7059 $\text{kg CO}_2/\text{kg}_{\text{glider}}$ pro glider elektromobilu s nikel-kadmiovou či LFP baterií pro vozidlo vyrobené v Číně [51].

Studie H. Hao, Q. Qiao a kol. (2016) se věnuje porovnání produkce emisí z výroby vozidla nižší střední třídy v Číně a USA. Výsledkem je však jediná hodnota, odpovídající buď v případě ICEV celému vozidlu, nebo v případě BEV vozidlu bez akumulátoru. V případě vozidla o hmotnosti 1292,8 kg se pak jedná buď o produkci 6241,2 $\text{kg CO}_2_{\text{ekv}}$ (4,828 $\text{kg CO}_2_{\text{ekv/kg}_{\text{vůz}}}$ – bez baterie) v případě vozidla vyrobeného v USA a 9596,9 $\text{kg CO}_2_{\text{ekv}}$ (7,423 $\text{kg CO}_2_{\text{ekv/kg}_{\text{vůz}}}$ – bez baterie). v případě vozidla vyrobeného v Číně [52]. Práce J. Buberger, A. Kersten a kol. (2022) se věnuje analýze životních cyklů vozidel množstvím různých pohonů [53]. Kromě vozidel spalujících benzín či naftu jsou

zde zpracovány i vozidla s vodíkovými palivovými články, vozidla spalující CNG či hybridy. Při odhadu množství emisí vyprodukovaných výrobou vozidla jsou využívány data interní analýzy firmy Volkswagen, vztažená pro vozidlo VW Golf vyrobené v Německu. Celkové emise skleníkových plynů vyprodukovaných při produkci vozidla (kromě baterie v případě elektromobilu) se zde uvedeny v intervalu od 4,16 kg CO₂ ekv./kg vozidla (pohon na CNG) až po 4,73 kg CO₂ ekv./kg vozidla (dieselový motor). V práci se však ve výpočtech již využívá jen jediná průměrná hodnota pro všechny typy pohonu, a to 4,56 kg CO₂ ekv./kg vozidla.

2.5 Powertrain

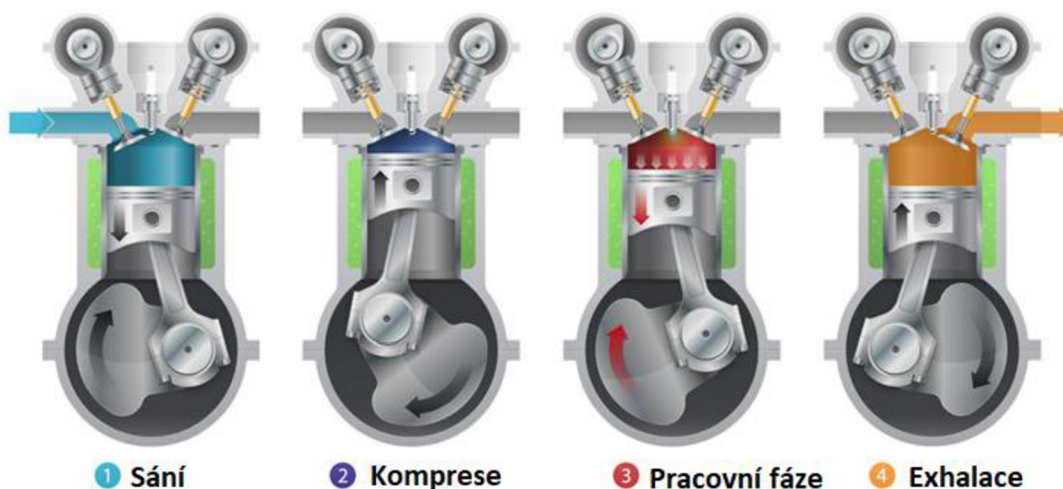
Celosvětově nejvíce užívaným typem pohonu vozidel je motor s vnitřním spalováním. Existují dva převládající typy těchto motorů, a to zážehový a vznětový. Dalším typem pohonu je elektrický pohon. Dále jsou některými automobilkami nabízeny i vozy s vodíkovým pohonem (především ve formě elektromotorů poháněných palivovými články, ale existují i vodíkové spalovací motory) a v neposlední řadě hybridní pohony, které kombinují obvykle spalovací motor a elektromotor.

2.5.1 Motor s vnitřním spalováním

Motor s vnitřním spalováním je tepelný motor, který funguje na principu spálení paliva za pomoci okysličovadla ve spalovací komoře motoru, který je jeho integrální součástí. Rozpínající se zahřáté plyny přímo působí na píst, který je stlačen a skrze ojnici působí na klikový hřídel, čímž je vytvořen rotační pohyb [54].

V moderních osobních vozech se téměř výhradně využívají čtyřdobé spalovací motory. Znamená to, že motor vykonává práci v pouze jedné době, respektive jedné polovině otáčky klikového hřídele.

1. Sání – Sací ventily jsou otevřené a dochází k sání vzduchu do spalovací komory. Toho je dosaženo pohybem pístu směrem dolů, případně přeplňováním turbodmychadlem nebo kompresorem. Zároveň je do válce (či sacího traktu) vstříkováno palivo. [54]
2. Kompresi – Ventily jsou uzavřeny. Píst se pohybuje směrem nahoru a dochází ke kompresi směsi.
3. Pracovní fáze – Ventily jsou stále uzavřeny. Směs je zažehnuta nebo vznícena, a vytvořený tlak plynů působí na píst, který tuto sílu přenáší na klikový hřídel.
4. Fáze exhalace – V této fázi se otevírají výfukové ventily a spaliny jsou vytlačeny pohybem pístu ven ze spalovací komory.

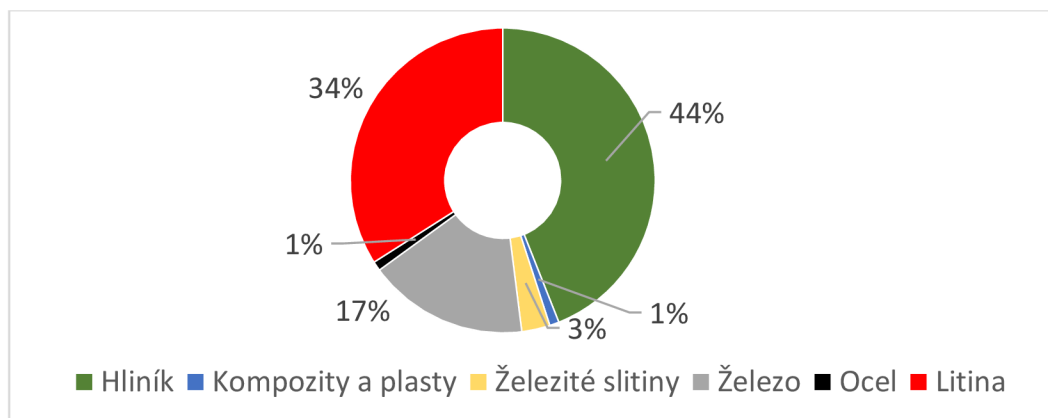


Obrázek 5: Čtyřdobý zážehový motor s vnitřním spalováním [55]

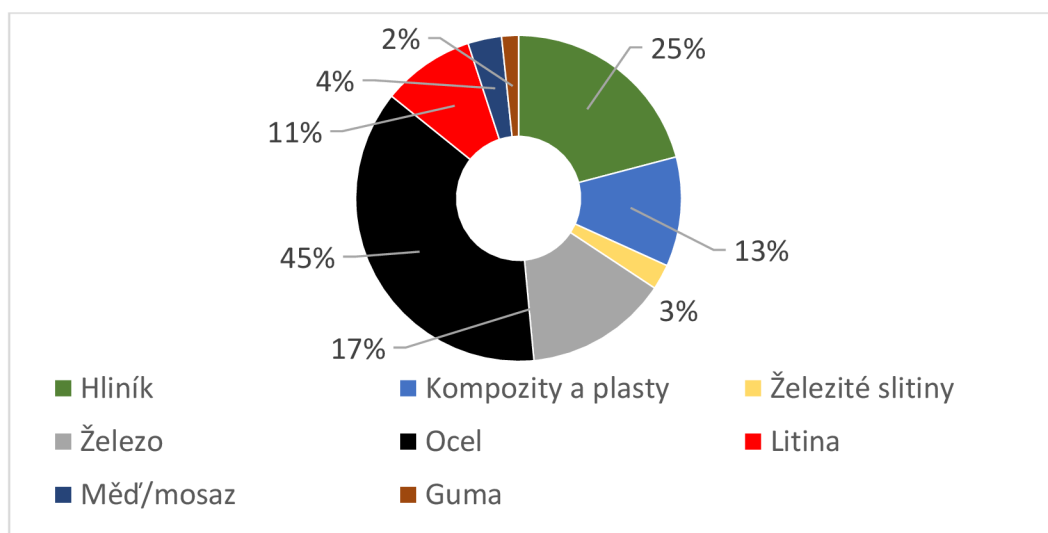
Existují dva hlavní typy spalovacích motorů – vznětový a zážehový. Oba mají u osobních vozů celosvětově zhruba rovnoměrné zastoupení. Vznětový motor využívá jako palivo motorovou naftu, a k zážehu směsi dochází jejím stlačením. Zážehový motor využívá jako palivo benzín, a zde se směs zapaluje pomocí zapalovací svíčky. [54]

Značná část emisí vyprodukovaných vozem se spalovacím motorem pochází právě z třetí fáze cyklu motoru, při spálení. Dochází zde k vytvoření CO_2 v množství přímo úměrnému množství spáleného paliva. Dále zde vznikají plyny jako oxidy dusíku, oxid uhelnatý a další. [54]

Termální efektivita moderních spalovacích motorů se pohybuje mezi 30 až 36 % (benzín) a 42 až 43 % (diesel), přičemž v úzkých výkonových pásmech dosahují až 46 % [56][57][58]. Při užití v kombinaci s elektromotorem (hybridní pohon) pak lze dosáhnout i efektivitu přes 50 % [56]. Dle provedených simulací a experimentů z roku 2019 lze bez větších zásahů do konstrukce motoru či výfukového vedení dosáhnout indikované efektivitu samotného diesellového motoru i 50 až 55 % [59]. Aktuálně vyvíjený motor Mazda Skyaktiv 3 by měl disponovat termální efektivitou až 56 %, avšak tyto hodnoty doposud nebyly ověřeny [63]. Závodní motor 1,6L V6 Hybrid firmy Mercedes Benz dosáhnul efektivitu 50 % již v roce 2017, nicméně se jedná o velmi nákladný motor určený pro specifický režim provozu [60].



Graf 3: Typické rozložení hmotnosti mezi materiály použitými ve spalovacím motoru a převodovce [45]



Graf 4: Typické rozložení hmotnosti mezi materiály použitými ve spalovacím motoru a převodovce dle GREET2022 [61]

2.5.2 Výfukový systém, nádrž a další příslušenství

Výfukový systém slouží k odvedení spalin z motoru. Součástí výfukového systému bývá kromě tlumičů hluku především katalyzátor, a v moderních vozech i filtr pevných částic. Katalyzátor funguje na principu redukce škodlivých plynů jako oxid uhelnatý a oxidy dusíku a uhlovodíky na méně škodlivé plyny jako oxid uhličitý, nebo vodu. [62]

Katalyzátory dosahují efektivity přes 90 %, nicméně pro svoji funkčnost vyžadují přesnou provozní teplotu odpovídající zhruba 400°C. Při nižších teplotách je redukční reakce neefektivní a vyšší teploty jsou schopné katalyzátor poškodit. Pro co nejefektivnější práci katalyzátoru je nutné jej tedy co nejdříve ohřát na pracovní teplotu. Dále je vyžadován velmi přesný stoichiometrický poměr spalované směsi. Příliš bohatá směs pak může katalyzátor nevratně poškodit. [62]

Výfukový systém se obvykle skládá z nerezové oceli a tlumicích směsí. Katalyzátory jsou však konstrukcí relativně složité a materiálově náročné. Pro svoji funkčnost vyžadují

prvky jako palladium, platina či rhodium v množství odpovídajícím řádově desetinám gramů až gramům na jeden katalyzátor. Dále se skládá především z nerezové oceli a hliníku. [43]

Vozidla se spalovacím motorem dále pro svůj provoz vyžadují startovací baterii (obvykle olovenou). Nádrž na palivo je ve většině případu z polypropylenu. [43]

2.5.3 Skleníkové plyny vyprodukované výrobou spalovacího motoru

Stejně jako v případě glideru i v případě pohonné jednotky se v doposud vypracovaných LCA vyskytují různé přístupy odhadu jejího ekologického dopadu. V případě spalovacích motorů se často vyskytuje využívání agregovaných dat z GREET či Ecoinvent [40][42][47][48]. Jiné práce k problematice přistupují skrze výpočet emisí potřebných pro výrobu jednotlivých materiálů potřebných pro konstrukci pohonu a jeho následnou montáž [43], avšak výsledné hodnoty nejsou z práce zřejmé. V některých pracích nejsou zřejmé ani zdroje dat [65]. V práci E. Hermes, J. Dietz a M. Weiss (2020) jsou uvedeny hodnoty 1,54 t CO₂ ekv. pro 1,6l 75 kW benzínový motor VW Caddy vyrobeného v Číně [44]. Studie R. Kawamoto a kol. (2019), využívající data JLCA, uvádí produkci 1274 kg CO₂ ekv pro benzínový motor s převodovkou a 1539 kg CO₂ ekv v případě dieselového motoru u vozu segmentu C vyrobeného v Japonsku [50]. Práce Q. Qiao a kol. uvádí hodnotu 2709,9 kg CO₂ na spalovací motor a převodovku vozidla vyrobeného v Číně. Přesnější specifikace vozidla však není známa. Práce J. Buberger a kol. (2022) posuzující vozidlo odpovídající VW Golf vyrobený v Německu u ICEV nerozlišuje mezi pohonnou jednotkou a gliderem vozidla, tato hodnota je již (s výjimkou akumulátoru BEV) zahrnuta v celkové hodnotě emisí skleníkových plynů [53].

2.5.4 Elektromotor

Pohonnou jednotkou elektromobilů je elektromotor. Existují tři hlavní typy těchto motorů – synchronní, asynchronní a buzený synchronní [64].

U asynchronního motoru je střídavé napětí přivedeno na statorové cívky, čímž se získá rotující magnetické pole, které indukuje napětí a proud v rotoru. Toto indukované napětí vytváří vlastní magnetické pole, které je mírně opožděné oproti magnetickému poli statoru, proto asynchronní motor. Pohyb rotoru je pak převáděn dále na převodovku (pokud je přítomna) případně dále na kola. Při deceleraci či brždění motor funguje zároveň jako generátor, čímž je možné dodávat energii zpět do akumulátorů či kondenzátorů.

Efektivita tohoto motoru je okolo 90 %. Jedná se o robustní, jednoduchý motor s dlouhou životností, který nepotřebuje vzácné kovy. Vyskytuje se například ve vozech Audi e-Tron, Mercedes-Benz EQC či v některých modelech automobilky Tesla. [64]



Obrázek 6: Synchronní motor s vnějším buzením od firmy BMW [64]

Synchronní motory s permanentními magnety disponují stálým rotujícím magnetickým polem vytvořeným permanentními magnety. U tohoto typu motoru se nevyskytuje skluz. Díky přítomnosti permanentního magnetického pole pracují tyto motory s vyšší efektivitou. Negativem ovšem je, že permanentní magnety jsou vyrobeny ze vzácných kovů, jejichž těžbu z velké části ovládá Čína, a při těžbě těchto kovů dochází k neetickému chování a porušování lidských práv. Existují snahy se při výrobě magnetů obejít bez těchto vzácných kovů, nicméně, vysoká efektivita těchto motorů (až 95 %) je činí velmi žádané i přes tyto výhrady. Používá se například v Hyundai Ioniq 5, Kia EV6, Tesla model S, 3 a X. [64]

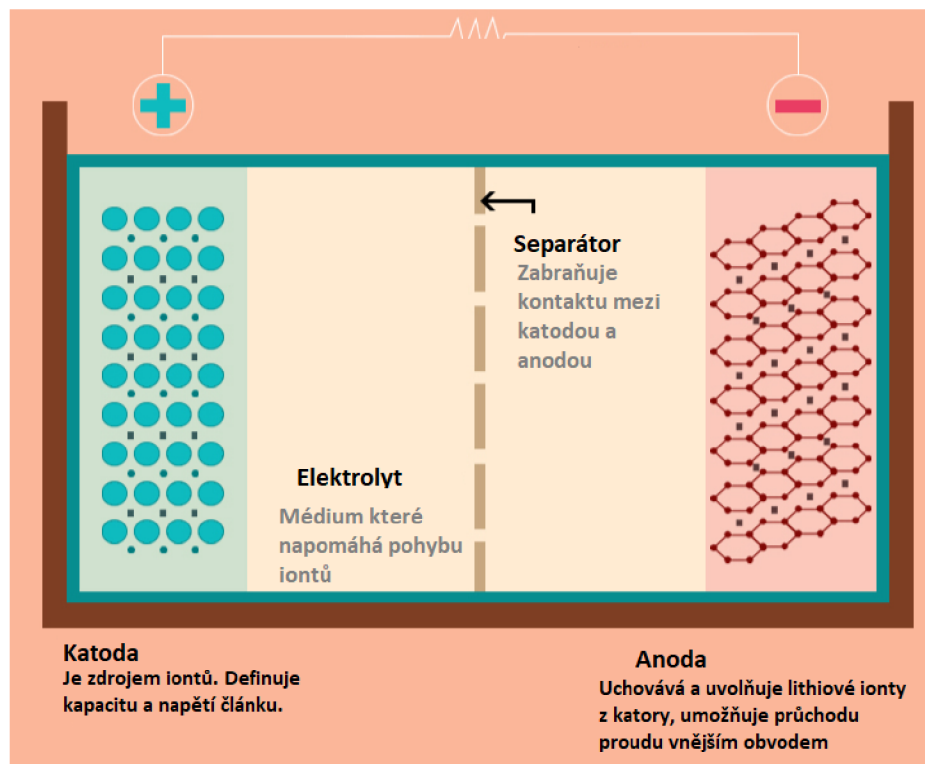
Synchronní motor s vnějším buzením je výsledkem snahy obejít se při výrobě synchronních motorů s permanentními magnety bez výše uvedených vzácných kovů. Místo permanentních magnetů se zde užívá uhlíků a skluzových kroužků. Efektivita těchto motorů je udávána až 93 %. Nicméně, samotná přítomnost uhlíků předznamenává možné budoucí problémy s opotřebením a údržbou. Tento typ motoru je užíván například v BMW i3, i4 či iX. [64]

Všechny typy elektromotorů jsou však konstrukčně jednodušší, obvykle menší, lehčí, nabízí plný točivý moment již od téměř nulových otáček a efektivita samotného motoru se pohybuje okolo 80 až 95 %, což je zhruba dvojnásobek moderních spalovacích motorů [64].

2.5.5 Trakční baterie

Elektrická energie potřebná pro provoz elektromotoru elektromobilu se ukládá v trakční baterii. V naprosté většině případů se dnes využívají lithium-ionové baterie, což je dáno především jejich vysokou energetickou hustotou, pohybující se v rozmezí 100–300 Wh/kg [67].

