

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ŘÍZENÍ A EKONOMIKY PODNIKU



Bakalářská práce

Analýza životního cyklu vodíkových vozidel

Life Cycle Analysis of hydrogen vehicles

Autor: Lukáš Trávníček

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

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

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Trávníček Jméno: Lukáš Osobní číslo: 501389
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav řízení a ekonomiky podniku
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: bez oboru

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza životního cyklu vodíkových vozidel

Název bakalářské práce anglicky:

Life cycle analysis of hydrogen vehicles

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky vodíkových pohonů z hlediska environmentálních a ekonomických aspektů
2. Charakteristika metody LCA
3. Analýza dostupných LCA studií
4. Formulace závěrů

Seznam doporučené literatury:

HAUSCHILD, Michael Z., Ralph K. ROSENBAUM, String Irving OLSEN a Editors. Life cycle Assessment, Theory and Practice. Montpellier: Springer, 2018. ISBN 978-3-319-56474-6.
KLÖPFER, Walter a GRAHL, Birgit. Life Cycle Assessment (LCA) - A Guide to Best Practice. 1. Newark: John Wiley, 2014. ISBN 978-3-527-32986-1.
KOČÍ, Vladimír. Posuzování životního cyklu Life Cycle Assessment - LCA. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 978-80-86832-42-5.
CORBO, Pasquale. Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles. 1. London: Springer Nature, 2011. ISBN 978-0-857-29136-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.10.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **04.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2024**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

.....

Lukáš Trávníček

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Barboře Stieberové, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a vstřícnost při psaní této práce. Rád bych také poděkoval své rodině, přítelkyni a přátelům za podporu po celou dobu mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou životního cyklu vodíkových vozidel. Úvodní část práce je zaměřena na představení jednotlivých typů vodíkových automobilů dle typu pohonu, na popis rozdílů ve spalování vodíku ve spalovacích motorech oproti konvenčním palivům a charakteristiku principu jednotlivých typů palivových článků. Práce dále obsahuje představení různých výrobních procesů vodíku a zabývá se rovněž skladováním a dopravou vodíku v různých jeho formách. V práci jsou popsány principy metodiky posuzování životního cyklu výrobku – LCA. Jádro práce tvoří analýza vybraných LCA studií vodíkových vozidel, které jsou v této práci shrnuty a jejich výsledky porovnány. Zjištěné souhrnné poznatky jsou poté uvedeny v závěrečné diskusi.

Klíčová slova

vodíkové vozidlo, LCA analýza, palivový článek, výroba vodíku

Annotation

This bachelor's thesis focuses on the life cycle analysis of hydrogen vehicles. The introductory part of the thesis is dedicated to introducing various types of hydrogen vehicles based on their propulsion systems. It describes differences in hydrogen combustion in internal combustion engines compared to conventional fuels and outlines the principles of various types of fuel cells. The thesis also includes an overview of different hydrogen production processes and addresses the storage and transportation of hydrogen in its various forms. The principles of the life cycle assessment methodology – LCA are described in the thesis. The core of the work consists of analyzing selected LCA studies of hydrogen vehicles, which are summarized in this thesis, and their results are compared. The comprehensive findings are then presented in the concluding discussion.

Keywords

Hydrogen vehicle, LCA analysis, Fuel cell, Hydrogen production

Obsah

Úvod	10
1 Vodíková vozidla	11
1.1 Spalování vodíku ve spalovacím motoru	12
1.1.1 Spalování směsí vodíku a metanu	13
1.2 Palivové články	13
1.2.1 AFC (alkalický palivový článek)	15
1.2.2 PEMFC (palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou)	16
1.2.3 PAFC (palivový článek s kyselinou fosforečnou)	17
1.2.4 MCFC (palivový článek s taveninou alkalických uhličitánů)	17
1.2.5 SOFC (palivový článek s tuhými oxidy)	18
2 Výroba vodíku	20
2.1 Parní reformování	22
2.2 Parciální oxidace	22
2.3 Zplyňování	23
2.4 Termochemický cyklus	24
2.5 Elektrolýza	25
2.5.1 AEL (alkalická elektrolýza)	26
2.5.2 PEMEL (elektrolýza s polymerním pevným elektrolytem)	27
2.5.3 SOEL (elektrolýza s tuhými oxidy)	28
3 Skladování a doprava vodíku	29
3.1 Skladování plynného vodíku	30
3.2 Doprava plynného vodíku	31
3.3 Skladování kapalného vodíku	32
3.4 Doprava kapalného vodíku	33
4 Metoda LCA	34
4.1 Definice cíle a rozsahu	34
4.1.1 Produktový systém a jeho funkce	35
4.1.2 Funkční jednotka	35
4.1.3 Referenční tok	35
4.1.4 Hranice systému	36
4.2 Inventarizace	36
4.3 Hodnocení dopadů	36
4.4 Interpretace	37

5	Dostupné LCA analýzy vodíkových vozidel	38
5.1	Přehled LCA analýz.....	38
5.2	Shrnutí LCA analýz	39
5.2.1	LCA analýza 1 - Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis (Baptista et al., 2011).....	39
5.2.2	LCA analýza 2 - The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework (Bauer et al., 2015).....	43
5.2.3	LCA analýza 3 - Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles (Miotti et al., 2015)	48
5.2.4	LCA analýza 4 - Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles (Evangelisti et al., 2016).....	53
5.2.5	LCA analýza 5 - Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank (Benitez et al., 2020)	56
5.2.6	LCA analýza 6 - Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars (Candelaresi et al., 2021).....	61
5.2.7	LCA analýza 7 - Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods (Ahmadi et Khoshnevisan, 2022) .	64
5.2.8	LCA analýza 8 - Novel short-term national strategies to promote the use of renewable hydrogen in road transport: A life cycle assessment of passenger car fleets partially fuelled with hydrogen (Candelaresi et al., 2022)	68
5.3	Porovnání výsledků LCA analýz.....	73
5.4	Diskuse zjištěných poznatků	76
	Závěr.....	78
	Seznam použité literatury	80
	Seznam obrázků	83
	Seznam tabulek.....	86

Seznam použitých zkratk

LCA	Life cycle assessment (posuzování životního cyklu)
LCI	Life cycle inventory (inventarizace životního cyklu)
LCIA	Life cycle impact assessment (hodnocení dopadů životního cyklu)
GWP	Global warming potential (potenciál globálního oteplování)
WTT	Well to tank (od zdroje k nádrži)
TTW	Tank to wheels (od nádrže ke kolům)
WTW	Well to wheels (od zdroje ke kolům)
C2G	Cradle to grave (od kolébky do hrobu)
FCV, FCEV	Fuel cell vehicle, fuel cell electric vehicle (vodíkové vozidlo poháněné vodíkovým článkem)
BEV	Battery electric vehicle (plně elektrické vozidlo)
ICEV	Internal combustion engine vehicle (vozidlo poháněné spalovacím motorem)
AFC	Alkaline fuel cell (alkalický palivový článek)
PEMFC	Polymer electrolyte membrane fuel cell (palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou)
PAFC	Phosphoric acid fuel cell (palivový článek s kyselinou fosforečnou)
MCFC	Molten carbonate fuel cell (palivový článek s taveninou alkalických uhličitánů)
SOFC	Solid oxide fuel cell (palivový článek s tuhými oxidy)
AEL	Alkaline electrolysis (alkalická elektrolýza)
PEMEL	Proton exchange membrane electrolysis (elektrolýza s polymerním pevným elektrolytem)
SOEL	Solid oxide electrolysis (elektrolýza s tuhými oxidy)
GH2	Gaseous hydrogen (plynný vodík)
LH2	Liquid hydrogen (kapalný vodík)
HEV	Hybrid electric vehicle (hybridní elektrické vozidlo)
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle (plug-in hybridní elektrické vozidlo)

Úvod

Vodíková vozidla se jeví jako slibná alternativa k elektrickým vozidlům ve snaze snížit dopady silniční dopravy na globální oteplování. Při svém provozu totiž vodíková vozidla nevypouští emise oxidu uhličitého (CO₂), který je považován za skleníkový plyn s největším vlivem na globální oteplování.

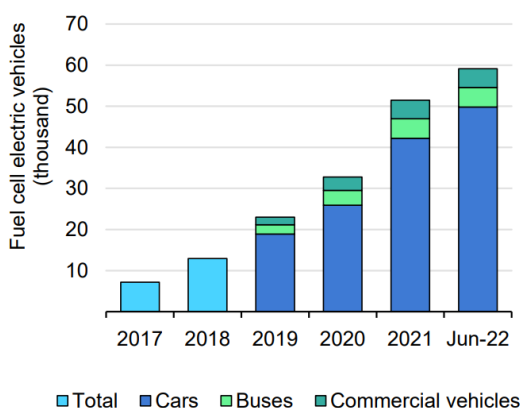
Přestože mají vodíková vozidla dlouhou historii, tak jejich technologický vývoj nedosahuje takového stupně jako vývoj elektrických vozidel. V dnešní době dochází k vývoji zejména vodíkových vozidel s palivovými články, na úkor vodíkových vozidel poháněných spalovacím motorem. Oproti elektrickým vozidlům nabízejí vodíková vozidla rychlejší doplňování paliva a potenciálně vyšší dojezd.

Tato práce se zaměřuje na analýzu životního cyklu vodíkových vozidel. Analýza celého životního cyklu vodíkových vozidel je klíčová pro posouzení dopadů této varianty na životní prostředí. Přestože samotný provoz vodíkových vozidel emise CO₂ nevytváří, tak ty mohou vznikat při výrobě a dopravě vodíku pro tato vozidla nebo ve fázích výroby či likvidace samotných vozidel. Výrobních procesů vodíku je několik a některé z nich využívají fosilních paliv, v důsledku čehož vypouští značné množství emisí. Fáze výroby a likvidace vodíkových vozidel mohou mít, vzhledem k využití drahých kovů, uhlíkových vláken a těžce recyklovatelných materiálů v konstrukci vozidel, velké dopady na životní prostředí. Důležité je si také uvědomit, že existují i jiné problémy životního prostředí, než je globální oteplování a vodíková vozidla mohou přispívat i k jejich zhoršení.

Tato bakalářská práce má dva hlavní cíle. Prvním cílem je přiblížit jak stávající technologie pohonu vodíkových vozidel, tak i technologie a možnosti výroby, dopravy a skladování vodíku a vysvětlit metodiku posuzování životního cyklu (LCA). Druhým cílem práce je ze shrnutí a porovnání vybraných LCA analýz posoudit nakolik jsou vodíková vozidla konkurenceschopná z pohledu dopadů na životní prostředí a zjistit, jak moc se jednotlivé analýzy rozcházejí ve svých výsledcích.

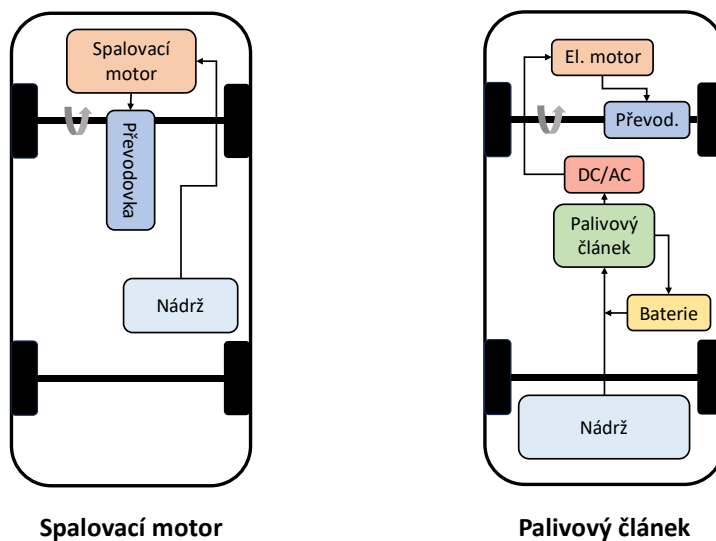
1 Vodíková vozidla

Vozidla využívající vodík jako palivo pro svůj pohon nejsou nikterak novým vynálezem. Jejich historie sahá až do roku 1807, kdy Francois Isaac de Rivaz sestrojil malé experimentální vozidlo poháněné prvním pístovým spalovacím motorem s elektrickým zapalováním, který využíval směs plynného vodíku a vzduchu jako palivo. Následně ale došlo k upozadění vodíkových vozidel ve prospěch vozidel spalujících fosilní paliva. V poslední době, s rostoucím povědomím o globálním oteplování, ale zájem o vodíková vozidla opět vzrostl (Obrázek 1), jelikož během provozu prakticky nevypouští emise uhlíku v žádné jeho podobě, a tudíž mají potenciál snížit celkové emise skleníkových plynů vznikajících v dopravě. [1]



Obrázek 1 - Celosvětový počet vodíkových vozidel s palivovými články dle segmentů [2]

Existují dva druhy vodíkového pohonu, a to spalování vodíku ve spalovacím motoru a využití vodíku v palivových článcích na výrobu elektrické energie pro elektrický motor (Obrázek 2). Vodíkové vozidlo se spalovacím motorem se velmi podobá v dnešní době nejvíce rozšířeným vozidlům se spalovacími motory spalujícími benzin či naftu. Vozidlo s palivovým článkem je poháněné elektrickým motorem, do kterého je dodávána elektrická energie vyrobená palivovým článkem nebo uskladněná v baterii. Baterie, zpravidla s nízkou kapacitou, u tohoto vozidla slouží k pokrývání náhlých změn požadovaného výkonu, ukládání přebytků palivovým článkem vyrobené elektrické energie a jako úložiště elektrické energie získané rekuperací při brzdění. [1][3]



Obrázek 2 - Schémata vodíkových vozidel poháněných spalovacím motorem a palivovým článkem [vlastní tvorba]

1.1 Spalování vodíku ve spalovacím motoru

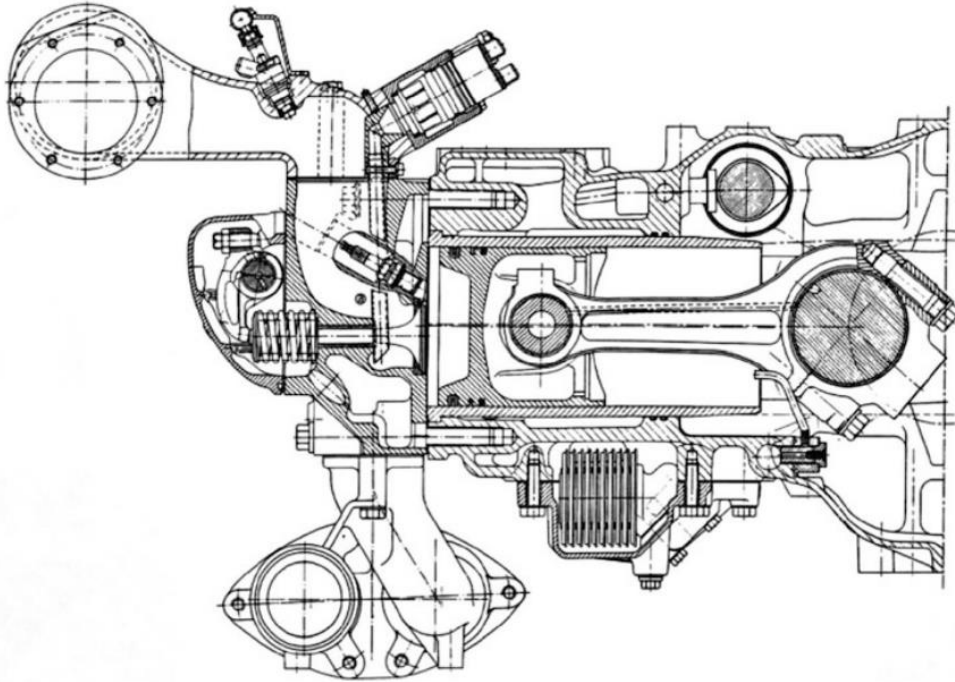
Princip vodíkového spalovacího motoru vychází z běžného spalovacího motoru, který je modifikován pro provoz s vodíkem (Obrázek 3). Tato koncepce není nová, už ve 30. letech 20. století se výzkum zaměřoval na přestavbu spalovacích motorů pro provoz s vodíkem a na zlepšení účinnosti konvenčně provozovaných spalovacích motorů přidáním vodíku. Vodík má oproti konvenčním palivům nízkou hustotu, ale vysokou výhřevnost. Pro zapálení vodíku je zapotřebí výrazně menší energie než pro zapálení benzínu či nafty a zároveň k jeho samovznícení dochází při daleko vyšších teplotách, z těchto důvodů jsou vodíkové motory většinou vznětové. Vysoká rychlost hoření vodíku umožňuje extrémně krátkou a efektivní dobu hoření. Vodíkové motory jsou i kvůli tomu schopné pracovat s vyšší účinností než motory spalující benzín, avšak účinnosti nejlepších naftových motorů nedosahují. Při spalování vodíku je možné v motorech spalovat velmi chudou směs (Tabulka 1), což vede k významnému snížení spotřeby paliva při nižším zatížení motoru. [1][3][4][5]

Vlastnost	Jednotka	Benzin	Nafta	Metan	Vodík
Hustota kapaliny	kg/m ³	750-770	820-845	423	70,8
při	°C	15	15	-162	-253
Hustota plynu	kg/m ³	-	-	0,716	0,090
Molární hmotnost	kg/kmol	~98	~190	16,043	2,016
Bod varu nebo rozmezí	°C	30-190	210-355	-161,5	-252,8
stechiometrická potřeba vzduchu	kg _{vzduch} /kg _{palivo}	14	14,7	17,2	34,3
Spodní výhřevnost LCV	MJ/kg	41,4	42,9	50	120
Hustota energie kapalina	MJ/dm ³	31,7	35,8	21	8,5
Hustota energie plyn	MJ/dm ³	-	-	12,6	3
Teplota samovznícení	°C	230-450	250	595	585
Energie potřebná pro vznícení	mJ	0,24	0,24	0,29	0,017
Laminární rychlost plamene	cm/s	~40	~40	~42	~230

Tabulka 1 - Porovnání vlastností vodíku s benzinem, naftou a metanem [1]

Absence uhlíku dělá z vodíku jediné palivo, které umožňuje, tedy alespoň teoreticky, spalování bez emisí oxidů uhlíku (CO_x). V reálném provozu výfukové plyny obsahují stopy těchto škodlivin z důvodu přítomnosti mazacího oleje ve spalovacím prostoru. Při spalování vodíku musí být věnována zvláštní pozornost pouze emisím oxidů dusíku (NO_x). [1][4]

Díky relativně vysokým výkonům, nízkým výrobním nákladům a vyspělosti pístových motorů se přímá přeměna vodíku na mechanickou energii jeví jako zajímavá možnost přechodu na alternativní palivo, která by navíc mohla být poměrně rychle zavedena v masovém měřítku. Výhodou této technologie je také možnost využití již stávajících výrobních zařízení v automobilovém průmyslu. [1][3][4]



Obrázek 3 - Motor z vodíkového autobusu MAN [1]

1.1.1 Spalování směsí vodíku a metanu

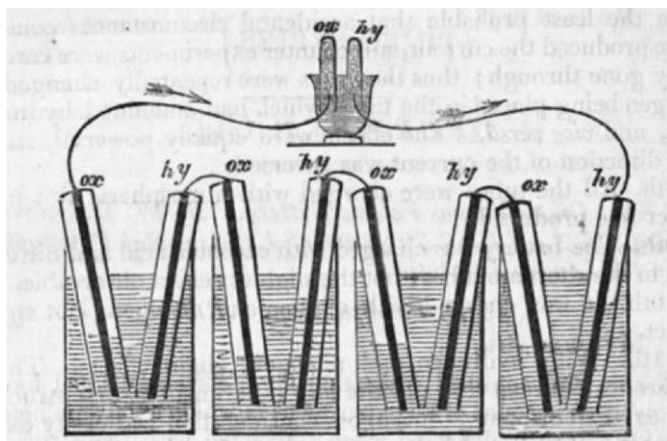
Vodík má s metanem mnoho společného a může s ním být smíchán v jakémkoliv poměru. Vodík ve směsi snižuje produkci emisí CO_x, zvyšuje účinnost motoru a umožňuje spalovat chudší směs oproti samotnému metanu. V automotive sektoru je nejčastěji využívána směs známá jako hytan, obsahující 10-30 % vodíku a 70-90 % metanu. [1][6]

Získávání metanu je levnější než výroba vodíku a v kombinaci s tím, že by mohl být hytan dopravován již existující infrastrukturou pro dopravu stlačeného zemního plynu, se jedná o méně nákladnou variantu s alespoň částečným snížením emisí CO_x. [1][6]

1.2 Palivové články

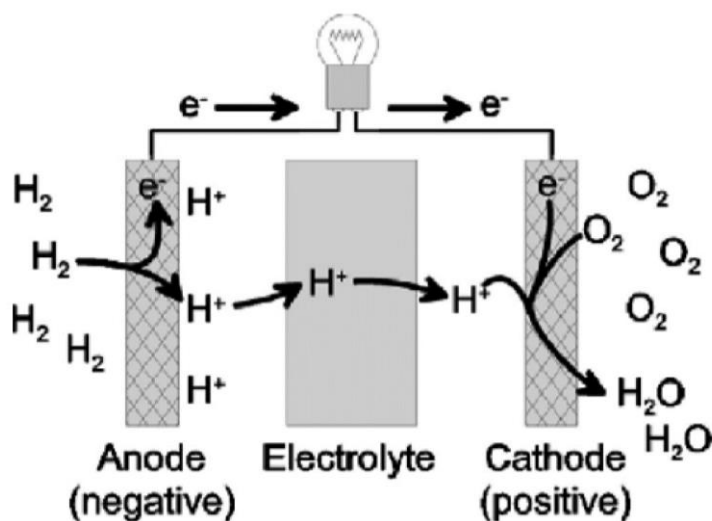
Palivový článek je elektrochemický měnič energie, který přeměňuje energii z chemické reakce paliva s oxidantem na energii elektrickou. Princip palivového článku objevil Christian Friedrich Schönbein již v roce 1838 a o rok později Sir William Robert Grove sestavil první funkční palivový článek (Obrázek 4). Po vynálezu mechanicky poháněného dynama pro výrobu elektrické energie přestal být palivový článek konkurenceschopný. Uplatnění našel pouze ve speciálních oborech, např. se osvědčil jako velice spolehlivý zdroj elektrické energie při cestách do vesmíru. [1][7]

V nedávné době došlo k obnovení intenzivního vývoje palivového článku, jelikož je vnímán jako zdroj elektrické energie budoucnosti, který lze provozovat bez emisí a dosahuje vysoké účinnosti. Palivové články mohou využívat různých paliv. V této práci budou uvažovány pouze palivové články, které využívají jako palivo vodík. [1][7]



Obrázek 4 - Palivový článek Sira Williama Roberta Grovea [8]

Palivový článek se typicky skládá ze dvou elektrod, kladné a záporné (katoda a anoda), oddělených elektrolytem (membránou) a vnějšího elektrického obvodu (Obrázek 5). Struktury elektrod jsou porézní, aby umožnily snadnou difuzi plynů a jejich následnou reakci na rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem a maximalizoval se jejich funkční povrch. V palivovém článku dochází k redoxní reakci, při které je práce vykonávána tokem elektronů. Vodík jakožto palivo je přiveden na anodu, kde dochází k jeho oxidaci rozdělením na kladné vodíkové ionty (H^+) a elektrony (e^-). Při pokojové teploty se vyskytují vodík a kyslík v molekulárních formách H_2 a O_2 . Pro průběh reakce je nutné tyto molekuly rozdělit na atomy, což lze provést zvýšením jejich teploty na cca $800\text{ }^\circ\text{C}$ až $1000\text{ }^\circ\text{C}$ nebo použitím katalyzátoru. Katalyzátorem často bývá drahý kov např. platina. Elektrolyt v palivovém článku představuje polopropustnou membránu, která umožňuje průchod nabitého atomu nebo molekuly, jako je vodíkový iont, z jedné elektrody na druhou. Tímto způsobem je umožněn transport vodíkových iontů, avšak zabrání se průchodu elektronů. Reakce může proběhnout pouze za přítomnosti uzavřeného elektrického obvodu, který umožňuje elektronům cirkulovat z jedné elektrody na druhou a tím reakci dokončit. Právě elektrony procházející vnějším elektrickým obvodem jsou příčinou vzniku elektrického proudu. Na katodě dochází k redukci oxidantu, kterým je kyslík, sloučením vodíkových iontů a elektronů s kyslíkem, při čemž vznikají molekuly vody. Narozdíl od baterií je nutné do palivového článku palivo i oxidant dodávat kontinuálně z vnějšího prostředí. [1][7][9][10]



Obrázek 5 - Princip palivového článku [11]

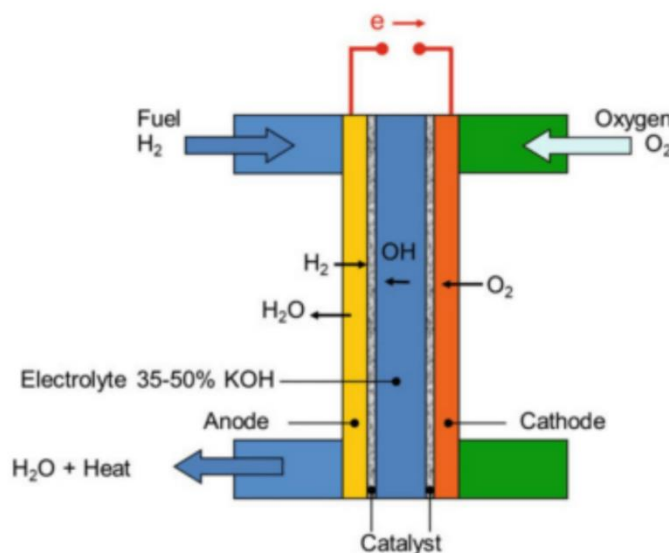
Palivové články lze rozdělit dle jejich provozní teploty na nízkoteplotní s provozní teplotou do 200 °C a vysokoteplotní s provozní teplotou nad 600 °C nebo dle použitého typu elektrolytu viz níže (Tabulka 2). [1][7][10]

	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Provozní teplota [°C]	60-80	60-120	160-200	~650	~1000
Výkon [kW]	10-100	0,1-500	až 10 000	až 100 000	až 100 000
Účinnost [%]	60-70, systém 60	50 -75, systém 45-60	55, systém 40	55, systém 50	60-65, systém 55-60
Aplikace	Cestování do vesmíru, vozidla	Cestování do vesmíru, vozidla	malé elektrárny	Elektrárny	Elektrárny

Tabulka 2 - Porovnání různých palivových článků [1]

1.2.1 AFC (alkalický palivový článek)

Alkalický palivový článek se řadí mezi nízkoteplotní palivové články. Běžně se jako elektrolyt používá vodný roztok hydroxidu draselného (KOH), protože má z alkalických hydroxidů nejvyšší vodivost. Reakce v tomto palivovém článku (Obrázek 6) se mírně liší od výše popsané standardní reakce, jelikož roztok KOH je vodivý spíše pro hydroxidové ionty (OH^-) než pro H^+ . Molekulární vodík je přiváděn k anodě, kde se štěpí na atomy vodíku, z nichž každý uvolňuje elektron do vnějšího elektrického obvodu. Při tom vzniklé H^+ reagují s OH^- procházejícími elektrolytem za vzniku molekul vody na anodě. Mezitím se na katodě dělí molekuly kyslíku na atomy kyslíku, které odebírají elektrony z vnějšího elektrického obvodu a následně reagují s molekulami vody v elektrolytu za vzniku OH^- . Elektrolyt může být absorbován v matrici nebo cirkulovat za účelem odvodu tepla z palivového článku. Pro své škodlivé účinky na životní prostředí nesmí elektrolyt z článku uniknout. [1][7][10]



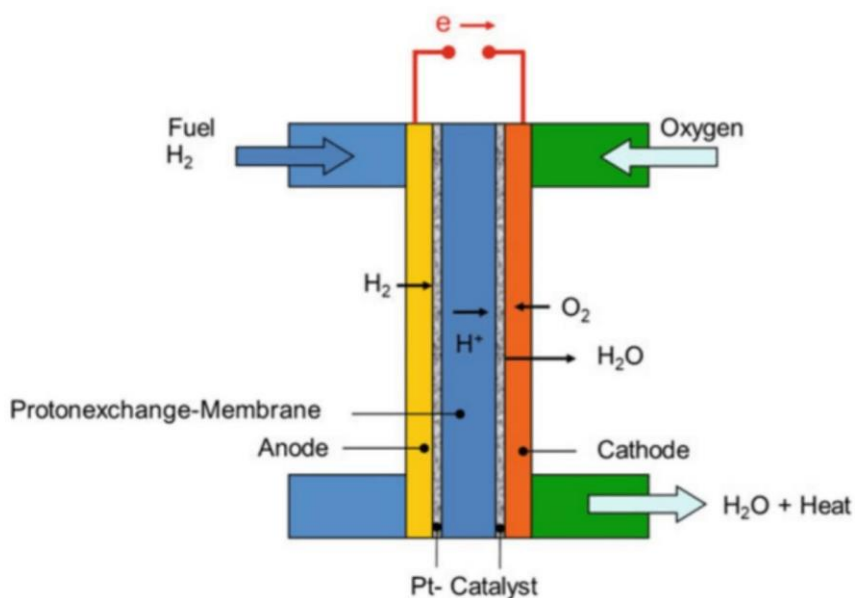
Obrázek 6 - Princip funkce AFC [1]

Výhodou alkalických článků je jejich jednoduchost. Alkalické články také mohou využívat katalyzátory z jiných než drahých kovů např. z niklu. Tyto kovy ale mají tendenci snadno oxidovat na kyslíkové elektrodě, což snižuje účinnost článku. V praxi se tedy často používá katalyzátor z platiny stejně jako v ostatních nízkoteplotních palivových člancích. Pro správnou funkci článku je nutné do něj dodávat čistý kyslík, jelikož oxid uhličitý (CO_2) obsažený ve vzduchu by reagoval s KOH na uhličitán draselný (K_2CO_3),

který ucpává strukturu elektrod a znehodnocuje elektrolyt. Alkalické články se používají pro výkony mezi přibližně 10 kW a 100 kW. Účinnost těchto článků se pohybuje kolem 60 % a mohla by dosáhnout až 70 %. [1][7][10]