Pro aplikaci v elektromobilech se jednotlivé bateriové články skládají do modulů a následně do packů, aby dosahovaly požadovaných charakteristik. Jednotlivé články mohou mít různé tvary; klasické cylindrické, prismatické či typu pouch. Tvar článků (a přeneseně i jejich váha) se může lišit výrobce od výrobce, avšak jejich napětí se pohybuje typicky v rozmezí mezi 3,6 a 3,75 V. Články se pak skládají do modulů, kdy každý modul může obsahovat až několik set článků. Moduly se poté skládají do packů [67]. Typická váha výsledného packu pak odpovídá jeho požadované kapacitě; kupříkladu 85 kWh baterie disponující články 18650 (2,2-3,6 Ah, 250 Wh/kg) v Tesle model S MkI váží zhruba 530 kg. Battery packy firmy Tesla užívají články 21700, které disponují o 20 % lepší energetickou hustotou oproti článkům 18650 (3-3,4 Ah, 300 Wh/kg) [68], případně nejnovější 4680, disponující údajně energetickou hustotou 272 až 296 Wh/kg [69], které však dle testování v již vyrobených vozech deklarovaných parametrů nedosahují a disponují energetickou hustotou pouze 229 kWh/kg [70]. K této váze je pak potřeba přičíst ještě obslužnou elektroniku a chladič či klimatizační prvky.



Obrázek 7: Princip lithium-iontové baterie [62]

Samotný Li-Ion článek se skládá ze 4 hlavních částí – katoda, anoda, elektrolyt a separátor. Jako katodové materiály se používají kobalt, mangan nebo nikl ve formě litiovaných oxidů. Anodové materiály bývají uhlíkové materiály, oxid titaničitý nebo směs křemíku a uhlíku. Elektrolyt obvykle bývá směs solí a aditiv rozpuštěných v rozpouštědlech. Separátor je pak vyroben z polypropylenu nebo polyetyleny [67]. Celkové materiálové složení battery packu se může lišit z mnoha důvodů – ať už z rozdílných materiálů použitých pro katodu či anodu nebo jiného, avšak obecně lze říci že nejvíce zastoupeným prvkem je grafit, následovaný hliníkem, niklem a mědí. Vzácné kovy jako mangan, lithium či kobalt obvykle představují jen jednotky procent celkové váhy baterie, a navíc se jejich množství liší i dle typu baterie [71][72]

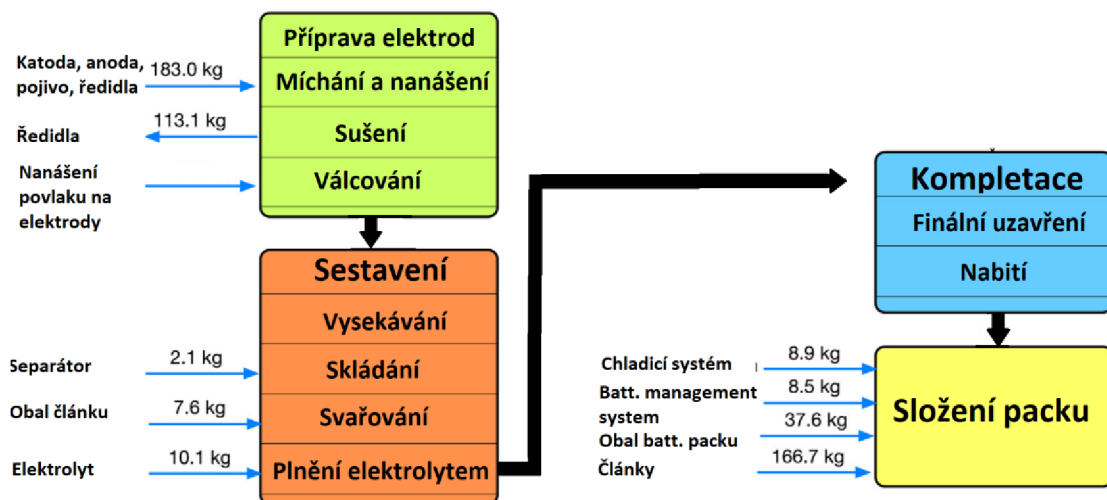
Výhodou provozování elektromobilu oproti vozidlu se spalovacím motorem jsou nižší provozní náklady, a to především v případě dostupné levné elektrické energie. Toto je však do určité míry vykoupeno výrobní cenou baterie, která je značná a pohybuje se okolo 153 EUR/kWh (rok 2022 a predikce pro rok 2023) při objemech produkce ne méně než 100 000 kusů ročně [74]. Pro snížení jejich ceny bude nutné buď omezit využití vzácných kovů, zefektivnit výrobu, či přejít na novou generaci baterií které nebudou takto materiálově náročné a poskytnou lepší energetickou hustotu.

Tabulka 6: Materiálové zastoupení článku NMC 811 [73]

Prvek	hmotnost [%]
Lithium	7,36
Nikl	46,01
Mangan	5,40
Kobalt	6,28
Kyslík	34,95

Dalším faktorem, který zapříčiňuje vysokou cenu baterií je pak značná energetická náročnost jejich výroby. Při výrobě se nejprve musí elektrodové materiály promíchat s aditivou a pojivou v rozpouštědle a poté jsou nanášeny na fólie. Následně probíhá sušení při 150 °C po dobu deseti hodin, které je následováno válcováním. V dalším kroku dojde k řezání elektrod do potřebných tvarů. Vyřezané elektrody jsou seskládány, ultrazvukově zavařeny a článek je naplněn elektrolytem [72][74].

Tento proces je energeticky velmi náročný. Existuje celá řada analýz, které se snaží popsat celý proces za použití různých přístupů, a výsledky těchto analýz se často velmi liší. Důležitým faktorem je pokročilost a efektivnost výrobních procesů různých firem vyrábějících baterie. Další proměnnou je častá roztržitost výrobního řetězce, kdy se baterie často nevyrábí celé v jednom výrobním závodu, ale napříč různými firmami a státy. Rozdíly mohou vznikat i tím, zda se analyzuje malo či velkovýroba, zda se zkoumá jeden typ baterie či vícero anebo rozdílnou lokalizací výroby. Další nepřesnosti mohou vznikat v rozsahu vstupů, které jsou do analýzy zahrnuty – zda se počítá



Obrázek 8: Proces výroby 24 kWh battery packu používaného v Nissan Leaf a Chevrolet Volt [72]

kupříkladu s výrobou primárních materiálů atd. V neposlední řadě, v analýzách se často vyskytuje mnoho aproximací a odhadů, které dále zpřesňují výsledné hodnoty. Díky tomu se vyskytují odhady energetické náročnosti v rozsahu od 40 kWh/kg až po 200 kWh/kg, některé práce však přichází s výsledky až 324 kWh/kg a více [40][72][75][76][77][78][79].

Tabulka 7: Energetická náročnost různých fází výroby 24 kWh battery packu používaného v Nissan Leaf a Chevrolet Volt [72]

Proces	Spotřebovaná energie na článek [kWh]	Celková spotřebovaná energie [kWh/kg]
Míchání a nanášení	0,11	0,12
Nanášení	0,18	0,21
Sušení	6,22	19,29
Válcování	0,38	1,15
Vysekávání	0,71	2,14
Skládání	0,77	2,36
Svařování	0,25	0,72
Plnění elektrolytem	0,59	0,2
Uzavření	0,1	1,87
Nabíjení	0,07	0,3
Stárnutí	3,9	21,78
Sestavení		0,03
CELKEM	13,28	50,17

V tabulce 4 lze vidět energetickou náročnost jednotlivých fází výroby typické Li-Ion baterie s grafitovou anodou a katodou $\text{Li}_x\text{Mn}_y\text{O}$. Energeticky nejnáročnější fází výroby je sušení elektrodového materiálu – zhruba 47 %. Dalších 29 % celkového množství energie je spotřebováno pro udržení předepsané teploty a vlhkosti vzduchu ve fázi sestavení baterie. Tato část uhlíkové stopy je tedy výrazně závislá na uhlíkové intenzitě energetického mixu.

2.5.6 Skleníkové plyny vyprodukované výrobou elektromotoru a akumulátoru

Data popisující ekologický dopad výroby akumulátorů elektromobilů mají napříč různými studiemi velký rozptyl. Některé práce podrobně popisují materiálové složení akumulátoru, avšak data popisující výrobu či výsledná hodnota nejsou přítomna [43]. Další práce opět využívají agregovaná data z Ecoinvent či GREET [46][47][52]. V jiných případech nejsou použita data uvedena [65]. Rozsáhlá studie Swedish Environmental Research Institute IVL využívá vlastní výzkum doplněný o data z dalších studií, přičemž dochází k hodnotě 61 až 106 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ baterie, přičemž přesná hodnota vychází z uhlíkové intenzity energie použité na výrobu akumulátoru [80][81]. Hodnota 61 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ baterie odpovídá případu, kdy je pro výrobu akumulátoru využita výhradně elektřina s uhlíkovou intenzitou 0 g $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$, kdežto 106 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ baterie odpovídá využívání elektřiny s uhlíkovou intenzitou 1 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$. Několik dalších prací se pak odkazuje právě na tuto studii [44][53]. V práci E. Hermes, J. Dietz a M. Weiss (2020) jsou uvedeny hodnoty 3,4 t CO_2_{ekv} pro 25,9 kWh baterii a elektromotor VW Caddy vyrobeného v Číně [44]. Práce R. Kawamoto a kol. (2019) posuzuje data ze čtyřech různých studií s hodnotami v rozsahu 121 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ až 250 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$, přičemž tato práce dále pracuje s hodnotou 177 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ [50]. Pro elektrický motor jsou zde uvažovány hodnoty 1070 kg CO_2_{ekv} a pro inverter 641 kg CO_2_{ekv} . Studie Qiao Q. a kol. (2016) pro vozidlo vyrobené v Číně uvažuje produkci 2788 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ v případě NCM baterie a 2894 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ v případě LFP akumulátoru [51]. Další obslužná elektronika pak představuje zhruba 1311 kg CO_2_{ekv} . Peters J. F. a kol. (2017) pracuje s daty z celkem 79 studií napříč světem a dochází k hodnotě 110 kg $\text{CO}_2_{\text{ekv}}/\text{kWh}$ pro kompletní akumulátor [80].

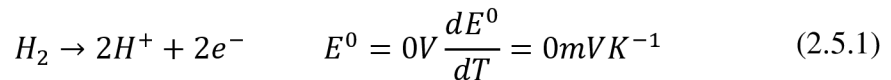
2.5.7 Samovybíjení baterie

Elektromobil samovolně ztrácí energii i když není v provozu. Je to způsobeno samovybíjením baterie a spotřebou palubních spotřebičů (SB). Přesné hodnoty se různí, avšak běžné hodnoty odpovídají 0,5 až 2 % za 24 hodin při optimálních klimatických podmínkách, 2 až 4 % při teplotách pod nulou a v některých případech i 5 % a více (sentry mód ve vozech Tesla, arktické podmínky atd.) [82][83][84]. Tyto ztráty lze snížit uvedením vozidla do stavu hibernace, ve kterém se snižují tyto ztráty až na 1–2 % měsíčně. Je však nutné zmínit, že existuje jen málo analyzující tento jev, a proto jsou tyto hodnoty převzaty z manuálu výrobce vozu nebo nevědecké literatury.

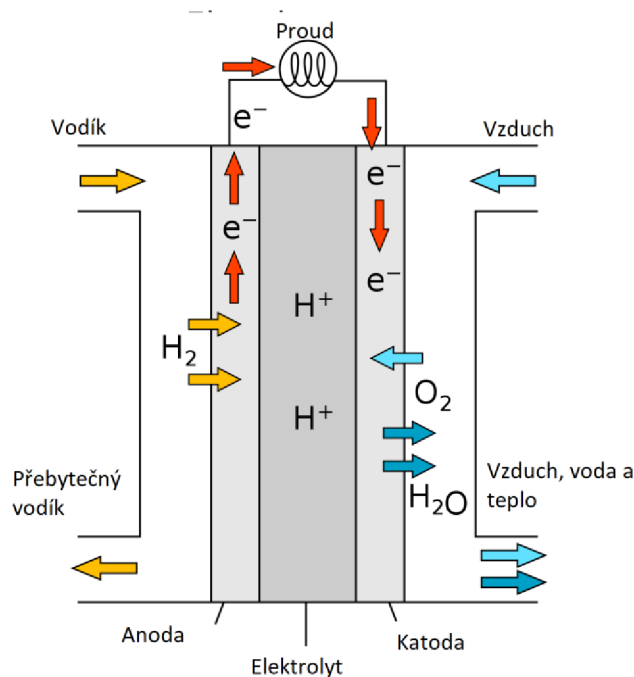
2.5.8 Vodíkový pohon

Dalším druhem pohonu osobních vozidel je vodíkový pohon. Existují dva hlavní principy: vozidlo s palivovými články a vozidlo s vodíkovým spalovacím motorem. U obou je palivo dodávané do vozidla vodík, avšak v jeho následném zpracování se oba tyto typy pohonu liší.

U **vozidla s palivovými články** je vodík o odpovídající čistotě natankován do nádrže, kde je uložen pod tlakem zhruba 70 MPa. Typický objem nádrže je 60 a 120 l, přičemž plná 120 l nádrž obsahuje přibližně 5,6 kg vodíku [142]. Z této nádrže je vodík přiváděn do palivových článků, kde probíhá jeho přeměna na elektrickou energii. Palivových článků existuje několik druhů, nicméně ve vozidlech s vodíkovým pohonem se nejčastěji používají PEMFC (Polymer Exchange Membrane Fuel Cell). U tohoto typu palivového článku je vodík přiveden na anodovou část, kde se katalyticky rozloží na protony a elektrony. Tato reakce je popsána následovně:[85][86]



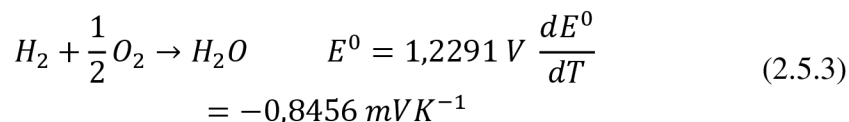
Nově vytvořené protony projdou skrze polymerovou elektrolytovou membránu na katodovou stranu. Elektrony postupují po vnějším obvodu přes zátěž, čímž vytváří proud. Zároveň se na katodovou stranu přivádí kyslík, kde reaguje s protony a elektrony přivedenými z anodové strany. Reakce na anodě je popsána následovně:



Obrázek 9: PEMFC palivový článek [86]

$$E^0 = 1,2291 \text{ V} \frac{dE^0}{dT} = -0,8456 \text{ mVK}^{-1}$$

Celková reakce je pak následující



Typicky se využívá několik set jednotlivých článků uzpůsobených do stacku [142]. Výstupní výkon se pohybuje od 90 do 134 kW při poměru váhy ku výkonu 0,83 až 2 kW/kg. Tato energie je pak využívána v elektromotoru obdobné konstrukce jako u běžného elektromobilu [87][88].

Aktuálně nejmodernější vozidla na vodíkové palivové články dále disponují měničem zvyšujícím výstupní napětí stacku na až 650 V a dále baterií, která je určena k akumulaci vyrobené energie a energie získané rekuperací z brždění. Kapacita této baterie se obvykle pohybuje v nižších jednotkách kWh. [142][87]

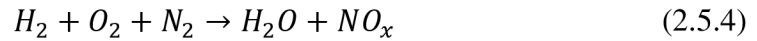
Tento typ pohonu neprodukuje žádné emise skleníkových plynů či pevných částic kromě vody.

Tabulka 8: Typické materiálové složení vodíkových palivových článků a nádrže [43]

Materiál	Hmotnost [kg]
Palivový článek	
Grafit	23
Ocel	13
PTFE	11
Elektronika	1,4
Platina	0,15
CELKEM	48,6
Vodíková nádrž	
Hliník	20,13
Skleněná tkanina	36,6
Ocel	40,27
CELKEM	61

U **vodíkového spalovacího motoru** je taktéž nejprve vodík natankován do vodíkové nádrže se stejnými parametry jako u vozidla s palivovými články, nicméně následně je vodík spálen ve spalovacím motoru konstrukčně velmi podobnému klasickému benzínovému spalovacímu motoru. [89][91]

Rovnice spalování vodíku:



Efektivita motoru je při ideálním stoichiometrickém 34:1 poměru odpovídající motoru na benzín. Nicméně, při tomto nastavení motor produkuje vysoké emise oxidů dusíku, které jsou kriticky sledované. Proto se tento poměr snižuje až na zhruba 60 až 70:1, kdy jsou emise NO_x téměř nulové. Nicméně takto má motor nižší výkon, což se obvykle kompenzuje větším objemem či přeplňováním. Kromě oxidů dusíku však nevznikají téměř žádné další škodlivé plyny – případné další emise jsou závislé pouze od čistoty použitého vodíku (tento typ motoru nevyžaduje tak čistý vodík jako palivové články), čistoty nasávaného vzduchu, případného průsaku maziva skrze pístní kroužky či opotřebením vnitřních částí motoru (např. povrchu válce či ventilů) v důsledku závady, zanedbání údržby či překročení životnosti motoru. [89][91]

Ve srovnání s palivovými články má tento motor nižší efektivitu při nízkém zatížení, avšak při zvyšování zatížení jeho efektivita stoupá a efektivita palivových článků klesá [89]. Při vysokém zatížení je pak efektivita vodíkového spalovacího motoru obdobná jako u palivových článků. Z tohoto důvodu se s tímto pohonem často experimentuje u sportovních či závodních vozů. Z řídičského hlediska je tento motor projevem prakticky totožný jako benzínový spalovací motor.



Obrázek 10: Vodíkový spalovací motor firmem Yamaha a Toyota - 5.0L V8 450hp

2.5.9 Skleníkové plyny vyprodukované výrobou pohonné jednotky vozidla s vodíkovými palivovými články či vodíkovým spalovacím motorem

Studií popisujících environmentální dopad výroby vozidla s palivovými články je podstatně méně, nežli těch popisujících ICEV a BEV. Některé práce k tomuto přistupují extrapolací parametrů laboratorních palivových článků [43]. Další práce se odkazují na GREET a Ecoinvent [47][85][90]. Práce Burberger J. a kol. (2022) pro FCEV odpovídající VW Golf vyrobeném v Německu uvádí rámcově stejné emise jako pro ICEV, pouze se výsledná hodnota pro glider a powetrain násobí koeficientem 1,17 [53]. U vodíkového spalovacího motoru se díky téměř totožné konstrukci předpokládá stejná produkce skleníkových plynů z výroby jako u motoru spalujícího benzín, CNG či LPG. Nad rámec tohoto lze ještě zohlednit výrobu baterie FCEV, která však mívá kapacitu v řádech jednotek kWh.

2.6 Celkové emise skleníkových plynů z produkce vozidla

Z výše uvedených výčtů prací je zřejmé, že celková ekologická zátěž (a tedy i množství vyprodukovaných emisí skleníkových plynů) z produkce vozidla se významně liší dle státu, ve kterém probíhá výroba. To je dáno především uhlíkovou intenzitou používané energie, ale například i kvalitou výrobních procesů a efektivitou výroby. Dále jsou zřetelné rozdíly mezi výsledky prací popisující vozidla jiných kategorií. V neposlední řadě jsou zjevné rozdíly mezi pracemi vyhotovenými nedávno a pracemi starými obecně 5 až 7 a více let, což je pravděpodobně dáno zvyšující se efektivitou výroby.

Pro získání co nejpřesnějšího srovnání je nutné použít, pokud možno stejnou metodiku výpočtu pro všechny typy pohonu a jednotlivé části vozidla. Použití pro jeden typ pohonu například aproximovaných dat z GREET a pro jiný typ vozu či pohonu výpočet pomocí rozkladu na jednotlivé základní materiály ve výsledku nedá věrohodné porovnání. Mnoho prací se věnuje pouze některé části vozidla (například pouze trakční baterii, či pouze elektromobilu) a nenabízejí přímé srovnání s jiným typem vozu.

Stejně tak je vhodné použít pro analýzu co možná nejpodobnější vozidla. V ideálním případě vozidla stejného výrobce, stejné řady, na stejné platformě a vyrobená v podobnou dobu. Pokud toho nelze dosáhnout, tak alespoň vozidla disponující co nejpodobnějšími parametry a sledované atributy týkající se výroby (například uhlíková intenzita elektrické energie užitá pro výrobu) jsou taktéž co nejpodobnější.

Jelikož uvažujeme výrobu a provoz vozidla ideálně v ČR, případně v jejím bezprostředním okolí, je vhodné vycházet z prací a hodnot které uvažují výrobu v EU. Pokud vezmeme v potaz i požadavek na jednotnou metodiku výpočtu napříč různými typy pohonu a jednotnost kategorie vozu, jako nejvhodnější zdroj hodnot lze považovat práci Burberger a kol. [53] pro glider a powetrain bez akumulátoru, a pro trakční baterii práci Švédského IVL [81]. Přidaná hodnota práce Burberger a kol. je nejen v tom, že je lokalizovaná na vozidla různých typů vyrobená v Německu, ale zároveň využívá interní

data výrobce, která mají větší vypovídající hodnotu nežli data agregovaná. Hodnoty odpovídají výsledkům dalších studií, které taktéž slučují glider a powertrain pro ICEV a glider a powertrain bez trakční baterie pro BEV [50][52]. Práce Švédské IVL je vhodná jednak kvůli velkému množství zdrojů dat, tak i díky její lokalizaci pro EU a možnosti upřesnit výsledné hodnoty dle uhlíkové intenzity státu, ve kterém je akumulátor vyráběn.

Tabulka 9: Emise GHG vyprodukované výrobou vozidla

Část vozidla	Vyprodukované emise skleníkových plynů
Glider + powertrain, ICEV	4,56 kg CO₂ ekv/kg vozidla
Glider + powertrain + baterie, FCEV	5,34 kg CO₂ ekv/kg vozidla
Glider, BEV	4,56 kg CO₂ ekv/kg vozidla bez baterie
Trakční baterie (dle energ. mixu)	61 až 106 kg CO₂ ekv/kWh baterie
Trakční baterie (PHEV/FCEV)	146 CO₂ ekv/kWh baterie

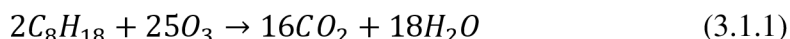
3. PROVOZ

V této kapitole budou nastíněny hlavní zdroje emisí skleníkových plynů vyprodukovaných provozem vozidel s různými druhy paliv.

3.1 Benzín

Benzín je jedním ze dvou hlavních typů paliv používaných ve spalovacích motorech motocyklů, osobních vozidel, lehkých a těžkých užitkových vozidel. Jedná se o homogenní sloučeninu většího množství různých lehkých uhlovodíků obsahujících 4 až 12 atomů uhlíku v každé molekule. Jedná se obvykle o parafíny, olefiny a cykloalkany. Přesné chemické složení však není definováno; existuje několik možných složení vycházejících z různých typů použité ropy, různých výrobních postupů či požadavků na výsledné palivo (především oktanové číslo) [93]. Oktanové číslo udává odolnost benzínu proti předčasnému detonačnímu hoření (tzv. klepání motoru), které má na motor destruktivní vliv a je nutné mu předejít. Vysoké oktanové číslo umožňuje motoru pracovat s chudší směsí či dosáhnout vyššího kompresního poměru, čímž lze dosáhnout vyššího výkonu a efektivity [54].

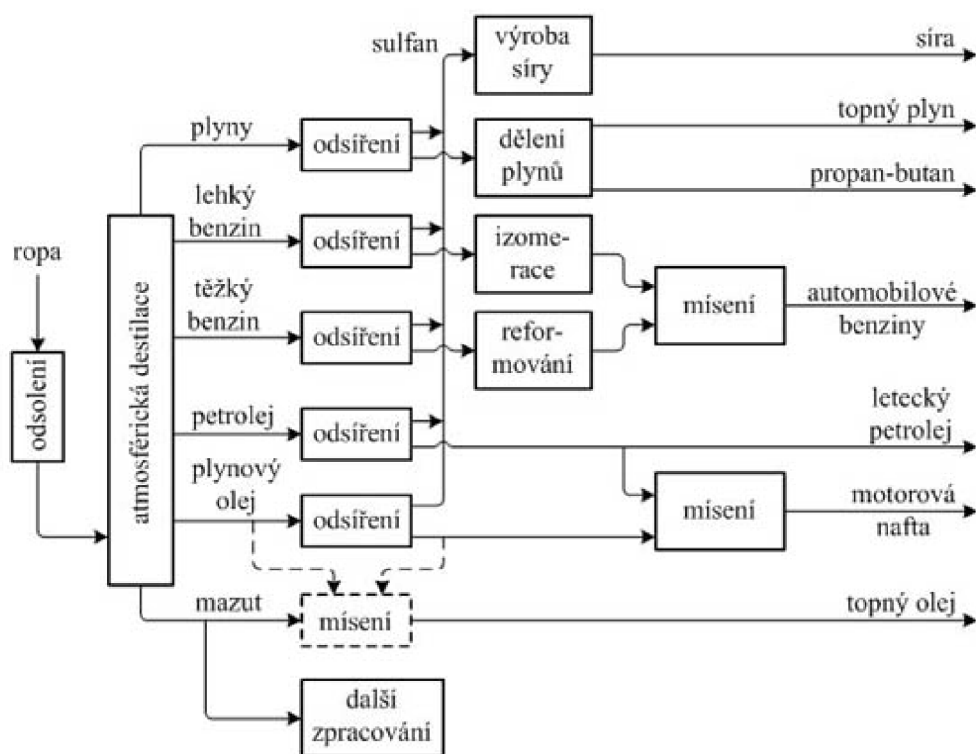
Hustota benzínu je 0,64 až 0,77 g/cm³ a bod varu je 60 až 120 °C. Spálením jednoho kilogramu benzínu je uvolněno přibližně 46,7 MJ energie, což odpovídá 13 kWh/kg, nicméně přesná hodnota se může lišit dle složení. Při spálení 1 kg oktanu (klíčové složky benzínu) dojde k reakci s 3,1 kg kyslíku a vznikne 3,09 kg oxidu uhličitého a 1,42 kg vody, což platí i pro samotný benzín. U něj pak vznikají i další produkty (jako NO_x, CO a další), které se odvíjejí od přesného složení benzínu a způsobu jeho spálení. [93]



Z výše uvedeného vyplývá, že množství oxidu uhličitého vyprodukovaného při ideálním spálení benzínu je přesně dané a odpovídá 2,392 kg na litr benzínu. Takto vyprodukovaný oxid uhličitý nelze dále redukovat (jako v případě oxidů dusíku či oxidu uhelnatého) v katalyzátorech, a celková produkce CO₂ způsobená spalováním paliva tedy přesně odpovídá spotřebě vozidla. [54][93]

Benzín je fosilní palivo – základní surovinou pro jeho výrobu je ropa. Ropa je směsí přírodních látek (především uhlovodíků), může mít jak organický, tak anorganický původ a vzniká během mnoha milionů let. Těží se z ložisek v půdě, ať již na souši či pod mořem a existuje několik metod její těžby. Ropa taktéž má různé složení odpovídající místu její těžby, obecně se však dělí na lehkou, střední a těžkou. Vytěžená ropa se zpracovává v rafinériích a navazujících petrochemických závodech. [94]

Vytěžená ropa nejprve projde procesem odsolování, kdy jsou z jejího složení odstraněny anorganické soli. Odsolení se provádí za účelem prevence korozivního



Obrázek 11: Atmosférická destilace ropy [95]

poškození technologických zařízení v navazujícím průmyslovém řetězci. Společně se soli se odstraní i voda. Odsolování probíhá při teplotách 90-150 °C a dosahuje účinnosti 90-99 %. Následuje atmosférická destilace, při které se za teploty 280 až 360 °C ropa rozděluje na jednotlivé frakce. Výsledkem destilace je topný plyn, propan butan, benzíny, petrolej, nafta, topný olej, síra a mazut. Samotný mazut se pak pomocí vakuové destilace za teplot 360–400 °C dále zpracovává, výsledkem jsou opět benzíny, topné oleje, petroleje, nafta a další, případně asfalt, akryláty nebo polymeráty. Některé frakce po atmosférické či vakuové destilaci dále zpracovávají v petrochemických závodech, kde se z nich vyrábí, kromě široké palety chemikálií jako benzen, toluen, metanol a další, také vodík. [95]

Automobilový benzín se vyrábí jak z lehkého, tak těžkého benzínu. Nejprve dojde k jejich odsíření hydrogenační rafinací a následně se zvyšuje oktanové číslo izomerací u lehkého benzínu nebo reformováním u těžkého benzínu [96]. Výsledkem je hotový automobilový benzín, který se distribuuje na čerpací stanice.

V každém článku výše uvedeného řetězce dochází k exhalacím (mimo jiné) skleníkových plynů. Tyto exhalace lze kategorizovat na emise vyprodukované při těžbě ropy, jejím následném transportu do rafinérie, při zpracování v rafinérii či navazujícím petrochemickém závodě, transportu hotových paliv na čerpací stanice a konečně při jejich spalení. Dále lze identifikovat emise vyprodukované při výstavbě potřebných zařízení.

Vypracování analýzy sledující přesné množství vyprodukovaných emisí v rámci celého procesu výroby benzínu specificky pro prostředí České republiky by neúměrně zvětšovalo rozsah této práce. Proto zde bude využita již dokončená práce vyhotovená Centrem dopravního výzkumu pro Ministerstvo životního prostředí, věnující se analýze životního cyklu fosilních motorových paliv a biopaliv v prostředí České republiky [97][98]. V této práci bylo za pomoci metody LCA vypracováno vyhodnocení dopadů na změnu klimatu při výrobě a užití fosilních paliv a biopaliv, přičemž v průběhu byly zvažovány následující faktory:

- vstupy a výstupy v hlavní zpracovatelské řadě,
- distribuce,
- výroba a užití paliv, elektřiny a tepla,
- užití a údržba výrobků,
- výroba, údržba a vyřazení investičních zařízení,
- a další.[97]

V rámci této práce bylo zjištěno, že při užití benzínu (tedy spalení v motoru) dojde k exhalaci 89 % veškerých emisí skleníkových plynů vyprodukovaných za celý životní cyklus tohoto paliva. [98]

Tabulka 10: Emise CO_{2ekv.} vyprodukované v jednotlivých fázích životního cyklu fosilních paliv. [98]

	Těžba ropy		Doprava ropy		Výroba paliva	
	[g CO _{2 ekv./t}]	[%]	[g CO _{2 ekv./t}]	[%]	[g CO _{2 ekv./t}]	[%]
Benzín	46 708,9	1,3	80 606,8	2,3	219 562,4	6,3
Nafta	26 427,3	0,7	45 606,2	1,3	228 939,8	6,5
	Distribuce paliva		Čerpání paliva		Užití paliva	
	[g CO _{2 ekv./t}]	[%]	[g CO _{2 ekv./t}]	[%]	[g CO _{2 ekv./t}]	[%]
Benzín	10 780,7	0,3	29 630,2	0,8	3 117 638,7	89,0
Nafta	10 780,7	0,3	26 455,6	0,8	3 194 115,0	90,4
Benzín celkem					3 504 927,7 g CO _{2 ekv./t}	
Nafta celkem					3 532 324,6 g CO _{2 ekv./t}	
Benzín, přepočteno na 1 litr (N95, 0,75 g/dm ³)					2 628,70 g CO_{2 ekv./litr}	
Nafta, přepočteno na 1 litr (0,8505 g/dm ³)					3 004,24 g CO_{2 ekv./litr}	

Je vhodné poznamenat, množství oxidů dusíků a oxidu uhelnatého vyprodukovaného ve fázi spalení paliva je odvislé od konstrukce motoru, režimu spalování a úrovně katalyzace. Není zřejmé, jak autoři postupovali při vyhodnocování této fáze životního cyklu paliva. Proto je pravděpodobné, že v tomto ohledu se mohou reálné hodnoty lišit.[99]

3.2 Elektrická energie

Každý stát disponuje vlastním energetickým mixem různých zdrojů elektrické energie, z čehož vychází jeho emisní faktor. Ten nám pak říká, jaké množství skleníkových plynů je vyprodukováno průměrně při výrobě jednotky elektrické energie. Emisní faktor elektrické energie pak hraje významnou roli při analýze životního cyklu vozidel se všemi typy pohonu. [40]

V první řadě jsou od něj odvozeny emise skleníkových plynů vyprodukované při výrobě vozidla – energeticky náročné výrobní procesy a technologie způsobují vysokou spotřebu elektřiny. Efektivita těchto procesů má přímý vliv na emise vyprodukované při výrobě elektřiny. [40]

Dále má emisní faktor elektrické energie vliv na emise vyprodukované provozem bateriového elektrického vozidla (BEV) a hybridních vozidel (HEV a PHEV). Ačkoliv mají BEV téměř nulové lokální emise skleníkových plynů, tak nelze říci že jejich provoz je zcela bezemisní, protože k produkci těchto emisí dochází právě při výrobě elektrické energie užitě k jejich pohonu. [40]

Emisní faktor má významný vliv i na provoz vozidel s vodíkovým pohonem, protože ačkoliv obdobně jako v případě BEV jsou lokální emise skleníkových plynů marginální, tak pro výrobu, transport a čerpání vodíku je potřeba elektrická energie. Produkce vodíku navíc bývá energeticky velmi náročná. [40]

Emisní faktor hraje svou roli i při recyklaci vozidel. Svou roli zde hrají použité recyklační procesy, poměr mezi množstvím recyklovaných, skládkovaných a znovu užitých komponent vozidla a hmotnosti vozidla. [40]

3.2.1 Energetický mix v České republice

Největší podíl na výrobě elektrické energie v Česku mají uhelné elektrárny se zastoupením zhruba 44 %. Všechny české uhelné elektrárny již prošly nebo procházejí modernizací a využívají hnědé uhlí. Jedná se o fosilní zdroj elektrické energie, který má zároveň velmi vysoký emisní faktor. Druhý největší podíl připadá jaderným zdrojům, a to více než 40 %. Tento zdroj je považován za nízkoemisní – při produkci elektřiny je emitováno jen velmi malé množství skleníkových plynů. [100]

Třetí největší podíl na tuzemské výrobě elektřiny mají plynové elektrárny, odpovídající přibližně 9 %. Jedná se opět o fosilní zdroj, který však disponuje nižšími, emisním faktorem než uhelné elektrárny. Obnovitelné zdroje energie (fotovoltaické, vodní, přečerpávací a větrné) pak v součtu představují zhruba 7 % celkové výroby elektřiny. [100]

Pro výpočet emisního faktoru energetického mixu ČR je nutné znát emisní faktor výroby jednotlivých druhů elektráren nejen z pohledu palivového cyklu, ale je nutné vzít v potaz i výstavbu potřebné infrastruktury a dodavatelských řetězců. Za tímto účelem vypracoval Mezinárodní panel pro změnu klimatu studii, ve které byly zjištěny průměrné hodnoty těchto emisí pro jednotlivé druhy zdrojů elektriny [101]. Tabulka 11 obsahuje zjištěná data relevantní pro český energetický mix.

Tabulka 11: Emise vybraných typů zdrojů elektrické energie. Hodnoty jsou uvedeny v $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{kWh}$ [101]

Typ elektrárny	Přímé emise	Infrastruktura	Celkové emise
	Min/medián/max	Typické hodnoty	Min/medián/max
Uhelná	670/760/870	9,6	740/820/910
Jaderná	0	18	3,7/12/110
Plynová	350/370/490	1,6	410/490/650
Vodní	0	19	1/24/2200
Solární	0	66	18/48/180
Větrné	0	15	7/11/56
Biomasa	Neznámé	210	130/230/420

Tyto hodnoty pak můžeme použít pro výpočet celkových emisí vyprodukovaných výrobou elektrické energie. Jako zdroj dat je použita čtvrtletní zpráva o provozu elektrizační soustavy české republiky za 4. čtvrtletí 2022 [100]. Pro výpočet vyprodukovaných emisí jsou použity mediánové hodnoty.

Tabulka 12: Celková výroba elektrické energie v ČR napříč všemi zdroji a korespondující emise skleníkových plynů [100]

Typ elektrárny	Výroba celkem (2022) [GWh]	Vyprodukované emise skl. plynů [$\text{gCO}_{2\text{ekv}}$]
Uhelná	41 049,3	$33\,660\,426,0 \cdot 10^3$
Jaderná	31 021,8	$372\,261,6 \cdot 10^3$
Plynová	6436,8	$3\,154\,032,0 \cdot 10^3$
Vodní	2 093,0	$50\,232,0 \cdot 10^3$
Solární	989,7	$47\,505,6 \cdot 10^3$
Větrná	641,3	$7\,054,3 \cdot 10^3$
Biomasa	2 295,5	$527\,965,0 \cdot 10^3$
CELKEM	84 527,5	$37\,819\,476,5 \cdot 10^3$

Celková hodnota emisního faktoru českého energetického mixu je vypočtena jako:

$$EF = \frac{\text{Vyprodukované emise}}{\text{Celkem vyrobená elektřina}} = \frac{37\,819\,476\,500}{84\,527\,500} \quad (1)$$

$$= 447,42 \text{ [gCO}_2\text{ ekv/kWh]}$$

Ministerstvo průmyslu a obchodu uvádí, že v roce 2021 byl emisní faktor české energetiky 390 gCO_{2 ekv}/kWh [102], přičemž predikce pro rok 2022 je 408 gCO_{2 ekv}/kWh [103]. Rozdíl oproti vypočtené hodnotě může být dán nepřesnou hodnotou celkových emisí energetických zdrojů (může být nižší než mediánová hodnota udávaná IPCC) či nepřesným výpočtem emisí elektrárny na biomasu. IPCC totiž ve své práci nepočítá s oxidem uhličitým spotřebovaným rostlinami, které byly následně použité jako součást paliva. Ministerstvo průmyslu a obchodu však s tímto faktorem kalkulovat mohlo. Na druhou stranu, MPO při svých výpočtech bere v potaz u obnovitelných zdrojů energie pouze přímé emise [103]. V práci IPCC je však kalkulováno i se emisemi vyprodukovanými výstavbou a recyklací těchto zdrojů. Dále, MPO zřejmě neuvažuje energetické ztráty z výroby a přenosu energie.

3.2.2 Ztráty při výrobě a v přenosové a distribuční síti

Při výrobě a distribuci elektrické energie dochází ke ztrátám. Jedná se především o technologickou vlastní spotřebu elektřiny na výrobu elektřiny, technologickou vlastní spotřebu elektřiny na výrobu tepla a ztráty v přenosové a distribuční síti. S těmito ztrátami je pak nutné počítat při následných výpočtech energie spotřebované spotřebičem a celkové uhlíkové stopy. Tabulka 13 zobrazuje ztráty při výrobě a distribuci elektrické energie v ČR pro rok 2022 [100].

Tabulka 13: Ztráty při výrobě a distribuci elektrické energie [100]

Typ ztrát	Ztráta [GWh]
Technologická vlastní spotřeba na výrobu elektřiny	5 757,9
Technologická vlastní spotřeba na výrobu tepla	987,7
Ztráty v přenosové soustavě	1 012,1
Ztráty v distribuční soustavě	2 402,2
CELKEM	10 159,9

$$\begin{aligned}
 EF_{spotř.en.} &= \frac{\text{Vyprodukované emise}}{\text{Celkem vyrobená elektřina} \cdot \text{ztráty}} \\
 &= \frac{37\,819\,476\,500}{84\,527\,500 \cdot 0,88} = \frac{37\,819\,476\,500}{74\,384\,200} \quad (2) \\
 &= 508,43 \text{ [gCO}_2\text{ ekv/kWh]}
 \end{aligned}$$

Z výše uvedených hodnot je zřejmé, že celkové ztráty z výroby a distribuce elektrické energie odpovídají přibližně 12 % z celkového množství vyrobené energie. Celkové emise CO₂ ekv. vyprodukované spotřebou 1 kWh vyrobené a dodané elektřiny v ČR se tedy rovnají **508,43 g CO₂ ekv/kWh**.