1.2.2 PEMFC (palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou)

Palivové články s polymerní elektrolytickou membránou pracují při nízkých teplotách, což je výhodné z důvodu rychlejšího dosažení požadované teploty a velmi rychlé odezvy na změnu požadovaného výkonu. Kvůli nízkým provozním teplotám je ale nutné použít jako katalyzátor platinu. V těchto palivových článcích je elektrolytem hydratovaný polymer místo obvyklejší kapaliny. Tato polymerová membrána, když je nasycená vodou, vede H^+ (Obrázek 7). Pevná elektrolytická membrána má poměrně nízkou vodivost, což může vést k vysokému vnitřnímu odporu článku. Tomu se lze vyhnout použitím extrémně tenkých membrán. Běžná tloušťka membrány je přibližně 50 μm až 175 μm . Jelikož vodivost membrány závisí na jejím nasycení vodou, tak jsou tyto články velmi citlivé na obsah vody. Často jsou dodávané plyny vlhčeny a zároveň musí být zajištěn odvod vody vznikající při reakci v článku, tak aby nedošlo k jeho zaplavení. Odvod vody je většinou zajištěn přebytečným vzduchem. Voda se v PEMFC nachází v kapalném stavu, což omezuje provozní teplotu článků. Provoz PEMFC při teplotách nad 100 $^{\circ}C$ je možný pouze za vyšších tlaků, avšak tím dochází ke snížení životnosti článku. [1][7][10]



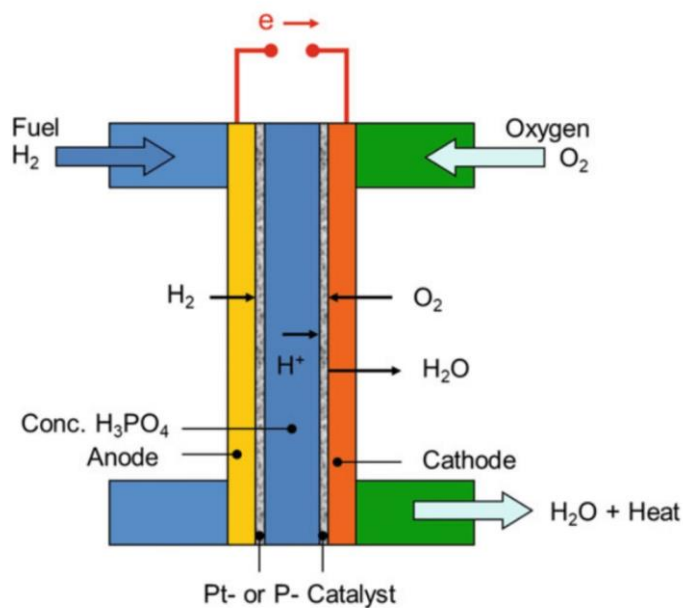
Obrázek 7 - Princip funkce PEMFC [1]

PEMFC jsou citlivé na oxid uhelnatý (CO), jelikož ten se při takto nízkých provozních teplotách silně váže na platinu. V důsledku toho dochází k zablokování katalyzátoru a úbytku výkonu, tento stav se někdy také nazývá otravou článku. Zablokování katalyzátoru lze zvrátit. Do PEMFC je tedy nutné dodávat vodík s velmi nízkým obsahem CO. [1][10]

Pro zvýšení elektrického napětí a výkonu je možné články spojovat do větších celků. Oproti kapalnému elektrolytu má pevná elektrolytická membrána výhodu jednodušší výroby a zejména nižší hmotnosti. Díky spojení nízké hmotnosti s nízkou provozní teplotou jsou PEMFC favoritem pro aplikaci ve vozidlech. Účinnost PEMFC může dosahovat až 60 %. Tyto články se využívají pro výkony do cca 500 kW. Životnost PEMFC typicky dosahuje 10 000 h. [1][7][10]

1.2.3 PAFC (palivový článek s kyselinou fosforečnou)

Palivové články s kyselinou fosforečnou jsou dalším zástupcem nízkoteplotních palivových článků. Elektrolytem je v těchto článcích kyselina fosforečná (H_3PO_4), ta se při pokojové teplotě nachází v pevném skupenství, ale taje při $42\text{ }^\circ\text{C}$ a je stabilní až do $200\text{ }^\circ\text{C}$. H_3PO_4 je poměrně slabý vodič, což se řeší tím, že je H_3PO_4 fixována do matrice karbidu křemíku vázané teflonem, čímž se sníží tloušťka elektrolytické vrstvy. V PAFC (Obrázek 8) dochází ke stejným reakcím jako v PEMFC. Většinou pracují tyto články při atmosférickém tlaku, ale mohou pracovat i za tlaků vyšších. Katalyzátorem v PAFC je nejčastěji platina či platinová slitina. PAFC musí být aktivně chlazeny. Chladivem může být kapalina nebo plyn, přičemž kapalina je účinnější, ale chladicí systémy pracující s kapalinou bývají složitější. Pro správnou funkci článku je nutné udržovat hladinu CO pod 1,5 % objemu, aby se minimalizovala otrava článku. [1][7][10]



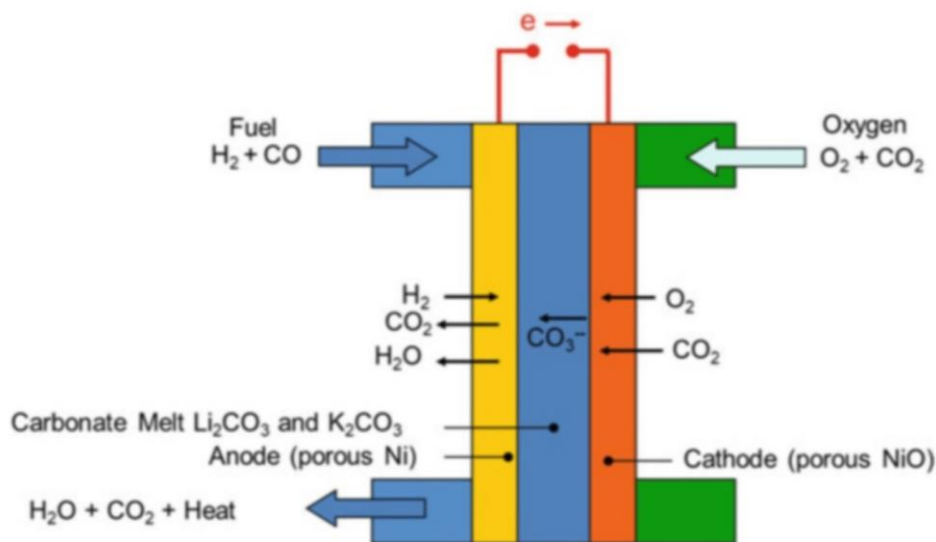
Obrázek 8 - Princip funkce PAFC [1]

Účinnost PAFC je nižší než u několika dalších typů palivových článků a pohybuje se mezi 36 % a 42 %. PAFC se běžně používají jako stacionární generátory elektrické energie s výkony od 50 kW až po 500 kW. Byla ale vyrobena i jednotka dodávající 11 MW. PAFC prokazují poměrně dlouhou životnost a to až 40 000 h. Jejich provozní teplota je dostatečně vysoká na to, aby odpadní teplo mohlo být využito pro ohřev vody či vytápění prostorů. Výhodou je oproti PEMFC zvýšená tolerance vůči CO. Navzdory vysoké technické vyspělosti této technologie se PAFC nerozšířil kvůli příliš vysokým nákladům a omezeným možnostem jejich snížení. [1][7][10]

1.2.4 MCFC (palivový článek s taveninou alkalických uhličitánů)

Palivové články s taveninou alkalických uhličitánů pracují při teplotě okolo $650\text{ }^\circ\text{C}$, a proto se řadí mezi vysokoteplotní palivové články. Z hlediska konstrukce i reakce v článku je MCFC nejkomplexnější z moderních palivových článků. Elektrolytem v těchto článcích je směs uhličitánů alkalických kovů, která se při pokojové teplotě nachází v pevném stavu, ale při pracovní teplotě článků je kapalná. Nejčastěji se využívá směs 62 % Li_2CO_3 a 38 % K_2CO_3 (molekulární poměr) fixovaná v matici tvořené LiAlO_2 . Tento elektrolyt vede uhličitánové ionty (CO_3^{2-}) z anody na katodu. Na rozdíl od dosud

uvedených typů palivových článků lze jako palivo použít plynou směs vodíku a CO. Tuto směs je možné vyrábět vnitřním reformováním paliva (metanu). Na anodu je dodáván vodík, jenž reaguje s CO_3^{2-} za vzniku molekul vody, CO_2 a elektronů. Na katodu je nezbytné dodávat směs kyslíku a CO_2 , pro tvorbu této směsi je možné využít CO_2 vznikající na anodě. Kyslík reaguje s CO_2 , absorbuje elektrony a vytváří CO_3^- , které migrují elektrolytem zpět k anodě (Obrázek 9). Zatímco u nízkoteplotních palivových článků představuje obsah CO v palivu riziko otravy článku, tak v MCFC může CO reagovat na anodě s molekulami vody za vzniku dalšího vodíku. Z důvodu vysoké pracovní teploty není nutné jako katalyzátor používat drahé kovy. Běžným katalyzátorem v MCFC je nikl. [1][7][10]



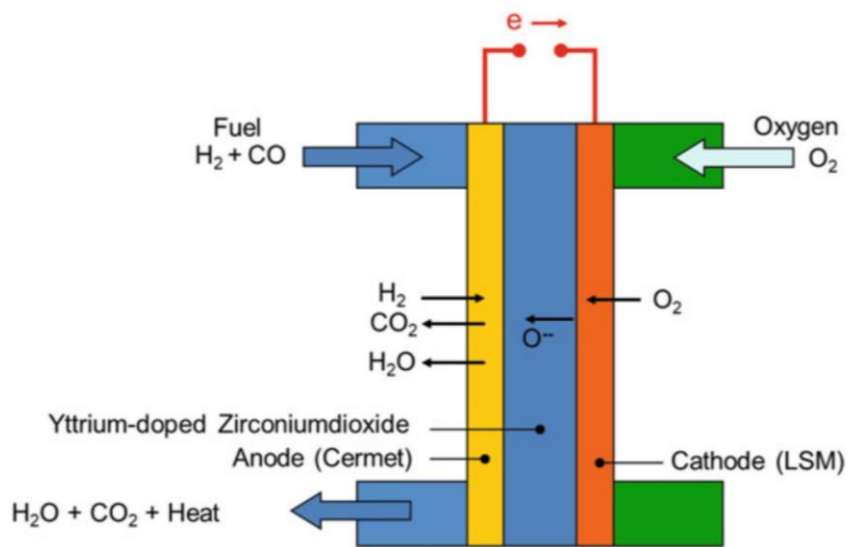
Obrázek 9 - Princip funkce MCFC [1]

MCFC jsou pro svou komplexnost využívány pouze pro vysoké výkony (od 100 kW až po 100 MW). Účinnost MCFC dosahuje teoreticky až 60 %, ale současné články dosahují účinnosti pouze kolem 50 %. Vysoké pracovní teploty umožňují využití odpadního tepla pro průmyslové procesy či kogeneraci a výfukové plyny z článku mohou pohánět plynovou turbínu. Potenciální výhodou těchto článků je jejich možné využití k zachytávání CO_2 produkovaného spalováním fosilních paliv. [1][7][10]

1.2.5 SOFC (palivový článek s tuhými oxidy)

Palivové články s tuhými oxidy pracují při teplotách mezi 750 °C a 1 000 °C a jedná se tedy o vysokoteplotní palivové články. Unikátním mezi moderními palivovými články je používaný elektrolyt, který je z pevného keramického materiálu. Nejčastěji se jedná o oxid zirkoničitý stabilizovaný oxidem yttritým. Tento elektrolyt vede při vysokých teplotách kyslíkové ionty (O^{2-}). Pro snížení odporu elektrolytu má vrstva elektrolytu velmi malou tloušťku, přibližně 10 μm až 100 μm . Na katodě jsou molekuly kyslíku děleny na atomy kyslíku, které odebírají každý dva elektrony z vnějšího elektrického okruhu a vznikají O^{2-} . Na anodě se vodík dělí na atomy vodíku, které odevzdají elektron do vnějšího elektrického okruhu a vytvoří H^+ , které reagují s O^{2-} procházejícími elektrolytem za vzniku molekul vody (Obrázek 10). Stejně jako u MCFC lze využívat vnitřního reformování paliva pro přípravu směsi vodíku a CO, kterou je možné dodávat na anodu místo čistého vodíku. CO na anodě reaguje s migrujícími O^{2-} , přičemž dochází k uvolnění elektronů a vzniku CO_2 . Alternativně může docházet k reakci CO

s molekulami vody, tak jako u MCFC. Díky vysokým pracovním teplotám není nutné použití drahých kovů jako katalyzátoru. [1][7][10]

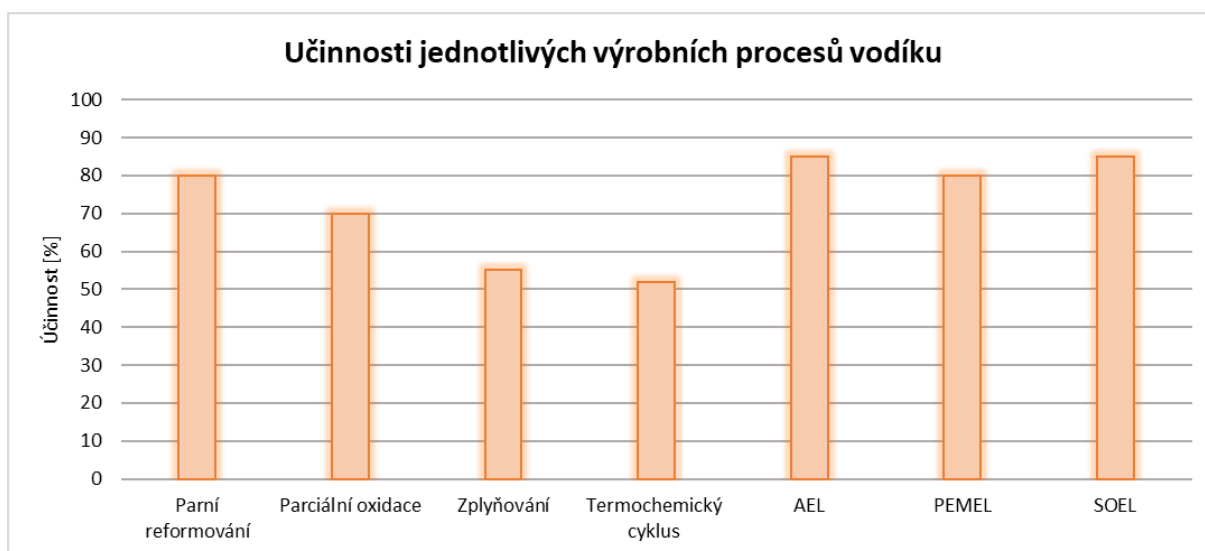


Obrázek 10 - Princip funkce SOFC [1]

Výroba a konstrukce tohoto článku je usnadněna tím, že všechny jeho části jsou v pevném skupenství. Použité materiály v palivovém článku ale musí mít podobný koeficient teplotní roztažnosti, aby při zahřívání na pracovní teplotu nedocházelo k praskání keramického elektrolytu a jeho oddělování od elektrod. I tak musí být zahřívání prováděno pozvolně a s velkou opatrností. SOFC jsou potenciálně nejjednodušší a nejvíce robustní ze všech palivových článků a zároveň mají velice dlouhou životnost (přes 60 000 h). Jejich účinnost dosahuje typicky hodnot okolo 50 %, ale teoreticky je možné dosáhnout až 60 % účinnosti. Odpadní teplo je možné využít, tak jako u MCFC, pro kogeneraci a výfukové plyny taktéž mohou pohánět plynovou turbínu. SOFC se používají pro široké výkonové spektrum od malých pohonných jednotek až po elektrárny o výkonu 100 MW. [1][7][10]

2 Výroba vodíku

Vodík je nejvíce rozšířeným prvkem v našem vesmíru, ale kvůli své vysoké reaktivitě se atomární vodík na Zemi nevyskytuje, jelikož okamžitě tvoří sloučeniny s jinými atomy, často sám se sebou za vzniku molekul vodíku (H_2). Molekuly vodíku se ale na Zemi vyskytují jen vzácně v čisté formě, zpravidla se totiž vyskytují ve sloučeninách, nejčastěji s kyslíkem ve formě molekul vody (H_2O). Vodík je přítomen v celé řadě dalších sloučenin jako jsou uhlovodíky, alkoholy, kyseliny, tuky, sacharidy nebo třeba proteiny. [1][11][12]

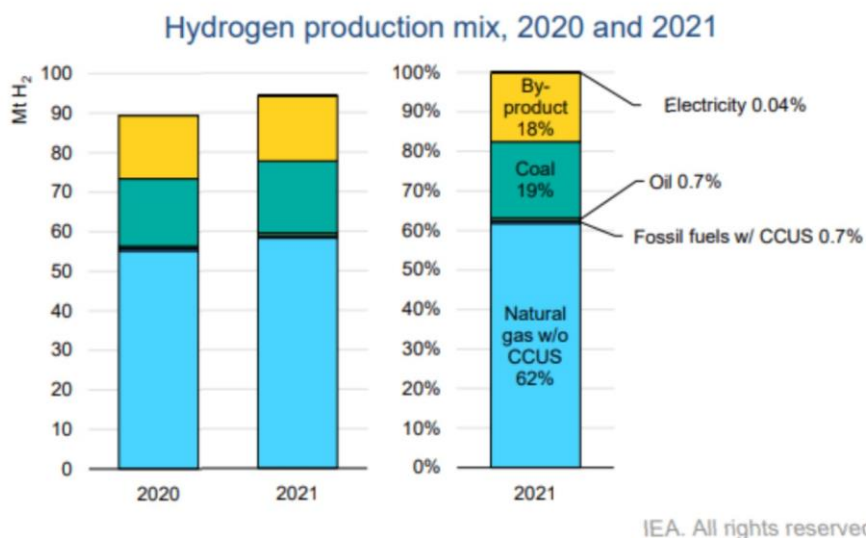


Obrázek 11 - Účinnosti jednotlivých výrobních procesů vodíku [vlastní tvorba]

	Parní reformování metanu	Parciální oxidace těžkých uhlovodíků	Zplyňování uhlí	Termochemický cyklus	Elektrolýza
Emise CO_2 na 1 kg vyrobeného vodíku	7,33 kg	12,35 kg	29,33 kg	0 kg	0 kg

Tabulka 3 - Emise CO_2 produkované výrobními procesy [13]

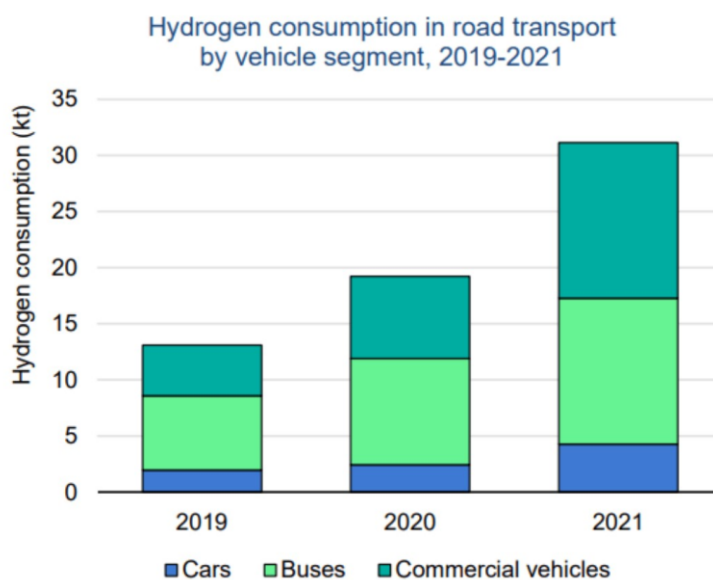
Protože se vodík v přírodě prakticky nevyskytuje v čisté formě, tak je nutné ho vyrábět z jiných surovin spotřebou primární energie. Významná část vyrobeného vodíku pochází z průmyslových procesů, které produkují vodík jako vedlejší produkt. Těmito procesy jsou např. výroba chloru pomocí elektrolýzy chlor-alkalických kovů, výroba koksu pro ocelářský průmysl a některé procesy rafinace ropy. Vyrábět přímo vodík lze mnoha výrobními procesy využívajícími různé jeho sloučeniny a zdroje primární energie. Obrázek 11 a Tabulka 3 představují účinnosti a emise CO_2 různých způsobů výroby vodíku. Jednotlivé výrobní procesy jsou popsány v podkapitolách níže. [1][12]



Note: CCUS = carbon capture, utilisation and storage.

Obrázek 12 - Mix produkce vodíku [2]

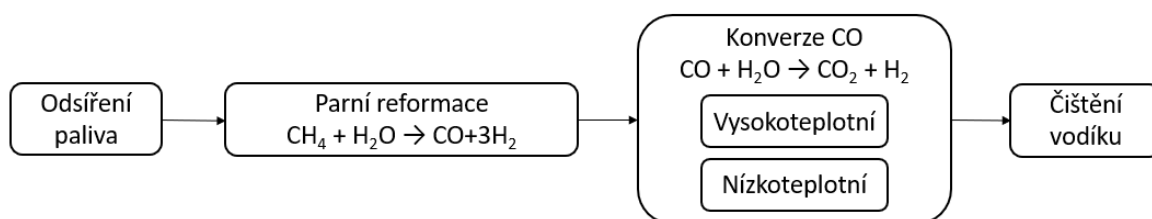
V roce 2021 se ve světě vyrobilo a spotřebovalo 94 Mt vodíku, což je přibližně 2,5 % celosvětové konečné spotřeby energie. Méně než 1 Mt vyrobeného vodíku bylo z nízkoemisních zdrojů a z toho bylo pouze 35 kt vodíku vyrobeno elektrolýzou vody (Obrázek 12). I přes tak nízké množství zaznamenal objem výroby vodíku elektrolýzou vody nárůst 20 % oproti roku 2020. Poptávka po vodíku v sektoru dopravy přesáhla 30 kt (Obrázek 13), což je 60 % více než v předchozím roce ale stále je to pouze 0,03 % celkové poptávky po vodíku. [2]



Obrázek 13 - Spotřeba vodíku v silniční dopravě podle segmentů vozidel [2]

2.1 Parní reformování

Parní reformování je endotermická přeměna lehkých uhlovodíků, zejména zemního plynu (metanu). V dnešní době je hlavním výrobním procesem vodíku. Proces probíhá při teplotách 700 °C až 900 °C a tlacích 20 barů až 40 barů, maximálně 80 barů. Pro urychlení reakce se využívají typicky niklové katalyzátory, ale je možné použít i katalyzátory z drahých kovů. [1][12]



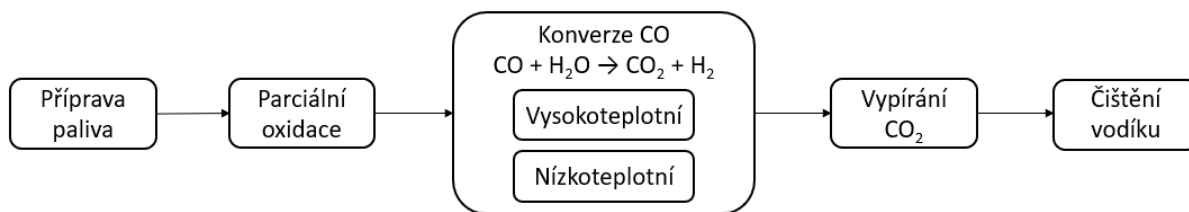
Obrázek 14 - Proces parního reformování zemního plynu [11]

Na začátku procesu (Obrázek 14) dochází ke katalytickému zpracování zemního plynu za přítomnosti vodíku s cílem odstranit sloučeniny síry. Odsířený zemní plyn se poté reformuje smícháním s párou a průchodem přes katalyzátor, přičemž vzniká směs vodíku a CO. Tato směs se také nazývá vodní plyn a je hojně využívána v chemickém průmyslu např. k výrobě metanolu či syntéze amoniaku. Následuje exotermická katalytická přeměna vzniklého oxidu uhelnatého s vodní parou, na vodík a CO₂. Tato přeměna probíhá ve dvou stupních lišících se teplotou. Vysokoteplotní přeměna probíhá při teplotách mezi 300 °C a 500 °C za přítomnosti katalyzátoru na bázi železa. Po vysokoteplotním stupni se obsah CO sníží na přibližně 2 %. Nízkoteplotní přeměna probíhá při 190 °C až 280 °C za přítomnosti měděného katalyzátoru. Obsah CO na výstupu z reakce je menší než 0,5 %. Posledním krokem procesu je čištění vyrobeného vodíku adsorpcí při kolísání tlaku nebo membránovou separací od zbylého CO, CO₂ a jiných nečistot. CO₂ je možné zachytávat tak, aby neunikal volně do atmosféry. [1][9][11][12]

Účinnost parního reformování se pohybuje mezi 75 % a 80 %. Velké výrobní závody mají výrobní kapacitu až 100 000 Nm³/h vodíku. Velkou nevýhodou tohoto výrobního procesu jsou značné emise CO₂. Na 1 kg vyrobeného vodíku parním reformováním metanu připadá 7,33 kg CO₂ při účinnosti 75 %. [1][13]

2.2 Parciální oxidace

Parciální oxidace je exotermická přeměna těžkých uhlovodíků např. topných olejů. Přeměna může být prováděna s katalyzátorem nebo bez něj. Přeměna bez katalyzátoru se odehrává při teplotách 1 200 °C až 1 500 °C a tlaku 25 barů až 80 barů, aby se zabránilo tvorbě uhlíku a sazí. Při použití niklového katalyzátoru probíhá reakce při teplotách okolo 800 °C a tlaku 25 barů až 35 barů. Katalytická přeměna je díky mírnějším podmínkám vhodnější pro malé a mobilní aplikace. Spalováním paliva s nedostatečným příívodem kyslíku dochází ke vzniku vodního plynu, CO₂ a sazí. CO ve vodním plynu dále reaguje s párou za vzniku CO₂ a vodíku (CO₂ se vypírá a výsledný plynný produkt se čistí adsorpcí při kolísání tlaku nebo membránovou separací. [1][11][12]

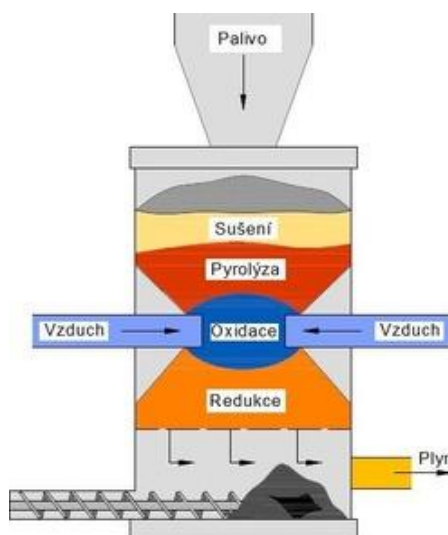


Obrázek 15 - Proces parciální oxidace [vlastní tvorba]

Parciální oxidace má účinnost okolo 70 %. Tento výrobní proces se provádí ve velkém měřítku s výrobní kapacitou až 100 000 Nm³/h. Při výrobě 1 kg vodíku parciální oxidací s účinností 75 % dochází k uvolnění 12,35 kg CO₂. Z pohledu emisí CO₂ je tedy parciální oxidace horší než parní reformování. [1][13]

2.3 Zplyňování

Při zplyňování se tuhá paliva s kyslíkem či parou přeměňují za vysokých teplot a tlaku až 40 barů na vodní plyn. Palivem může být např. uhlí, dřevo nebo pro snížení emisí biomasa. Proces zplyňování je velice komplexní ale lze jej rozdělit na čtyři podprocesy, které na sebe navazují (Obrázek 16). Prvním je sušení, při kterém je odpařována voda obsažená v palivu za teploty přibližně 200 °C. Na sušení navazuje pyrolýza probíhající za teplot mezi 200 °C a 500 °C. Palivo je při ní tepelně rozloženo na sloučeniny uhlíku a vodíku, a to bez přístupu vzduchu. Poté probíhá oxidace, při níž je rozložené palivo částečně spáleno oxidantem v exotermické reakci při teplotách 500 °C až 2 000 °C za vzniku CO, CO₂ a H₂O. Posledním podprocesem je redukce, při které produkty vystupující z oxidace reagují s uhlíkem za teplot 500 °C až 1 000 °C. Při redukci probíhá Boudouardova reakce (redukce CO₂ na CO) a heterogenní reakce vodního plynu (redukce H₂O na H). Současně s nimi probíhá reakce CO s párou za vzniku CO₂ a vodíku a také dochází k tvorbě metanu. [1][12]