České ministerstvo průmyslu a obchodu uvádí, že emisní faktor českého energetického mixu se od roku 1990 do 2022 snižuje průměrně o 1,7 % ročně [104]. Vzhledem k Unijním závazkům ohledně snižování produkce skleníkových plynů, plánovanému ukončení provozu uhelných elektráren, plánované výstavbě až 4 nových bloků jaderných elektráren a plánu být jako EU27 do roku 2050 uhlíkové neutrální, lze předpokládat, že tento trend bude nadále pokračovat. Předpokládané hodnoty EF českého energetického mixu jsou uvedeny v příloze A.1.

3.3 Nabíjecí ztráty

U vozidla se spalovacím motorem nedochází při tankování k téměř žádným ztrátám. To však není případ BEV, kde množství energie dodané do baterie je menší než množství energie dodané do nabíječky. Tyto ztráty se nazývají nabíjecí ztráty (NZ) a skládají se z usměrňovacích ztrát (usměrnění z AC do DC), tepelných ztrát a ztrát při konverzi elektrické energie do baterie. Nabíjecí ztráty se obvykle pohybují 9 až 22 % (při úrovni nabití baterie mezi 15 a 80 % State-of-charge (SoC)) [105][106][107][108]. Nabíjení nad 80 % SoC pak nabíjecí ztrát dále zvyšuje, a to až na dvojnásobek [109]. Dalším významným faktorem je teplota. Velmi nízké teploty mohou snížit efektivitu nabíjení až na 59 %. Na druhé straně, vysoké teploty obvykle nemívají významný efekt na nabíjecí ztráty. Stejně tak využívání stejnosměrných rychlonabíjecích stanic s výkonem převyšujícím 80 kW [109]

3.4 Vodík

Vodík je nejjednodušší chemický prvek skládající se z jednoho protonu a jednoho elektronu. Jedná se hořlavý ale hoření nepodporující plyn. Díky jeho vysoké reaktivnosti se na zemi jako samostatná molekula téměř nevyskytuje. Vodík samotný žádným způsobem neznečišťuje životní prostředí. Jedná se o palivo s velmi vysokou energetickou hustotou – 33 kWh/kg, avšak na druhou stranu nízkou objemovou energetickou hustotou, která odpovídá 3 kWh/m³ při 20 °C a 1 bar. [93][110]

Emisní faktor vodíku je závislý na způsobu jeho produkce. Existuje několik metod, které lze obecně rozdělit na ty využívající neobnovitelné zdroje a zdroje obnovitelné. Dále se zavedla praxe nazývat vyprodukovaný vodík barvou (zelený vodík, modrý vodík, tyrkysový vodík atd.) dle zdrojové suroviny nebo energie ze které byl vytvořen. [110][111][112][113]

3.4.1 Neobnovitelné zdroje vodíku

V současnosti zhruba 96 % celosvětové produkce vodíku pochází z fosilních zdrojů [110]. Mezi hlavní metody patří parní reforming, gasifikace a pyrolýza [114].

Parní reforming – U této metody je základním zdrojem zemní plyn a další uhlovodíky obsahující metan. Jedná se o chemický proces, při kterém se vodní pára o teplotě 750 až 950 °C přivede k metanu. Mezi metanem a párou proběhne reakce a vzniká vodík, oxid uhelnatý a oxid uhličitý. Touto metodou je vyrobeno přibližně 48 % veškeré světové produkce vodíku. Na každý 1 kg vyrobeného vodíku je emitováno 9–12 kg CO₂ [114]. Vyrobený vodík se označuje jako šedý, v případě užití technologie zachytávání uhlíku (CCS) pak jako modrý [111].

Gasifikace – Zdrojovým materiálem je uhlí. Uhlí se začne spalovat za přivedení malého množství kyslíku, přičemž začne vznikat oxid uhličitý. Ten reaguje s uhlíkem v uhlí, a vznikne oxid uhelnatý. K tomu je přivedena vodní pára, a vzniká vodík a oxid uhličitý. Touto cestou se emituje cca 29 kg CO₂ na každý kilogram vodíku. V tomto případě je značení vodíku stejné jako u metody parního reformingu. Touto metodou se vyrobí přibližně 18 % veškeré světové produkce vodíku. Alternativně lze místo uhlí použít biomasu – poté se vyrobený vodík označuje jako zelený. [114]

Pyrolýza – Zjednodušeně spočívá v zahřívání materiálu (obvykle zemního plynu) za účelem rozkladu metanu. Výsledkem je vodík a uhlík v pevném skupenství. V tomto procesu nedochází ke spalování. Na 1 kg vodíku je tímto procesem vyprodukováno přibližně 6,1 kg CO_{2 eq.}[115]. Vyrobený vodík se označuje jako tyrkysový [110][111].

3.4.2 Obnovitelné zdroje vodíku

Elektrolýza – Jedná se nejvíce zastoupenou metodu výroby vodíku z obnovitelných zdrojů. Touto metodou se vyrobí 4 % celkové světové produkce vodíku [114]. Vstupní surovinou je voda, která se za pomoci elektrického proudu štěpí na vodík a kyslík. Na výrobu 1 kg vodíku je potřeba 9 l vody a 50 až 60 kWh elektrické energie [110][114][116].

Tabulka 14: Emisní faktor různých druhů výroby vodíku. Nejsou zahrnuty emise vyprodukované výstavbou výrobní infrastruktury. [103][111][112][113]

Typ vodíku	Barva	Vyprodukované emise skl. plynů
Gasifikace (černé uhlí)	Černá	29 kgCO ₂ ekv./kg H
Gasifikace (hnědé uhlí)	Hnědá	21,7 kgCO ₂ ekv./kg H
Parní reforming (bez CCS)	Šedá	9-12 kgCO ₂ /kg H
Částečná oxidace (Bez CCS)	Šedá	N/A
Pyrolýza	Tyrkysová	6,1 kgCO ₂ ekv./kg H
Parní reforming (s CCS)	Modrá	1,4-6 kgCO ₂ ekv./kg H
Částečná oxidace (s CCS)	Modrá	0,7-2,5 kgCO ₂ ekv./kg H
Elektrolýza (elektrina ze sítě)	Žlutá	dle em. faktoru elektřiny
Elektrolýza (elektrina z jádra)	Růžová	0,75 kgCO ₂ ekv./kg H
Elektrolýza (elektrina z OZE)	Zelená	0,03-0,3 kgCO ₂ ekv./kg H

Pakliže je pro výrobu vodíku použita skutečně pouze energie z obnovitelných zdrojů, je označován jako zelený. Pokud se použije elektrická energie z jaderných elektráren, označuje se vodík za růžový. Když se použije elektřina odpovídající běžnému energetickému mixu sítě, označuje vyrobený vodík za žlutý. Růžový a žlutý vodík se však nepovažuje za pocházející z obnovitelných zdrojů. [110][111]

3.4.3 Transport a tankování vodíku

Vodík lze dopravovat k plnicím stanicím potrubím či speciálními trailery, přičemž může být v kapalném či plynném skupenství [117]. Kapalně skupenství je výhodné především pro transport na velké vzdálenosti. V české republice aktuálně neexistuje žádný projekt uvažující zásobování kapalným vodíkem, a všechny vybudované vodíkové plnicí stanice se zásobují trailery převážející stlačený plynný vodík [118].

Za účelem transportu se vodík při plnění cisterny stlačí na 50-500 bar [117][118]. Následně je převážen na plnicí stanici, kde se přepouští do provozní tlakové nádoby s tlakem cca 25 bar [119]. Poté se vodík postupně stlačuje v kaskádě tlakových nádob na 300, 500 a eventuálně i 900 bar [117][119]. Takto kaskádovitě stlačování je nutné kvůli předcházení ztrát ohřevem vodíku a snížení energetické náročnosti stlačování [117]. Dále, některé typy vozidel (např. autobusy) vyžadují nižší plnicí tlak než osobní vozy [119].

Vodíková vozidla obvykle disponují nádrží na přibližně 6 kg vodíku pod tlakem 700 bar, přičemž plnění nemá trvat déle než 3 minuty [117]. Při takto rychlém plnění by docházelo k nadměrnému zahřívání nádrže vozidla vysoce nad předepsanou úroveň 85 °C. Proto se před plněním vodík ochladí na -33 až -40 °C, čímž se předejde tomuto přehřátí [117]. Zároveň plnění probíhá vyšším tlakem než 700 bar – dosahuje se tlaků až 875 bar. Toto je opět kvůli ohřevu při plnění a je tím zaručeno, že po ochlazení nádrže na okolní teplotu bude tlak vodíku dosahovat právě 700 bar [117].

Všechny tyto faktory je nutné posoudit z hlediska energetické náročnosti. Kaskádovité stlačování vodíku na potřebných 900 bar vyžaduje zhruba 2,25 kWh/kg. Chlazení před plnění do vozidla odpovídá zhruba 0,18 kWh/kg. Dále je nutné zohlednit plnění traileru. Nelze opomenout spotřebu traileru při transportu vodíku [117]. Vycházet lze z hodnot zjištěných pro benzín či naftu, tedy 10,78 gCO₂ ekv./kg H.

3.4.4 Vodík v ČR

Dle Vodíkové strategie ČR z roku 2020 jsou doposud převládajícími způsoby výroby vodíku v ČR částečná oxidace těžkých kovů ropných frakcí, parní reforming a elektrolýza. Pokud by se v ČR vodík vyráběl pouze elektrolýzou pomocí energie ze sítě, dle tohoto dokumentu by byl emisní faktor tohoto vodíku 24,816 kgCO₂/kg H. Dle vlastních výpočtů by měl emisní faktor odpovídat 24,608 kgCO₂ ekv./kg H při efektivitě výroby 55 kW/kg vodíku a emisním faktoru elektřiny 442,74 gCO₂ ekv./kW, respektive 27,964 kgCO₂ ekv./kg H při emisním faktoru 508,43 gCO₂ ekv./kW. Nicméně, v dokumentu je uvedeno že reálný průměrný emisní faktor je 16,356 kg CO₂/kg H.

Pokud k této hodnotě připočteme některé ztráty z transportu a čerpání,

$$H_{celk} = 16,356 + 0,01 + (2,25 + 0,18) \cdot 0,50843 = 17,6015 \text{ [kgCO}_2 \text{ ekv./kgH]} \quad (3)$$

dojdeme k výslednému emisnímu faktoru **17,6015 kgCO₂ ekv./kg H**.

Vodíková strategie ČR neuvádí, v jakém poměru budou zastoupeny zdroje vodíku v nadcházejících letech [120]. Nicméně, vzhledem k předpokládanému nárůstu spotřeby elektrické energie ČR, odstavování uhelných elektráren, odstavování nejstarších jaderných bloků a pomalé výstavbě bloků nových (první nový blok Dukovany 5 nejdříve v roce 2036) nelze předpokládat, že by většinu výroby vodíku zastaly jaderné zdroje. Pro představu, plánovaná spotřeba vodíku v roce 2050 představuje 1,728 mld. tun vodíku, na jehož výrobu by byl potřeba 3,2násobek nynějšího ročního výkonu elektráren Dukovany a Temelín.

Dále je nepravděpodobné, že by v nejbližších 15 letech pokryl jakkoli významnou část spotřeby vodíku import ze zahraničí. Vodíková koncepce ČR nepředpokládá dovoz vodíku ze zahraničí za použití přestavby plynové infrastruktury dříve než v letech 2035-2039, kdy končí platné dlouhodobé kontrakty na dodávky plynu [120]. Dále se zde uvádí, že jediné zdroje schopné dodat signifikantní množství vodíku, které by pokrylo alespoň část plánované spotřeby je plynová pyrolýza a elektrolýza s využitím jaderných zdrojů – tedy tyrkysový a růžový vodík. Plánované kapacity obnovitelných zdrojů se jeví pro výrobu vodíku jako nedostatečné.

4. KONEC ŽIVOTNÍHO CYKLU

Jakmile vozidlo dosáhne konce své životnosti, je nutné jej ekologicky zlikvidovat. Průměrná doba života vozidla v EU se pohybuje od 8 do 35 let s mediánovou hodnotou 21,7 let, přičemž ve státech západní Evropy je to 18,1 a ve státech východní Evropy 28,4 let [120]. Data o průměrných kilometrových nájezdech před recyklací se pak značně liší, přičemž nejčastěji se objevují hodnoty mezi 205 000 [122] a 250 000 km [46][123]. Zpráva ICCT z roku 2021 uvádí průměrný věk dožití vozidla v Německu 17 až 18 let, 19 let ve Francii a 20 let v Polsku při průměrném nájezdu 13500 km ročně (KM_{annual}) u vozidla nižší střední třídy a 15 000 km ročně u segmentu SUV [124]. Průměrný nájezd se stále zvyšuje, což je dáno především vyšší kvalitou výroby a použitých materiálů [125]. Vozidla běžně dosahují i vyšších nájezdů odpovídajících 300 až 400 000 km [125][126] (v relativně vzácných případech i více), avšak takovéto nájezdy se obvykle nachází za plánovanou konstrukční životností vozu a neobejdou se bez důsledné údržby a oprav.

Záruky výrobců se obvykle vztahují na 2 až 5 let provozu a 100 000 až 200 000 km + případnou dodatečnou záruku na korozi karoserie až 12 let [127]. Záruky na baterie BEV bývají obvykle na 8 let/166 000 km, dle toho, co přijde dříve, přičemž za akceptovatelné se považuje ztráta až 30 % kapacity baterie [128] a samovybití odpovídající samovolné ztrátě 5 % energie za 24 hodin [129]. Některé modely Tesla či Rivian však nabízí záruku na ujetí 200 000, 250 000 či dokonce 290 000 km [128].

4.1 Legislativa

V Evropské unii se recyklace vozidel řídí direktivou Evropské Unie 2000/53/EC [130], v ČR pak zákonem č. 541/2020 Sb. – Zákon o odpadech. Direktiva EU stanovuje limity pro recyklaci a znovuvyužití materiálů z vozů na konci životnosti, stanovuje pravidla pro recyklační provozovny, definuje kategorie a kódy pro různé materiály využití ve vozech, nařizuje výrobcům konstruovat vozidla tak aby bylo možné je efektivně recyklovat a další. Aktuálně platné znění stanovuje, že z celkové hmotnosti vozu musí být zrecyklovány či znovuvyužity materiály odpovídající nejméně 85 % jeho hmotnosti. Tato direktiva byla do českého právního řádu začleněna zákonem č. 541/2020 Sb., Zákon o odpadech.

Výše uvedená direktiva nezahrnovala baterie BEV. Tyto byly z direktivy vyjmuty, aby se urychlil přechod na BEV jakožto preferovaného typu pohonu. V prosinci roku 2022 však byla odsouhlasena nová regulace 2019/1020 [131], týkající se právě baterií. Cílem této regulace je zajistit udržitelnou výrobu, bezpečný provoz a ekologickou recyklaci baterií, přičemž sledovány mají být i sociální, environmentální a lidskoprávní faktory těžby primárních materiálů. Zároveň se stanovuje, že nově vyrobené trakční baterie BEV musí obsahovat určité minimální poměrné množství recyklovaných materiálů. Jedná se o nejméně 16 % v případě kobaltu, 85 % u olova, 6 % u lithia a 6 %

v případě niklu pro rok 2031 a nejméně 26 % v případě kobaltu, 85 % u olova, 12 % u lithia a 15 % v případě niklu od roku 2036. Zajištění dodržování těchto požadavků (i v případě baterií importovaných z nečlenských států EU) bude dosaženo zavedením průvodní dokumentace každé baterie, ve které budou uvedeny požadované informace [132].

4.2 Recyklace

Dle výše uvedené direktivy 2000/53/EC a ISO standardu 22628:2002 lze recyklaci vozu rozdělit na 4 fáze:

1. Odstranění znečišťujících látek – v tomto kroku se odstraní baterie, sejmou a recyklují pneumatiky a katalyzátory.
2. Demontáž – recyklace skel a kotoučových brzd, recyklace či částečné skládkování oddělitelných dílů karoserie.
3. Drcení.
4. Odstranění odpadu z drcení – recyklace většiny ocele a hliníku, zbytek se skládkuje.

Způsob zohlednění recyklace do celkového zhodnocení životního cyklu vozidla se často výrazně liší. Některé práce zohledňují pouze energii spotřebovanou pro samotný proces recyklace bez zohlednění úspor znovuvyužitím materiálů [133]. Zde se odhaduje, že celým procesem je vyprodukováno 65 kg CO_{2 ekv./kg} vozidla. Tento přístup mohl mít své opodstatnění v minulosti a částečně i dnes, kdy ještě není v platnosti direktiva pro recyklaci baterií BEV.

Jiné práce využívají systém kreditů, kdy se kalkuluje využitím určité části zrecyklovaných materiálů pro výrobu nového vozu. Tímto klesá environmentální zátěž výroby tohoto nového vozu, avšak pro výpočet se tento efekt transponuje do celkové uhlíkové bilance analyzovaného recyklovaného vozu. Takto se pak kalkuluje s - 2,33 až - 3,52 kg CO_{2 ekv./kg} vozidla v případě ICEV a -41,1 až -55,7 kg CO_{2 ekv./kg} vozidla v případě BEV (při 83,5 kg CO_{2 ekv./kg} baterie) [53][134]. Nicméně je otázkou, zda tyto emise skleníkových plynů by neměly být zohledněny až ve prospěch následně z těchto materiálů vyrobeného vozu, protože emise byly již extrakcí a zpracováním materiálů vyprodukované, a jejich recyklací nedošlo k jejich zpětnému odchytu. Qiao, Hao a kol. (2018) [134], z jejichž práce vychází i práce Buberger a kol. [53] přistupuje k problematice tak, že uvažuje nákup BEV na konci jeho životnosti, jeho kompletní recyklaci dle aktuálně (nebo v blízké budoucnosti dostupných) technologií v Číně a následně porovnává environmentální dopad a finanční úsporu takovéto recyklace oproti těžbě nových materiálů. Tento přístup však nemusí být metodicky korektní pro všechny typy analýz, protože jednak předpokládá stav recyklačního průmyslu v nynější době, a zároveň předpokládá, že nová baterie či vozidlo je vyrobeno výhradně z takto recyklovaných materiálů. X. Sun, X. Luo a kol. (2022) analyzují článek NMC 611

recyklovaný v Číně, přičemž se předpokládá efektivita recyklace 98,7 % u niklu, 97,1 % u Manganu, 98,2 % u kobaltu a 81 % u lithia [135]. Autoři uvažují rozdíl mezi emisemi skl. plynů vzniklých procesem recyklace a těžbou nových materiálů jako bonus, který pak odečtou od emisí vyprodukovaných výrobou těžce baterie. Tímto došli ke snížení množství emisí skleníkových plynů vyprodukovaných výrobou baterie o zhruba 24 %. Obdobných výsledků dosahuje i studie M. Mohr a J.F. Peters [136], ve které jsou mimo různé verze NMC článků (NMC 111, NMC 622 a NMC 811) i LFP, NCA a SIB články. V práci bylo zjištěno, že recyklací článků a využitím získaných materiálů v nových lze snížit celkové emise skleníkových plynů z životního cyklu článku o 18 až 29 %, dle užití metody a pokročilosti recyklačního procesu. Významné rozdíly mezi typy článků NMC nebyly zjištěny. Je však nutné poznamenat, že v této práci se neanalyzuje recyklace celých battery packů – pouze jednotlivých článků. K podobným hodnotám (14 až 25 % redukce) dochází i R. E. Ciez a J.F. Whitcare [138]. V dalších pracích se aplikuje obdobný kreditový systém, kdy se ušetřené emise transponují do emisí vyprodukovaných provozem vozidla [137][139]. Tento systém se nicméně jeví jako nepřesný. Jiné práce pak přesná data pro recyklaci neuvádí [42][43][46][65]. Práce švédské IVL uvádí energetickou náročnost recyklace zhruba 15 kg CO₂ ekv./kWh, přičemž elektřina se uvádí jako hlavní zdroj energie [81].

Data pro energetickou náročnost recyklace glideru jsou poměrně vzácná; ve většině případů je recyklace z práce úplně vynechána pro její minimální vliv na celkový výsledek. Pokud jsou tyto hodnoty uvedeny, obvykle odpovídají zhruba 0,17 kWh/kg vozidla + energie ze surovin jako plyn či uhlí. Celkem se pak jedná o hodnotu zhruba 2,36 kg CO₂ ekv./kg glider [134][141].

Další práce se snaží vzít v potaz i předpokládané znovuvyužití baterií v tzv. druhém životě – kupříkladu jako baterie pro domácí solární elektrárny a podobně [40][44]. V tuto chvíli sice toto znovuvyužití není příliš rozšířené, avšak v případě recyklace vozidla je nutné počítat nikoliv se stavem recyklačního průmyslu v dnešní době, ale v době, kdy vozidlo reálně dosáhne konce své životnosti a bude recyklováno. Již jen z hlediska přijatých regulací a direktiv je zřejmé, že v následujících letech dojde s největší pravděpodobností k značnému rozšíření a zkvalitnění recyklačních kapacit a procesů. Pokud tedy budeme analyzovat vozidlo vyrobené v roce 2022, tak v případě že dosáhne konce svého života po osmi letech, je vhodné předpokládat stav recyklačního průmyslu odpovídající roku 2030. Ve studii vypracované pro Evropskou komisi [40] se uvádí, že ač se v dnešní době znovuvyužívá méně než 10 % baterií z BEV, v roce 2030 to bude 40 až 80 %.

Jiné práce pak emise vyprodukované recyklací vozu neberou v potaz vůbec. Jako nejčastější důvod se uvádí nedostatek relevantních dat či minimální vliv na celkový výsledek [41][45][140].

V každém případě se však počítá s recyklací vozidla v EU. Pakliže by došlo k exportu vozidla před koncem jeho životnosti mimo EU a jeho následné recyklaci zde, je pravděpodobné, že emisní stopa recyklace by byla negativnější.

Z výše uvedené je zřejmé, že data týkající se recyklace vozidla mají znatelný rozptyl. Jako nejmarkantnější vliv se jeví znovuvyužití trakční baterie BEV v jiné aplikaci. V datu předpokládaného konce životnosti analyzovaných vozidel by se mělo jednat o 40 % (nízký předpoklad) až 80 % (vysoký předpoklad) baterií. Je však nutné poznamenat, že se jedná o baterie v často již pokročilé fázi jejich života a k jejich recyklaci stejně dříve nebo později nevyhnutelně dojde.

Dále se jeví jako rozporuplná praxe promítat efekt recyklace vozidla (především baterie BEV) do vozidla, které je již na konci životnosti a je právě recyklováno. Jako korektnější se jeví promítnutí těchto hodnot až do životního cyklu následně z těchto materiálů vyrobeného vozidla či baterie. Nicméně, jelikož se ve většina studií týkajících se tohoto tématu uplatňuje právě tento přístup, budou zpracovány oba scénáře, přičemž budou uvažovány aktuálně nejefektivnější známé postupy, aby se alespoň částečně zohlednil pokrok v recyklačním průmyslu v nadcházejících letech.

Životnost vozidla je na základě informací z kapitoly 4 stanovena jako 250 000 km a 18 let [46][120][122][123][124].

Tabulka 15: Vliv recyklace na emise skleníkových plynů – bez zohlednění bonusů z recyklačního procesu

Část vozidla	Vyprodukované emise skleníkových plynů
Glider + powertrain bez baterie FCEV a trakční baterie BEV	2,36 kg CO₂ ekv/kg vozidla
Trakční baterie a baterie FCEV	15 kg CO₂ ekv/KWh baterie

Tabulka 16: Vliv recyklace na emise skleníkových plynů – včetně zohlednění bonusů z recyklačního procesu

Část vozidla	Vyprodukované emise skleníkových plynů
Glider + powertrain bez baterie FCEV a trakční baterie BEV	-3,52 kg CO₂ ekv/kg vozidla
Trakční baterie a baterie FCEV	-29 % CO₂ ekv/KWh baterie

5. PRAKTICKÁ ČÁST

Jako zástupci BEV a ICEV byla vybrána vozidla vyšší střední třídy (segment D) BMW i4 eDrive35 a BMW 430i Gran Coupe spalující benzín. Tyto vozidla byla vybrána z důvodu, že sdílí společnou platformu, množství dílů a část dodavatelského řetězce. Z důvodu malé rozšířenosti FCEV byla vybrána Toyota Mirai MK2 jakožto vůz nejvíce podobný BMW řady 4. Zároveň se jedná o jediné aktuálně prodávané FCEV střední třídy karoserie sedan / coupe.

Výpočet je rozdělen do třech modulů: výroba, provoz a konec života pro každý typ pohonu zvlášť. Pro zjednodušení výpočtu se předpokládá, že roční nájezd bude po celou dobu životnosti vozidla stejný, ačkoliv ve skutečnosti průměrně vozidla najíždí v počátcích svého života nadprůměrné množství kilometrů ročně a s postupným stárnutím se roční množství ujetých kilometrů snižuje. Dále jsou ignorovány přestupné roky.

5.1 Použité vztahy

5.1.1 BEV

Modul produkce vozidla:

$$E_{prod} = \left((m_{vuz} - m_{batt}) \cdot EF_{glider} \right) + (Q_{batt} \cdot EF_{batt}) \quad (4)$$

Kde:

E_{prod}	emisní faktor produkce vozidla
m_{vuz}	hmotnost vozidla
m_{batt}	hmotnost baterie
EF_{glider}	emisní faktor produkce glideru
Q_{batt}	kapacita baterie
EF_{batt}	emisní faktor výroby baterie

Modul provozu vozidla (jeden rok):

$$E_{oper i} = \left(\frac{(KPL_{aver} \cdot KM_{annual}) +}{(Q_{batt} \cdot SB \cdot 365)} \right) \cdot NZ \cdot EF_{el i} \quad (5)$$

Kde:

$E_{oper i}$	emisní faktor provozu vozidla pro daný rok
KPL_{aver}	průměrná spotřeba vozidla
KM_{annual}	průměrný roční nájezd
Q_{batt}	kapacita baterie
SB	samovybití baterie
365	počet dní v roce
NZ	nabíjecí ztráty
$EF_{el i}$	emisní faktor elektrické energie pro daný rok (viz A.1)

Modul konce životnosti vozidla:

$$E_{EoL} = (R_{glider} \cdot (m_{veh} - m_{batt})) + ((Q_{batt} \cdot EF_{batt}) \cdot R_{batt}) \quad (6)$$

Kde:

E_{EoL}	emisní faktor recyklace vozidla
R_{glider}	emisní faktor recyklace glideru
m_{veh}	hmotnost vozidla
m_{batt}	hmotnost baterie
Q_{batt}	kapacita akumulátoru
EF_{batt}	emisní faktor výroby baterie
R_{batt}	emisní faktor recyklace baterie

Celkový výpočet:

$$E_{total} = E_{prod} + \sum_{i=2023}^{2040} E_{oper\ i} + E_{EoL} \quad (7)$$

5.1.2 ICEV – benzín i diesel**Modul produkce vozidla:**

$$E_{prod} = m_{vuz} \cdot EF_{glider} \quad (8)$$

Kde:

E_{prod}	emisní faktor produkce vozidla
m_{vuz}	hmotnost vozidla
EF_{glider}	emisní faktor produkce glideru

Modul provozu vozidla (jeden rok):

$$E_{oper\ i} = KPL_{aver} \cdot KM_{annual} \cdot EF_{palivo} \quad (9)$$

Kde:

$E_{oper\ i}$	emisní faktor provozu vozidla pro daný rok
KPL_{aver}	průměrná spotřeba vozidla
KM_{annual}	průměrný roční nájezd
EF_{palivo}	emisní faktor benzínu či nafty

Modul konce životnosti vozidla:

$$E_{EoL} = R_{glider} \cdot m_{veh} \quad (10)$$

Kde:

E_{EoL}	emisní faktor recyklace vozidla
R_{glider}	emisní faktor recyklace glideru
m_{veh}	hmotnost vozidla

Celkový výpočet:

$$E_{total} = E_{prod} + \sum_{i=2023}^{2040} E_{oper\ i} + E_{EoL} \quad (11)$$

5.1.3 FCEV

Modul produkce vozidla:

$$E_{prod} = m_{vuz} \cdot EF_{gliderFCEV} \quad (12)$$

Kde:

E_{prod}	emisní faktor produkce vozidla
m_{vuz}	hmotnost vozidla
EF_{glider}	emisní faktor produkce glideru

Modul provozu vozidla (jeden rok):

$$E_{oper\ i} = KPL_{aver} \cdot KM_{annual} \cdot EF_{vodík} \quad (13)$$

Kde:

$E_{oper\ i}$	emisní faktor provozu vozidla pro daný rok
KPL_{aver}	průměrná spotřeba vozidla
KM_{annual}	průměrný roční nájezd
$EF_{vodík}$	emisní faktor vodíku dle České vodíkové strategie

Modul konce životnosti vozidla:

$$E_{EoL} = R_{glider} \cdot m_{veh} \quad (14)$$

Kde:

E_{EoL}	emisní faktor recyklace vozidla
R_{glider}	emisní faktor recyklace glideru
m_{veh}	hmotnost vozidla

Celkový výpočet:

$$E_{total} = E_{prod} + \sum_{i=2023}^{2040} E_{oper\ i} + E_{EoL} \quad (15)$$

Tabulka 17: Vybrané technické parametry zvolených vozidel [142][143][144][145][146]

	BMW i4 eDrive35	BMW 430i Coupe	Toyota Mirai MKII	BMW 430d xDrive Coupe
Výkon	210 kW (286 PS)	180 kW (245 PS)	134 kW (182 PS)	210 kW (286 PS)
Palivo/energie	Elektřina	Benzín	Vodík	Nafta
Hmotnost včetně náplní	2065 kg	1733 kg	2415 kg	1855 kg
Pohon	1x synchronní 3f motor	1998 ccm I4	1x synchronní 3f motor, PEM FC 128 kW, 5,4 kW/kg	2993 ccm I4
Rekuperace energie	Ano	Ne	Ano	Ne
Trakční akumulátor	70,2/67 kWh NMC 811		1,24 kWh, NiMH	
Maximální kapacita baterie	70.2 kWh		1.24 kWh	
Využitelná kapacita baterie	67 kWh		1.12 kWh	
Hmotnost trakčního akumulátoru [kg]	550 kg		44.5 kg	
Nádrž	-	59 L	5,6 kg	59 L
Spotřeba – průměr (dle výrobce)	17.25 kWh/100 km	7.2 l/100 km	0.81 kg/100 km	5.8 l/100 km
Spotřeba – nízký odhad	15.8 kWh/100 km	6.8 l/100 km	0.81 kg/100 km	5.5 l/100 km
Spotřeba – vysoký odhad	18.7 kWh/100 km	7.6 l/100 km	0.81 kg/100 km	6.1 l/100 km
Dojezd (dle výrobce)	482-406 km	867-771 km	650 km	1073-967 km
Výfukové emise CO₂	0 g/km	167/149 g/km	0 g/km	160/145 g/km
Emisní norma	Euro 6d	Euro 6d	Euro 6d	Euro 6d
Jízdní dynamika 0-100 km/h / 100-200 km/h	6 / NA sec (max. rychlost 190 km/h)	6,2 / 19,7 sec	9,2 / NA sec (max. rychlost 175 km/h)	5,1 / 18,8 sec

5.2 Přímé srovnání všech pohonů

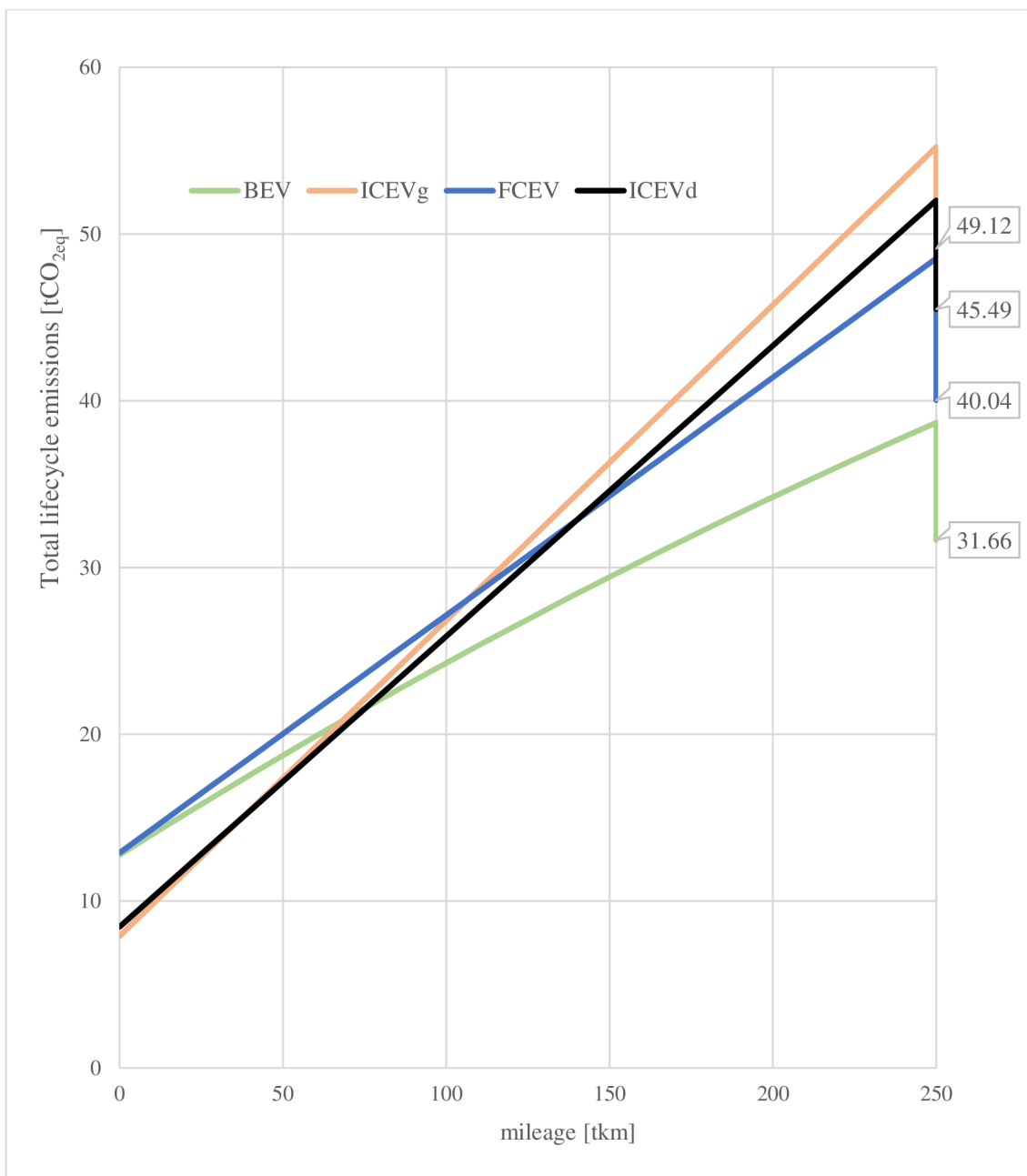
Pro první výpočet byly zvoleny všechny čtyři typy pohonu, přičemž u BEV se předpokládá střední průměrná hodnota nabíjecích ztrát 15 % a průměrná úroveň samovybití 2 % za 24 hodin. Předpokládané budoucí snižování EF elektřiny českého energetického mixu je o 2 % ročně. EF vodíku je zvolen dle dat MPO, ke kterému jsou přičteny ztráty z transportu a čerpání [120]. Byl zvolen recyklační model s bonusy.

Nejprve byly vypočteny emise z výroby dle vztahů 4, 8 a 12. Ty jsou pro celý životní cyklus konstantní. Následně byly vypočteny emise z výroby vozidel dle vztahů 5, 9 a 13. V případě vozidel se spalovacím motorem a vozidlem s vodíkovými palivovými články byl proveden identický výpočet pro každý z 18 let životního cyklu vozidel. U BEV se kalkulovalo s každoročním snížením EF elektřiny, a proto je pro každý rok následující po prvním výsledná hodnota vyprodukovaných emisí nižší. Vypočtené emise za každý rok provozu se sečetly a přičetly se k emisím z výroby. Nakonec byl proveden výpočet emisí z recyklace vozidel dle vztahů 6, 10 a 14. Tyto byly vypočteny ve formě bonusu, který se odečetl od celkových emisí z výroby a provozu vozidel. Tento bonus je pak patrný v grafech níže, a to jako pokles v posledním roce života vozidel.

Dle výpočtů má nejvyšší kumulativní emise GHG za životní cyklus vozidlo s benzínovým spalovacím motorem, s celkovým množstvím 49,12 tCO_{2eq}, viz graf 5. Druhými nejvyšší emise má vozidlo s naftovým spalovacím motorem a to 45,49 tCO_{2eq}, což představuje o 7,4 % nižší hodnotu než ICEVg. FCEV za svůj životní cyklus vyprodukuje 40,04 tCO_{2eq}, což představuje o 18 % méně než v případě ICEVg. BEV za svůj životní cyklus vyprodukuje 31,66 tCO_{2eq}, tedy o 35 % méně GHG než ICEVg.

Tyto rozdíly však nejsou po celou dobu života vozidel konstantní. Vozidla se spalovacími motory mají vyšší emise z provozu, avšak nižší z výroby. To má za následek, že celkové vyprodukované emise GHG jsou u BEV nižší než ICEVg teprve po ujetí 70 000 km (5 let provozu) a u FCEV až po více než 111 000 km (8 let). ICEVd má oproti BEV nižší kumulativní emise GHG až do ujetí 83 300 km (6 let) a oproti FCEV až do ujetí 153 000 km (11 let).