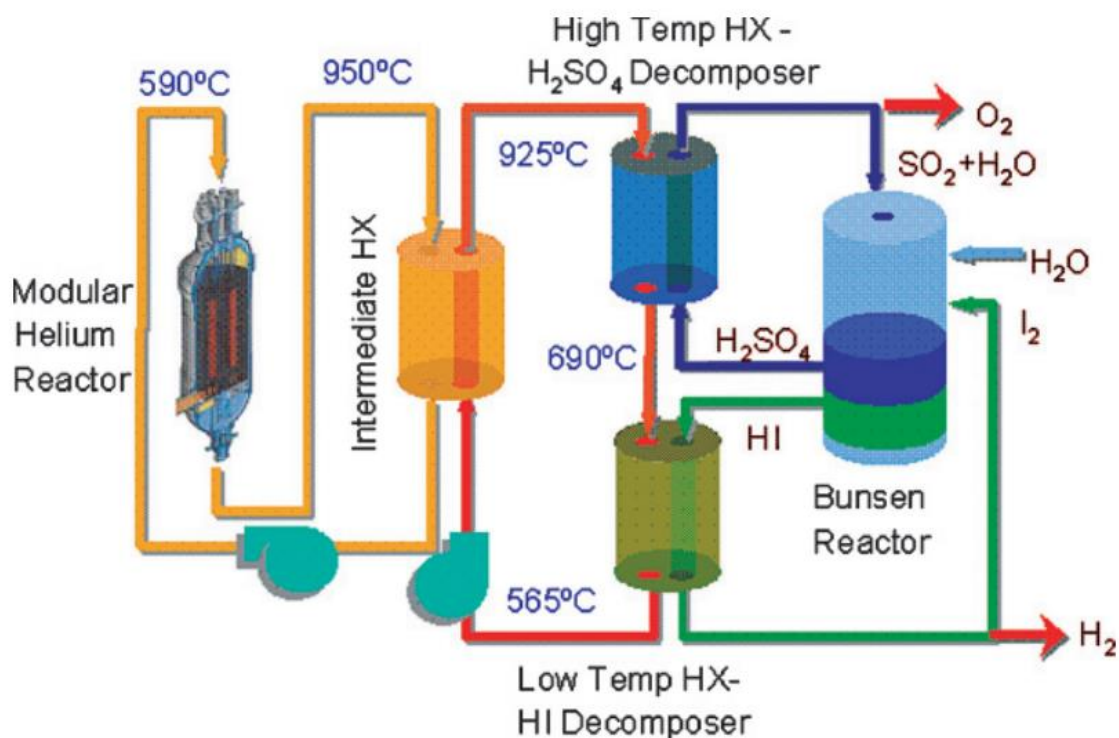
Obrázek 16 - Podprocesy procesu zplyňování [14]

Účinnost zplyňování při výrobě vodíku je přibližně 50 %. Zplyňování se při výrobě vodíku nedokázalo komerčně prosadit, jelikož čistota výsledného plynu je poměrně nízká a náklady na jeho nezbytné čištění jsou vysoké. Dalším problémem zplyňování je tvorba dehtu, zejména při použití biomasy jako paliva. Při uvažované účinnosti 75 % je při výrobě 1 kg vodíku zplyňováním uhlí uvolněno 29,33 kg CO₂. Zplyňování tedy produkuje nejvíce emisí CO₂ z uvedených výrobních procesů. [1][12][13]

2.4 Termochemický cyklus

Štěpení molekul vody na kyslík a vodík výhradně teplem vyžaduje velmi vysokou teplotu. Při 2 700 °C se rozloží jen asi 15 % vody. Pro snížení této teploty je možné využít několika chemických činidel, která jsou schopna jí snížit pod 1 200 °C. Termochemické cykly využívají těchto chemikálií a vytvářejí vodík prostřednictvím řady chemických reakcí. Všechny chemikálie používané ve výrobním procesu jsou plně recyklovány a jedinou surovinou spotřebovávanou v průběhu procesu je voda. Voda je prakticky nevyčerpatelným zdrojem vodíku. [1][9][11]

Nejrozvinutějším termochemickým cyklem je siřičito-jodový termochemický cyklus. V tomto cyklu je do vstupující vody přidáván oxid siřičitý a jod. Reakcí těchto složek nazývanou Bunsenova reakce vznikají kyseliny sírová a jodovodíková. Bunsenova reakce je exotermická a je možné z ní odvést teplo o teplotě až 120 °C. Za správných podmínek jsou jednotlivé kyseliny nemísitelné a lze je snadno oddělit. Následně dochází k rozkladu již oddělených kyselin. Kyselina sírová se rozkládá na kyslík, vodu a oxid siřičitý vhodný k opětovnému použití při teplotě větší než 800 °C. Při teplotě přes 300 °C dochází k rozkladu kyseliny jodovodíkové na vodík a znovu využitelný jod. Do procesu tedy vstupuje pouze voda s vysokoteplotním teplem a vystupuje kyslík, vodík a nízkoteplotní teplo (Obrázek 17). [9][11][15]

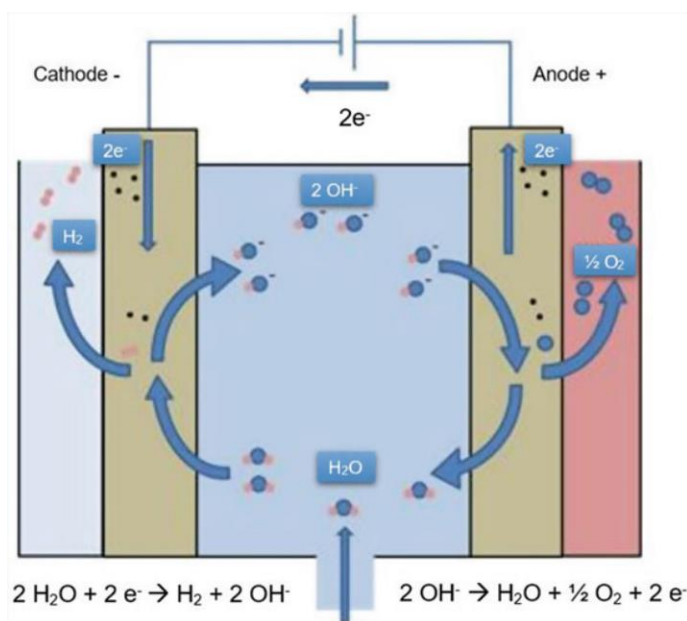


Obrázek 17 - Schéma siřičito-jodového cyklu s jaderným reaktorem jako zdrojem tepla [11]

Při samotném výrobním procesu nedochází k uvolňování CO₂ či jiných škodlivin do životního prostředí. Jediným zdrojem emisí může být zdroj dodávaného vysokoteplotního tepla. Slibnými zdroji tepla pro tento výrobní proces se jeví jaderné elektrárny. Celková efektivita termochemického cyklu se pohybuje mezi 40 % až 52 %. Termochemický cyklus je perspektivním výrobním procesem pro rozsáhlou, ekologickou a efektivní výrobu vodíku. Nevýhodou tohoto procesu jsou nároky na použité materiály, které musí odolat vysokým teplotám a agresivitě využívaných kyselin. [9][11][15]

2.5 Elektrolyza

Pokud se pro rozklad vody na kyslík a vodík využije elektrická energie místo tepla, tak lze rozklad vody provádět již při teplotě okolí. Proces elektrochemického rozkladu látky za použití elektrického proudu se označuje jako elektrolyza. Elektrolyza je vlastně opakem procesu probíhajícího v palivovém článku. Zatímco palivový článek vytváří stejnosměrný elektrický proud prostřednictvím chemických reakcí, tak v elektrolyzáru jsou chemické reakce vynuceny stejnosměrným proudem. Díky tomu mají palivové články a elektrolyzáry velice podobnou konstrukci. Elektrolyzáru se skládá z anody, katody, elektrolytu a vnějšího elektrického obvodu, na který je připojen zdroj stejnosměrného elektrického proudu. Anoda v elektrolyzáru je kladnou elektrodou a katoda zápornou elektrodou (Obrázek 18) tedy opačně, než je tomu v palivovém článku. [1][9][12]



Obrázek 18 - Princip elektrolyzáru pro elektrolyzu vody [1]

Při následujícím popisu funkce elektrolyzáru je uvažována čistá voda jako elektrolyt. Na katodě voda přijímá elektrony ze zdroje a redukuje se na vodík a OH^- . OH^- migrují na anodu, kde odevzdávají elektrony a oxidují na vodu a kyslík. Produkované plyny musí být odděleny, aby se předešlo vzniku výbušné směsi vodíku s kyslíkem, proto je mezi elektrodami umístěna plynům nepropustná membrána neboli separátor. V praxi není elektrolytem pro svůj vysoký elektrický odpor čistá voda, ale jsou do ní pro jeho snížení přidávány kyseliny (HCl), zásady (KOH) nebo rozpustné soli (NaCl). Jelikož je voda při reakci v elektrolyzáru spotřebována, tak je nutné ji souvisle doplňovat. [1][12]

Výroba 1 Nm^3 vodíku elektrolyzou vody spotřebuje mezi 4 kWh až 8 kWh elektrické energie a přibližně 0,8 l vody. Voda se před použitím v elektrolyze odsoluje, aby nedocházelo k zanášení elektrolyzáru. Vodík vyrobený elektrolyzou vody má čistotu přes 99,9 %. Vzhledem k tomu, že vodík je převážně požadován pod tlakem a spotřeba elektrické energie elektrolyzy pod tlakem téměř neroste, tak je tlaková elektrolyza vhodnou možností. V současné době jsou dostupné tlakové elektrolyzáry až do 50 barů, zařízení až do 350 barů jsou testována a zařízení až do 700 barů jsou ve vývoji. Náklady na konstrukci a utěsnění takových elektrolyzáru jsou ale vysoké. Účinnosti tlakových elektrolyzáru jsou nižší než u elektrolyzáru provozovaných za atmosférického tlaku. Stejně jako při termochemickém cyklu při elektrolyze vody nedochází k uvolňování CO_2 ani jiných škodlivých látek. Pro CO_2 neutrální

výrobu vodíku elektrolýzou vody je ale nutné využívat bezemisní zdroje elektrické energie. Takovými zdroji jsou např. vodní, větrné, solární a jaderné elektrárny. [1][12]

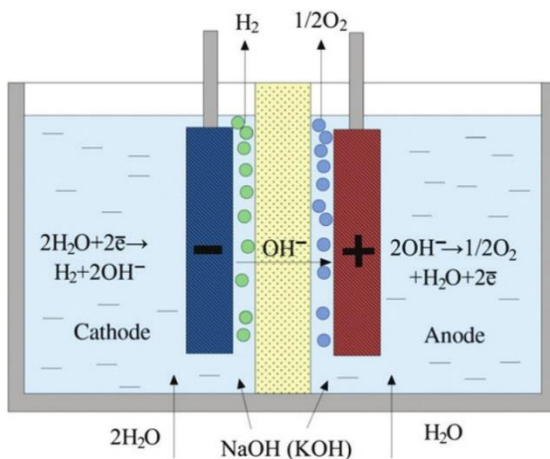
K elektrolýze vody se využívají tři různé technologie elektrolýzy (Tabulka 4), a to alkalická elektrolýza s kapalným elektrolytem (AEL), kyselá elektrolýza s polymerním pevným elektrolytem (PEMEL) a elektrolýza s tuhým oxidem jako elektrolytem prováděná při vysokých teplotách (SOEL). Účinnosti všech technologií jsou udávány bez započítání účinnosti výroby elektrické energie. V praxi celková účinnost systému velmi záleží na zvoleném zdroji elektrické energie. [1][12][16]

	AEL	PEMEL	SOEL
Provozní teplota [°C]	50 - 80	~80	700 - 1 000
Spotřeba energie [kWh/Nm ³]	4,1 - 7,0	4,3 - 8,0	-
Proudová hustota [A/cm ²]	0,2 - 0,6	0,5 - 2,0	0,2 - 2,0
Účinnost [%]	až 85	až 80	až 85
Životnost [h]	>50 000	<50 000	-

Tabulka 4 - Porovnání technologií elektrolýzy vody [1][12]

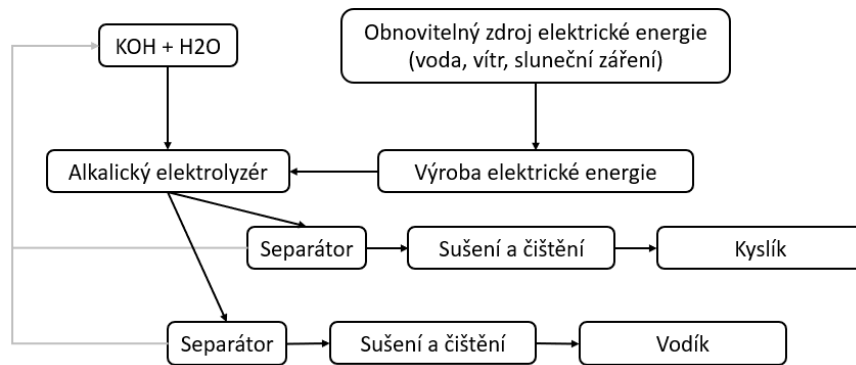
2.5.1 AEL (alkalická elektrolýza)

Alkalické elektrolýzery jsou nejdéle komerčně dostupné a nejrozšířenější. Jako elektrolyt využívají vodný 20 % až 40% roztok KOH, který je vodivý pro OH⁻. Provozní teplota alkalických elektrolýzérů se pohybuje v rozsahu 50 °C až 80 °C. Elektrody bývají vyrobeny z ocelových mřížek potažených niklem, jenž může plnit funkci katalyzátoru v AEL místo drahých kovů. Kvůli snížení elektrického odporu je výhodné, aby byly elektrody umístěny co nejbližší k sobě (Obrázek 19). V pokročilejších elektrolýzerech s nulovou mezerou jsou elektrody přitlačeny přímo na separátor, který je napuštěný elektrolytem. Separátor může být vyroben z kompozitního či keramického materiálu. Dříve používaný azbest je dnes již pro své nežádoucí účinky na lidské zdraví zakázán. [1][12]



Obrázek 19 - Schéma alkalického elektrolýzérů [17]

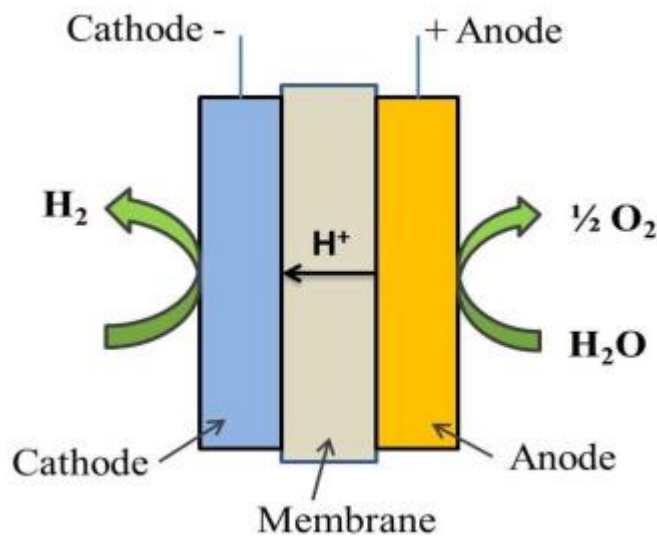
Pro svou robustnost, škálovatelnost a dlouhou životnost (až 30 let) je AEL oblíbenou technologií elektrolýzy v mnoha oblastech. Provozní proudové hustoty AEL se pohybují mezi 0,2 Acm⁻² a 0,6 Acm⁻². Moderní elektrolýzery s nulovou mezerou dosahují účinnosti až 85 %. [1][12]



Obrázek 20 - Schéma systému alkalického vodního elektrolyzérů pro výrobu vodíku a kyslíku [vlastní tvorba]

2.5.2 PEMEL (elektrolýza s polymerním pevným elektrolytem)

Na rozdíl od AEL není v PEMEL žádný používán tekutý elektrolyt, místo něho je používán pevný polymerní elektrolyt vodivý pro H^+ , jenž zároveň plní funkci separátoru (Obrázek 21). Kvůli velmi kyselému prostředí v elektrolyzáru se používají jako katalyzátory drahé kovy, zejména platina a oxid iridičitý. Ty jsou obvykle rozptýleny na porézním titanu tvořícím elektrody. Do článků je dodávána pouze deionizovaná voda, do které není nutné přidávat kyseliny ani zásady pro zvýšení její vodivosti. Případné nečistoty ve vodě mohou výrazně snížit vodivost elektrolytu, je tedy vyžadována vyšší čistota vody než při AEL. Provozní teplota v elektrolyzárech s pevným polymerním elektrolytem se pohybuje okolo $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1][12]

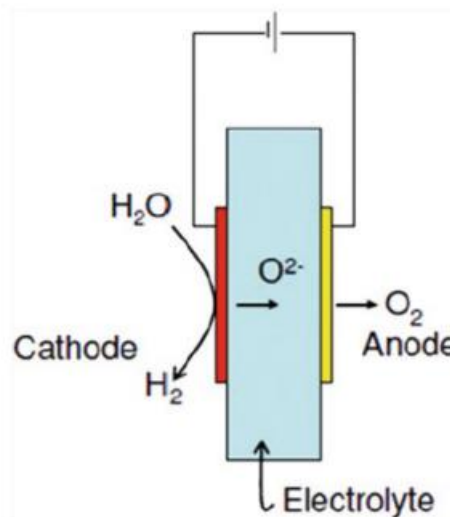


Obrázek 21 - Schéma elektrolyzérů s pevným polymerním elektrolytem [18]

Oproti AEL je možné používat vyšší proudové hustoty od $0,5\text{ Acm}^{-2}$ až po 2 Acm^{-2} . Produkované plyny mají tak vysokou čistotu, že je většinou není nutné již dále čistit. PEMEL je vhodná pro flexibilní výrobu vodíku při využití elektrické energie z kolísavých obnovitelných zdrojů, poněvadž zvládá velmi rychlé dynamické změny zatížení. V minulosti byla PEMEL využívána ve srovnání s AEL pro menší výkony. V poslední době ale dochází k vývoji a postupně i ke komerční dostupnosti PEMEL modulů s vyššími výkony. PEMEL dosahuje účinnosti až 80% . [1][12]

2.5.3 SOEL (elektrolýza s tuhými oxidy)

Elektrolyzéry s tuhým oxidem jako elektrolytem pracují za vysokých teplot mezi 700 °C a 1 000 °C. Takto vysoké provozní teploty dovolují použít levnější materiál jako katalyzátor. Běžně se používá nikl. S rostoucí provozní teplotou roste i podíl energie dodávané ve formě tepla, což má za důsledek sníženou spotřebu elektrické energie. Materiálem elektrolytu může být stejně jako u SOFC oxid zirkoničitý stabilizovaný oxidem yttritým, který za vysokých teplot vede O^{2-} a přitom plní i funkci separátoru (Obrázek 22). Voda do článku je kvůli vysokým teplotám dodávána ve formě páry. V dodávaném plynu je možné využít i CO_2 , redukovat jej na CO a vytvářet tak vodní plyn. [1][12]



Obrázek 22 - Schéma vysokoteplotního elektrolyzérů s tuhým oxidem [18]

SOEL je stále ve vývoji a zatím není dostupná ke komerčnímu použití. Jedná se o velmi slibnou technologii pro výrobu vodíku ve větším měřítku. Elektrolyzéry s tuhými oxidy vykazují účinnost až 85 %. V závislosti na konstrukci elektrolyzérů se provozní proudová hustota pohybuje mezi $0,2 \text{ Acm}^{-2}$ až 2 Acm^{-2} . Nevýhody jsou podobné jako u SOFC. [1][12]

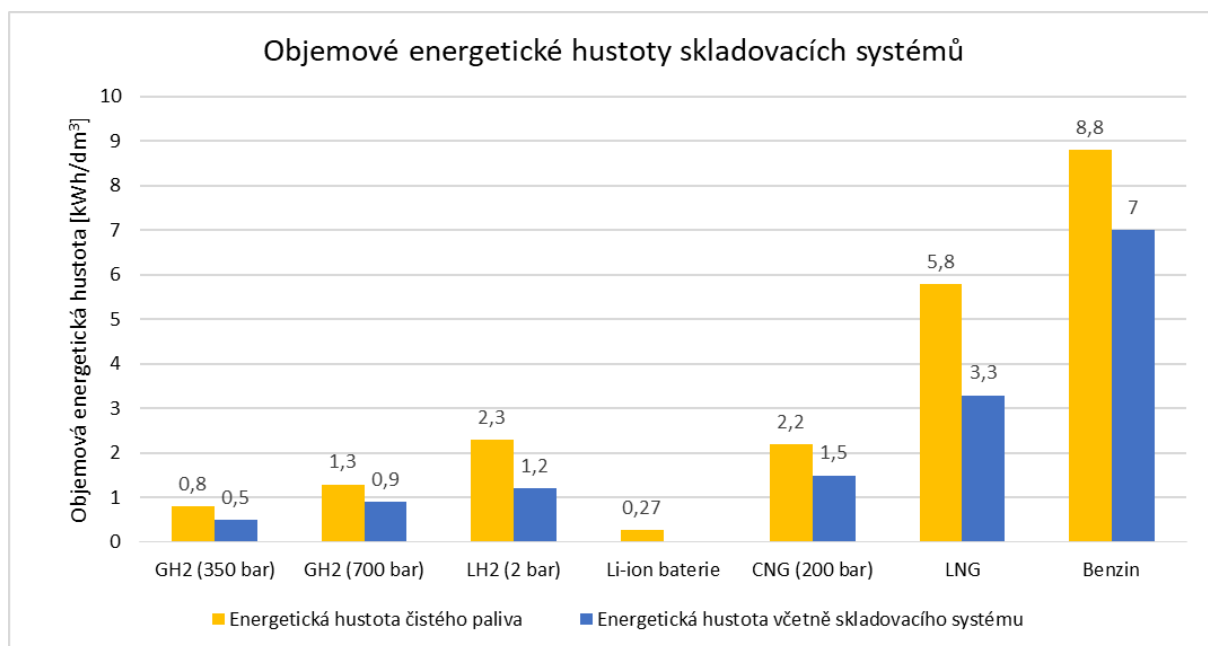
3 Skladování a doprava vodíku

Vodík je pro své vlastnosti, zejména nízkou hustotu (Tabulka 5), technicky a finančně poměrně náročné skladovat a dopravovat. Dnes se běžně využívají dvě metody pro jeho skladování a dopravu. První metodou je skladovat a distribuovat stlačený plyný vodík (GH2). Druhou metodou je vodík skladovat a dopravovat v kapalném skupenství (LH2) při teplotách menších než -252,8 °C. [1][12]

Vodík	Tlak	Teplota	Hustota	obsah energie	obsah energie
	[bar]	[°C]	[kg/m ³]	[MJ]	[kWh]
1 kg	1	25	0,08	120	33,3
1 Nm ³	1	25	0,08	10,7	3,0
1 m ³ GH2	200	25	14,5	1685	468
1 m ³ GH2	350	25	23,3	2630	731
1 m ³ GH2	700	25	39,3	4276	1188
1 m ³ GH2	900	25	46,3	4691	1303
1 m ³ LH2	1	-253	70,8	8495	2360

Tabulka 5 - Hustota a obsah energie vodíku v různých skupenstvích [1]

Energetická hustota LH2 při dnes obvyklém rozsahu pracovních tlaků 2 bary až 4 bary je o minimálně 50 % větší než energetická hustota GH2 při 700 barech. Bez zahrnutí skladovacího systému je možné dosáhnout energetické hustoty až 2,3 kWh/dm³ pro skladování LH2 při tlaku 2 bary a 1,3 kWh/dm³ pro skladování GH2 při běžné teplotě a tlaku 700 barů (Obrázek 23). [1][12]



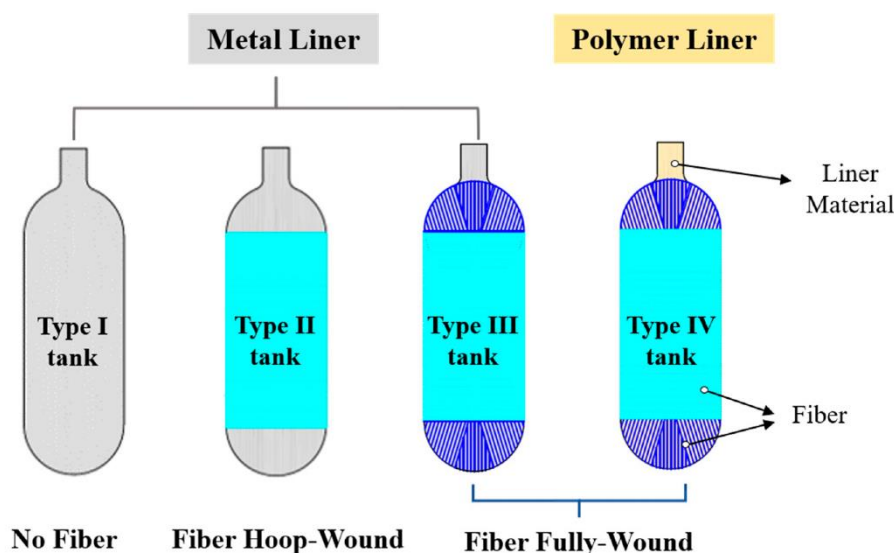
Obrázek 23 - Objemové energetické hustoty skladovacích systémů [1]

GH2 se v dnešní době nejčastěji skladuje ve vodíkových vozidlech při tlaku 350 barů nebo 700 barů. Stlačený GH2 na 350 barů se využívá zejména v menších vozidlech jako jsou vysokozdvížné vozíky a jiná průmyslová vozidla určená pro přepravu nákladu na krátkou vzdálenost. Tlak 700 barů je celosvětovým standardem pro běžná vozidla s palivovými články. Stlačený GH2 lze skladovat v uzavřeném skladovacím systému dlouhodobě beze ztrát. Ke stlačení GH2 je potřeba energie odpovídající přibližně 15 % jeho výhřevnosti. V praxi stlačený GH2 poskytuje přijatelnou hustotu energie za přiměřené náklady. [1][12]

Zásobníky na LH2 s vakuovou izolací obvykle nejsou vybaveny aktivním chlazením. Nevyhnutelné ohřívání zásobníku způsobuje var v něm uskladněného LH2, což má za následek zvýšení tlaku v zásobníku a následné odvětrání při dosažení limitního tlaku. Tento proces vede ke ztrátám v rozsahu 0,3 % až 3 % LH2 denně. Vodík vypouštěný do okolí může být bezpečnostním rizikem. Energie potřebná ke zkapalnění vodíku je asi 20 % až 30 % jeho výhřevnosti. Všechny součásti skladovacích a distribučních systémů (např. potrubí, spojky nebo ventily) pro LH2 musí být vakuově izolovány, aby nedocházelo k vysokým ztrátám LH2 a jsou proto poměrně složité a drahé. LH2 se využívá ve vozidlech, od kterých je vyžadován vysoký dojezd nebo pro distribuci velkého množství vodíku z centralizované výroby. [1][12]

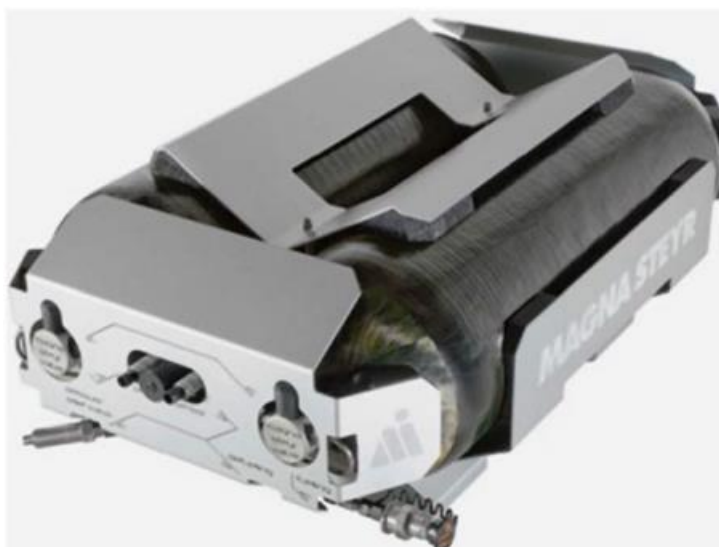
3.1 Skladování plynného vodíku

Skladování stlačených plynů v tlakových nádobách je osvědčenou technologií. Na tlakové nádoby jsou kladeny vysoké požadavky, a to hlavně z hlediska jejich bezpečnosti. Kulové a válcové tlakové nádoby jsou výhodné kvůli příznivému rozložení napětí. Nevýhodou kulových nádob je však jejich nákladná výroba, a proto jsou v praxi častěji využívány nádoby válcové. Vodík má tendenci difundovat do kovů nebo skrz ně, což vede k jejich křehnutí. Vhodnými materiály pro GH2 tlakové nádoby jsou např. austenitická ocel, hliníkové slitiny nebo kompozity. [1][12]



Obrázek 24 - Typy tlakových nádob pro skladování plynného vodíku [19]

Tlakové nádoby pro skladování GH2 se dělí na čtyři typy (Obrázek 24). Typ 1 je tlaková nádoba vyrobená z kovu, nejčastěji z chrom-molybdenové oceli. Tyto tlakové nádoby jsou ale příliš těžké pro mobilní aplikace, a tak se v posledních letech častěji používají kompozitní tlakové nádoby. Tyto nádoby mají vložku, která zaručuje těsnost nádoby. Tlakové nádoby typu 2 mají kovovou vložku (ocel nebo hliník) částečně obalenou kompozitním materiálem, jenž dodává nádobě její pevnost. U tlakových nádob typu 3 je kovová vložka kompletně obalena kompozitním materiálem pro vyšší pevnost. Tlakové nádoby typu 4 mají vložku polymerní místo kovové, a ta je kompletně obalena kompozitem. Ve vozidlech se používají pro svou nízkou hmotnost a dobrou pevnost tlakové nádoby typu 3 a 4 (Obrázek 25), které jsou ale kvůli využití kompozitu poměrně drahé. [1][12]



Obrázek 25 - Tlaková nádoba pro skladování vodíku v automobilu při 700 barech [1]

Plnění tlakové nádoby by mělo proběhnout co možná nejrychleji. Při plnění tlakových nádob stlačeným GH2 dochází k zahřívání jak GH2 v nádobě, tak následně i samotné nádoby. Po dokončení plnění a ochlazení tlakové nádoby na teplotu okolí klesne tlak v nádobě pod jmenovitý tlak. Kvůli tomu se v nádobě uskladní méně GH2. Těmto ztrátám při skladování lze předcházet buď plněním nádoby na vyšší tlak nebo aktivním chlazením plnicího plynu např. kapalným dusíkem. [1][11]