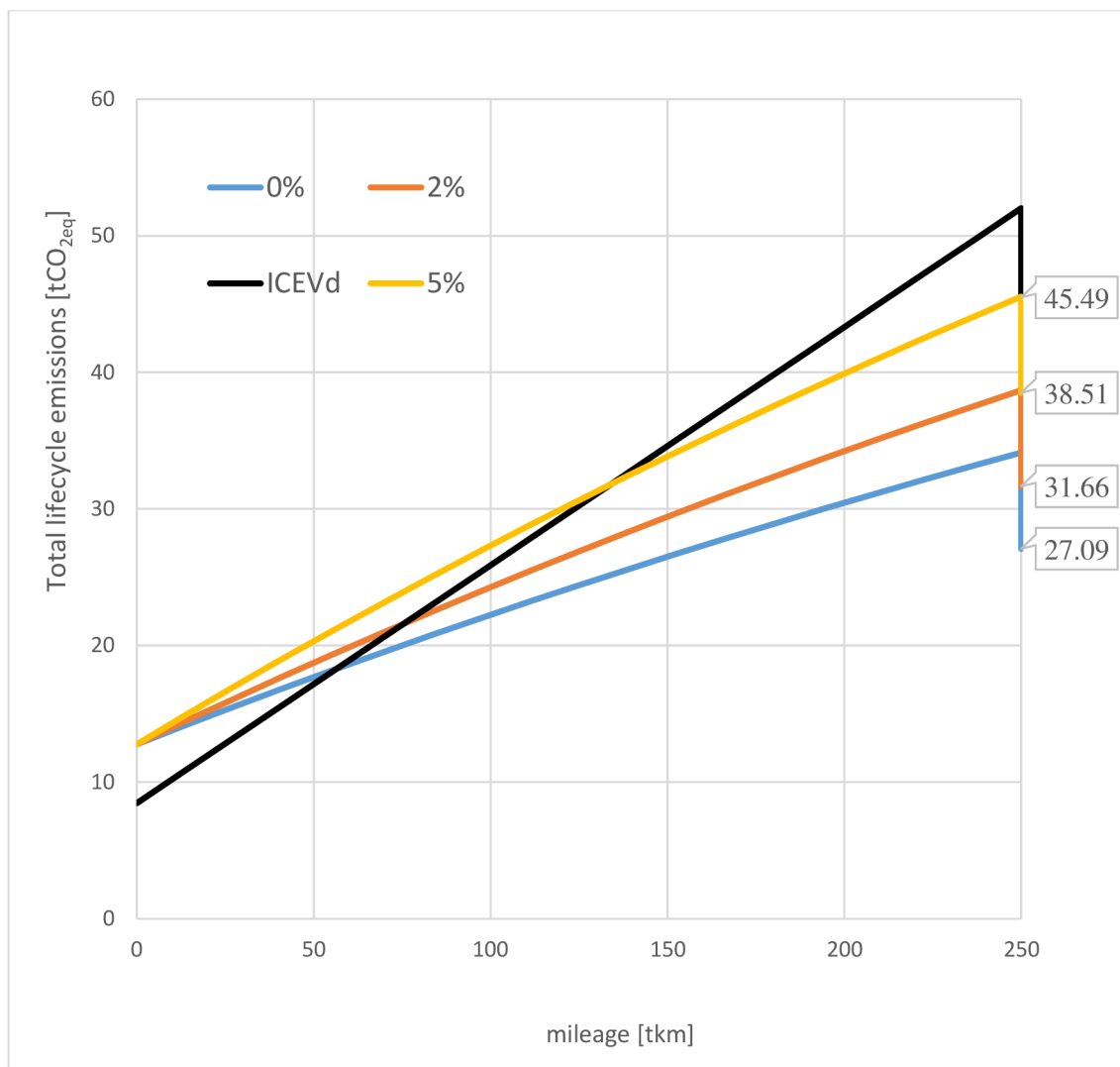
Z výsledků je patrné, že ICEVg má nepatrně nižší emise z výroby nežli ICEVd (o 6,5 %). Příčinou je vyšší hmotnost pohonné jednotky a větším množstvím potřebných materiálů na jeho výrobu. Nicméně, již po dvou letech provozu má celkové emise nižší vozidlo s dieslovým motorem, a do konce životního cyklu těchto vozidel se již jeho náskok jen zvyšuje. To je dáno nižší spotřebou ICEVd, a to i přes vyšší emise GHG za životní cyklus nafty (spálením 1 litru nafty se vyprodukuje více emisí než v případě benzínu).



Graf 5: Celkové emise GHG pro ICEV, FCEV a BEV

5.3 Vliv samovybíjení baterie BEV

V dalším případě byl modelován vliv samovybíjení trakční baterie elektromobilu na celkovou emisní bilanci. Pro názornost byly zvoleny hodnoty 0 %, 2 % a 5 %. Nabíjecí ztráty pro tento případ zůstávají 15 % a budoucí snižování EF elektřiny na 2 %.

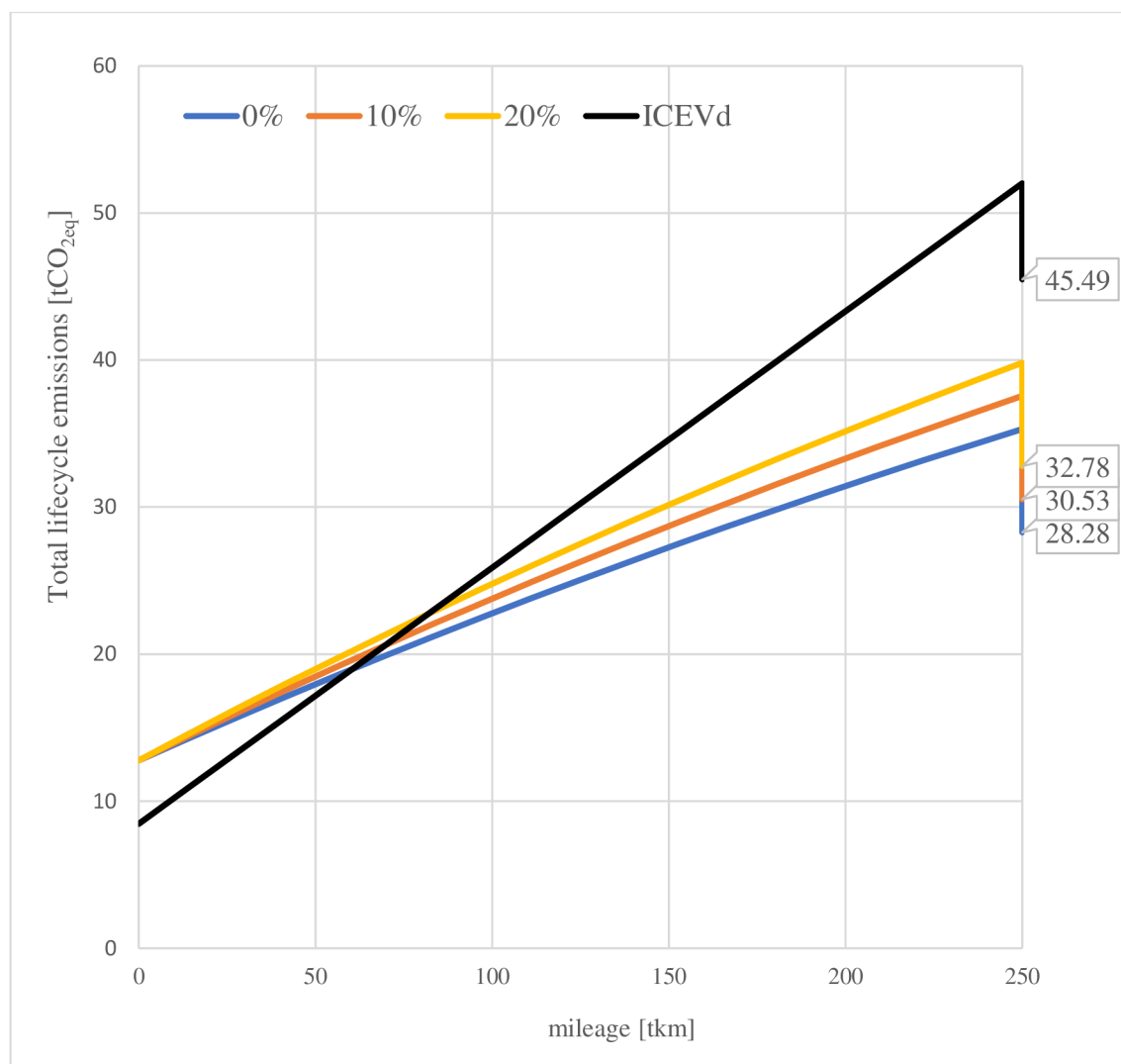


Graf 6: Vliv samovybíjení trakční baterie elektromobilu

Graf 6 zobrazuje vypočtené hodnoty. Zohledněním 2 % samovybíjení se zvyšují celkové vyprodukované emise BEV za celý životní cyklus vozidla o 16 % oproti situaci bez započtení samovybíjení. Při samovybíjení na úrovni 5 % se už jedná o 42 % zvýšení emisí GHG, avšak takové hodnoty budou v praxi jen těžko dosažitelné. Musel by být přítomen některý z následujících faktorů: provoz v arktickém klimatu, baterie na konci její životnosti, velký odběr palubními spotřebiči nebo kombinace několika vlivů.

5.4 Vliv nabíjecích ztrát

V následujícím případě byl modelován vliv nabíjecích ztrát elektromobilu. Pro tento případ byla zvolena úroveň samovybíjení 2 % a 2 % průměrné roční snížení EF elektřiny. Oproti předchozímu případu samovybíjení akumulátoru, nabíjecí ztráty mají menší vliv na celkovou emisní bilanci. desetiprocentní nabíjecí ztráty zvýší celkové emise GHG o 8 % oproti ideální situaci bez ztrát, dvacetiprocentní pak o 16 %.

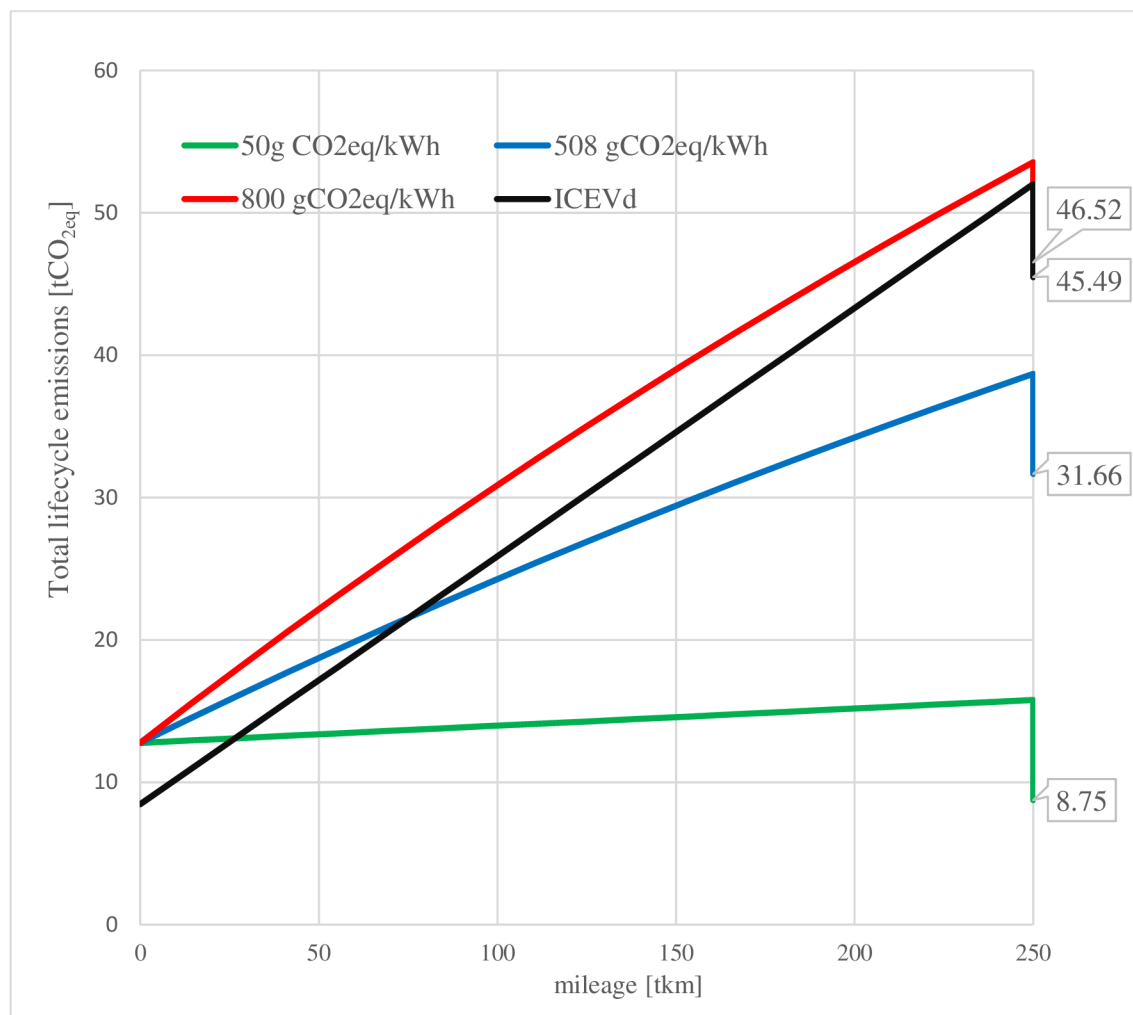


Graf 7: Vliv nabíjecích ztrát na celkové kumulativní emise GHG u BEV

5.5 Vliv emisního faktoru elektřiny na provoz BEV

Vliv emisního faktoru elektřiny na provoz BEV je vyobrazen v grafu 8. Dle výsledků je zřejmé, že na celkové emise GHG má u BEV největší vliv právě uhlíková intenzita elektřiny pro nabíjení. Hodnota 50 gCO_{2eq}/kWh přibližně odpovídá energetickému mixu Francie, který je z velké části založen na jaderné energetice, nebo situaci kdy je vozidlo

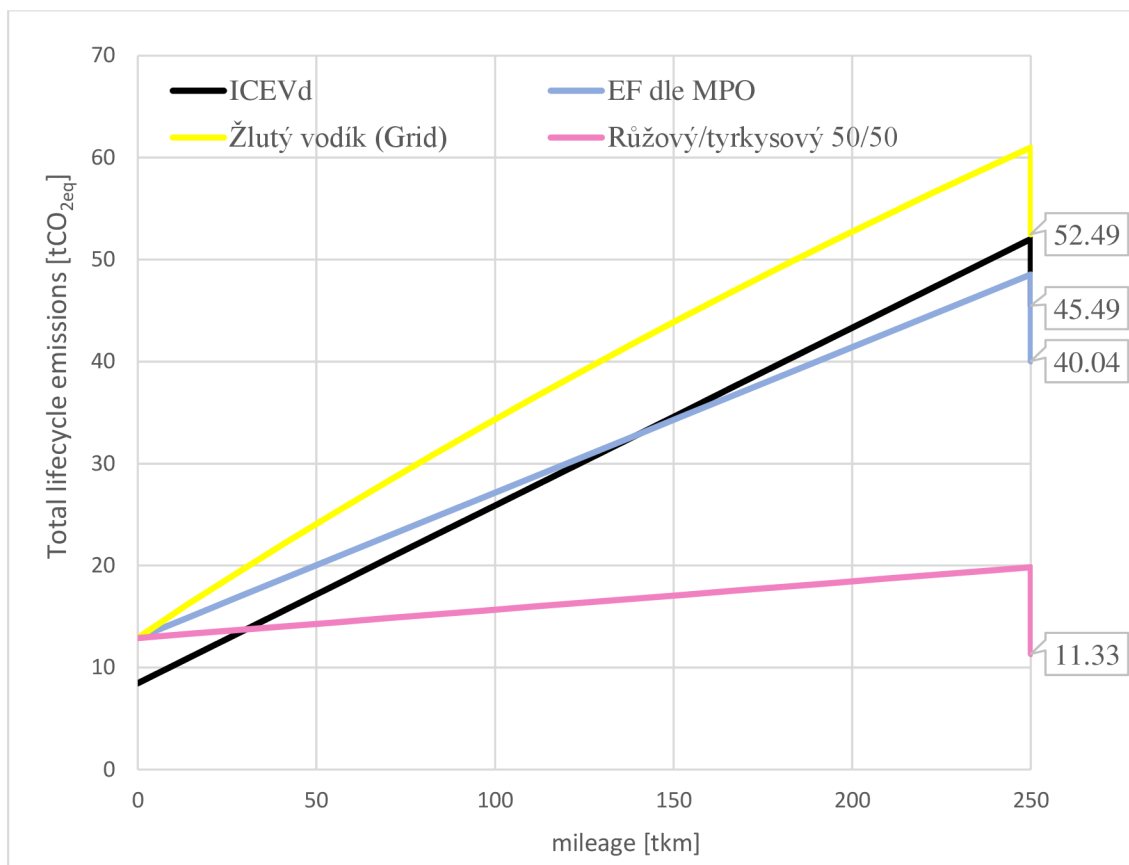
nabíjeno výhradně z domácí solární elektrárny. Hodnota 800 gCO_{2eq}/kWh odpovídá energetickému mixu Polska nebo Kypru. 508 gCO_{2eq}/kWh je EF českého energetického mixu. Pro porovnání je v grafu vyobrazeno i vozidlo s naftovým motorem.



Graf 8: Vliv EF elektřiny na celkové kumulativní emise GHG u BEV. ICEVd pro referenci

5.6 Vliv emisního faktoru vodíku na emise FCEV

V grafu 9 je vyobrazen vliv EF vodíku na provoz FCEV. Při využití vodíku vyrobeného elektrolýzou za pomoci elektřiny ze sítě je celková emisní bilance velmi vysoká, i nad úroveň vozů se spalovacím motorem. Na druhou stranu, při využití mixu různého a tyrkysového vodíku 50/50 (jaderné zdroje a pyrolýza) tak jak předpokládá Česká vodíková strategie, se celkové emise GHG za životní cyklus vozidla sníží až na úroveň 11,33 tCO_{2eq}. Je však nutné podotknout, že tento scénář je jen teoretický, protože potřebná infrastruktura se buď teprve připravuje (výstavba nových jaderných zdrojů), neexistuje (velkokapacitní elektrolyzátory) nebo bude ještě dlouho využívána k jiným účelům (dálkové plynové potrubí).



Graf 9: Vliv EF vodíku na emise GHG u FCEV

5.7 Palivo vozidel se spalovacím motorem

U vozů se spalovacím motorem je situace rozdílná. Benzín a nafta má pevně dané množství vyprodukovaného CO₂ na spálený litr, a lze redukovat pouze emitaci dalších skleníkových plynů jako NO_x a CO katalyzací. Dalšího snížení emisí z provozu pak lze kromě snížení spotřeby dosáhnout jen změnou paliva. Kromě dnes již běžného CNG, LPG či paliv na bázi ethanolu se začaly testovat a uvádět do provozu i další paliva, jako HVO100 (bionafta) či syntetická paliva. Tyto jsou díky rozdílným výrobním procesům a chemickému složení schopné dosáhnout celkového snížení emisí GHG o jednotky až vyšší desítky procent. Jejich podrobnější analýza by však byla velmi rozsáhlá a vyžadovala by samostatnou studii. Stručná charakterizace některých alternativních paliv:

- **LPG** – Jedná se o zkapalněný ropný plyn, jiným názvem také propan-butan. Přesné fyzikální složení se různí, obecně se ale jedná o směs propanu, butanu a dalších uhlovodíků. Lze použít ve vozidlech s benzínovým motorem, je ale nutné provést jejich úpravu a přidat nádrž na LPG. Vozidlo je pak schopné provozu na oba druhy paliv. Při provozu na LPG má vozidlo obvykle nižší výkon. Při provozu na LPG jsou výfukové emise GHG zhruba o 13 až 16 % nižší než v případě benzínu. [147]

- **CNG** – Compressed natural gas. Složením se jedná o metan. Má větší energetickou hustotu než benzín či nafta. Podobně jako u CNG je nutné buď dodatečně upravit motor, či musí být již upraven od výroby. V druhém případě může mít dokonce větší výkon na CNG než na benzín. Při použití CNG jsou zhruba o 16 až 20% nižší emise CO₂, avšak vyšší emise NO_x a CO. [147]
- **HVO100** – Hydrogenizovaný rostlinný olej. Vyrábí se z rostlinných produktů. Podle způsobu výroby a zdrojových surovin snižuje emise CO₂ až o desítky procent (dle zdrojových surovin, metody výroby a metodiky výpočtu). Použitelný v moderních diesellových motorech bez úprav.[148]
- **E-fuels** – synteticky vyrobené palivo. Vyrobené z (například) zachyceného CO₂ nebo CO a vodíku za pomoci Fischer-Tropschova procesu. Vozidlo sice stále má výfukové emise GHG (ač nižší), ale od těchto se odečítá CO₂/CO spotřebovaný při výrobě. Výroba je velmi energeticky náročná a celková emisní bilance závisí na emisním faktoru elektřiny použité pro výrobu. Lze dosáhnout snížení emisí GHG i o vyšší desítky procent, při neoptimálním výrobním procesu však mohou být celkové emise i vyšší než u běžných fosilních paliv. Paliva jsou použitelná ve stávajících motorech bez nutnosti úprav.[149][150]

Zajímavým se jeví přepočítání kumulativních emisí CO_{2eq} za celý život vozidla na ujeté kilometry. V případě ICEVg se jedná o 196,5 gCO_{2 eq}/km, ICEVd 182 gCO_{2 eq}/km, u FCEV 160 gCO_{2eq}/km a u BEV (český energetický mix) 126,5 gCO_{2 eq}/km. Pokud by bylo BEV nabíjeno elektřinou při energetickém mixu odpovídající Polskému (tj. 800 gCO_{2 eq}/kWh), ujetí jednoho kilometru by odpovídalo vypuštění 186 gCO_{2 eq}/km. Naopak, při využití energetického mixu Francie či nabíjení pouze z domácí fotovoltaické elektrárny by se jednalo o 35 respektive 33 gCO_{2 eq}/km. FCEV by při užití vodíku vyrobeného elektrolýzou za pomoci elektřiny z českého energetického mixu bylo na každý ujetý kilometr emitováno 210 gCO_{2 eq}/km. Při užití vodíku odpovídajícím české vodíkové koncepci – tedy výhradně tyrkysový a růžový vodík – by to pak odpovídalo 45,5 gCO_{2 eq}/km. Ve všech případech se předpokládá, že celý životní cyklus vozidla proběhne v ČR, tedy i včetně těžby a primárního zpracování surovin a kompletní recyklace.