3.2 Doprava plynného vodíku

Doprava GH2 v dnešní době obvykle probíhá v tlakových nádobách nákladními automobily, vlaky či loděmi. Pro přepravu velkého množství GH2 je neekonomičtější řešením využití potrubí. Potrubí pro dopravu vodíku je obvykle z nízkouhlíkové oceli, která není náchylná na vodíkovou křehkost. Tlak v potrubí je nejčastěji mezi 40 bary a 70 bary a průměry potrubí se pohybují mezi 10 mm a 300 mm. Vyšších tlaků je možné dosáhnout použitím dražší austenitické oceli. Nebezpečí v důsledku úniku GH2 z potrubí je v otevřených prostorech velmi malé, jelikož se GH2 velmi rychle rozptýlí a netvoří oblaka. Do budoucna se slibně jeví vlákna vyztužené polymerní potrubí (FRP). FRP by mohlo být provozováno při tlacích až 250 barů. Náklady na instalaci FRP jsou přitom nižší než u ocelových potrubí. [1][11]

GH2 může být také dopravován již stávajícím potrubím pro zemní plyn. To ale není k provozu s GH2 uzpůsobeno materiálově a může tedy docházet k jeho křehnutí. Také nízká účinnost kompresorových stanic pro zemní plyn omezuje použití GH2. Přeprava směsí vodíku s metanem (obsah vodíku okolo 15 % obj.) by vyžadovala pouze menší úpravy stávajícího potrubí. Pro dopravu čistého GH2 by byly vyžadovány podstatnější úpravy. [1][11]

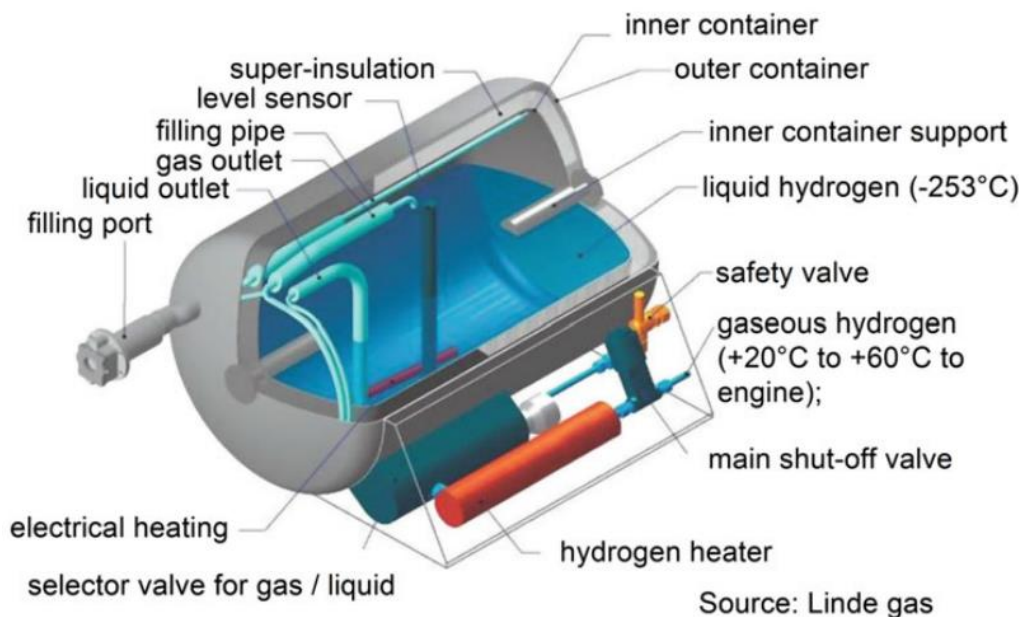
Vodíkové čerpací stanice jsou podobné jako čerpací stanice zemního plynu (Obrázek 26). Palivo na čerpacích stanicích je uloženo ve velkých tlakových nádobách při tlacích okolo 40 barů. GH2 z těchto nádob je následně stlačen na vysoké tlaky a dočasně uskladněn ve vysokotlakých nádobách a z nich je dodáván do vozidel prostřednictvím výdejního stojanu. Samotné plnění vozidla GH2 proběhne během několika málo minut. [1][11]



Obrázek 26 - Výdejní stojan vodíkové čerpací stanice [1]

3.3 Skladování kapalného vodíku

LH2 musí být skladován při teplotách menších než je $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, což jeho skladování poněkud komplikuje. Kryogenní zásobník LH2 se skládá z vnitřní a vnější nádrže, mezi nimi je vakuum pro tepelnou izolaci. Materiálem nádrží je obvykle austenitická ocel, která si zachovává svou deformační kapacitu i při velmi nízkých teplotách a nestává se křehkou. Prostor mezi nádržemi obsahuje vícevrstvou izolaci, aby se omezil přenos tepla sáláním (Obrázek 27). K přenosu tepla vedením dochází v místech, kde se obě nádrže dotýkají, těmi jsou například distanční vložky nebo místa plnění či odběru LH2. Tento nevyhnutelný přívod tepla způsobuje odpařování uskladněného LH2, kvůli čemuž se zvyšuje v zásobníku teplota a tlak. Proto musí být zásobníky na LH2 vybaveny systémem odvětrávání. V případě potřeby je možné ze zásobníku odebrat GH2 přivedením tepla a ohřátím zásobníku. U vozidel může být toto zajištěno přesměrováním chladicího okruhu motoru nebo elektrickým topením. [1][11]



Obrázek 27 - Schéma zásobníku na kapalný vodík [1]

Koule je nejvhodnějším tvarem pro zásobník na LH2, jelikož má nejmenší poměr plochy k objemu. Díky tomu je možný přenos tepla z vnějšího prostředí nejnižší. Kromě toho, že kulové zásobníky jsou náročné na výrobu, tak při jen částečně plném zásobníku je volný povrch kapaliny větší než u válce. V praxi je proto početnější zastoupení válcových zásobníků na LH2. [1][11]

3.4 Doprava kapalného vodíku

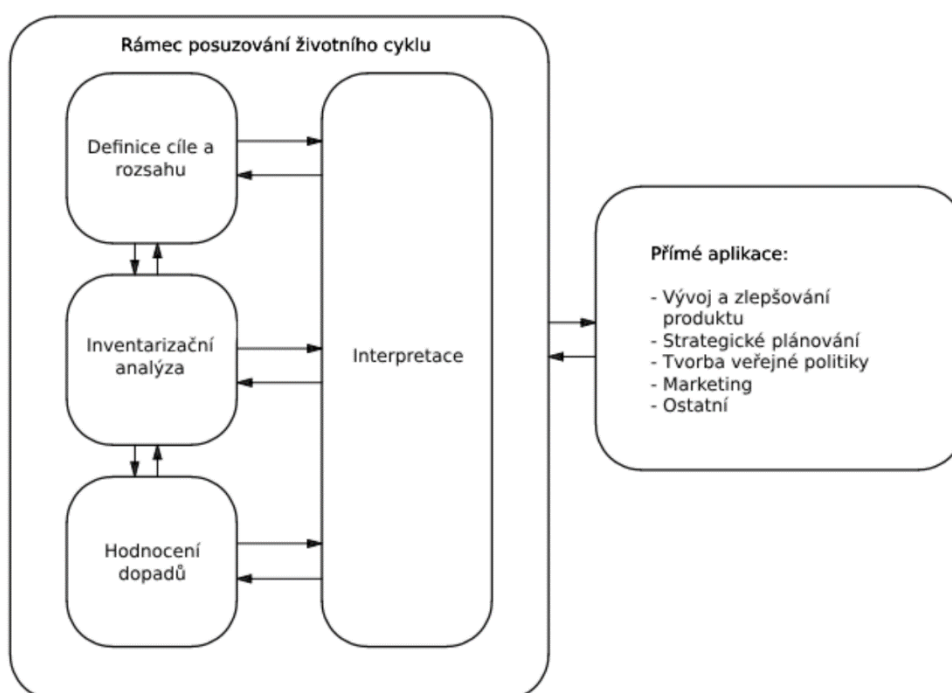
LH2 má mnohem vyšší hustotu než GH2. Doprava LH2 je oproti GH2 více než šestkrát účinnější ve smyslu hmotnostní kapacity. LH2 je dopravován hlavně v zásobnících nákladními automobily a vlaky. Velmi moderní je přeprava LH2 ve 12 m kontejnerech. [1][11]

Jak je již uvedeno výše, všechny součásti systémů pro dopravu LH2 musí být vakuově izolovány. V místech nedostatečné izolace vznikají studené můstky, které se projevují kondenzací vody z okolního vzduchu a následně tvorbou ledu. Pokud by izolace chyběla, tak může docházet k lokálnímu zkapalnění vzduchu. Součásti, které se dostávají do styku s vodíkem, musí být vyrobeny z vhodných materiálů např. z austenitické oceli. Před naplněním nesmí být v systému přítomný vzduch. Zásobníky a potrubí jsou před naplněním proto propláchnuty heliem. [1][11]

4 Metoda LCA

Analytická metoda life cycle assessment (LCA) neboli posuzování životního cyklu je definována mezinárodními normami ISO 14040 a ISO 14044. Pomocí LCA lze hodnotit dopady daného produktu na životní prostředí po celý jeho životní cyklus, tedy od získání surovin a zdrojů až po konečnou likvidaci, tyto fáze se někdy souhrnně označují C2G (od kolébky do hrobu). LCA je kvantitativní metodou a bývá využívána pro porovnání jednotlivých produktů mezi sebou nebo jednotlivých fází životního cyklu daného produktu. Výsledky LCA analýzy mohou být velice důležitým nástrojem pro rozhodování. LCA analýza se většinou nezabývá ekonomickými nebo sociálními aspekty, ale není to pravidlem. [20][21][22][23]

LCA analýza má dle norem ISO čtyři fáze. První je definice cíle a rozsahu, kterou následuje inventarizační analýza, další je hodnocení dopadů a poslední je interpretace výsledků. Tyto fáze jsou iterativní, jak naznačují obousměrné šipky (Obrázek 28) a změny v každé iteraci musí být důkladně popsány. [20][21][23][24]



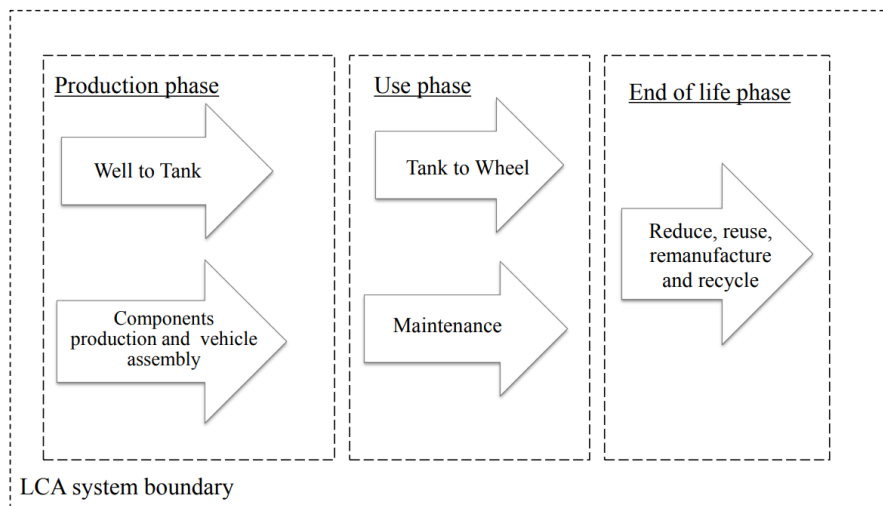
Obrázek 28 - Rámec LCA [20]

4.1 Definice cíle a rozsahu

LCA analýza začíná definováním jejího cíle. Pro úplnou definici cíle je nutné uvést zamýšlené použití a publikum, důvody pro provedení studie a zda jsou výsledky určeny k veřejnému srovnávání produktů. [20][22][25]

Pro efektivní provedení analýzy je nutné stanovit odpovídající rozsah analýzy. Součástí stanovení rozsahu je kromě jiného určení produktového systému a jeho funkce, funkční jednotky, referenčního toku, hranice systému, metodiky hodnocení dopadů a kategorií dopadu. Je také třeba uvést požadavky na kvalitu dat i předpoklady a omezení analýzy. [20][21][25]

Kompletní LCA analýza vozidla by měla zahrnovat jak životní cyklus vozidla, tak i životního cyklus jeho paliva (Obrázek 29). Životní cyklus vozidla se skládá z výroby, provozu (údržby) a likvidace vozidla. Všechny fáze životního cyklu paliva se často souhrnně označují jako WTW (od zdroje ke kolům). WTW se zpravidla dělí na dvě části, a to WTT (od zdroje do nádrže) a TTW (od nádrže ke kolům). WTT zahrnuje fáze získávání surovin, výroby paliva a jeho přepravy. TTW zahrnuje fázi použití paliva ve vozidle. [26]



Obrázek 29 - Schéma rozsahu kompletní LCA analýzy vozidla [26]

4.1.1 Produktový systém a jeho funkce

Produktový systém je soubor všech procesů, které se podílí na jednotlivých fázích životního cyklu produktu. V LCA je produktový systém složen z procesů a toků. Procesy jsou sledy operací, při kterých dochází ke změně vstupů na výstupy a toky spojují tyto procesy. Tok je vstupem do daného procesu a zároveň výstupem procesu předcházejícího. [20][21][25]

Produktový systém plní jednu či více definovaných funkcí. Pokud plní produktový systém funkcí více, je nutné určit jednu z funkcí jako primární. Zbylé funkce se označují jako sekundární. Primární funkce je společná pro různé alternativy, zatímco sekundární funkce jsou specifické pro každý scénář a pokud se mezi alternativami výrazně liší, tak mohou zkruslit jejich srovnání. Např. u vozidel je primární funkce přeprava osob či materiálu a sekundární ochrana osob či materiálu při nárazu. [20][21][25]

4.1.2 Funkční jednotka

Jakmile je určena funkce produktového systému, tak je možné definovat funkční jednotku. Funkční jednotka je kvantifikovaná funkce produktu. Funkční jednotka musí být měřitelná a aditivní. Různé produkty je možné porovnávat pouze na základě společné funkce, a tudíž i funkční jednotky. U vozidel může být funkční jednotkou např. jeden ujetý kilometr. [20][21][23][25]

4.1.3 Referenční tok

Referenční tok je množství produktu potřebné k naplnění funkce vyjádřené funkční jednotkou. Referenční tok musí být tak jako funkční jednotka měřitelný. [20][21][23][25]

4.1.4 Hranice systému

Hranice systému určuje, jaké konkrétní procesy budou v produktovém systému zahrnuty. V ideálním případě jsou v produktovém systému zahrnuty všechny procesy a fáze životního cyklu produktu. Pro zjednodušení provedení LCA analýzy lze vynechat pouze procesy či fáze, které nemají významný vliv na závěry LCA analýzy. Vynechání jednotlivých procesů nebo fází musí být uvedeno a vysvětleno. Volba hranice systému musí být v souladu s již definovaným cílem analýzy. [20][21][23][25]

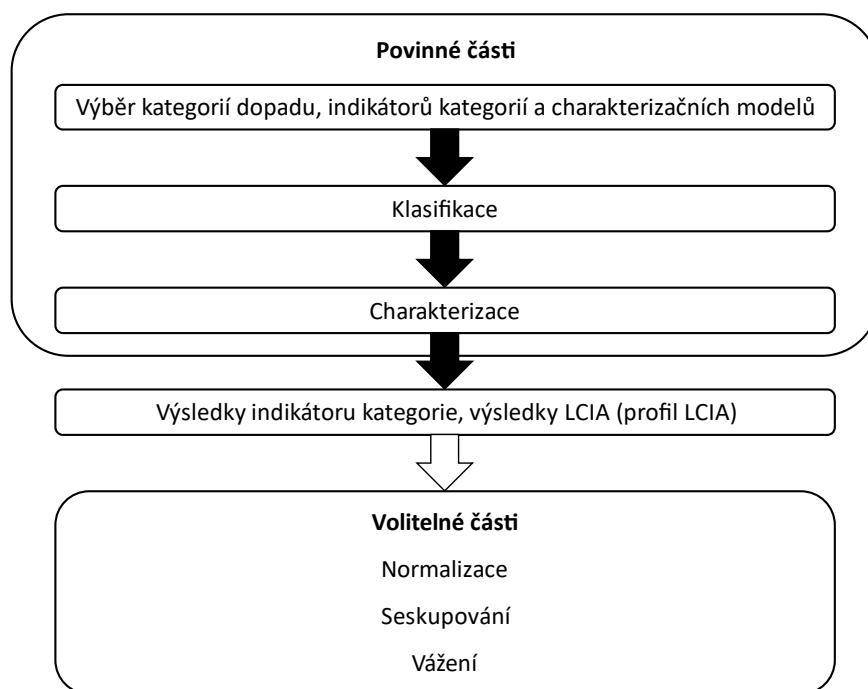
4.2 Inventarizace

Tato fáze LCA analýzy je často označována zkratkou LCI (life cycle inventory) a dochází při ní k shromažďování dat o energetických a materiálových tocích všech procesů v produktovém systému. Výsledkem inventarizace je kvantifikace elementárních toků neboli vstupů a výstupů produktového systému a jejich zápis do inventarizační tabulky. Vstupy jsou např. materiály, zdroje, polotovary nebo jiné produkty a výstupy mohou být např. emise a odpad. [20][21][24][25]

Inventarizace je náročná na dostupnost kvalitních dat, a tak se často vzhledem ke komplexnosti produktového systému opírá o generická data pro mnoho procesů. Tato data často pocházejí z databází s jednotkovými procesy. Jednotkový proces je proces, který již není dělen na podprocesy. [21][24]

4.3 Hodnocení dopadů

V této fázi LCA analýzy, která bývá označována zkratkou LCIA (life cycle impact assesment), je vyhodnocována významnost potenciálních dopadů na životní prostředí. Tento proces má dle ISO tři povinné části (Obrázek 30). [20][25]



Obrázek 30 - Schéma fáze hodnocení dopadů [20]

První z nich je výběr kategorií dopadu. Kategorie dopadu představuje určitý problém životního prostředí, na kterém se podílí lidská činnost. Problémem životního prostředí je např. globální oteplování, acidifikace, ekotoxicita atp. Kategorie dopadu jsou využívány pro porovnání, na jakých problémech se analyzované produkty podílejí více či méně. [20][21][25]

Pro každou kategorii dopadu je vhodně zvolen její indikátor spolu s charakterizačním modelem, jenž lze použít ke kvantifikaci dopadu elementárních toků na indikátor. [20][21][24][25]

Poté je provedena klasifikace, tedy přiřazení elementárních toků z inventarizační analýzy k jednotlivým kategoriím dopadu dle jejich schopnosti ovlivnit zvolené indikátory jednotlivých kategorií. Další povinnou částí je charakterizace, při které dochází za pomoci charakterizačních modelů k vyčíslení schopnosti každého z přiřazených elementárních toků ovlivnit indikátor dané kategorie. Výsledné hodnoty jsou vyčísleny ve společné jednotce pro každý indikátor kategorie dopadu. Takové hodnoty je možné sloučit do jednoho výsledku, jenž představuje celkový dopad produktového systému na danou kategorii dopadu. [20][21][24][25]

Např. pro kategorii dopadu globální oteplování je indikátorem potenciál globálního oteplování (GWP). GWP umožňuje porovnávat různé skleníkové plyny na základě jejich schopnosti způsobit oteplování v porovnání s CO₂. GWP má proto jednotku CO_{2eq}. [21]

Soubor výsledků indikátorů pro různé kategorie dopadu tvoří charakterizační profil dopadu produktového systému. [20][21][25]

Na charakterizaci navazují volitelné části (Obrázek 30). První z nich je normalizace, při které je vyjádřena relativní míra zasažení kategorií dopadu vzhledem k referenci. Výstupem normalizace je normalizovaný profil dopadu, ve kterém jsou všechny výsledky indikátorů kategorií dopadu vyjádřeny shodnou jednotkou. Dalšími volitelnými částmi jsou vážení a seskupování, při kterých se jednotlivé kategorie dopadu seskupují a řadí dle vnímané závažnosti. Kvantitativním vážením je možné dosáhnout agregací všech vážených výsledků dopadu jedné výsledné hodnoty dopadu produktového systému na životní prostředí, což může být užitečné při rozhodování v informacemi přehlceném prostředí. [20][21][24][25]

4.4 Interpretace

V poslední fázi LCA analýzy jsou interpretovány zjištění z přechozích fází společně. Dochází k identifikaci nejdůležitějších problémů z hlediska životního prostředí tzv. významných zjištění, které mají potenciál změnit konečné výsledky LCA analýzy. Součástí interpretace bývají i analýzy citlivosti a nejistoty. Tyto analýzy napomáhají k vypracování závěrů z výsledků a také k posouzení jejich spolehlivosti. Interpretace by měla srozumitelně a přehledně prezentovat výsledky, které jsou v souladu s definovaným cílem a rozsahem a které vedou k závěrům, vysvětlují omezení a poskytují doporučení. [20][21][24][25]

5 Dostupné LCA analýzy vodíkových vozidel

Pro vypracování této práce bylo shromážděno přibližně dvacet dostupných LCA analýz zaměřených na problematiku použití vodíku jako pohonu v dopravních prostředcích. Tyto studie byly analyzovány. Některé z nich nebyly dostatečně relevantní k tématu životního cyklu vodíkových vozidel, a proto nemohly být v této práci použity. Z relevantních LCA analýz bylo vybráno osm nejvíce reprezentativních studií, které byly blíže analyzovány a srovnávány. Pro vhodnost jejich srovnání byla uvažována například: funkční jednotka, rozsah, šíře zpracování, přehlednost a geografické zaměření analýzy. Vybrané LCA analýzy vodíkových vozidel jsou v této kapitole představeny a jejich výsledky shrnuty a následně porovnávány mezi sebou. Součástí této kapitoly je i diskuse zjištěných poznatků.

5.1 Přehled LCA analýz

Přehled vybraných LCA analýz seřazený dle roku vydání je v tab. 6 níže. Nejstarší analýza byla vydána v roce 2011 a nejnovější analýzy byly vydány v roce 2022. Všechny vybrané LCA analýzy vodíkových vozidel mají shodnou funkční jednotku 1 ujetý kilometr, tak aby bylo možné je porovnat.

Pořadí	Rok vydání	Autor	Funkční jedn.	Cíl	Rozsah	Typy vozidel	Zdroj
1	2011	Baptista et al.	1 ujetý km	Porovnání spotřeby energie a emisí CO ₂ různých technologií vozidel a paliv pro londýnské taxi.	WTW, výroba, provoz a likvidace vozidla	ICE Diesel, PHEV-FC, HEV-FC, EV	[27]
2	2015	Bauer et al.	1 ujetý km	Porovnání dopadů životního cyklu současných a budoucích osobních automobilů střední třídy provozovaných ve Švýcarsku s různými typy pohonů a paliv.	WTW, výroba, provoz a likvidace vozidla i výroba a údržba silniční infrastruktury	ICEV, HEV, BEV, FCV	[28]
3	2015	Miotti et al.	1 ujetý km	Analýza dopadů a nákladů životního cyklu systému palivového článku a různých druhů vozidel včetně jejich porovnání.	WTW, výroba, provoz a likvidace vozidla i výroba a údržba silniční infrastruktury	FCV, BEV, ICEV Petrol	[29]
4	2016	Evangelisti et al.	1 ujetý km	Porovnání dopadů životního cyklu různých technologií vozidel s důrazem na jejich výrobu.	Výroba, provoz a likvidace vozidla	FCV, BEV, ICEV Diesel	[30]
5	2020	Benitez et al.	1 ujetý km	Hodnocení dopadů životního cyklu FCEV se speciálním zaměřením na výrobu tlakové nádoby z uhlíkových vláken.	Výroba, provoz a likvidace vozidla	FCV	[31]
6	2021	Candelaresi et al.	1 ujetý km	Hodnocení dopadu životního cyklu různě poháněných vodíkových vozidel a jejich porovnání s vozidly na stlačený zemní plyn a s vozidly spalujícími směsí vodíku a benzínu.	WTW, výroba a provoz vozidla	FCEV, H ₂ -ICE, HEV H ₂ -ICE, CNG, HEV CNG, Hythane, H ₂ -Gasoline	[32]
7	2022	Ahmadi et Khoshnevisan	1 ujetý km	Hodnocení životního cyklu vodíkového vozidla s přihlédnutím k degradaci palivového článku a porovnání produkovaných emisí při využití vodíku z různých výrobních procesů. Následné porovnání výsledků s benzinovým vozidlem.	WTW, Výroba a provoz vozidla	FCV, Gasoline	[33]
8	2022	Candelaresi et al.	1 ujetý km	Porovnání dopadů životního cyklu flotil osobních automobilů, které používají vodík a fosilní paliva samostatně (v různých vozidlech) nebo ve směsi (ve stejném vozidle).	WTW, výroba a provoz vozidla	FCEV, CNG, HEV CNG, Hythane, HEV Hythane, Gasoline, HEV Gasoline, H ₂ -Gasoline, HEV H ₂ -Gasoline	[34]

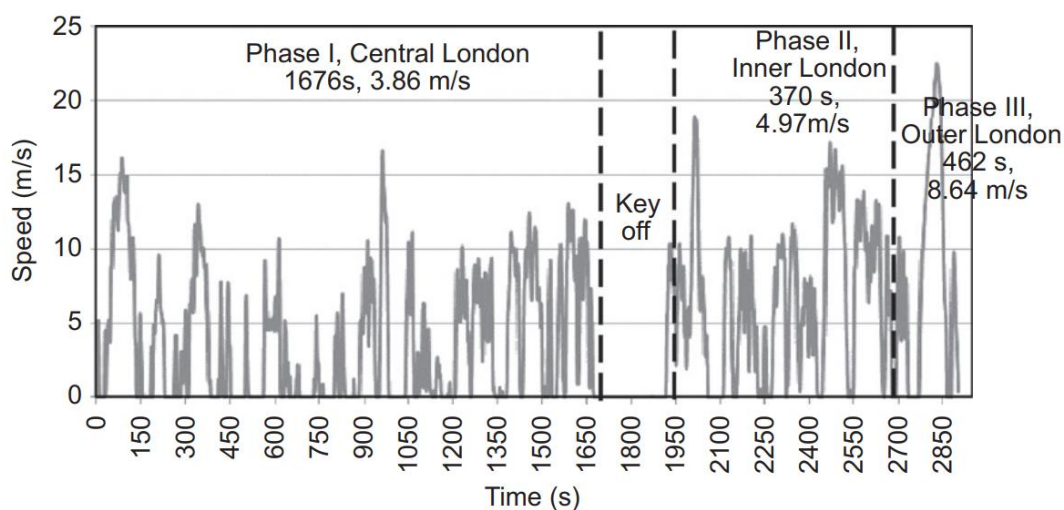
Tabulka 6 - Seznam vybraných LCA analýz

5.2 Shrnutí LCA analýz

V této části jsou vybrané LCA analýzy blíže představeny a jejich výsledky shrnuty. Zdůrazněny jsou také klíčové předpoklady jednotlivých analýz.

5.2.1 LCA analýza 1 - Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis (Baptista et al., 2011)

Tato analýza vznikla před letní olympiádou v roce 2012, pro kterou byla připravována k předvedení malá flotila vodíkových taxi s palivovými články. Cílem analýzy bylo porovnat spotřebu energie a emise CO₂ různých technologií vozidel a paliv pro klasické londýnské taxi. V této analýze byly uvažovány fáze životního cyklu paliva i vozidla well to tank (WTT), tank to wheel (TTW) a výroba, provoz a likvidace vozidla (C2G) pro různé způsoby výroby elektřiny, nafty a vodíku. Pro porovnání jednotlivých vozidel taxi byl využit jízdní cyklus PCO-CENEX London Taxi (Obrázek 31) reprezentující typické jízdní podmínky vozidel taxi v hlavním městě Velké Británie. [27]



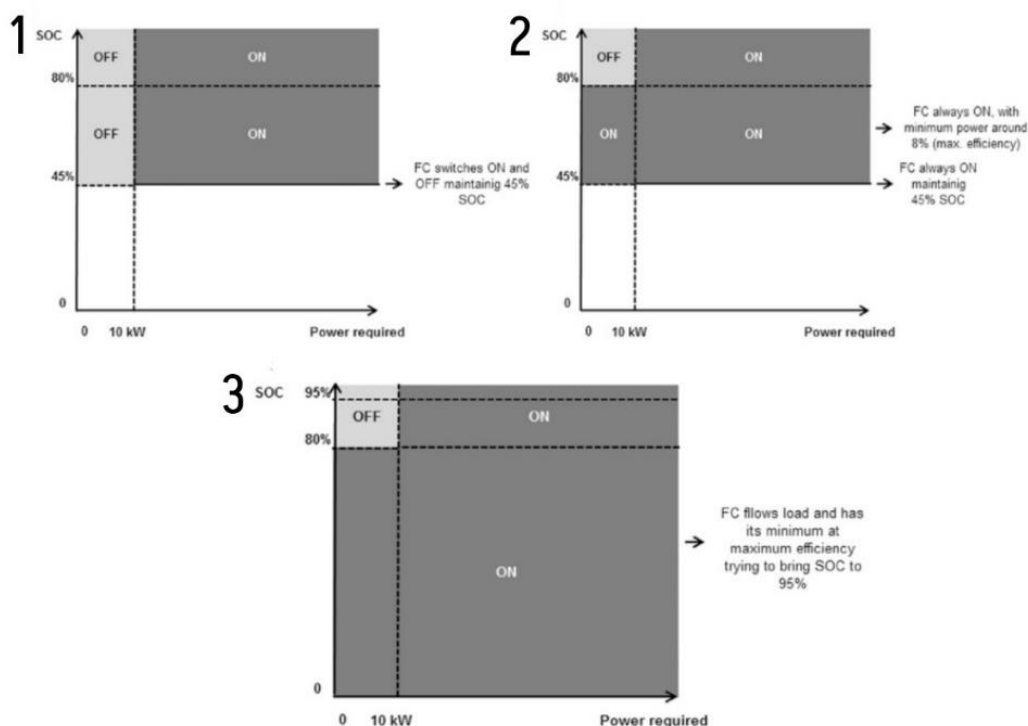
Obrázek 31 - Rychlostní profil PCO-CENEX London Taxi [27]

Porovnávány byly celkem čtyři technologie vozidel, a to vozidlo s naftovým spalovacím motorem (ICE diesel), vodíkový plug-in hybrid (PHEV-FC), vodíkový hybrid (HEV-FC) a plně elektrické vozidlo (EV). Vodíková vozidla (PHEV-FC a HEV-FC) využívala jako primární zdroj energie palivový článek. [27]

Vehicle	Data
Frontal area (m ²)	2.78
Drag coefficient	0.46
Tire rolling radius (m)	0.325
Rolling coefficient	0.014 (Bosch, 2007)
Accessory power (W)	1000
ICE Diesel Taxi	
Weight (kg)	1895
ICE engine	
Peak power (kW) @rpm	75 kW @ 4000 rpm
Maximum torque [N.m] @rpm	240 Nm @ 1800 rpm
Peak efficiency %	41
Transmission	Gear ratios: 3.00, 1.67, 1.0, 0.75, 0.67 final drive 4.1
Fuel cell Taxi	
Weight (kg)	2060
Hydrogen storage (kg)	3.73
Storage pressure (MPa)	35
Fuel cell	
Peak power (kW)	32
Limit of response (W/s)	± 10,000
Peak efficiency	61.6% @ 2.7 kW
Brushless PM Motor/Generator	
Peak power	100 kW @ 2000–4500 rpm
Motor continuous (kW)	100
Maximum Torque	550 Nm @ 0–1500 rpm
Peak efficiency (%)	92.5
Inverter/Controller (coupled)	
Standby power consumption (kW)	17
Peak efficiency (%)	97
Li-polymer battery	
N ^{er} of modules	95
Capacity per module (Ah)	40
Nominal voltage per module (V)	3.7
Energy density (Wh/kg)	148
Coulombic efficiency	0.98

Tabulka 7 - Specifikace analyzovaných typů vozidel taxi [27]

Specifikace analyzovaných typů vozidel jsou uvedené v tab. 7 V ní si lze všimnout zejména poměrně nízkého maximálního výkonu palivového článku a to pouhých 32 kW. V tabulce není uvedena kapacita baterie a hmotnost EV. Kapacita baterie EV je uvažována 155,9 kWh, což se může zdát jako poměrně vysoká hodnota. Hmotnost celého EV je ze všech typů vozidel v analýze nejvyšší hlavně kvůli velké baterii a dosahuje 2 834 kg. Životnost vozidla taxi byla zvolena 563 250 km. Autoři uvažovali, že vozidlo taxi ročně ujede 90 000 km s průměrnou obsazeností 1,48 pasažéra. Pro analýzu údržby vozidla byly zvoleny intervaly výměny několika komponent. Palivový článek by měl dle této analýzy životnost v průměru 11 220 h minimálně však 8 415 h. Autoři analýzy také analyzovali tři strategie vybíjení baterie u vodíkových vozidel (Obrázek 32). [27]



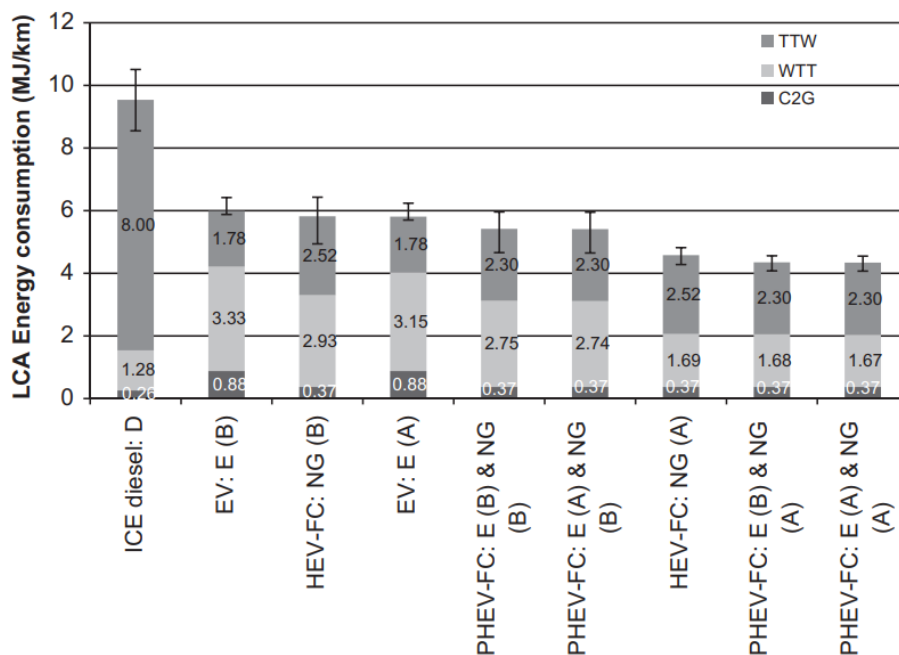
Obrázek 32 - Analyzované vybíjecí strategie vodíkových vozidel taxi [27]

Výrobním procesem vodíku bylo v této analýze zvoleno parní reformování zemního plynu. Uvažovány byly dva způsoby dopravy vodíku (Tabulka 8). První způsob (značen NG (A)) zahrnoval dopravu plyného vodíku k čerpací stanici potrubím dlouhým přibližně 50 km. Druhý způsob (značen NG (B)) se vyznačovala dopravou kapalného vodíku k čerpací stanici nákladním automobilem. Data pro analýzu výroby elektřiny pocházela z Velké Británie (značena E (A)) nebo z celé Evropy (značena E (B)). Pro analýzu výroby nafty byla využita pouze evropská data. [27]

Fuel	Pathways designation	Process	Energy (MJ _{ex} /MJ _{fuel})	CO ₂ (g/MJ _{fuel})
Diesel [17]	D	Extraction & Processing	0.03	3.7
		Transport	0.01	0.9
		Refining	0.10	8.6
		Distribution & dispensing	0.02	1.0
		Total pathway	0.16 (0.14–0.18)	14.2 (12.6–16.0)
Electricity UK	E (A)	UK-mix power generation	1.69	149.4
		Distribution	0.08	0
		Total pathway	1.77	149.4
Electricity EU	E (B)	UK-mix power generation	1.84	120.8
		Distribution	0.03	0
		Total pathway	1.87	120.8
Gaseous hydrogen	NG (A)	Extraction & Processing	0.04	1.6
		Transport 1000–4000 km pipeline	0.08	4.0
		Distribution	0.01	0.7
		Central reforming	0.32	73.7
		Gaseous H ₂ distribution & compression	0.22	8.5
		Total pathway	0.67 (0.62–0.71)	88.7 (85.0–91.9)
Liquid hydrogen	NG (B)	Extraction & Processing	0.04	1.6
		Transport 1000–4000 km pipeline	0.08	4.0
		Distribution	0.01	0.7
		Central reforming	0.32	73.7
		H ₂ Liquefaction	0.67	37.4
		Liquid H ₂ distribution & delivery	0.04	2.8
		Extraction & processing	0.04	1.6
		Total pathway	1.16 (0.88–1.35)	120.4 (91.1–139.4)

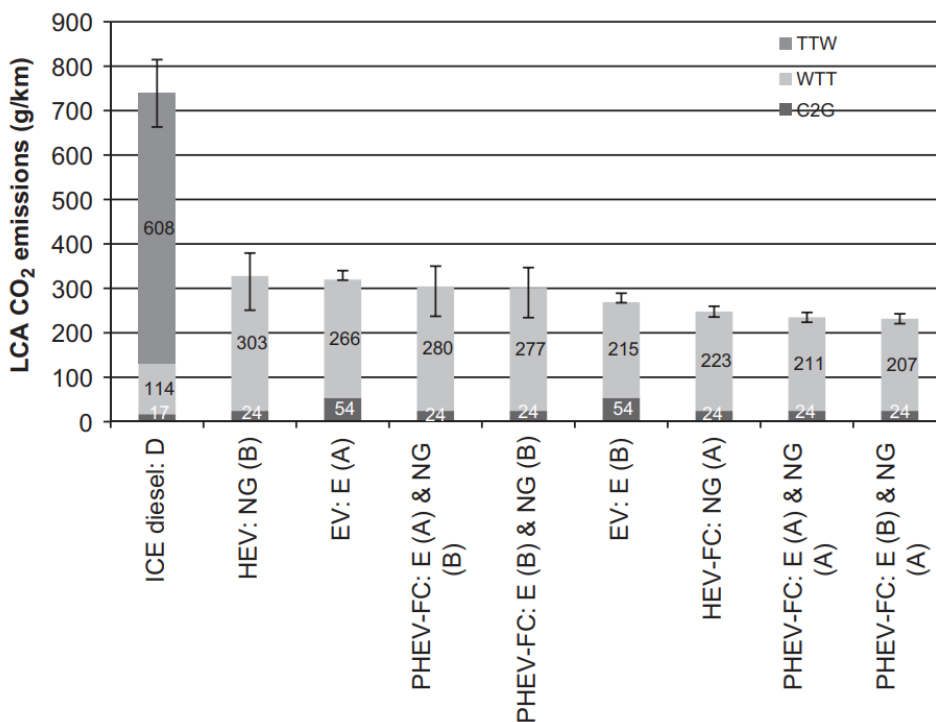
Tabulka 8 - Uvažované způsoby výroby a dopravy energií [27]

Výsledky této LCA analýzy jsou prezentovány v grafech níže (Obrázek 33 a Obrázek 34). Nejvíce spotřebované energie na jeden ujetý kilometr vykazuje ICE diesel (9,54 MJ/km) naopak nejmenší hodnoty (4,34 MJ/km) dosahuje PHEV-FC E (A) & NG (A). [27]



Obrázek 33 - Výsledné hodnoty spotřeby energie analyzovaných typů vozidel taxi [27]

Emisí CO₂ na jeden ujetý kilometr opět nejvíce vyprodukuje ICE diesel (738,6 gCO₂/km) a nejméně jich vyprodukuje PHEV-FC E (B) & NG (A) (231,7 gCO₂/km). V porovnání s ICE diesel mají všechny další analyzované typy vozidel potenciál výrazně snížit spotřebovanou energii (o 37 % až 55 %) i emise CO₂ (o 55 % až 69 %). [27]

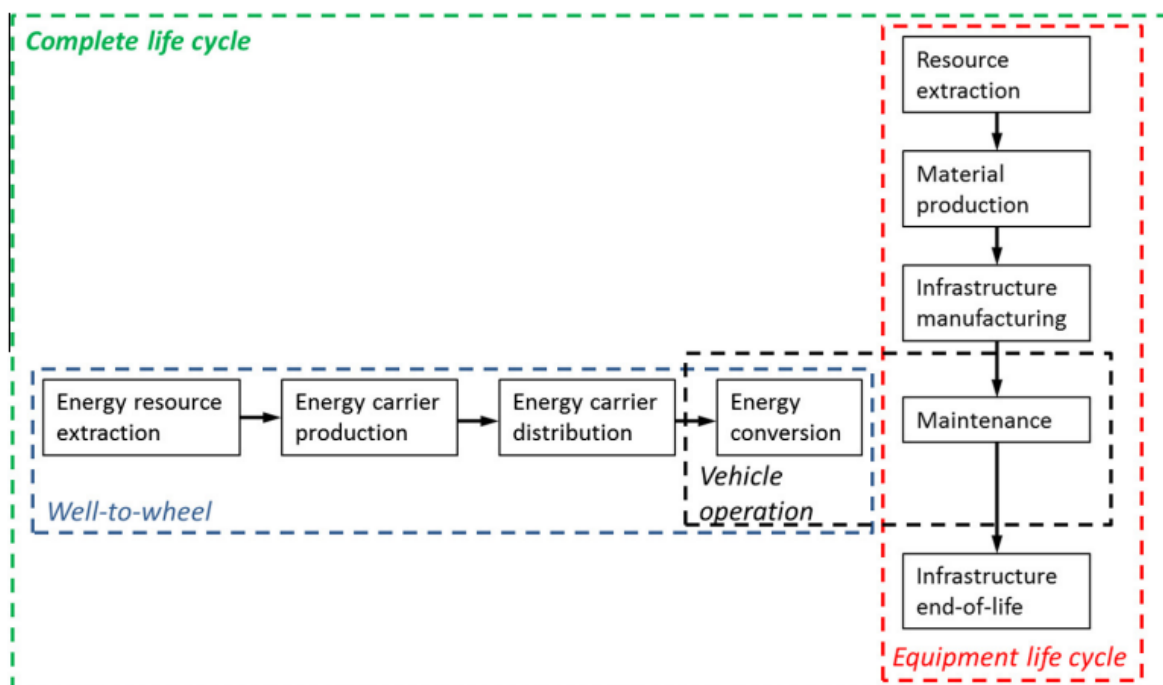


Obrázek 34 - Výsledné hodnoty emisí CO₂ analyzovaných typů vozidel taxi [27]

Z výsledků jednotlivých fází životního cyklu je patrné, že u vodíkových a plně elektrických vozidel je velmi důležitý způsob výroby a distribuce vodíku, respektive elektřiny. Vodíková vozidla využívající plynný vodík dosahují lepších hodnot než ty, které využívají kapalný vodík. Ze srovnání PHEV-FC a HEV-FC i přes velice podobné výsledky o něco lépe vychází PHEV-FC. Mezi analyzovanými strategiemi vybíjení baterie vodíkových vozidel nebyly velké rozdíly ve spotřebě elektřiny a vodíku (2,30 MJ/km nebo 2,52 MJ/km). Dle výsledných hodnot spotřebované energie by HEV-FC bylo nutné natankovat 1x denně, PHEV-FC kromě toho ještě 2,8 h až 3,2 h nabíjet (liší se dle zvolené vybíjecí strategie) a EV by potřebovalo 9 h nabíjení na 14 kVA nabíječe. Je důležité poznamenat, že sponzorem této analýzy byla společnost Intelligent Energy, která vozidla taxi s palivovými články vyvíjela. [27]

5.2.2 LCA analýza 2 - The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework (Bauer et al., 2015)

Autoři této analýzy si stanovili za cíl porovnat dopady životního cyklu současných a budoucích osobních automobilů střední třídy (typickým automobilem této třídy je VW Passat) provozovaných ve Švýcarsku s různými typy pohonů a paliv. Analyzovaná vozidla jsou porovnávána ve více kategoriích dopadu. Kromě kategorie dopadu globální oteplování (emise skleníkových plynů) jsou analyzovány i další kategorie, kterými jsou tvorba prachových částic, lidská toxicita, tvorba fotochemického smogu a acidifikace. Tato analýza zahrnuje WTW fáze životního cyklu paliva, fáze výroby, provozu a likvidace vozidla i výrobu a údržbu silniční infrastruktury (Obrázek 35). Pro porovnávání údajů o spotřebě paliva a emisích vozidel autoři využili jízdní cyklus WLTP, který je nástupcem jízdního cyklu NEDC. WLTP simuluje reálné jízdní podmínky lépe než jeho předchůdce. [28]



Obrázek 35 - Zjednodušené schéma rozsahu LCA analýzy 2 [28]

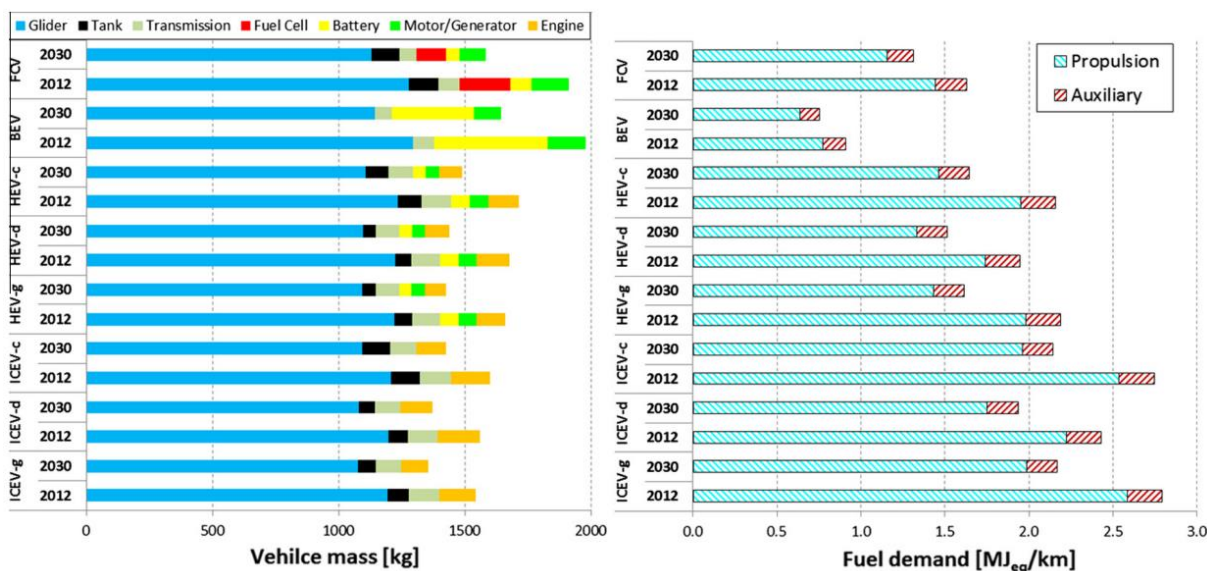
Analyzována byla vozidla (Tabulka 9) se spalovacím motorem (ICEV), hybridní vozidla (HEV), plně elektrická vozidla (BEV) a vodíková vozidla s palivovými články (FCV). ICEV a HEV byla analyzována ve

třech variantách dle použitého paliva, tím byla nafta (d), benzin (g) nebo zemní plyn (cng). V analýze jsou uvažovány dva scénáře. Současný scénář reprezentuje technologický vývoj v roce 2012 a budoucí scénář predikuje technologický vývoj do roku 2030. [28]

		Electric range ^a (km)	Fuel range (km)	Power ^b (kW)					Energy storage	
				Engine	Motor and controller	Power battery ^c	Fuel cell	Transmission	Fuel tank (MJ)	Energy battery ^d (kWh)
ICEV-g	2012	0	700	117	0	0	0	117	1956	0
	2030	0	700	103	0	0	0	103	1518	0
ICEV-d	2012	0	700	118	0	0	0	118	1702	0
	2030	0	700	104	0	0	0	104	1353	0
ICEV-cng	2012	0	500	121	0	0	0	121	1373	0
	2030	0	700	108	0	0	0	108	1499	0
HEV ^e -g	2012	0	700	94	69	69	0	126	1531	0
	2030	0	700	81	59	59	0	108	1130	0
HEV ^e -d	2012	0	700	95	70	70	0	127	1363	0
	2030	0	700	82	60	60	0	109	1060	0
HEV ^e -cng	2012	0	500	97	71	71	0	130	1079	0
	2030	0	700	84	62	62	0	112	1152	0
BEV	2012	200	0	0	147	0	0	147	0	50
	2030	350	0	0	122	0	0	122	0	73
FCV	2012	0	500	0	145	79	145	145	814	0
	2030	0	700	0	120	66	120	120	919	0

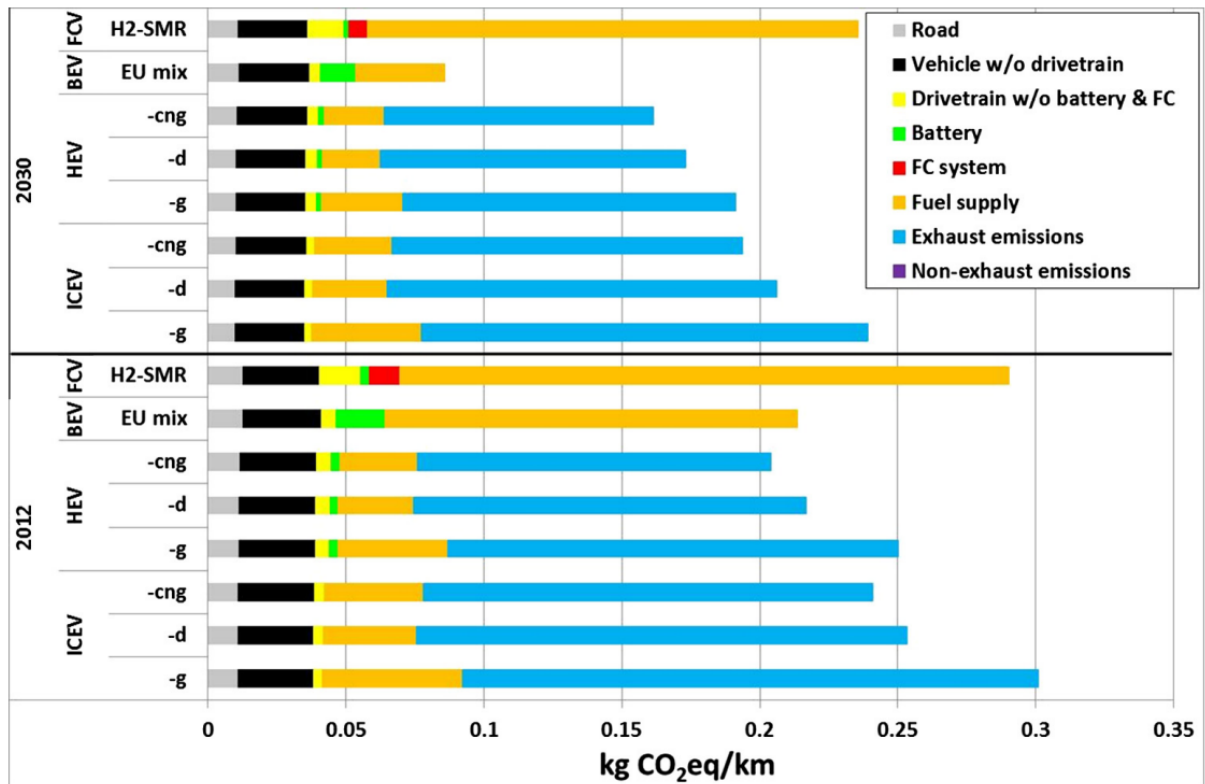
Tabulka 9 - Specifikace analyzovaných typů vozidel střední třídy [28]

FCV je druhé nejtěžší vozidlo v analýze hned po BEV (Obrázek 36). Mezi lety 2012 a 2030 autoři předpokládají redukcí hmotnosti FCV o přibližně 300 kg. Dle simulace má spotřebu paliva největší ICEV-g (2012: cca 2,8 MJ_{eq}/km, 2030: cca 2,8 MJ_{eq}/km) a nejmenší BEV (2012: cca 0,9 MJ_{eq}/km, 2030: cca 0,75 MJ_{eq}/km). Životnost vozidla byla stanovena 240 000 km. Palivový článek má dle autorů stejnou životnost jako vozidlo, zatímco baterie má životnost pouze 150 000 km. BEV je nabíjeno z evropského energetického mixu a FCV využívá vodík z parního reformování zemního plynu. Změny energetického mixu a zlepšení výrobních procesů jsou předpokládány v rámci budoucího scénáře. Dopad jiných výrobních procesů na výsledky je také analyzován. [28]



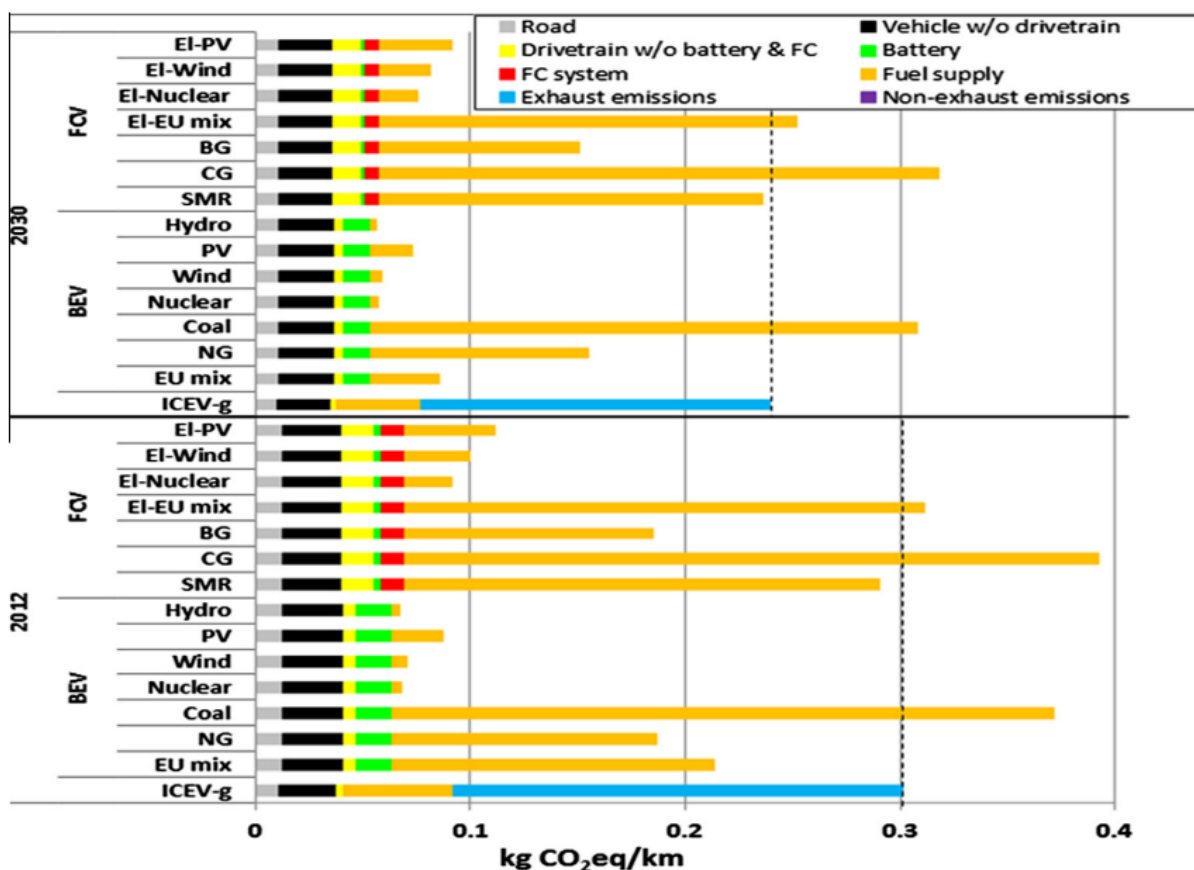
Obrázek 36 - Hmotnost analyzovaných typů vozidel dle komponent (vlevo) a jejich spotřeba paliva (vpravo) [28]

Nejméně emisí skleníkových plynů v současném scénáři (Obrázek 37) produkují HEV-cng, HEV-d a BEV (okolo 210 g CO_{2eq}/km), naopak nejvíce emisí produkuje ICEV-g (300 g CO_{2eq}/km). V budoucím scénáři zejména kvůli příznivé změně evropského energetického mixu dochází k výrazné redukcí emisí skleníkových plynů BEV. FCV v obou scénářích nedosahuje výrazně nižších hodnot než ICEV-g. [28]



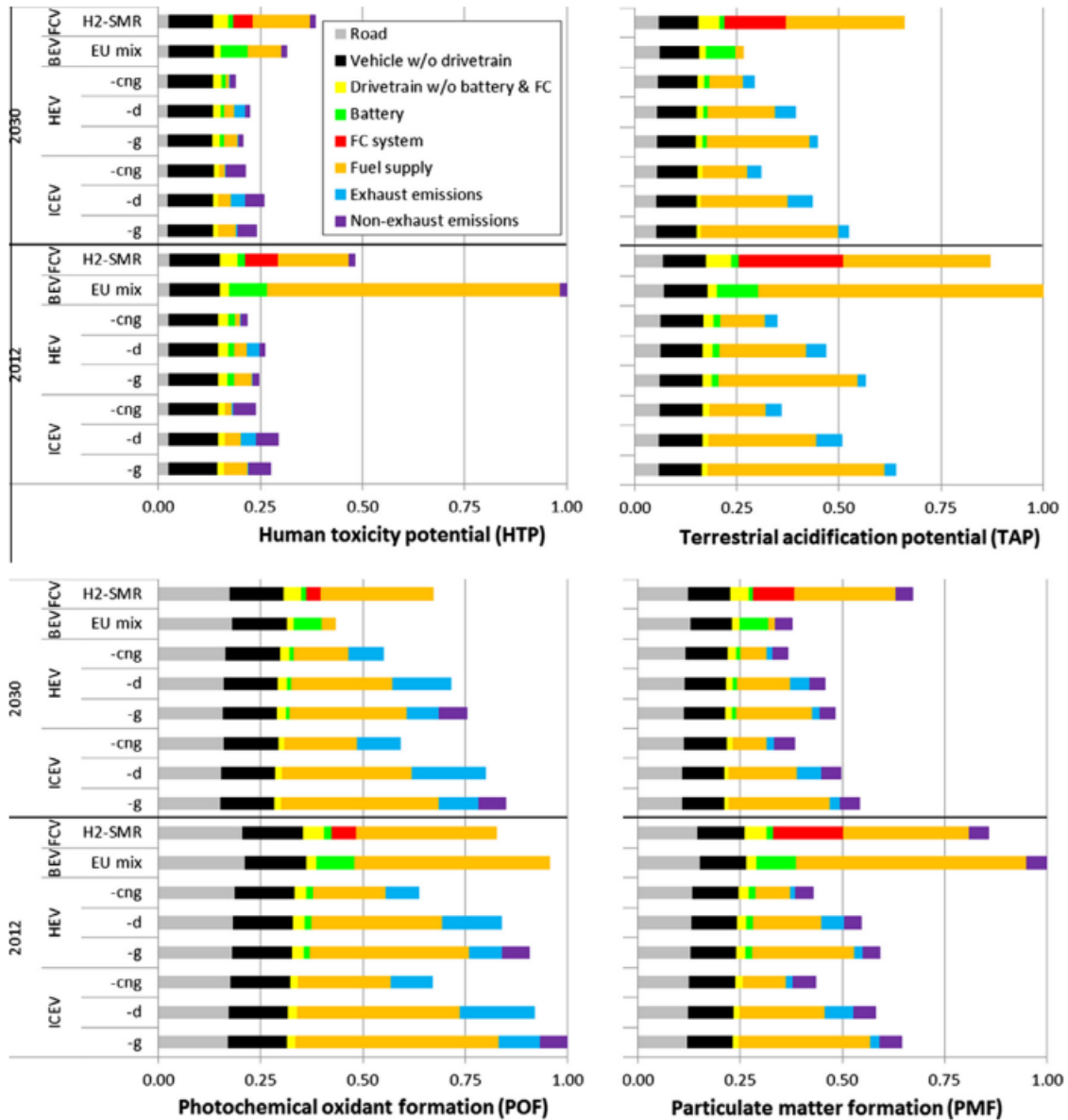
Obrázek 37 - Emise skleníkových plynů analyzovaných typů vozidel [28]