V tabulce 18 jsou pro kontext uvedeny platné flotilové emisní limity, vycházející z Evropských výkonnostních norem pro emise CO₂ pro osobní vozy [32].

Tabulka 18: Flotilové limity výfukových emisí CO₂

Roky	Flotilové limity CO ₂
do konce roku 2024	95 gCO₂/km
od roku 2025 do roku 2030	80,75 gCO₂/km
od roku 2030 do roku 2035	59,4 gCO₂/km
od roku 2035	0 gCO₂/km

ZÁVĚR

Na základě výše uvedených poznatků je zřejmé, že již v dnešní době má BEV provozované v České republice nižší emise GHG nežli vozidla se spalovacími motory nebo vodíková vozidla. A to i v případě započtení relativně vysokých nabíjecích ztrát a samovybíjení. Nicméně, nelze říci, že BEV je zcela bezemisní; ve skutečnosti jsou jeho celkové emise nižší o 33 % v případě ICEVg, respektive 30 % v případě ICEVd. FCEV pak má celkovou emisní bilanci jen marginálně lepší nežli ICEVd.

Co se týče BEV, nabíjecí ztráty mají relativně malý vliv na celkovou emisní bilanci. Samovybíjení baterie o něco větší, avšak zde by bylo vhodné získat přesná data pro dané vozidlo a battery pack – například měřením daného modelu vozidla. Hodnota samovybíjení se totiž může výrazně lišit dle způsobu užití vozidla, klimatických podmínek či použitých technologií. Zdaleka největší vliv má však emisní faktor elektřiny použité pro nabíjení vozidla. Při užití elektřiny výhradně z jaderných zdrojů nebo domácích solárních elektráren lze dosáhnout snížení celkových emisí GHG až o 74 % oproti situaci, kdy je nabíjeno ze sítě.

Obdobná situace je i v případě FCEV. Jeho celková emisní bilance při provozu na vodík dostupný nyní v ČR (a zjevně i v dalších deseti letech) je jen nepatrně nižší nežli u vozidla s dieslovým motorem. Avšak, za použití „čistšího“ vodíku lze dosáhnout snížení celkové emisní bilance o více než 60 %.

U vozidel se spalovacím motorem jsou emise GHG relativně pevně navázané na množství spotřebovaného paliva. Jediná možná cesta pro jejich snížení (kromě ještě efektivnější katalyzace) je změna paliva za jiné, s jinými chemickými vlastnostmi. Nicméně, u všech typů pohonů platí, že znatelného snížení emisí lze dosáhnout snížením spotřeby. Například zvýšením efektivity motoru, snížením hmotnosti vozu či zlepšením aerodynamiky.

Aktuální Unijní legislativa totiž uvažuje jen výfukové emise, a ostatní zdroje emisí z životního cyklu vozidel nejsou brány v potaz. Díky tomu se BEV a FCEV jeví jako bezemisní, což zcela zřejmě neodpovídá realitě. Tato práce dokazuje, že žádný typ pohonu není zcela bezemisní. Ač existují zjevné rozdíly v celkové produkci emisí, jejich koncentrace napříč životním cyklem se liší, a navíc i tentýž typ pohonu může mít v rozdílných státech různé emise GHG.

Proto by bylo vhodné upravit unijní legislativu tak, aby brala v potaz i ostatní zdroje emisí z životního cyklu vozidla. Aktuální stav může vést k závěrům nerefluktující realitu a neoptimální alokaci zdrojů. Dle předvolebních aklamací některých europarlamentních frakcí k volbám do EP 2024 (včetně největší frakce EPP) je však možné, že v následujícím volebním období dojde ke změně této praxe.

LITERATURA

- [1] Climate data information [online]. 2022 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <http://www.climatedata.info/forcing/data-sources/>
- [2] Změna klimatu. Meteorologický slovník [online]. Česká meteorologická společnost [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: [Meteorologický slovník \(cmes.cz\)](http://www.cmes.cz)
- [3] HOLLAN Matěj Pojmy vztahující se ke globální změně [online]. Brno: Masarykova Univerzita, 2015 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://amper.ped.muni.cz/gw/pojmy.html>
- [4] IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [online]. 2022, 3068 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: doi:10.1017/9781009325844
- [5] TISEO, Ian. Distribution of greenhouse gas emissions worldwide in 2019, by sector. *Statista* [online]. 2019 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/241756/proportion-of-energy-in-global-greenhouse-gas-emissions/>
- [6] TISEO, Ian. Global carbon dioxide emissions from 1970 to 2021, by sector. *Statista* [online]. 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/276480/world-carbon-dioxide-emissions-by-sector/>
- [7] JONES, Matthew W.; PETERS, Glen P.; GASSER, Thomas; ANDREW, Robbie M.; SCHWINGSHACKL, Clemens et al. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. Online. Scientific Data. 2023, roč. 10, č. 1. ISSN 2052-4463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>. [cit. 2023-10-24].
- [8] BUYSSE, Claire a Josh MILLER. *TRANSPORT COULD BURN UP THE EU'S ENTIRE CARBON BUDGET* [online]. 2021 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://theicct.org/transport-could-burn-up-the-eus-entire-carbon-budget/>
- [9] Understanding *Global Warming Potentials* [online]. United States Environmental Protection Agency, 2022 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [10] *Cradle to grave* [online]. European Environment Agency [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/cradle-to-grave#>
- [11] STOKEL-WALKER, Chris. *LCA? Well-to-wheels (WtW)? Carbon handprint? Sustainable transport jargon explained* [online]. 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://journeytozerostories.neste.com/sustainability/lca-well-wheels-wtw-carbon-handprint-sustainable-transport-jargon-explained>
- [12] *What is carbon intensity* [online]. London: National grid [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-carbon-intensity>

- [13] *About UNFCCC* [online]. Bonn, Germany: UNFCCC [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.unfccc.org/Shared/KnowledgeCenter/Pages/UNFCCC>
- [14] *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. [online]. Bonn: UNFCCC, 1997 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf>
- [15] *Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/kjotsky_protokol
- [16] *The Paris Agreement* [online]. Bonn: UNFCCC [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [17] *Withdrawal of USA from Paris agreement* [online]. Bonn: United Nations [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2017/CN.464.2017-Eng.pdf>
- [18] *NDC Registry* [online]. Bonn: UNFCCC, 2023 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://unfccc.int/NDCREG>
- [19] *Q&A: What does China's new Paris Agreement pledge mean for climate change?* [online]. London: Carbon Brief, 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.carbonbrief.org/qa-what-does-chinas-new-paris-agreement-pledge-mean-for-climate-change/>
- [20] *China's first NDC (updated 2021)* [online]. Bonn: UNFCCC, 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E8%90%BD%E5%AE%9E%E5%9B%BD%E5%AE%B6%E8%87%AA%E4%B8%BB%E8%B4%A1%E7%8C%AE%E6%88%90%E6%95%88%E5%92%8C%E6%96%B0%E7%9B%AE%E6%A0%87%E6%96%B0%E4%B8%BE%E6%8E%AA.pdf>
- [21] *Czech Republic: Regional Outlook 2021 - Country notes* [online]. OECD, 2021 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.oecd.org/regional/RO2021%20Czech%20Republic.pdfhttps://www.oecd.org/regional/RO2021%20Czech%20Republic.pdf>
- [22] *STATE OF CLIMATE ACTION 2022* [online]. Climate action tracker, 2022 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://climateactiontracker.org/documents/1083/2022-10-26_StateOfClimateAction2022_kR0sbBZ.pdf
- [23] Rešerše: Emisní závazky států. *Fakta o klimatu* [online]. 2021 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/studie/2021-reserse-zavazky-statu>
- [24] *Directive 70/220/EEC (EURO 1)* [online]. Brussels: European Commission, 1991 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0441&from=EN>
- [25] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 96/69/ES (EURO 2)* [online]. Brussels: Úřední věstník Evropské Unie, 1996 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0069&from=EN>

- [26] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/646 (EURO 6d)* [online]. Brussels: Úřední věstník Evropské Unie, 2016 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0646&from=EN>
- [27] *Euro 7: Deal on new EU rules to reduce road transport emissions* [online]. Brussels: European Commission, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: [Euro 7: Deal on new EU rules to reduce road transport emissions | News | European Parliament \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022R0670&from=EN)
- [28] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 98/69/ES (EURO3)* [online]. Brussels: Úřední věstník Evropské Unie [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31998L0069&from=EN>
- [29] *SMĚRNICE KOMISE 2002/80/ES (EURO 4)* [online]. Brussels: Úřední věstník Evropské Unie, 2002 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0080&from=EN>
- [30] *NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 715/2007 (EURO 5 a 6)* [online]. Brussels: Úřední věstník Evropské Unie, 2007 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715&from=EN>
- [31] *NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 443/2009* [online]. Brussels: Úřední věstník Evropské Unie, 2009 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0443&from=EN>
- [32] EUROPEAN UNION. *CO₂ emission performance standards for cars and vans*. In: . Brusel: European Commission, 2021, ročník 2021, (EU) 2019/631. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0631-20210301>
- [33] GERMANY, NOT THE LAND OF COMPACT CARS:: WHY THE EU NEW CAR CO2 STANDARDS ARE NOTHING TO FEAR. *International Council on Clean Transportation* [online]. Berlin: ICCT, 2022 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: [https://theicct.org/eu-co2-standards-nothing-to-fear-feb22/CO2 emissions from new passenger cars in Europe: Car manufacturers' performance in 2020. International Council on Clean Transportation \[online\]. Berlin: ICCT, 2021 \[cit. 2021-11-21\]. Dostupné z: \[https://theicct.org/sites/default/files/publications/eu-co2-pvs-performance-2020-aug21_0.pdf\]\(https://theicct.org/sites/default/files/publications/eu-co2-pvs-performance-2020-aug21_0.pdf\)](https://theicct.org/eu-co2-standards-nothing-to-fear-feb22/CO2%20emissions%20from%20new%20passenger%20cars%20in%20Europe%3A%20Car%20manufacturers%20performance%20in%202020)
- [34] European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions: Tisková zpráva. *European Commission* [online]. Brussels: European Commission, 2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541
- [35] *Delivering the European Green Deal* [online]. Brussels: European Commission, 2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/en/actions/european-green-deal>

- [policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en](https://ec.europa.eu/info/policies/policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en)
- [36] EUROPEAN UNION. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2019/631: as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition. In: . Brussels: European Commission, 2021, ročník 2021. Dostupné také z: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/amendment-regulation-co2-emission-standards-cars-vans-with-annexes_en.pdf
- [37] *Normy pro emisi CO₂ pro osobní automobily a lehká užitková vozidla: Přijatý text* [online]. Štrasburg: Evropský parlament, 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0039_EN.html
- [38] *Europe steps back from 2035 ICE ban* [online]. Amsterdam: SAE International, 2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.sae.org/news/2023/03/european-ice-ban>
- [39] MURALIKRISHNA, Iyyanki V. a Valli MANICKAM. Life Cycle Assessment. *Environmental Management* [online]. Elsevier, 2017, 2017, 57-75 [cit. 2023-03-30]. ISBN 9780128119891. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1
- [40] Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA: Final Report for the European Commission, DG Climate Action [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020 [cit. 2023-03-12]. ISBN 978-92-76-20301-8. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-09/2020_study_main_report_en.pdf[pa.eu%2Fsystem%2Ffiles%2F2020-09%2F2020_study_main_report_en.pdf&usg=AOvVaw3fF4dJld86tWcL4q4uZUpC](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-09/2020_study_main_report_en.pdf&usg=AOvVaw3fF4dJld86tWcL4q4uZUpC)
- [41] DE SOUZA, Lidiane La Picirelli, Electro Eduardo Silva LORA, José Carlos Escobar PALACIO, Mateus Henrique ROCHA, Maria Luiza Grillo RENÓ a Osvaldo José VENTURINI. Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **203**, 444-468 [cit. 2023-03-12]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.236
- [42] TAGLIAFERRI, Carla, Sara EVANGELISTI, Federica ACCONCIA, Teresa DOMENECH, Paul EKINS, Diego BARLETTA a Paola LETTIERI. Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 2016, **112**, 298-309 [cit. 2023-03-12]. ISSN 02638762. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2016.07.003
- [43] LOMBARDI, Lidia, Laura TRIBIOLI, Raffaello COZZOLINO a Gino BELLA. Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel

- cell powertrains based on LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2017, **22**(12), 1989-2006 [cit. 2023-03-12]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-017-1294-y
- [44] HELMERS, Eckard, Johannes DIETZ a Martin WEISS. Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. *Sustainability* [online]. 2020, **12**(3) [cit. 2023-03-12]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12031241
- [45] DELOGU, Massimo, Francesco DEL PERO, Laura ZANCHI, Marcos IERIDES, Violeta FERNANDEZ, Kristian SEIDEL, Dinesh THIRUNAVUKKARASU a Thilo BEIN. *Lightweight Automobiles ALLIANCE Project: First Results of Environmental and Economic Assessment from a Life-Cycle Perspective* [online]. 2018-05-30, - [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: doi:10.4271/2018-37-0027
- [46] PERO, Francesco Del, Massimo DELOGU a Marco PIERINI. Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2018, **12**, 521-537 [cit. 2023-03-12]. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2018.11.066
- [47] KARAASLAN, Enes, Yang ZHAO a Omer TATARI. Comparative life cycle assessment of sport utility vehicles with different fuel options. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2018, **23**(2), 333-347 [cit. 2023-03-12]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-017-1315-x
- [48] European Commission, Joint Research Centre, Castellani, V., Fantoni, M., Cristòbal, J. et al., Consumer footprint – Basket of products indicator on mobility, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/539712>
- [49] SATO, Fernando Enzo Kenta a NAKATA, Toshihiko. Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. Online. *Energies*. 2020, roč. 13, č. 9. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13092396>. [cit. 2023-10-05].
- [50] KAWAMOTO, Ryuji; MOCHIZUKI, Hideo; MORIGUCHI, Yoshihisa; NAKANO, Takahiro; MOTOHASHI, Masayuki et al. Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. Online. *Sustainability*. 2019, roč. 11, č. 9. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su11092690>. [cit. 2023-10-05].
- [51] QIAO, Qinyu; ZHAO, Fuquan; LIU, Zongwei; JIANG, Shuhua a HAO, Han. Comparative Study on Life Cycle CO₂ Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China. Online. *Energy Procedia*. 2017, roč. 105, s. 3584-3595. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.827>. [cit. 2023-10-05].
- [52] Hao, H., Qiao, Q., Liu, Z. et al. Comparing the life cycle Greenhouse Gas emissions from vehicle production in China and the USA: implications for targeting the reduction opportunities. *Clean Techn Environ Policy* **19**, 1509–1522 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1325-6>

- [53] BUBERGER, Johannes, Anton KERSTEN, Manuel KUDER, Richard ECKERLE, Thomas WEYH a Torbjörn THIRINGER. Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2022, **159** [cit. 2023-10-05]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2022.112158
- [54] NABER, J.D. a J.E. JOHNSON. Internal combustion engine cycles and concepts. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance* [online]. Elsevier, 2014, 2014, 197-224 [cit. 2023-03-12]. ISBN 9780857095220. Dostupné z: doi:10.1533/9780857097422.2.197
- [55] STEVENS, Mark. How an Internal Combustion Engine Works. *Car Treatments* [online]. 2021 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://cartreatments.com/how-internal-combustion-engine-works/>
- [56] DAHHAM, Rami Y., Haiqiao WEI a Jiaying PAN. Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. *Energies* [online]. 2022, **15**(17) [cit. 2023-03-30]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15176222
- [57] WANG, Zhibin, Xiaobing PAN, Wei ZHANG, Yu ZHAO, Haiming LI a Peng LIU. The Development Trend of Internal Combustion Engine. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2020, **1626**(1) [cit. 2023-03-30]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1626/1/012139
- [58] LEACH, Felix, Gautam KALGHATGI, Richard STONE a Paul MILES. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering* [online]. 2020, **1** [cit. 2023-03-30]. ISSN 2666691X. Dostupné z: doi:10.1016/j.treng.2020.100005
- [59] MARMORINI, L. a T. LUCHINNI. A numerical and experimental investigation of bi-fuel RCCI combustion and TCRCI, a temperature controlled single fuel compression ignition combustion. <http://www.engines.polimi.it/> [online]. Milano: Politecnico di Milano, 2020 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://www.engines.polimi.it/2day/presentations2020/Marmorini.pdf>
- [60] Mercedes amg f1 engine achieves 50 percent thermal efficiency [online]. Motor authority [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.motorauthority.com/news/1112999_mercedes-amg-f1-engine-achieves-50-percent-thermal-efficiency
- [61] GREET Excel Model Platform [online]. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.11578/GREET-Excel-2022/dc.20220908.1>
- [62] GAO, Jianbing, Guohong TIAN, Aldo SORNIOTTI, Ahu Ece KARCI a Raffaele DI PALO. Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2019, **147**, 177-187 [cit. 2023-03-12]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037

- [63] *Mazda Targets 56 Percent Thermal Efficiency With Skyactiv-3* [online]. The Drive, 2018 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.thedrive.com/article/18037/mazda-targets-56-percent-thermal-efficiency-with-skyactiv-3>
- [64] Different types of electric motors used in EVs. *Arenaev.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: https://www.arenaev.com/different_types_of_electric_motors_used_in_evs-news-214.php
- [65] VAN MIERLO, Joeri; MESSAGIE, Maarten a RANGARAJU, Surendraprabu. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. Online. *Transportation Research Procedia*. 2017, roč. 25, s. 3435-3445. ISSN 23521465. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244>. [cit. 2023-10-06].
- [66] BMW i4 Production and Technology. *Bmwusanews.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.bmwusanews.com/image-gallery.do?method=view&imageGalleryId=1383&mid=>
- [67] Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety, and Cost. 1. Axel springer, 2018. ISBN 978-3-319-69949-3.
- [68] *All Things You Need to Know about 21700 Battery* [online]. DNK power, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.dnkpower.com/teslas-mass-production-21700-battery/>
- [69] KANE, Mark. Tesla's 4680-Type Battery Cell Teardown: Specs Revealed. Online. 2022. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/598656/tesla-4680-battery-cell-specs/>. [cit. 2023-10-24].
- [70] KOWIT ENERGY. Tesla 4680 battery energy density does not meet the standard at all. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/tesla-4680-battery-energy-density-does-meet-standard-all-lee-ricardo>. [cit. 2023-10-24].
- [71] *The Four Components of a Li-ion Battery* [online]. Seoul: Samsung technologies [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html#:~:text=Li%20Dion%20batteries%20consist%20of,of%20the%20components%20is%20missin g.>
- [72] XUAN, Wen; OTSUKI, Akira a CHAGNES, Alexandre. Investigation of the leaching mechanism of NMC 811 (LiNi 0.8 Mn 0.1 Co 0.1 O 2) by hydrochloric acid for recycling lithium ion battery cathodes. Online. *RSC Advances*. 2019, roč. 9, č. 66, s. 38612-38618. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C9RA06686A>. [cit. 2023-10-24]. YUAN, Chris,
- [73] Yelin DENG, Tonghui LI a Fan YANG. Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. *CIRP Annals* [online]. 2017, 66(1), 53-56 [cit. 2023-03-12]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2017.04.109
- [74] FOTW #1272, January 9, 2023.: Electric Vehicle Battery Pack Costs in 2022 Are Nearly 90% Lower than in 2008, according to DOE Estimates [online].