Na obr. 38 je vidět, jak výsledné hodnoty emisí skleníkových plynů BEV a FCV ovlivní jiné výrobní procesy a zdroje. Výsledné emise skleníkových plynů FCV se pro různé výrobní procesy vodíku i několikanásobně liší. Výroba vodíku elektrolýzou vody při využití jaderné energie jako zdroje elektrické energie vychází z hlediska emisí skleníkových plynů FCV v obou scénářích nejlépe a výsledná hodnota je v porovnání s ICEV-g méně než třetinová. Při výrobě vodíku zplyňováním uhlí dochází v obou scénářích k navýšení emisí skleníkových plynů oproti ICEV-g. Je také patrné, že BEV v porovnání s FCV dosahuje nižších hodnot. [28]



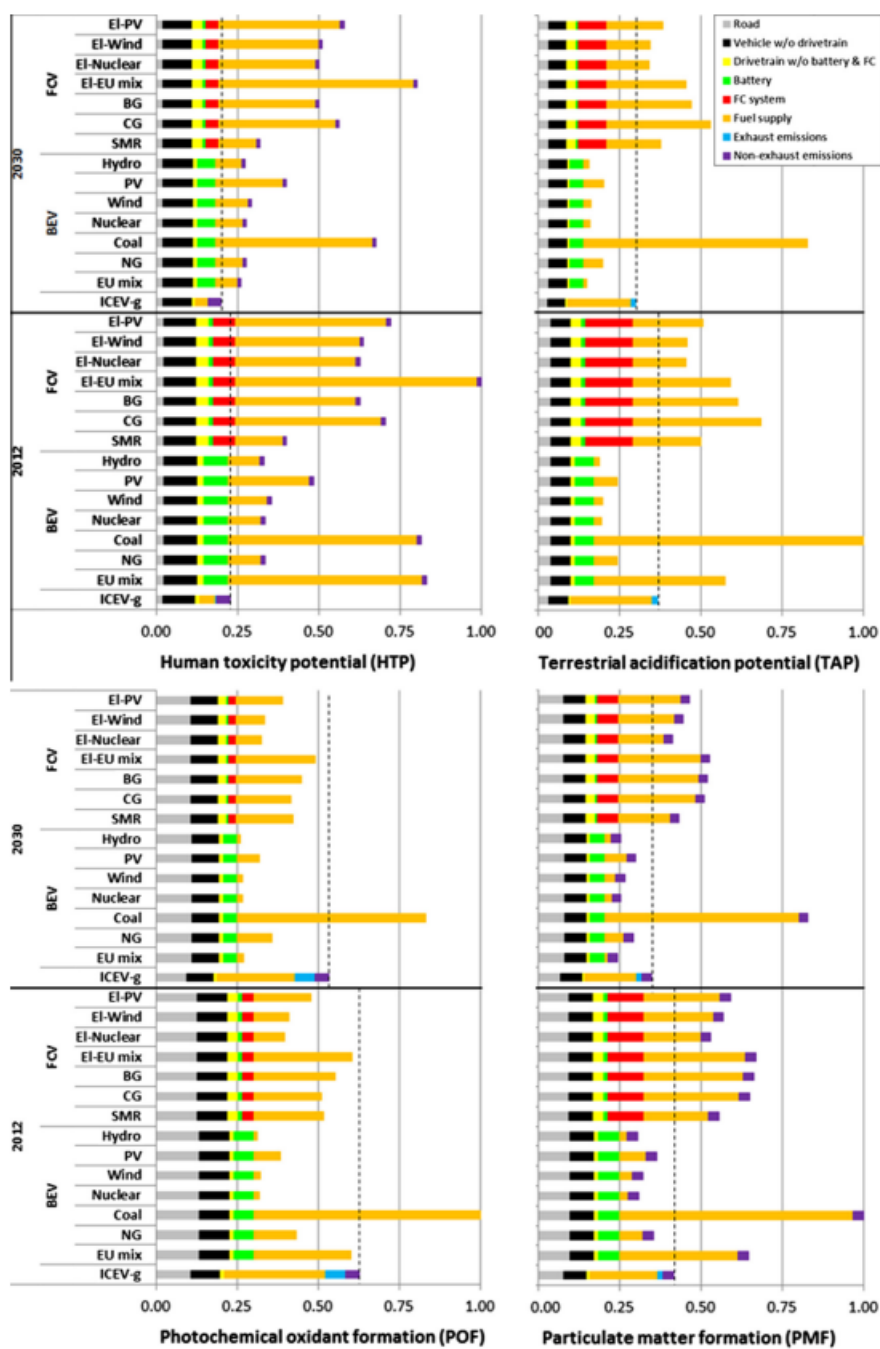
Obrázek 38 - Emise skleníkových plynů BEV a FCV s různými zdroji elektřiny a vodíku [28]

Výsledky porovnání analyzovaných vozidel v dalších čtyřech kategoriích dopadu jsou na obr. 39. Z výsledných hodnot je patrné, že FCV a BEV dosahují v současném scénáři ve třech ze čtyř kategorií horších výsledků než ICEV, a to zejména kvůli emisím při výrobě vodíku nebo elektřiny a také při samotné výrobě těchto vozidel. Dopady BEV se v budoucím scénáři ve všech kategoriích hlavně změnou energetického mixu významně snižují, zatímco dopady FCV se nikterak výrazně nesnižují. Největší dopady spojené s výrobou palivového článku FCV způsobuje těžba platiny, která se používá jako katalyzátor. BEV jsou ve všech kategoriích lepší volbou než ICEV a vozidla spalující zemní plyn dosahují lepších výsledků než ty, co spalují naftu či benzin. Zde tedy platí, že využití FCV místo ICEV nemusí znamenat snížení dopadů na životní prostředí. [28]



Obrázek 39 - Výsledky analyzovaných typů vozidel v dalších kategoriích dopadu [28]

Ani při změně výrobního procesu a zdroje vodíku nedosahují FCV v budoucím scénáři nižších hodnot než BEV (Obrázek 40). Překvapivě velké dopady v obou scénářích vykazují FCV využívající vodík z elektrolýzy vody, při které je používána elektrická energie z evropského energetického mixu. Ve většině kategorií jsou dopady FCV využívajících tento výrobní proces dokonce vyšší, než pokud by vodík byl vyráběn zplyňováním uhlí. [28]



Obrázek 40 - Výsledky BEV a FCV s různými zdroji elektřiny a vodíku v dalších kategoriích dopadu [28]

5.2.3 LCA analýza 3 - Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles (Miotti et al., 2015)

Tato analýza má dva hlavní cíle. Prvním je hodnocení dopadů na životní prostředí a analýza nákladů životního cyklu systému palivového článku (FCS). Na ten navazuje porovnání dopadů a nákladů životního cyklu vodíkových vozidel (FCV) s plně elektrickými vozidly (BEV) a vozidly se spalovacím motorem na benzin (ICEV). Studie je geograficky zaměřená na Evropu. Analyzováno je hned několik kategorií dopadu, kromě klimatické změny (emisí skleníkových plynů) také acidifikace, lidská toxicita, tvorba fotochemického smogu a tvorba prachových částic. Autoři do analýzy zahrnuli WTW fáze životního cyklu paliva, fáze výroby, provozu a likvidace vozidla a fáze výroby a údržby silnic. Náklady

životního cyklu byly hodnoceny z pohledu majitele vozidla, a zahrnují pouze nákupní cenu a cenu paliva. [29]

Autoři pracují se třemi scénáři. Současný scénář počítá se stavem technologií mezi lety 2011 a 2014 a výrobou 200 vozidel za rok. Scénář 2030 konzervativní predikuje pomalejší vývoj technologií a nárůst výroby na 1 000 vozidel za rok. Scénář 2030 optimistický predikuje rychlejší vývoj technologií a výrazný nárůst výroby na 500 000 vozidel za rok. Zde je však nutné poznamenat, že objem výroby v této analýze ovlivňuje pouze náklady na životní cyklus nikoliv dopady na životní prostředí. Mezi scénáři, na rozdíl od předchozí analýzy, nedochází ke změně energetického mixu. Ceny energií se mezi scénáři také nemění. [29]

Parameter/component	Current	2030 Conservative	2030 Optimistic	Source
Production volume (affects costs only)	200 per year	1000 per year	500,000 per year	
Stack				
Catalyst layer ^a	0.4 mg/cm ² Pt in Pt/C particles	0.2 mg/cm ² Pt in Pt/C particles, higher specific activity ^a	0.1 mg/cm ² Pt in Pt/C particles, even higher specific activity ^a	Model, (Martin 2010; Debe 2012; Martin et al. 2012; Cobb 2014)
Membrane ^a	Perfluorosulfonic acid (PFSA/Nafion®) with expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) backbone and sulfuric acid side chains, 25 µm	Thickness reduced to 17.5 µm, improved performance and temperature	Polybenzimidazole (PBI), 12.5 µm, even further improved performance and temperature, much lower costs	(James et al. 2010; Barbir 2013)
Gas diffusion layer ^a	0.28-mm non-woven carbon substrate macroporous layer with 0.04-mm microporous layer of PTFE and carbon black	0.15-mm non-woven carbon substrate macroporous layer with 0.04-mm microporous layer of PTFE and carbon black	0.08-mm non-woven carbon substrate macroporous layer with 0.02-mm microporous layer of PTFE and carbon black	(James et al. 2010). Future values are assumptions.
Bipolar plates	1.5-mm-thick injection-molded graphite plates (3 mm combined), injection-molded coolant gaskets	0.152-mm-thick stainless steel plates, coated with TiN, screen-printed coolant gaskets	0.120-mm-thick stainless steel plates, coated with TiN, screen-printed coolant gaskets	(James et al. 2010; Karimi et al. 2012; Barbir 2013)
Balance of plant				
Air management	Compression-expansion-motor unit for operation at 2 bar	Improved compression-expansion-motor unit for operation at 2 bar	Improved, smaller compression-expansion-motor unit for operation at 1.5 bar	(Sinha et al. 2008; James et al. 2010; Barbir 2013)
Water management	Humidifier using PFSA (Nafion®) tubes	Simple humidifier without Nafion®, operating temperature above 373 K	No humidifier and precooler necessary	(Sinha et al. 2008; James et al. 2010; Barbir 2013)
Heat management	Radiator and antifreeze liquid	Smaller unit due to higher operating temperature	Even smaller unit	(Sinha et al. 2008; James et al. 2010; Barbir 2013)
Performance				
Peak efficiency in % (LHV)	58	62	64	Model
Efficiency at rated power in % (LHV)	48	50	52	Model
Power density at rated power (mW/cm ²)	1060	1310	1625	Model
Hydrogen tank				
Hydrogen tank	700-bar single gaseous tank	700-bar single gaseous tank, 15 % lower material consumption	700-bar single gaseous tank, 30 % lower material consumption	(Hua et al. 2011; Law 2011)

Obrázek 41 - Specifikace analyzovaného FCS ve všech scénářích [29]

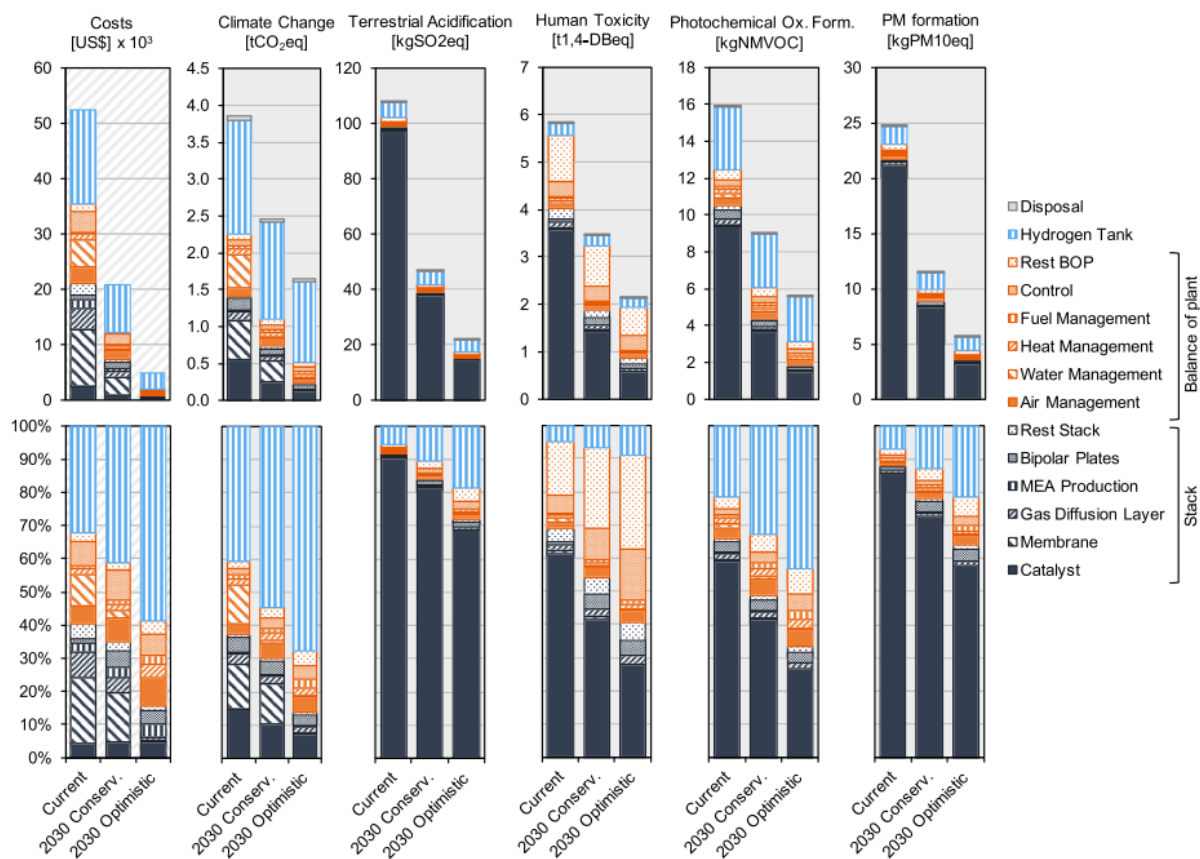
Funkční jednotkou analýzy FCS je palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou o výkonu 80 kW a tlaková nádoba na vodík s kapacitou 5,6 kg. Vodík je v tlakové nádobě skladován v plynném stavu při tlaku 700 barů (Obrázek 41). Předpokládána je tlaková nádoba z uhlíkových vláken typu 4. [29]

Parameter	Unit	FCV			BEV			Gasoline ICEV		
		Current	2030 Con	2030 Opt	Current	2030 Con	2030 Opt	Current	2030 Con	2030 Opt
Powertrain										
Active area of fuel cell stack	m ²	9.1	5.9	4.0						
Total area of fuel cell stack	m ²	14.0	9.1	5.3						
FCS nominal power	kW	85	72	62						
Motor/engine (peak) power	kW	102	86	74	100	90	81	84	78	73
Total amount of platinum ^a	g	36.4	11.8	4.0	0	0	0	1.5	1.4	1.2
Rest of vehicle										
Battery power	kW	28	24	21						
Battery and energy density of batteries	kW/kg, kWh/kg	1.2	1.5	2.5	0.11	0.14	0.19			
Fuel capacity (usable)	kg, kWh, L	5.6	5.0	4.5	25	30	35	56	45	40
Vehicle curb weight ^b	kg	1537	1292	1117	1501	1352	1208	1198	1117	1045
Vehicle purchasing price	\$	74,460	27,110	16,350	37,180	24,500	15,580	20,060	22,110	14,880
Fuel										
Fuel consumption ^c (energy equivalents)	kWh/100 km	35.0	28.8	24.3	16.8	14.3	12.1	52.6	53.7	36.3
Fuel consumption ^c (mixed units)	kg/100 km, kWh/100 km, L/100 km	1.05	0.86	0.73	16.8	14.3	12.1	5.88	4.88	4.06
Fuel consumption ^{c,d} (US units)	MPG(e)	60	73	86	125	146	173	40	48	58
Effective range	km	535	576	616	149	209	289	951	920	987
Hydrogen production efficiency (electrolysis/SMR) ^f	%	58.5/67	66.7/67	66.7/67						
Fuel price (including fuel tax and VAT)	\$/kg, \$/kWh, \$/L	17.1/ 9.34 ^f	15.9/ 9.34 ^f	15.9/ 9.34 ^f	0.303	0.303	0.303	1.83	1.83	1.83
Exhaust emissions standard								EURO VI	EURO VI	EURO VI

Obrázek 42 - Specifikace analyzovaných FCV, BEV a ICEV ve všech scénářích [29]

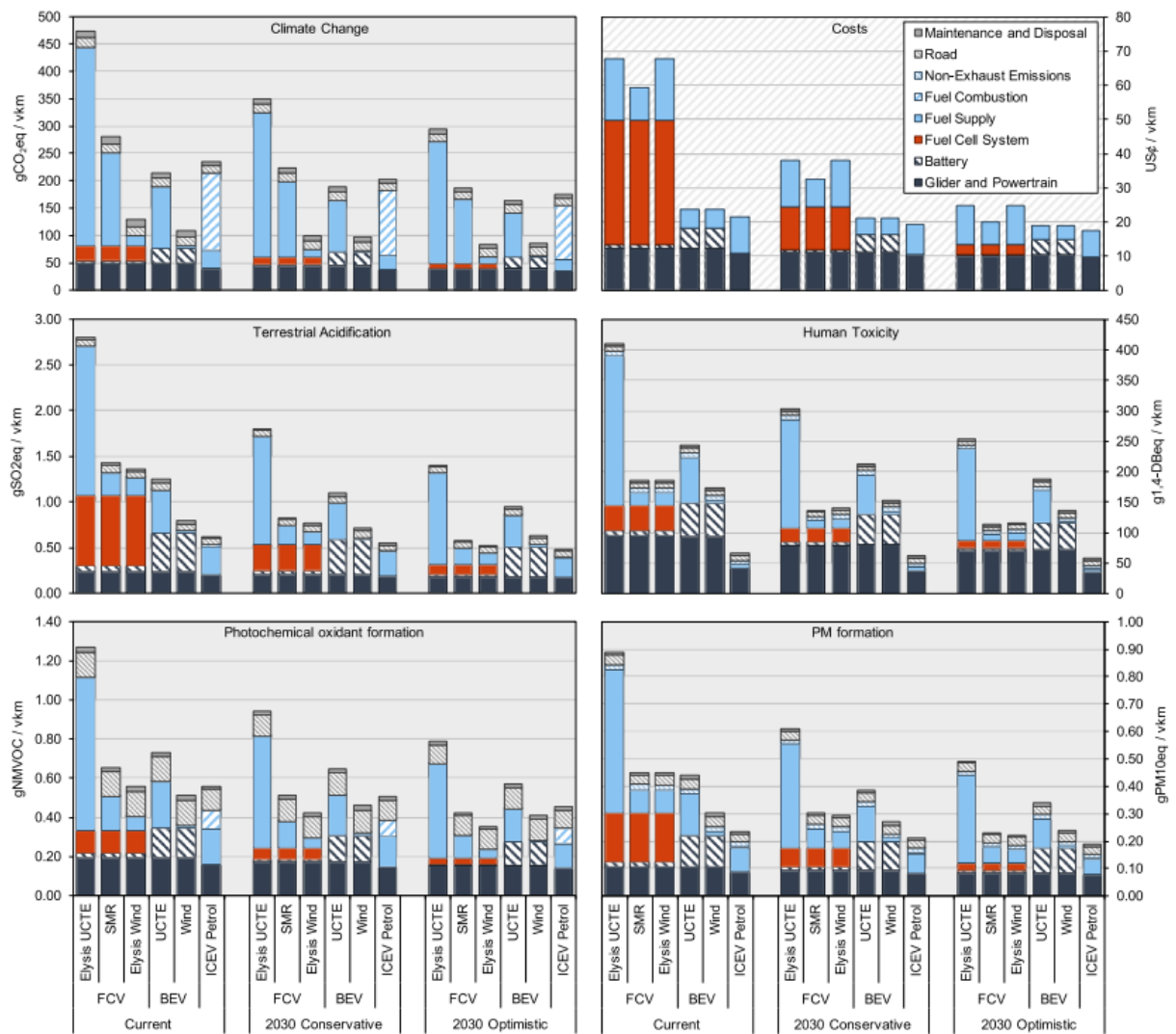
Autoři pro porovnávání FCV, BEV a ICEV zvolili kompaktní třídu vozidel s životností 150 000 km (Obrázek 42) a stejným zrychlením (12 s z 0 km/h na 100 km/h). FCV je v současném scénáři překvapivě těžší než BEV, to je ale způsobeno zejména baterií BEV o nízké kapacitě pouhých 25 kWh. Z důvodu takto nízké kapacity baterie má BEV efektivní dojezd v současném scénáři jenom 149 km. V budoucích scénářích se kapacita baterie BEV zvyšuje až na 35 kWh. Dojezd BEV je ale i v 2030 optimistickém scénáři méně než poloviční v porovnání s FCV, a to i přestože kapacita tlakové nádoby na vodík se v tomto scénáři snižuje na 4,5 kg vodíku. Efektivní dojezd ICEV je ve všech scénářích výrazně nejvyšší. Porovnávání spotřeby paliva je provedeno s využitím jízdního cyklu NEDC. K výsledným hodnotám spotřeby paliva dle NEDC byla přidána ještě 10 % penalizace. BEV má ve všech scénářích spotřebu paliva nejnižší. Přestože FCV má spotřebu paliva vyšší než BEV, stále představuje úsporu paliva ve srovnání s ICEV. [29]

V analýze byla uvažována lokální výroba vodíku na čerpací stanici parním reformováním zemního plynu nebo elektrolýzou vody využívající elektrickou energii buď z energetického mixu UCTE (hlavně kontinentální Evropa) nebo z větrných elektráren. Účinnost elektrolýzy se v budoucích scénářích zvyšuje, zatímco účinnost parního reformování zůstává neměnná. [29]



Obrázek 43 - Výsledky dopadů na životní prostředí a nákladů životního cyklu FCS [29]

Výsledky analýzy FCS ukazují, že značný podíl na emisích v kategoriích acidifikace, lidská toxicita, tvorba fotochemického smogu a tvorba prachových částic představuje katalyzátor palivového článku (Obrázek 43). Hlavním důvodem jsou emise pocházející z těžby platiny. Na emisích skleníkových plynů má výroba membrány nebo tlakové nádoby stejný či větší podíl než výroba katalyzátoru. Největší podíl nákladů životního cyklu FCS tvoří tlaková nádoba. Cena platiny nemá významný dopad na celkové náklady životního cyklu FCS. [29]



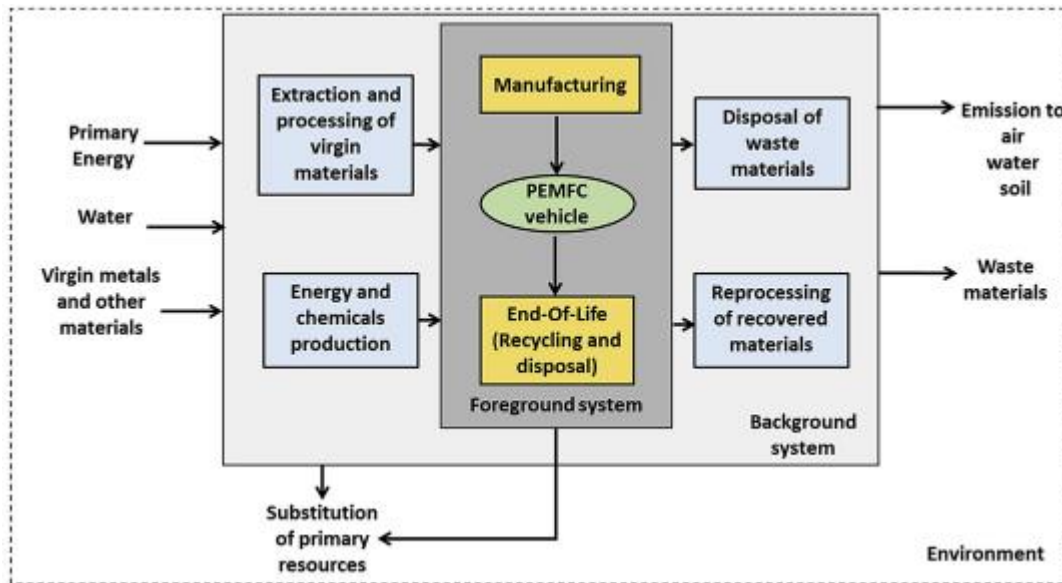
Obrázek 44 - Výsledky porovnání FCV, BEV a ICEV [29]

Výsledek srovnání FCV, ICEV a BEV velmi závisí na způsobu výroby vodíku (Obrázek 44). Pokud je vodík vyráběn parním reformováním zemního plynu, tak FCV produkuje více emisí skleníkových plynů v současném scénáři než ICEV a v 2030 optimistickém scénáři přibližně stejné množství. Při výrobě vodíku elektrolýzou s využitím elektřiny z energetického mixu UCTE dochází dokonce k významnému nárůstu produkovaných emisí skleníkových plynů ve srovnání s ICEV. Pouze při výrobě vodíku elektrolýzou s využitím větrné energie dochází k redukci emisí skleníkových plynů FCV o 46 % až 53 % v porovnání s ICEV. Emise skleníkových plynů BEV, které využívá elektřinu z větrných elektráren, jsou pouze mírně nižší než u FCV. Ve většině ostatních kategorií dopadu FCV nepřináší výrazné snížení dopadu oproti ICEV a v některých kategoriích dokonce způsobuje zvýšení dopadu. To je způsobeno hlavně emisemi vznikajícími při výrobě FCS a vodíku. [29]

Snaha výrobců o dosažení nákladové konkurenceschopnosti FCV proti ICEV bude obtížná. Výroba FCS je v současném scénáři nejvýznamnější nákladovou položkou životního cyklu FCV. V budoucích scénářích se náklady na výrobu FCS snižují se zvyšujícím se objemem výroby a zlepšující se technologií. V 2030 optimistickém scénáři výroba FCS tvoří 22 % nákladů na výrobu vozidla a 11 % až 14 % z celkových nákladů životního cyklu FCV. BEV se dle výsledků zdají být v oblasti nákladů téměř plně konkurenceschopné s ICEV. [29]

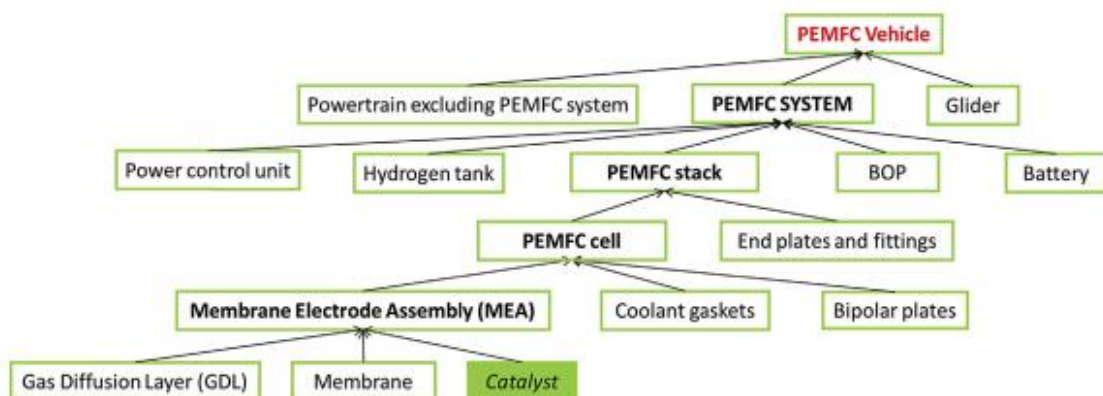
5.2.4 LCA analýza 4 - Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles (Evangelisti et al., 2016)

Tato analýza porovnává dopady životního cyklu na životní prostředí vodíkového vozidla využívajícího palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou (FCV) s plně elektrickým vozidlem (BEV) a vozidlem se spalovacím motorem na naftu (ICEV). Analýza zahrnuje celý životní cyklus vozidla, tedy jeho výrobu, provoz i likvidaci (Obrázek 45). Autoři kladli velký důraz zejména na fázi výroby. Vozidla jsou porovnávána v pěti kategoriích dopadu, těmi jsou globální oteplování (emise skleníkových plynů), acidifikace, vyčerpávání neobnovitelných zdrojů, tvorba fotochemického smogu a lidská toxicita. [30]



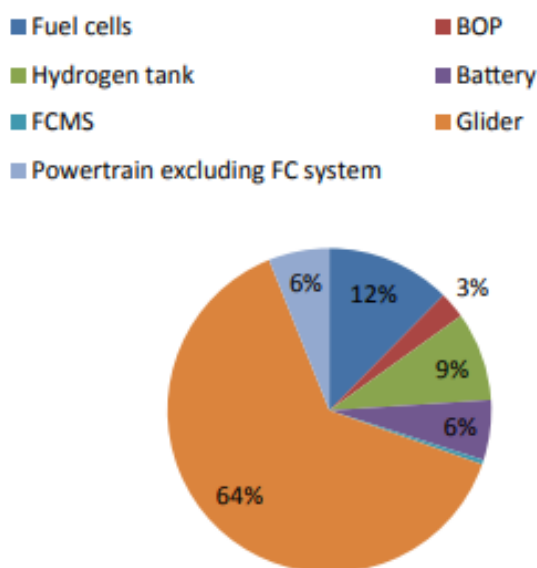
Obrázek 45 - Hranice systému analýzy [30]