- Washington: Energy.gov, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly>
- [75] DEGEN, Florian a Marius SCHÜTTE. Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2022, **330** [cit. 2023-03-13]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.129798
- [76] PETERS, Jens F., Manuel BAUMANN, Benedikt ZIMMERMANN, Jessica BRAUN a Marcel WEIL. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **67**, 491-506 [cit. 2023-03-13]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.08.039
- [77] KALLITSIS, Evangelos, Anna KORRE, Geoff KELSALL, Magdalena KUPFERSBERGER a Zhenggang NIE. Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-manganese cathodes utilising novel electrode chemistries. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, **254** [cit. 2023-03-13]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.120067
- [78] SUN, Xin, Xiaoli LUO, Zhan ZHANG, Fanran MENG a Jianxin YANG. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, **273** [cit. 2023-03-13]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.123006
- [79] DAVIDSSON KURLAND, Simon. Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production. *Environmental Research Communications* [online]. 2019, **2**(1) [cit. 2023-03-13]. ISSN 2515-7620. Dostupné z: doi:10.1088/2515-7620/ab5e1e
- [80] PETERS, Jens F.; BAUMANN, Manuel; ZIMMERMANN, Benedikt; BRAUN, Jessica a WEIL, Marcel. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, roč. 67, s. 491-506. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>. [cit. 2023-10-09].
- [81] EMILSSON, Erik a DALLÖF, Lisbeth. Lithium-Ion Vehicle Battery Production: Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. Swedish Environmental Research Institute IVL, 2017.
- [82] TESLA. Tesla model 3 owner's manual. Online. 2024. Dostupné z: https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_us/GUID-7FE78D73-0A17-47C4-B21B-54F641FFAEF4.html. [cit. 2024-02-28].
- [83] MAXWELL, Alfred. How long can an electric car sit without charging? Online. 2022. Dostupné z: <https://topcharger.co.uk/how-long-can-an-electric-car-sit-without-charging/#:~:text=in%20the%20process,->

- ,Energy%20loss%20in%20electric%20car%20batteries,how%20cold%20temperatures%20affect%20batteries).. [cit. 2024-02-28].
- [84] NEIGHBOR. How Long Can an Electric Car Sit Without Charging? Online. 2024. Dostupné z: <https://www.neighbor.com/storage-blog/how-long-can-electric-car-sit-without-charging/>. [cit. 2024-02-28].
- [85] AHMADI, Pouria a Alireza KHOSHNEVISAN. Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2022, **47**(62), 26758-26769 [cit. 2023-03-13]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.06.215
- [86] BARGAL, Mohamed H.S., Mohamed A.A. ABDELKAREEM, Qi TAO, Jing LI, Jianpeng SHI a Yiping WANG. Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: A detailed survey. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2020, **59**(2), 635-655 [cit. 2023-03-13]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2020.02.005
- [87] NONOBE, Yasuhiro. Development of the fuel cell vehicle mirai. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* [online]. 2017, **12**(1), 5-9 [cit. 2023-03-13]. ISSN 1931-4973. Dostupné z: doi:10.1002/tee.22328
- [88] *The New Toyota Mirai* [online]. Brussels: Toyota Europe Newsroom, 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://newsroom.toyota.eu/the-new-toyota-mirai/>
- [89] DAS, L.M. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Compendium of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 2016, 2016, 177-217 [cit. 2023-03-13]. ISBN 9781782423638. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-78242-363-8.00007-4
- [90] WONG, Eugene Yin Cheung; HO, Danny Chi Kuen; SO, Stuart; TSANG, Chi-Wing a CHAN, Eve Man Hin. Life Cycle Assessment of Electric Vehicles and Hydrogen Fuel Cell Vehicles Using the GREET Model—A Comparative Study. Online. *Sustainability*. 2021, roč. 13, č. 9. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su13094872>. [cit. 2023-10-10].
- [91] AKAL, Dinçer, Semiha ÖZTUNA a Mustafa Kemalettin BÜYÜKAKIN. A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, **45**(60), 35257-35268 [cit. 2023-03-13]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2020.02.001
- [92] *Tapping the Potential Within 100% Hydrogen-Powered Engines* [online]. 17.02.2022 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.yamaha-motor.eu/lt/lt/news/tapping-the-potential-within-100--hydrogen-powered-engines/>
- [93] DABELSTEIN, Werner, Arno REGLITZKY, Andrea SHÜTZE, Klaus REDERS a Andreas BRUNNER. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [online]. 2016, 27695 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: doi:10.1002/14356007.a16_719.pub3
- [94] *Těžba a rafinace ropy: Základní statistiky* [online]. Praha: oEnergetice.cz, 2015 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa/tezba-rafinace-ropy-statistiky>

- [95] Zpracování ropy: 1. část - základní zpracování ropy [online]. Praha: oEnergetice.cz, 2015 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa/zpracovani-ropy-1-cast-zakladni-zpracovani-ropy>
- [96] Zpracování ropy: 2. část - výroba pohonných hmot [online]. Praha: oEnergetice.cz, 2015 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa/zpracovani-ropy-2-cast-vyroba-pohonnych-hmot>
- [97] Analýza životního cyklu fosilních motorových paliv a biopaliv pro tvorbu koncepčních dokumentů zavedení daně z CO₂ v oblasti mobilních zdrojů znečišťování [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2011 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/project/SPII411%2F33%2F07#project-main>
- [98] JEDLIČKA, Jiří. Analýza životního cyklu fosilních motorových paliv a biopaliv pro tvorbu koncepčních dokumentů zavedení daně z CO₂ v oblasti mobilních zdrojů znečištění [online]. Ministerstvo životního prostředí; Centrum dopravního výzkumu, 2010 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.kverulant.org/upload/kc/files/bioomy1_SPII4i1_33_07_extrakt.pdf
- [99] NAGGAR, A. Y. El; ELKHATEEB, A.; ALTALHI, T. A.; EL NADY, Mohamed M.; ALHADHRAMI, A. et al. Hydrocarbon compositions and physicochemical characteristics for the determination of gasoline quality: An implication from gas chromatographic fingerprints. Online. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2017, s. 1-6. ISSN 1556-7036. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1370515>. [cit. 2023-10-26].
- [100] ČTVRTLETNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR ZA IV. ČTVRTLETÍ 2022 [online]. Praha: Energetický regulační úřad, 2023 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/ctvrtletni-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-za-iv-ctvrtleti-2022>
- [101] AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Annex III: Technology-specific Cost and Performance Parameters [online]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
- [102] Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010–2021 [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2022 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2021--260559/
- [103] Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010 - 2022 [online]. Praha: Průmyslová ekologie [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010-2022>
- [104] MINISTRY OF INDUSTRY AND TRADE. CO₂ emission factor from electricity generation for the years 2010-2022. Online. 2023. Available from: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/emisni-faktor-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2022--273197/. [cited 2024-02-24].

- [105] SEVDARI, Kristian; CALEARO, Lisa; BAKKEN, Bjørn Harald; ANDERSEN, Peter Bach a MARINELLI, Mattia. Experimental validation of onboard electric vehicle chargers to improve the efficiency of smart charging operation. Online. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2023, roč. 60. ISSN 22131388. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103512>. [cit. 2024-02-27].
- [106] KOSTOPOULOS, Emmanouil D.; SPYROPOULOS, George C. a KALDELLIS, John K. Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. Online. Energy Reports. 2020, roč. 6, s. 418-426. ISSN 23524847. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.008>. [cit. 2024-02-27].
- [107] APOSTOLAKI-IOFIDOU, Elpiniki; CODANI, Paul a KEMPTON, Willett. Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. Online. Energy. 2017, roč. 127, s. 730-742. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015>. [cit. 2024-02-27].
- [108] REICK, Benedikt; KONZEPT, Anja; KAUFMANN, André; STETTER, Ralf a ENGELMANN, Danilo. Influence of Charging Losses on Energy Consumption and CO2 Emissions of Battery-Electric Vehicles. Online. Vehicles. 2021, roč. 3, č. 4, s. 736-748. ISSN 2624-8921. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/vehicles3040043>. [cit. 2024-02-27].
- [109] TRENTADUE, Germana; LUCAS, Alexandre; OTURA, Marcos; PLIAKOSTATHIS, Konstantinos; ZANNI, Marco et al. Evaluation of Fast Charging Efficiency under Extreme Temperatures. Online. Energies. 2018, roč. 11, č. 8. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en11081937>. [cit. 2024-02-27].
- [110] *Základní informace k vodíku* [online]. Husinec: HYTEP - České vodíková technologická platforma, 2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [111] *The many colors and applications of hydrogen: Four things you need to know about hydrogen use in industry* [online]. ELSEVIER, 2022 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/connect/the-many-colors-and-applications-of-hydrogen>
- [112] SOAM, Shveta a BÖRJESSION, Pål. Considerations on Potentials, Greenhouse Gas, and Energy Performance of Biofuels Based on Forest Residues for Heavy-Duty Road Transport in Sweden. Online. Energies. 2020, roč. 13, č. 24, s. 21. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13246701>. [cit. 2023-10-26].
- [113] IEA, Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes, 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021>, IEA.
- [114] YOUNAS, Muhammad, Sumeer SHAFIQUE, Ainy HAFEEZ, Fahad JAVED a Fahad REHMAN. An Overview of Hydrogen Production: Current Status,

- Potential, and Challenges. *Fuel* [online]. 2022, **316** [cit. 2023-04-11]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2022.123317
- [115] TIMMERBERG, Sebastian, Martin KALTSCHMITT a Matthias FINKBEINER. Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs. *Energy Conversion and Management: X* [online]. 2020, **7** [cit. 2023-04-11]. ISSN 25901745. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecmx.2020.100043
- [116] VÝROBA VODÍKU [online]. Praha: Devinn, 2019 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku>
- [117] BAUER, Artur, Thomas MAYER, Malte SEMMEL, Martin Alberto GUERRERO MORALES a Joerg WIND. Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, **44**(13), 6795-6812 [cit. 2023-04-11]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.01.087
- [118] *Jak jsou vodíkové plnicí stanice zásobovány vodíkem?* [online]. Praha 9: APT, 2021 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.apt.cz/q11>
- [119] *Z jakých základních funkčních částí se skládá vodíková plnicí stanice pro silniční vozidla?* [online]. Praha 9: APT, 2021 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.apt.cz/newspaper/q1z>
- [120] MINISTRY OF INDUSTRY AND TRADE. HYDROGEN STRATEGY OF THE CZECH REPUBLIC. Online. 2021. Available from: https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie_v030b.pdf. [cited 2024-02-24]
- [121] HELD, Maximilian, Nicolas ROSAT, Gil GEORGES, Hermann PENGG a Konstantinos BOULOUCHOS. Lifespans of passenger cars in Europe: empirical modelling of fleet turnover dynamics. *European Transport Research Review* [online]. 2021, **13**(1) [cit. 2023-04-25]. ISSN 1867-0717. Dostupné z: doi:10.1186/s12544-020-00464-0
- [122] WEYMAR, Elisabeth a Matthias FINKBEINER. Statistical analysis of empirical lifetime mileage data for automotive LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. 2016, **21**(2), 215-223 [cit. 2023-04-25]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-015-1020-6
- [123] *European LCA Results: European Life Cycle Assessment Results and Fact Sheets* [online]. 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.greenncap.com/european-lca-results/>
- [124] BIEKER, Georg. A GLOBAL COMPARISON OF THE LIFE-CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF COMBUSTION ENGINE AND ELECTRIC PASSENGER CARS. Online. 2021, 2021. Dostupné z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf. [cit. 2023-12-12].

- [125] *How Many Miles Does a Car Last?* [online]. Car and Driver [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/research/a32758625/how-many-miles-does-a-car-last/>
- [126] Understanding the Average Lifespan of a Car. *Cascadecollision* [online]. 2020 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://cascadecollision.com/blog/what-is-the-average-life-of-a-car/>
- [127] *Záruka na nové auto: Srovnání 22 značek pro rok 2023* [online]. Skrblik.cz, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.skrblik.cz/auto/nakup-noveho-auto/zaruka-na-nove-auto/>
- [128] *The Best Electric Vehicle Battery Warranties in 2022* [online]. Car Edge, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://caredge.com/guides/ev-battery-warranties>
- [129] SIVAPRIYA, Mothilal Bhagavathy, Hannah BUDNITZ, Tim SCHWANEN a Malcolm MCCULLOCH. *Impact of Charging Rates on Electric Vehicle Battery Life* [online]. 23.3.2021 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:10.32866/001c.21459
- [130] Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles [online]. Brusel: Evropská Komise, 2020 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32000L0053>
- [131] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY: concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020 [online]. Brusel: European Commission, 2022 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020PC0798>
- [132] EUROPEAN COMMISSION. REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. Online. 2023. Dostupné z: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-2-2023-INIT/en/pdf>. [cit. 2023-12-15].
- [133] KAWAMOTO, Ryuji, Hideo MOCHIZUKI, Yoshihisa MORIGUCHI, Takahiro NAKANO, Masayuki MOTOHASHI, Yuji SAKAI a Atsushi INABA. Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. *Sustainability* [online]. 2019, **11**(9) [cit. 2023-04-25]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su11092690
- [134] HAO, Han, Qinyu QIAO, Zongwei LIU a Fuquan ZHAO. Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2017, **122** [cit. 2023-04-25]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2017.02.005
- [135] SUN, Xin; LUO, Xiaoli; ZHANG, Zhan; MENG, Fanran a YANG, Jianxin. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2020, roč. 273.

- ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123006>. [cit. 2023-12-13].
- [136] MOHR, Marit; PETERS, Jens F.; BAUMANN, Manuel a WEIL, Marcel. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. Online. *Journal of Industrial Ecology*. 2020, roč. 24, č. 6, s. 1310-1322. ISSN 1088-1980. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/jiec.13021>. [cit. 2023-12-15].
- [137] KOROMA, Michael Samsu, Nils BROWN, Giuseppe CARDELLINI a Maarten MESSAGIE. Prospective Environmental Impacts of Passenger Cars under Different Energy and Steel Production Scenarios. *Energies* [online]. 2020, **13**(23) [cit. 2023-04-25]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13236236
- [138] CIEZ, Rebecca E. a WHITACRE, J. F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. Online. *Nature Sustainability*. 2019, roč. 2, č. 2, s. 148-156. ISSN 2398-9629. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>. [cit. 2023-12-15].
- [139] ZENG, Dan, Yan DONG, Huajun CAO, Yuke LI, Jia WANG, Zhenbiao LI a Michael Zwicky HAUSCHILD. Are the electric vehicles more sustainable than the conventional ones? Influences of the assumptions and modeling approaches in the case of typical cars in China. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2021, **167** [cit. 2023-04-25]. ISSN 09213449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2020.105210
- [140] NEUGEBAUER, Maciej, Adam ŻEBROWSKI a Ogulcan ESMER. Cumulative Emissions of CO₂ for Electric and Combustion Cars: A Case Study on Specific Models. *Energies* [online]. 2022, **15**(7) [cit. 2023-04-25]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15072703
- [141] SATO, Fernando Enzo Kenta a NAKATA, Toshihiko. Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. Online. *Energies*. 2020, roč. 13, č. 9. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13092396>. [cit. 2023-12-14].
- [142] PIELECHA, Ireneusz, Andrzej SZĄLEK a Grzegorz TCHOREK. Two Generations of Hydrogen Powertrain—An Analysis of the Operational Indicators in Real Driving Conditions (RDC). *Energies* [online]. 2022, **15**(13) [cit. 2023-03-13]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15134734
- [143] BMW GMBH. BMW. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.bmw.cz/cs/all-models.html>. [cit. 2023-10-17].
- [144] INSIDEEVS. BMW i4 Gets Official EPA Range: Here's Everything We Know. Online. 2021, 27.12.2021. Dostupné z: [https://insideevs.com/news/556828/bmw-i4-epa-range-301miles/#:~:text=According%20to%20BMW%2C%20the%20i4,270%20miles%20\(434%20km\)..](https://insideevs.com/news/556828/bmw-i4-epa-range-301miles/#:~:text=According%20to%20BMW%2C%20the%20i4,270%20miles%20(434%20km)..) [cit. 2023-10-17].
- [145] TOYOTA. Vše, co potřebujete vědět o našem novém modelu na vodík. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/spolecnost/novinky/toyota-mirai>. [cit. 2023-10-17].

- [146] TOYOTA. Mirai mk2 tech specs. Online. 2021. Dostupné z: <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/220203M-Mirai-Tech-Spec.pdf>. [cit. 2023-10-17].
- [147] BIERNAT, Krzysztof; SAMSON-BREK, Izabela; CHŁOPEK, Zdzisław; OWCZUK, Marlena a MATUSZEWSKA, Anna. Assessment of the Environmental Impact of Using Methane Fuels to Supply Internal Combustion Engines. Online. *Energies*. 2021, roč. 14, č. 11. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14113356>. [cit. 2024-05-03].
- [148] Källmén, A., et. al., (2019) Well-to-wheel LCI data for HVO fuels on the Swedish market. Report No 2019:04, f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels, Sweden. Available at www.f3centre.se
- [149] *Sustainable synthetic carbon based fuels for transport: Policy briefing*. 1. London: The Royal Society, 2019. ISBN 978-1-78252-422-9.
- [150] LABUNSKI, Frank; SCHNURR, Birte; PÖSSINGER, Julia a GÖTZ, Thomas. Environmental Impact of e-Fuels via the Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC) and Fischer–Tropsch Synthesis (FTS) Route for Use in Germany. Online. *Energies*. 2024, roč. 17, č. 5. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en17051078>. [cit. 2024-05-03].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

BEV	Battery electric vehicle
CCS	Carbon capture storage
CNG	Compressed natural gas
EGD	European Green Deal
EF	Emisní faktor
EU	Evropská Unie
EV	Electric vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GHG	Greenhouse gas
GWP	Global warming potential
HEV	Hybrid electric vehicle
HICEV	Hydrogen internal combustion engine vehicle
ICEV	Internal combustion engine vehicle
ICCT	International council for clean transportation
IPCC	International panel for climate change
LCA	Life cycle assesment
LPG	Liquified petroleum gas
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NZ	Nabíjecí ztráty
SB	Samovybíjení
SoC	State of charge
W-T-T	Well to tank
W-T-W	Well to wheel

A.1 Předpokládané budoucí hodnoty emisního faktoru elektřiny z českého energetického mixu při zachování 2 % ročního poklesu

Tabulka 19: Průměrné budoucí hodnoty EF elektřiny v ČR

Předpokládaný budoucí EF elektřiny (2%)	
Rok	Emisní faktor
2023	508.43 g CO ₂ ekv/kWh
2024	498.261 g CO ₂ ekv/kWh
2025	488.296 g CO ₂ ekv/kWh
2026	478.53 g CO ₂ ekv/kWh
2027	468.96 g CO ₂ ekv/kWh
2028	459.58 g CO ₂ ekv/kWh
2029	450.389 g CO ₂ ekv/kWh
2030	441.381 g CO ₂ ekv/kWh
2031	432.553 g CO ₂ ekv/kWh
2032	423.902 g CO ₂ ekv/kWh
2033	415.424 g CO ₂ ekv/kWh
2034	407.116 g CO ₂ ekv/kWh
2035	398.974 g CO ₂ ekv/kWh
2036	390.994 g CO ₂ ekv/kWh
2037	383.174 g CO ₂ ekv/kWh
2038	375.511 g CO ₂ ekv/kWh
2039	368 g CO ₂ ekv/kWh
2040	360.64 g CO ₂ ekv/kWh

A.2 Excelový soubor s výpočty

Soubor je vložen do informačního systému jako příloha k tomuto textu.