Na obr. 46 je vidět jaké součásti byly zahrnuty v modelu FCV. Procesy výroby každé součásti, stejně tak jako použité materiály a energetické vstupy byly v analýze zohledněny. Vodík v FCV je skladován v tlakové nádobě typu 4 z uhlíkových vláken při tlaku 350 barů. Tato tlaková nádoba pojme 5,6 kg vodíku. Původ vodíku je předpokládán z mixu několika výrobních procesů. Uvažována byla spotřeba vodíku 0,85 kg/100 km. Předpokládaný výkon FCV je 80 kW a je počítáno s výrobou 1 000 vozidel za rok. [30]



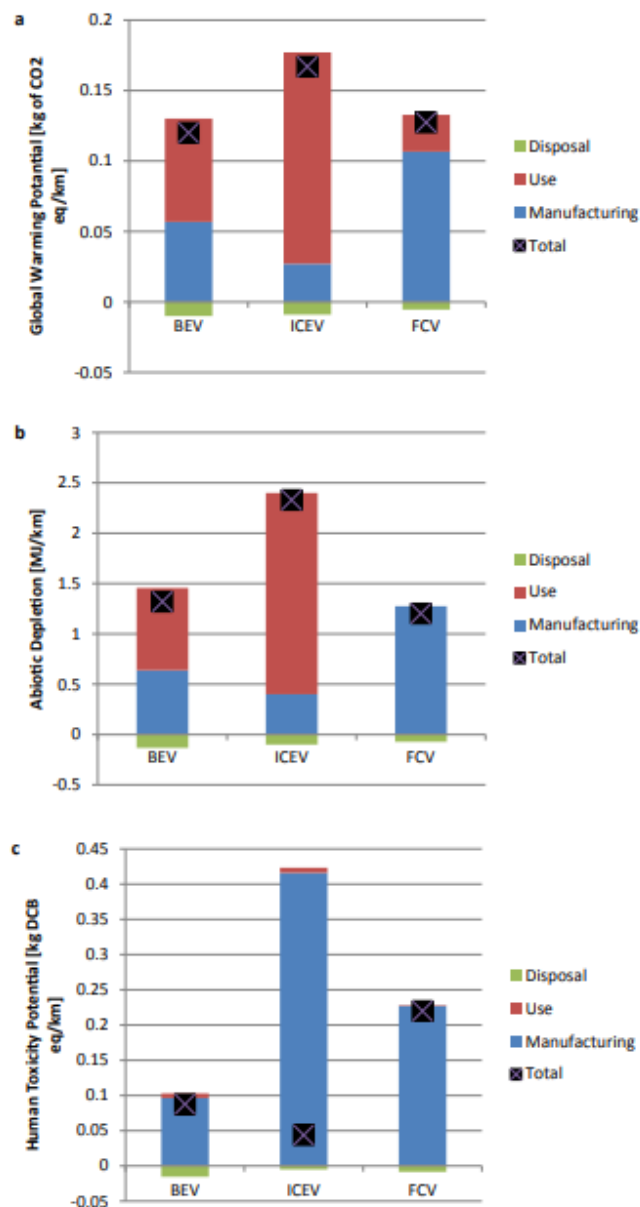
Obrázek 46 - Součásti a jejich hierarchie v modelu FCV [30]

Životnost všech vozidel byla stanovena 150 000 km. Hmotnost FCV byla uvažována 1319 kg (Obrázek 47), zatímco hmotnost BEV byla uvažována nižší, a to 1 132 kg. Důvodem je velmi malá baterie BEV o kapacitě pouhých 24 kWh. [30]



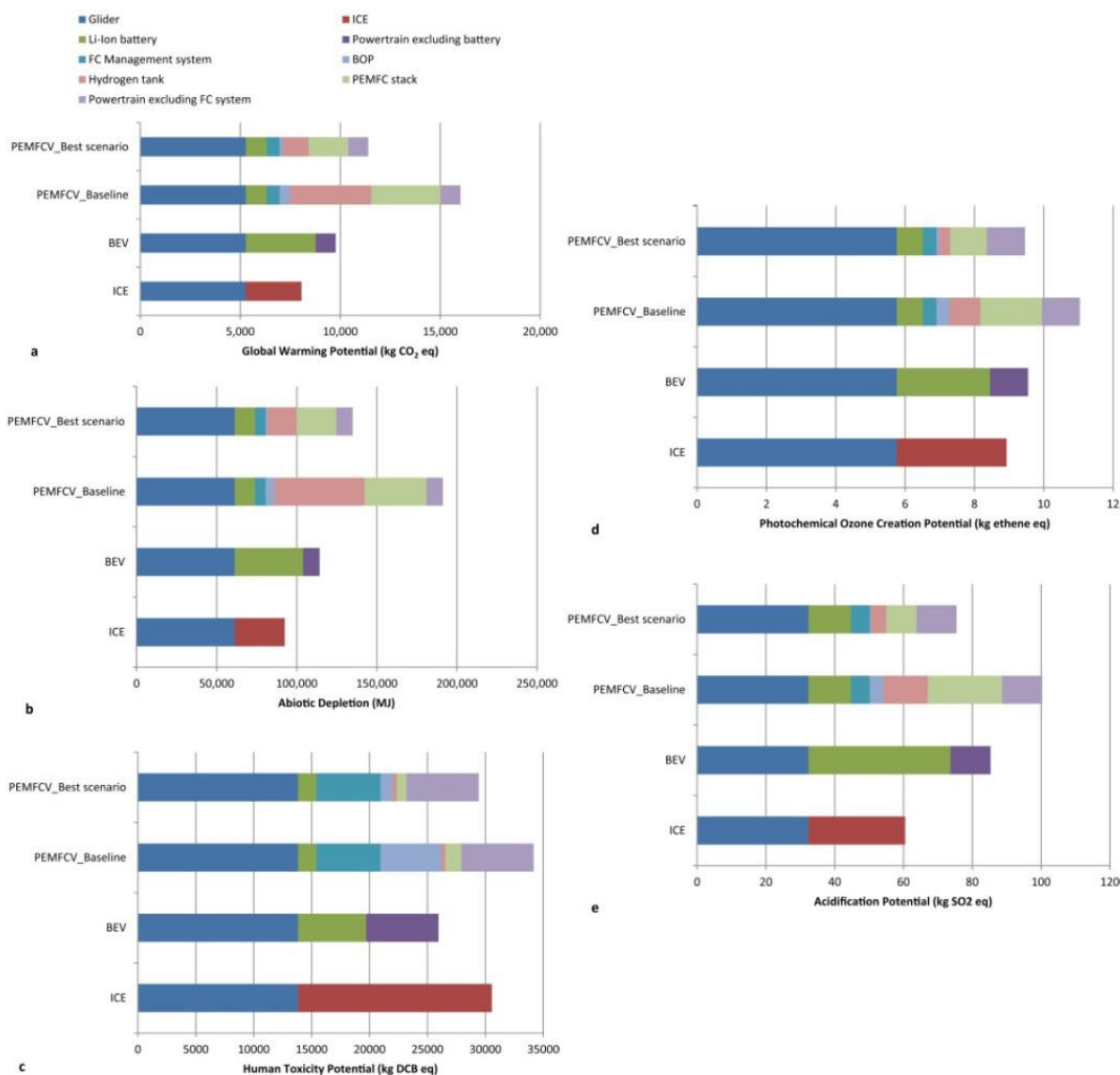
Obrázek 47 - Rozložení hmotnosti FCV [30]

Výsledky porovnání FCV, BEV a ICEV ve třech kategoriích dopadu, které byly autory označeny jako klíčové, lze vidět na obr. 48. Nejvíce emisí skleníkových plynů produkuje ICEV. FCV a BEV dosahují v této kategorii podobných hodnot. FCV, dle vyjádření autorů, díky využití vodíku jako paliva produkuje nejméně emisí ve fázi provozu vozidla. Při výrobě FCV ale naopak vzniká nejvíce emisí skleníkových plynů. Fáze likvidace má zanedbatelný vliv na výsledné hodnoty emisí skleníkových plynů u všech vozidel. Na kategorii vyčerpávání neobnovitelných zdrojů má FCV nejnižší dopad, o něco vyšších hodnot dosahuje BEV a nejvyšší dopad má ICEV. Výsledný dopad FCV na tuto kategorii tvoří zejména fáze výroby. Výsledný graf pro kategorii lidská toxicita je přinejmenším zvláštní. Dopad ICEV z fáze výroby by měl být dle grafu přibližně 0,41 kgDCB_{eq}/km, to ale neodpovídá výsledným hodnotám uvedeným dále v analýze (Obrázek 49). Po vynásobení počtem ujetých km (životnost uváděna 150 000 km) vychází celkový dopad výrobní fáze ICEV 61 500 kgDCB_{eq}. Podle obr. 49 je ale celkový dopad výrobní fáze ICEV přibližně 31 000 kgDCB_{eq}. Celkové dopady ostatních vozidel rovněž neodpovídají. Také poloha značky total u ICEV absolutně neodpovídá zbytku sloupce. Dle mého názoru graf nezobrazuje výsledky ani jiné analyzované kategorie dopadu, je tedy možné, že se jedná o chybu např. při zadávání dat. [30]



Obrázek 48 - Výsledky porovnání FCV, BEV a ICEV ve třech klíčových kategoriích dopadu [30]

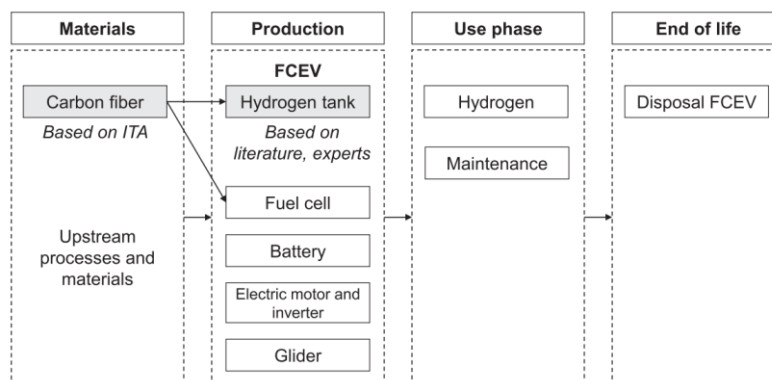
Z výsledků výše je patrné, že výrobní fáze analyzovaných vozidel tvoří značnou část enviromentálních dopadů a u FCV dokonce jejich většinou část. Obrázek 49 představuje výsledky porovnání výrobní fáze ICEV, BEV a FCV, ke kterým je navíc přidán nejlepší scénář FCV z provedené analýzy citlivosti. Prezentovány jsou výsledky ve všech pěti kategoriích dopadu. Emise skleníkových plynů vypuštěné při výrobě FCV (cca 16 000 kgCO_{2eq}) jsou skoro dvakrát tak vysoké jako při výrobě ICEV (cca 8 000 kgCO_{2eq}). Hlavní příčinou takto vysokých emisí je výroba tlakové nádoby a palivového článku. Emise vypuštěné při výrobě BEV jsou menší než při výrobě FCV, ale větší než při výrobě ICEV. Podobný trend je možné pozorovat i u ostatních kategorií dopadu, pouze u kategorie lidská toxicita ICEV dosahuje horší hodnoty než BEV a výroba tlakové nádoby a palivového článku není tak významná pro dopad FCV na tuto kategorii. Podle následně provedené analýzy výroby tlakové nádoby a palivového článku je při výrobě tlakové nádoby největším přispěvatelem dopadu na většinu kategorií produkce uhlíkových vláken. Výroba platinového katalyzátoru pro palivový článek se také poměrně významně podílí na výsledných dopadech. [30]



Obrázek 49 - Výsledky porovnání výrobní fáze analyzovaných vozidel [30]

5.2.5 LCA analýza 5 - Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank (Benitez et al., 2020)

Cílem této analýzy je zhodnocení dopadů životního cyklu vodíkového vozidla poháněného palivovým článkem (FCEV) na životní prostředí se speciálním zaměřením na výrobu tlakové nádoby na vodík z uhlíkových vláken. Analyzována je i samotná produkce potřebných uhlíkových vláken. Funkční jednotkou analýzy produkce uhlíkových vláken je 1 kg vyrobených uhlíkových vláken. Autoři analyzovali fáze životního cyklu, tak jak jsou na obr. 50. Kategorii dopadu se v analýze objevuje větší množství než v předchozích analýzách (Tabulka 10). [31]



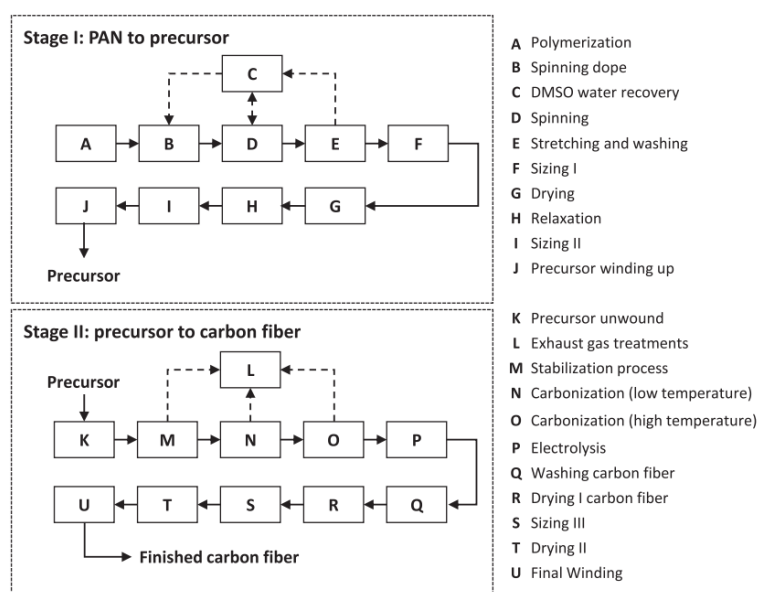
Obrázek 50 - Analyzované fáze životního cyklu FCEV [31]

V rámci analýzy jsou uvažovány dva scénáře. Současný scénář zahrnuje nejnovější technologické inovace a předpokládá německý energetický mix v roce 2015. Budoucí scénář, nazvaný nejlepším možným scénářem pro rok 2050, předpokládá vývoj technologií a 78 % podíl elektrické energie z obnovitelných zdrojů v energetickém mixu. [31]

Impact category	Abbreviation	Unit
Climate change	GWP100	kg CO2-Eq
Terrestrial acidification	TAP100	kg SO2-Eq
Ozone depletion	ODP	kg CFC-11-Eq
Human toxicity	HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq
Particulate matter formation	PMFP	kg PM10-Eq
Freshwater ecotoxicity	FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq
Terrestrial ecotoxicity	TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq
Marine ecotoxicity	METPinf	kg 1,4-DCB-Eq
Freshwater eutrophication	FEP	kg P-Eq
Marine eutrophication	MEP	kg N-Eq
Ionizing radiation	IRP	kg U235-Eq
Photochemical oxidant formation	POFP	kg NMVOC
Mineral resource scarcity	MDP	kg Fe-Eq
Fossil resource scarcity	FDP	kg oil-Eq

Tabulka 10 - Analyzované kategorie dopadu [31]

Proces výroby uhlíkových vláken je velmi složitý. Analýza produkce uhlíkových vláken následuje výrobní proces na obr. 51, ten předpokládá míru konverze prekurzoru na uhlíková vlákna 42 %. Výstupem tohoto procesu je 1 kg uhlíkových vláken Toray T700 G. [31]



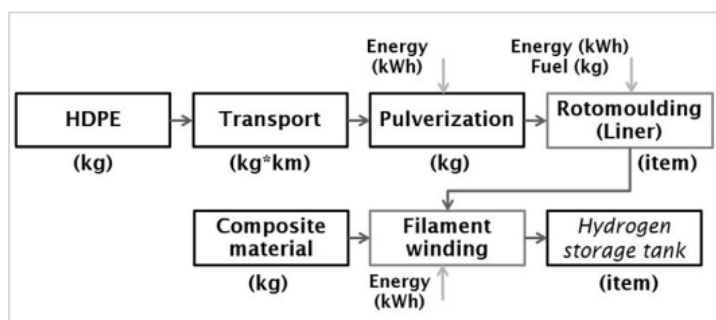
Obrázek 51 - Výrobní proces uhlíkových vláken [31]

Při analýze výrobní fáze FCEV je předpokládána výroba tlakové nádoby typu 4 s životností 10 let nebo 150 000 km, ve které bude skladováno 5,6 kg vodíku při tlaku 700 barů (Tabulka 11). Autoři počítají s použitím 102 kg uhlíkového kompozitu na jednu nádobu. Uhlíkový kompozit je tvořen uhlíkovými vlákny T700 G a epoxidovou pryskyřicí, která tvoří 40 % jeho objemu. Výrobní proces tlakové nádoby je naznačen na obr. 52. [31]

Parameter	Unit	Value
Operation pressure	bar	700
Capacity	kg H ₂	5.60
Volume (water volume)	L	149
Safety factor	–	2.25
Length/diameter	–	3.00
HDPE plastic liner	kg	7.50
Liner thickness	mm	5.00
Carbon composite	kg	102
Fiber volume fraction	%	60
Mass carbon fiber	kg	76
Epoxy resin volume fraction	%	40
Mass epoxy resin	kg	26
Composite density	kg/m ³	1800

HDPE: High density polyethylene.

Tabulka 11 - Specifikace analyzované tlakové nádoby [31]



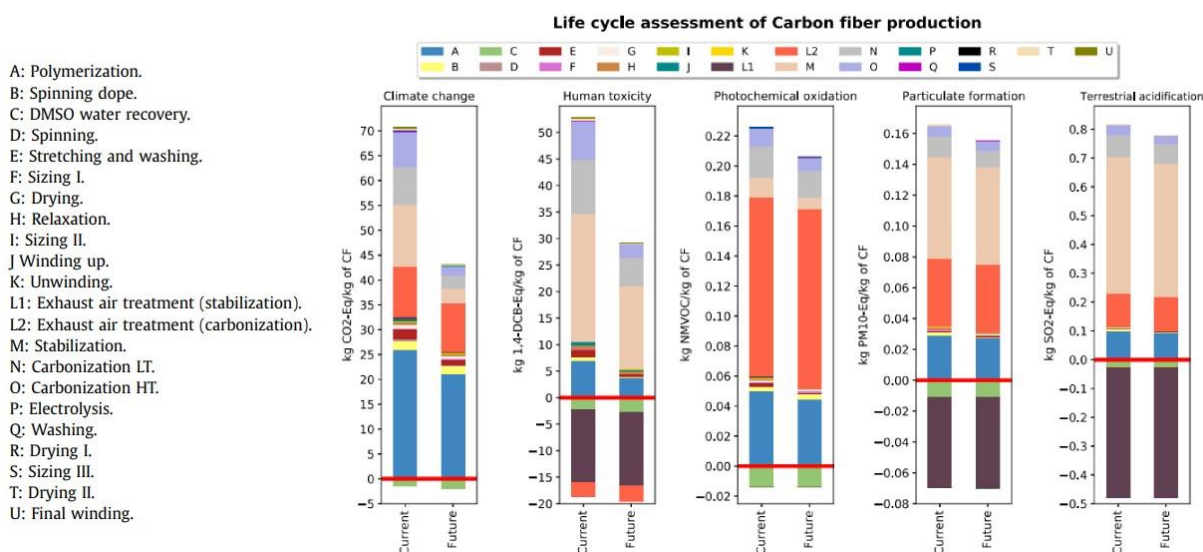
Obrázek 52 - Výrobní proces analyzované tlakové nádoby [31]

Předpokládaným výrobním procesem vodíku pro pohon FCEV je v obou scénářích alkalická elektrolýza vody. Doprava vyrobeného vodíku je uvažována naftovými nákladními vozidly. Analyzované FCEV má výkon 100 kW a teoretický dojezd 737 km, respektive 966 km (Tabulka 12). Předpokládaná spotřeba vodíku analyzovaného FCEV v současném scénáři odpovídá průměrné spotřebě již na trhu dostupného vozidla Toyota Mirai. Životnost FCEV je, tak jako u tlakové nádoby, stanovena na 150 000 km. [31]

Life cycle inventory adapted for this study		
Component	Current	Future
Hydrogen tank	Type IV 102 kg cc: 76 kg carbon fiber, 26 kg epoxy resin. Hydrogen capacity 5.6 kg	Type IV: 92 kg cc: 68 kg carbon fiber, 24 kg epoxy resin. Hydrogen capacity 5.6 kg
Glider	Standard passenger car 800 kg	Standard passenger car 800 kg
Fuel cell	PEM, 100 kW Platinum load: 20 g. 9 kW/m ² , 2 g/m ² Aa 11 m ²	PEM, 100 kW Platinum load: 6 g 16 kW/m ² , 1 g/m ² Aa 6 m ²
Battery	Li-Ion, LFP 82.90 Wh/kg 1.4 kWh	Li-Ion, LFP 138 Wh/kg 1.4 kWh
Electric motor and inverter	AC synchronous 100 kW, 53 kg	AC synchronous 100 kW, 53 kg
Electricity provision	German electricity mix 2015	German electricity mix 2050
Electricity demand of assembly	700 kWh per vehicle	560 kWh per vehicle
Hydrogen production	Adapted for FCEV hydrogen demand: 0.76 kg H ₂ per 100 km	Adapted for FCEV hydrogen demand: 0.58 kg H ₂ per 100 km

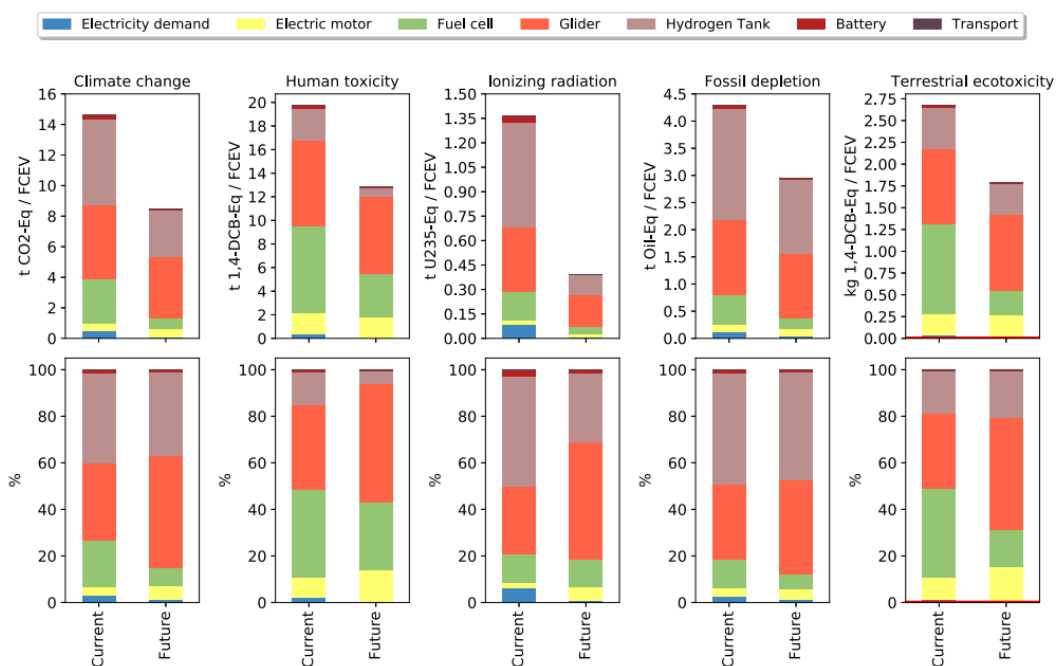
Tabulka 12 - Specifikace analyzovaného FCEV v obou scénářích [31]

Z výsledků analýzy produkce uhlíkových vláken je patrné, že výroba 1 kg uhlíkových vláken v současném scénáři představuje uvolnění přibližně 70 kgCO_{2eq} do atmosféry (Obrázek 53). V budoucím scénáři jsou emise skleníkových plynů redukovány na přibližně 43 kgCO_{2eq}. Podstatný dopad na všechny kategorie dopadu tvoří procesy polymerizace akrylonitrilu (A), stabilizace prekurzoru vlákna (M) a karbonizace (N a O). Významnou část dopadů na většinu kategorií představuje také karbonizace výfukových plynů (L2). Recyklace rozpouštědla (C) má naopak pozitivní vliv na každou z kategorií. Změna energetického mixu v budoucím scénáři má velmi pozitivní dopad hlavně na kategorie klimatická změna (emise skleníkových plynů) a lidská toxicita. [31]



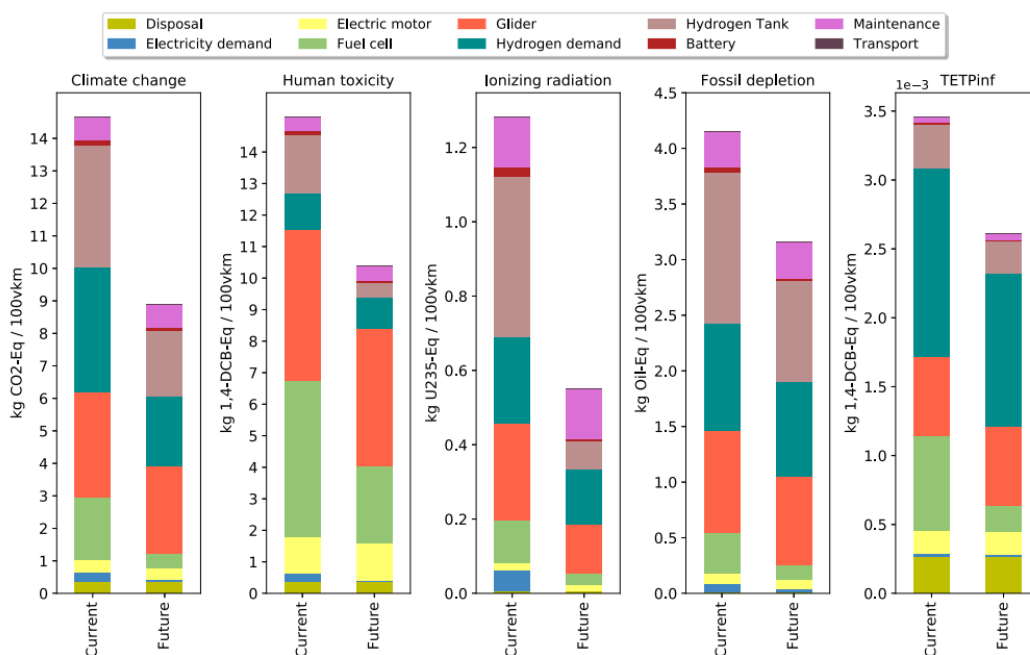
Obrázek 53 - Výsledky analýzy produkce uhlíkových vláken [31]

Při výrobě FCEV dle současné scénáře je uvolněno okolo 14 tCO_{2eq}, 38 % těchto emisí skleníkových plynů je tvořeno výrobou tlakové nádoby (Obrázek 54). V ostatních kategoriích dopadu výroba tlakové nádoby také výrazně ovlivňuje výsledné hodnoty. Environmentální dopady výroby tlakové nádoby jsou velmi závislé na množství použitých uhlíkových vláken. Budoucí scénář, který zahrnuje snížení množství uhlíkových vláken a úsporu energie, významně snižuje tyto dopady. Dopady výroby tlakové nádoby se v jednotlivých kategoriích snižují následovně, emise skleníkových plynů se snižují o 46 %, lidská toxicita o 75 %, ionizující záření o 82 %, vyčerpání fosilních paliv o 33 % a ekotoxicita země o 26 %. [31]



Obrázek 54 - Výsledky analýzy výrobní fáze FCEV [31]

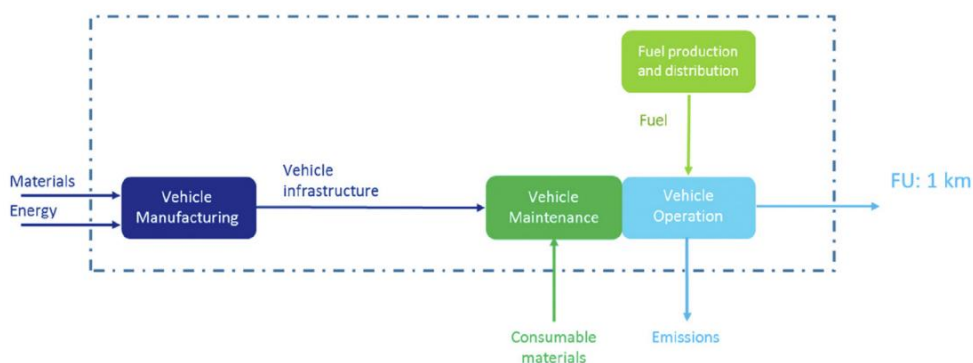
Výsledky hodnocení celého životního cyklu FCV ukazují, že na každých ujetých 100 km připadá 15 kgCO_{2eq} emisí skleníkových plynů (Obrázek 55). V budoucím scénáři je tato hodnota snížena na 9 kgCO_{2eq}. Redukce v kategorii lidská toxicita dosahuje v budoucím scénáři 31 % díky snížení obsahu platiny v palivovém článku. Větší podíl obnovitelných zdrojů v energetickém mixu budoucího scénáře snižuje dopad v kategorii ionizující záření o 57 % a v kategorii vyčerpání fosilních paliv o 24 %. Fáze likvidace a údržby FCV nepřesahují 10 % podíl na dopadu v žádné z kategorií. Z výsledků lze pozorovat, že dopady spojené s tlakovou nádobou jsou významné i v rámci celého životního cyklu FCV. [31]



Obrázek 55 - Výsledky analýzy celého životního cyklu FCEV [31]

5.2.6 LCA analýza 6 - Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars (Candelaresi et al., 2021)

V této analýze autoři hodnotí dopady životního cyklu různě poháněných vodíkových vozidel, těmi jsou vozidlo poháněné palivovým článkem (FCEV), vozidlo poháněné spalovacím motorem (H2-ICE) a hybridní vozidlo poháněné spalovacím a elektrickým motorem (HEV H2-ICE). Vodíková vozidla jsou následně porovnávána s vozidly na stlačený zemní plyn a s vozidly spalujícími směsí vodíku a jiného paliva. Analýza zahrnuje fáze výroby, provozu a údržby vozidla i WTW fáze životního cyklu paliva (Obrázek 56). Likvidace vozidla není v této analýze uvažována. Analyzovány byly tři kategorie dopadu, a to globální oteplování (emise skleníkových plynů, GWP), acidifikace (AP) a neobnovitelná energie (CED). [32]



Obrázek 56 - Hranice systému analýzy [32]

Pro porovnání vozidel si autoři zvolili jako referenci průměrný evropský osobní automobil patřící do kompaktní třídy o výkonu 80 kW. Zahrnuté do analýzy byly pouze zážehové spalovací motory. Specifikace vodíkových vozidel jsou uvedeny v Tabulka 13. Je důležité poznamenat, že hmotnost a dojezd jednotlivých vodíkových vozidel se liší. HEV H2-ICE má také o 27 kW vyšší výkon než ostatní vodíková vozidla. Životnost palivového článku je uvažována 190 000 km, z tohoto důvodu je na stejnou

hodnotu omezena i životnost FCEV. U ostatních vozidel je životnost stanovena 300 000 km. U všech vodíkových vozidel je předpokládáno využití tlakové nádoby typu 4, která pojme 5 kg vodíku při tlaku 700 barů. [32]

Table 2 – Main technical characteristics of the hydrogen vehicles considered in the study.

Parameter (unit)	FCEV	H2-ICE	HEV H2-ICE
H ₂ consumption (kg/100 km)	0.76	1.68	1.27
Weight (kg)	1800	1380	1550
Lifespan (km travelled)	190,000 ^a	300,000 ^b	300,000 ^b
Thermal engine power (kW)	–	80	58.4
Electric motor power (kW)	80	–	48.6
Driving range (km)	600	300	400
Storage pressure (bar)	700	700	700
Tank volume (l)	120	120	120
Hydrogen (kg)	5	5	5

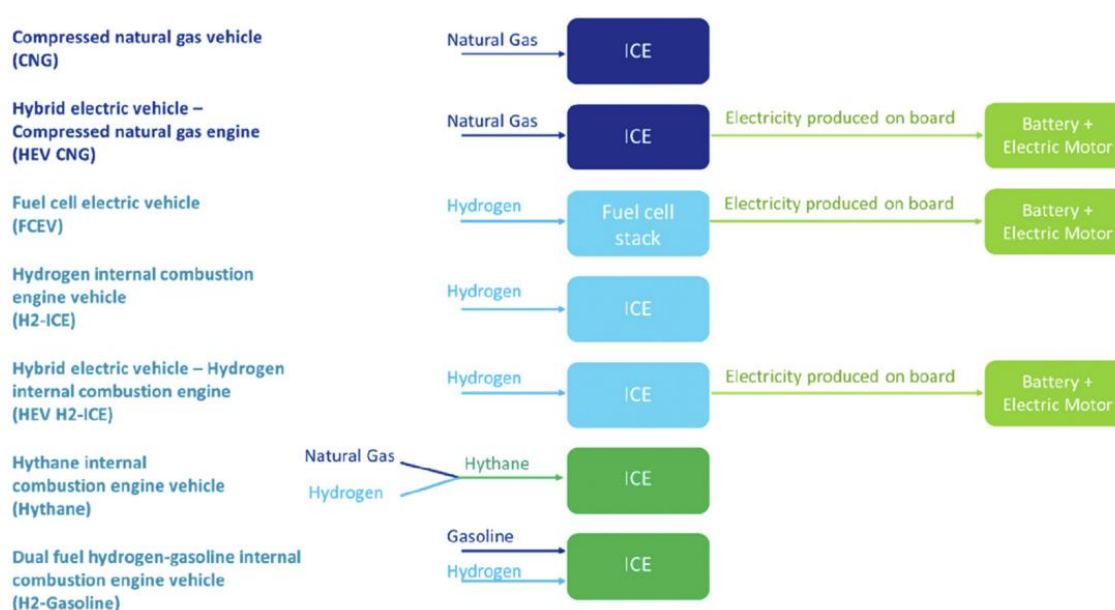
^a Based on [22].

^b Based on [24,25].

Tabulka 13 - Specifikace analyzovaných vodíkových vozidel [32]

Analyzována jsou pro porovnání dvě různě poháněná vozidla na stlačený zemní plyn (Obrázek 57). První je poháněno spalovacím motorem, jenž spaluje pouze zemní plyn (CNG) a druhé je hybridní poháněné jak spalovacím, tak elektrickým motorem (HEV CNG). Vozidla spalující směsi vodíku a jiného paliva se objevují v analýze také dvojího druhu. Jedním je vozidlo poháněné spalovacím motorem, který spaluje hytan (Hythane). Takové vozidlo je skoro identické s CNG. Druhým je vozidlo poháněné spalovacím motorem spalujícím směs vodíku a benzínu, přičemž tato směs vzniká až přímo v motoru (H2-Gasoline). Součástí H2-Gasoline je menší tlaková nádoba typu 4 pro skladování 1 kg vodíku. Směs vodíku a benzínu používaná v H2-Gasoline má stejný energetický poměr jako hytan a tedy vodík poskytuje 7,3 % celkové energie směsi. [32]

Autoři uvažovali výrobu vodíku elektrolýzou vody, pro kterou je elektřina generována z větrné energie. Předpokládána je silniční doprava vyrobeného vodíku (100 km). Doprava hytanu je uvažována potrubím dlouhým 100 km. [32]



Obrázek 57 - Porovnávaná vozidla [32]

Údaje o spotřebě paliva a hodnoty emisí při provozu vozidel byly získány z více různých zdrojů. Nejmenší spotřeby paliva dosahuje FCEV, naopak největší spotřebu paliva má CNG (Tabulka 14). Vodíková vozidla neprodukují při svém provozu emise CO₂ a FCEV dokonce neprodukuje emise žádné. Hythane produkuje při provozu méně emisí CO₂ než CNG a H2-Gasoline. [32]

Vehicle	Fuel economy [km/kg]	CO ₂ [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
FCEV ^a	131.58	–	–	–	–
H2-ICE ^b	59.239	–	0.05851	0.0082	0.0205
HEV H2-ICE ^b	78.985	–	0.05851	0.0082	0.0172
CNG	28.571 ^c	94.000 ^c	0.04825 ^c	0.0294 ^d	0.0168 ^d
HEV CNG ^e	43.290	66.888	0.03233	0.0201	0.0049
Hythane ^f	34.382	75.670	0.02779	0.0194	0.0269
H2-Gasoline ^g	31.352	87.146	0.10227	0.0258	0.0337

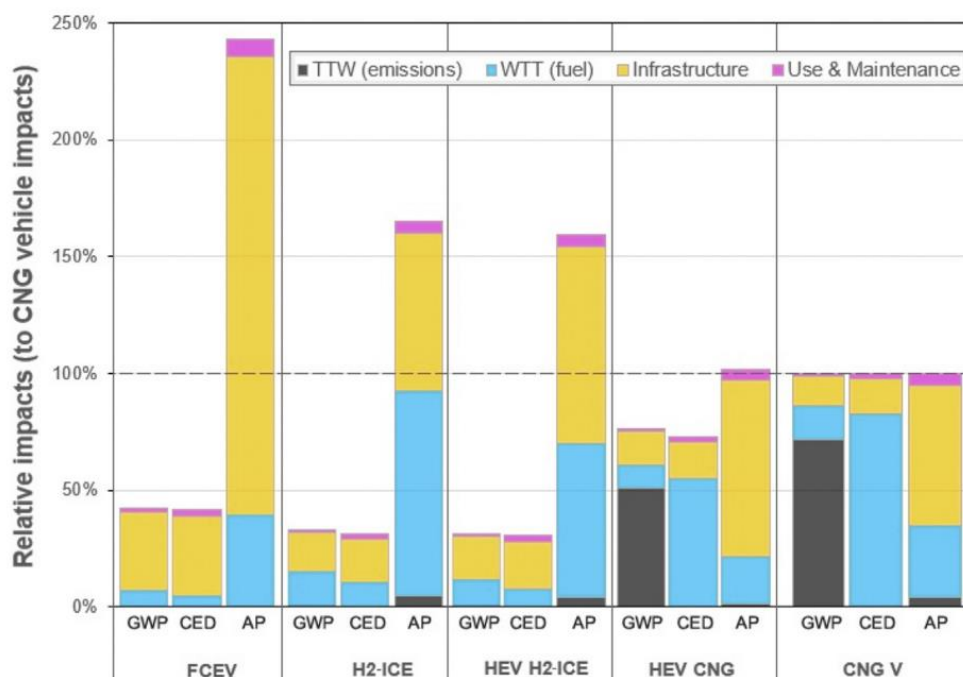
Tabulka 14 - Údaje o spotřebě paliva a hodnoty emisí při provozu porovnávaných vozidel [32]

V kategoriích dopadu GWP a CED dosahují nejlepších výsledných hodnot vodíková vozidla (Tabulka 15). V kategorii AP je trend jiný a největší dopad na tuto kategorii má FCEV. V této kategorii dosahují nejlepších výsledků Hythane, CNG a HEV CNG. Vodíková vozidla se spalovacím motorem celkově dosahují lepších výsledků než FCEV. Výsledky FCEV jsou ale výrazně poznamenány nižší životností vozidla. Hythane je dle výsledků ve všech kategoriích lepší volbou než H2-Gasoline, zejména díky využití zemního plynu místo benzínu. Hythane je také zajímavou alternativou snižující enviromentální dopady k CNG. [32]

	GWP [kg CO ₂ eq·km ⁻¹]	CED [MJ·km ⁻¹]	AP [kg SO ₂ eq·km ⁻¹]
FCEV	5.601·10 ⁻²	9.913·10 ⁻¹	5.332·10 ⁻⁴
H2-ICE	4.343·10 ⁻²	7.450·10 ⁻¹	3.618·10 ⁻⁴
HEV H2-ICE	4.103·10 ⁻²	7.227·10 ⁻¹	3.500·10 ⁻⁴
CNG	1.317·10 ⁻¹	2.367	2.161·10 ⁻⁴
HEV CNG	1.004·10 ⁻¹	1.734	2.229·10 ⁻⁴
Hythane	1.106·10 ⁻¹	1.996	2.113·10 ⁻⁴
H2-Gasoline	1.301·10 ⁻¹	2.211	4.019·10 ⁻⁴

Tabulka 15 - Charakterizační profily porovnávaných vozidel [32]

Na obr. 58 lze vidět porovnání vodíkových vozidel a vozidel na zemní plyn s využitím CNG jako měřítko. Z tohoto porovnání lze pozorovat, že výroba (značeno infrastructure) FCV má větší enviromentální dopady než výroba ostatních vozidel. To je dáno hlavně menší komplexností konstrukce spalovacích motorů ve srovnání s palivovými články. FCEV je ale nejlepší volbou z hlediska dopadů WTT, což je důsledkem velmi nízké spotřeby paliva a předpokládané výroby vodíku pomocí větrné energie. Fáze provozu a údržby má u všech vozidel pouze nepatrný vliv na výsledky. [32]



Obrázek 58- Relativní dopady vodíkových vozidel a vozidel na zemní plyn [32]

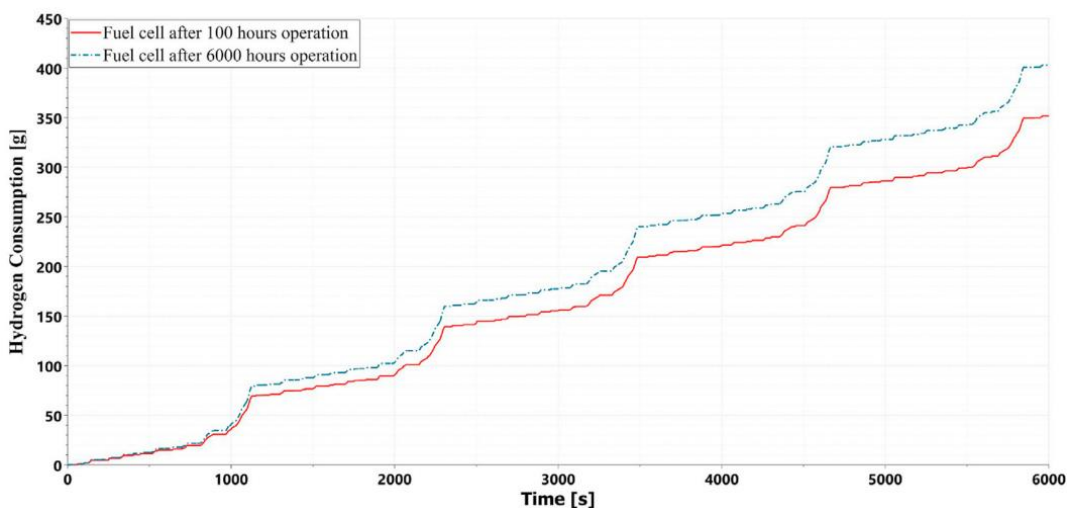
5.2.7 LCA analýza 7 - Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods (Ahmadi et Khoshnevisan, 2022)

Hlavním cílem této analýzy je zhodnotit životní cyklus vodíkového vozidla poháněného palivovým článkem (FCV) a porovnat jím produkované emise při využití vodíku z různých výrobních procesů. Autoři speciálně zkoumají vliv degradace palivového článku na množství emisí produkovaných FCV. Pro lepší pochopení byly výsledky FCV porovnány s výsledky benzinového vozidla (Gasoline). Analýza zahrnuje životní cyklus paliva i vozidla. V analýze ale není uvedeno, zda životní cyklus vozidla počítá s fází likvidace. Pro získání údajů o spotřebě paliva a emisích byl použit jízdní cyklus NEDC. Analyzovány byly emise skleníkových plynů (CO₂), CO, NO_x a těžkých organických látek. [33]

Parameters of PEM	Value
Fuel cell stack lower/upper voltage bound	200/380 V
Heating value of hydrogen	120 MJ/kg
Maximum output current	500 A
Maximum output power of fuel cell	114 kW
Minimum output power of fuel cell	5 kW
Single-cell thickness	1.34 mm
Total fuel cell stack weight	37.74 kg
Vehicle information (Length, width, height)	4.89 m, 1.81 m, 1.53 m
FCV weight	1850 kg
Type of battery cells	Nickel-metal hydride unit
Battery pack dimensions	190 × 850 × 495 mm
Battery pack capacity	1.6 kWh
Battery pack weight	52 kg
Cells number	84

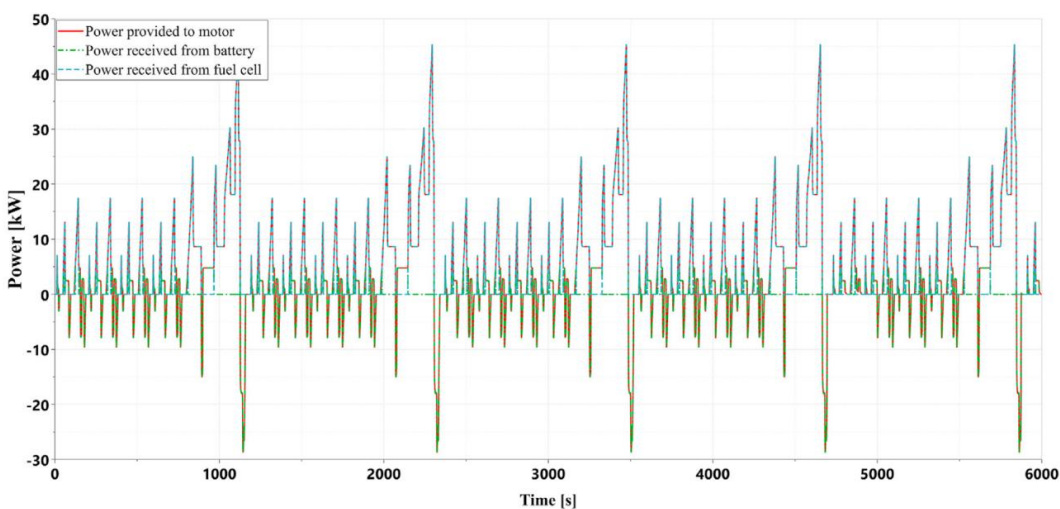
Tabulka 16 - Specifikace vozidla Toyota Mirai [33]

Specifikace analyzovaného FCV odpovídá osobnímu automobilu Toyota Mirai (Tabulka 16). Autoři v analýze neuvádějí celkovou životnost vozidla. Během provozu FCV dochází k degradaci palivového článku, a tedy k poklesu napětí. Pokles napětí má negativní vliv na efektivitu a výkon palivového článku. K degradaci dochází hlavně při velkém počtu startů a zastavení. Míra degradace palivového článku je v analýze uvažována $6,91 \times 10^{-3}$. Palivový článek po 6 000 h používání spotřebuje při pěti NEDC cyklech (55,1 km) 0,401 kg vodíku (Obrázek 59). Čerstvě zjetý palivový článek při stejných pěti cyklech spotřebuje 0,350 kg vodíku. Degradace palivového článku tedy zvyšuje spotřebu paliva o 14,3 %. Používaný článek vykazuje pokles napětí 11,3 %, což kromě již uvedené spotřeby paliva ovlivňuje i zrychlení v důsledku sníženého výkonu. [33]



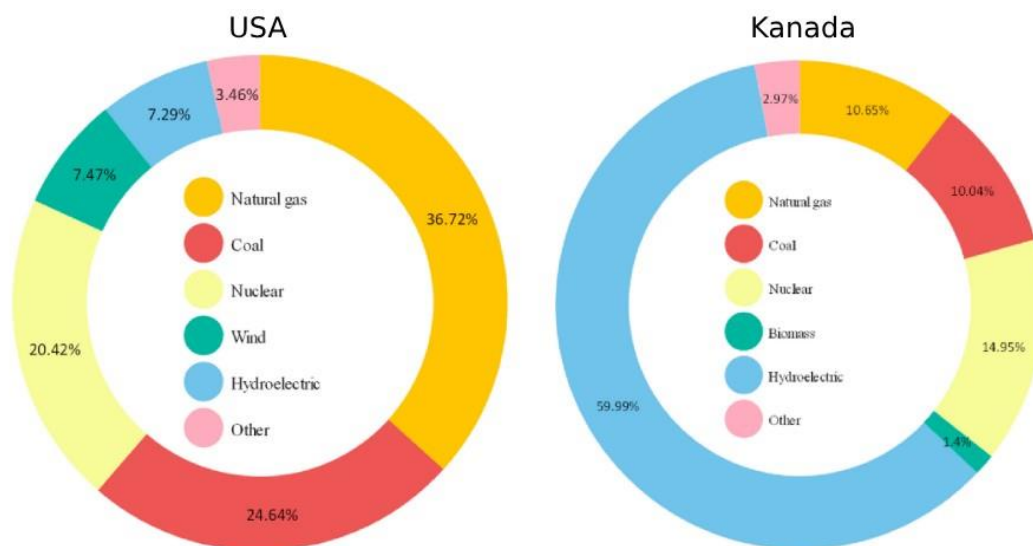
Obrázek 59 - Srovnání spotřeby paliva nového a používaného palivového článku [33]

Z obr. 60 je vidět jak baterie a palivový článek poskytují elektrickou energii motoru k zajištění požadovaného výkonu FCV při opakovaných cyklech NEDC. Při nízkém výkonu FCV je samotná baterie schopna dodávat požadovanou energii motoru. Při vyšším výkonu FCV poskytuje energii motoru palivový článek. Z grafu lze také pozorovat energii ukládanou do baterie při brzdění vozidla tzv. rekuperaci energie. [33]



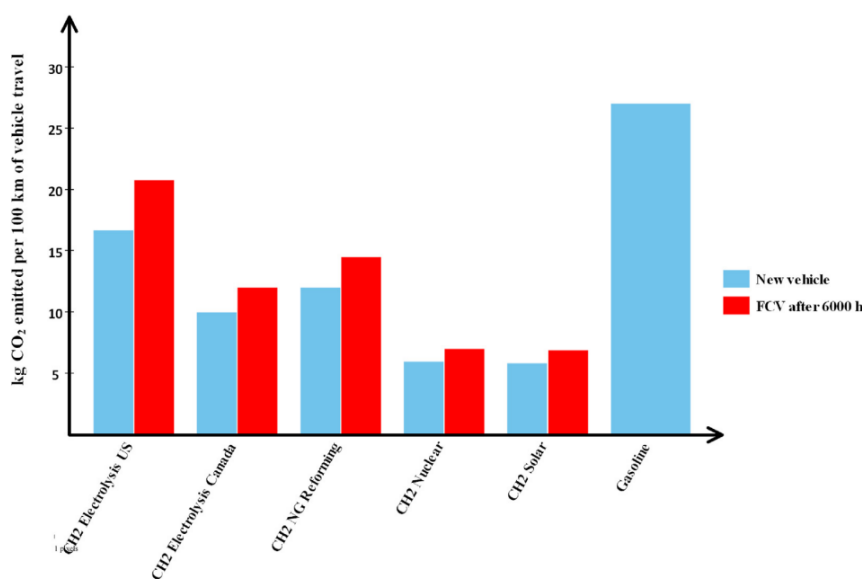
Obrázek 60 - Elektrické energie dodávaná z baterie a z palivového článku motoru v FCV při opakovaných cyklech NEDC [33]

Výroba vodíku byla uvažována parním reformováním zemního plynu (CH₂ NG Reforming), elektrolýzou vody nebo termochemickým cyklem. Pro elektrolýzu byly uvažovány tři různé zdroje elektrické energie, kterými jsou větrná energie (CH₂ Solar), energetický mix USA (CH₂ Electrolysis US) a energetický mix Kanady (CH₂ Electrolysis Canada). V energetickém mixu USA pochází většina elektrické energie z fosilních paliv, zatímco v energetickém mixu Kanady je většina elektrické energie dodávána z vodních elektráren (Obrázek 61). K výrobě vodíku termochemickým cyklem bylo uvažováno použití odpadního tepla z jaderné elektrárny (CH₂ Nuclear). [33]



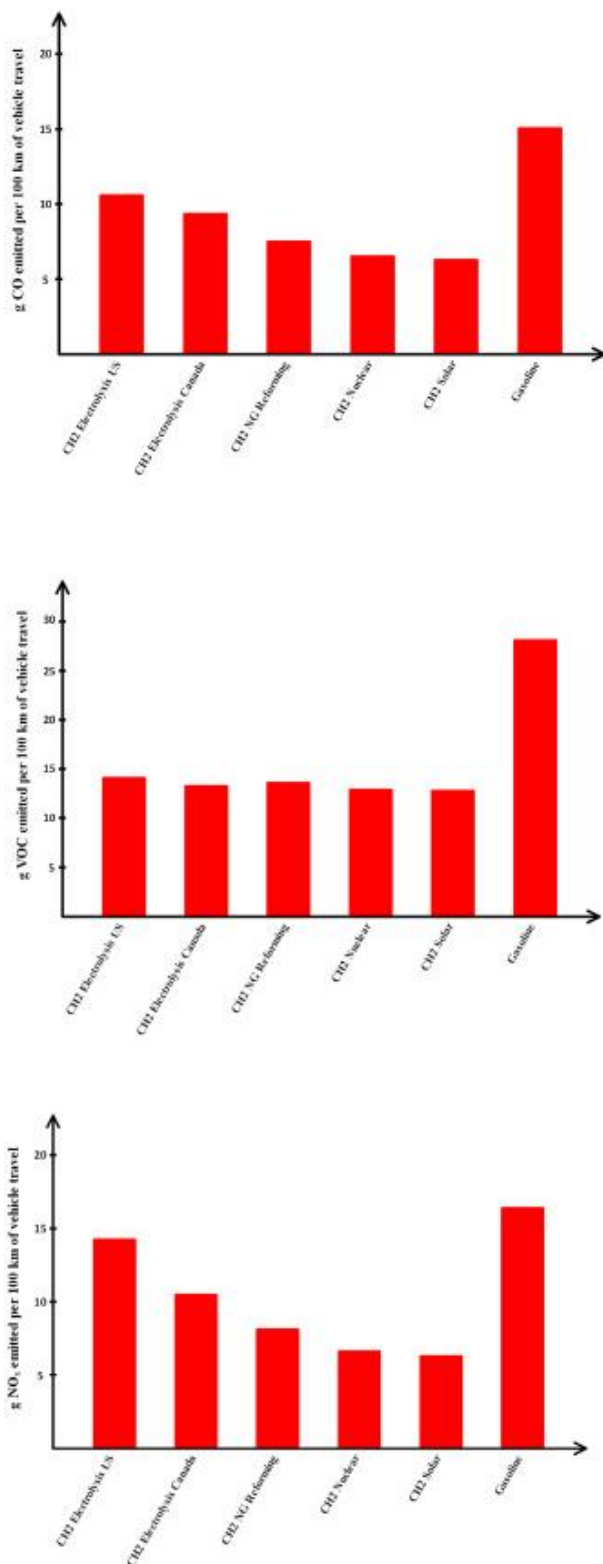
Obrázek 61 - Složení energetických mixů USA a Kanady [33]

Výsledné hodnoty produkovaných emisí CO₂ ukazují, že jakákoliv varianta FCV produkuje méně emisí než Gasoline, a to i pokud je FCV provozováno s použitým palivovým článkem (Obrázek 62). Největší redukce emisí CO₂ ve srovnání s Gasoline dosahují varianty CH₂ Nuclear a CH₂ Solar. Rozdíl mezi CH₂ Electrolysis US a CH₂ Electrolysis Canada je způsoben větším zastoupením obnovitelných zdrojů v energetickém mixu Kanady. Lze také pozorovat negativní vliv degradace palivového článku na emise CO₂. Tento vliv je výraznější u variant produkujících více emisí CO₂. [33]



Obrázek 62 - Porovnání výsledných hodnot emisí CO₂ [33]

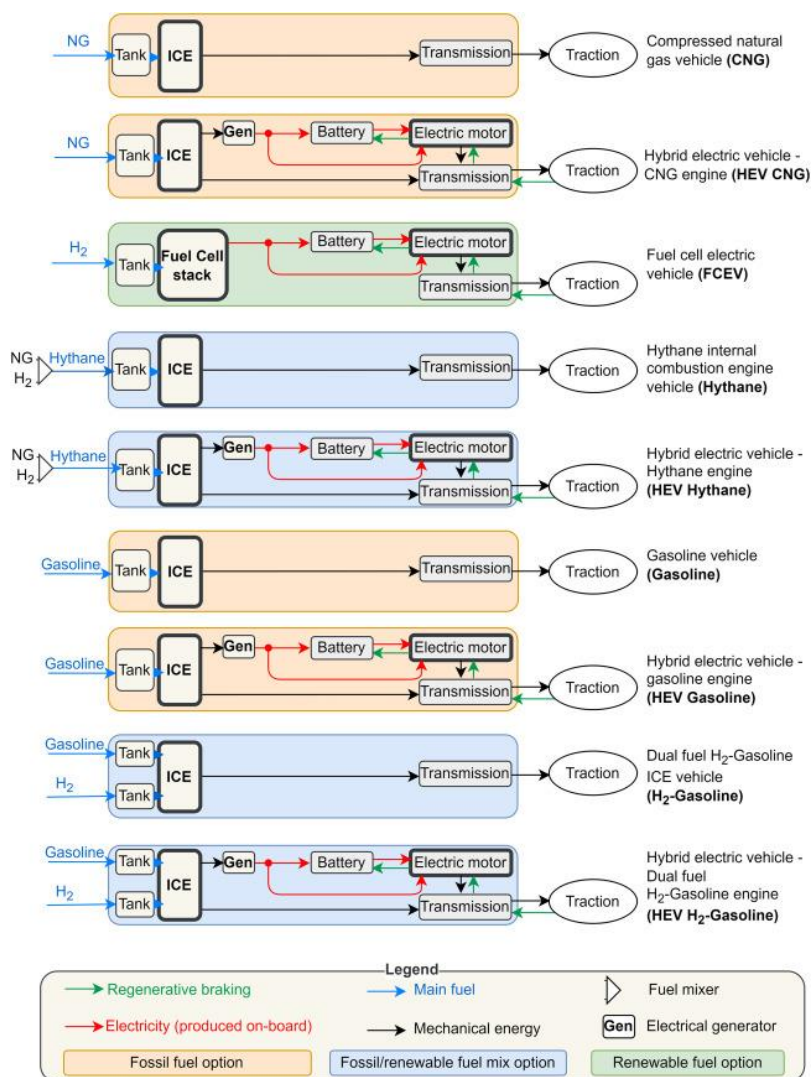
Využitím jakékoliv varianty FCV dochází ke snížení emisí i dalších znečišťujících látek ve srovnání s Gasoline (Obrázek 63). Nejméně emisí CO a NO_x produkují opět CH2 Nuclear a CH2 Solar. Všechny varianty FCV produkují podobné množství emisí těkavých organických látek, toto množství je přibližně poloviční oproti Gasoline. Výsledky analýzy ukazují, že složení energetického mixu dokáže výrazně ovlivnit emise znečišťujících látek FCV. [33]



Obrázek 63 - Výsledné hodnoty emisí CO, těkavých organických látek a NO_x [33]

5.2.8 LCA analýza 8 - Novel short-term national strategies to promote the use of renewable hydrogen in road transport: A life cycle assessment of passenger car fleets partially fuelled with hydrogen (Candelaresi et al., 2022)

Tuto analýzu vypracovali stejní autoři jako LCA analýzu 6 a využívají mnoho předpokladů a dat z ní, proto doporučují nejdříve přečíst shrnutí LCA analýzy 6. Cílem této analýzy je porovnání dopadů životního cyklu flotil osobních automobilů, které používají vodík a fosilní paliva samostatně (v různých vozidlech) nebo ve směsi (ve stejném vozidle). Itálie, kterou si autoři vybrali jako referenční zemi, plánuje zavedení vodíku z obnovitelných zdrojů v silniční dopravě. Autoři této práce navrhuji několik strategií ve formě různě složených flotil osobních automobilů, které mohou usnadnit zavedení vozidel využívajících vodík do italského vozového parku. Analýza zahrnuje fáze výroby, provozu a údržby vozidla i WTW fáze životního cyklu paliva, nezahrnuje však fázi likvidace vozidla. Analyzovány byly tři kategorie dopadu, a to globální oteplování (emise skleníkových plynů, GWP), neobnovitelná energie (CED) a acidifikace (AP). [34]



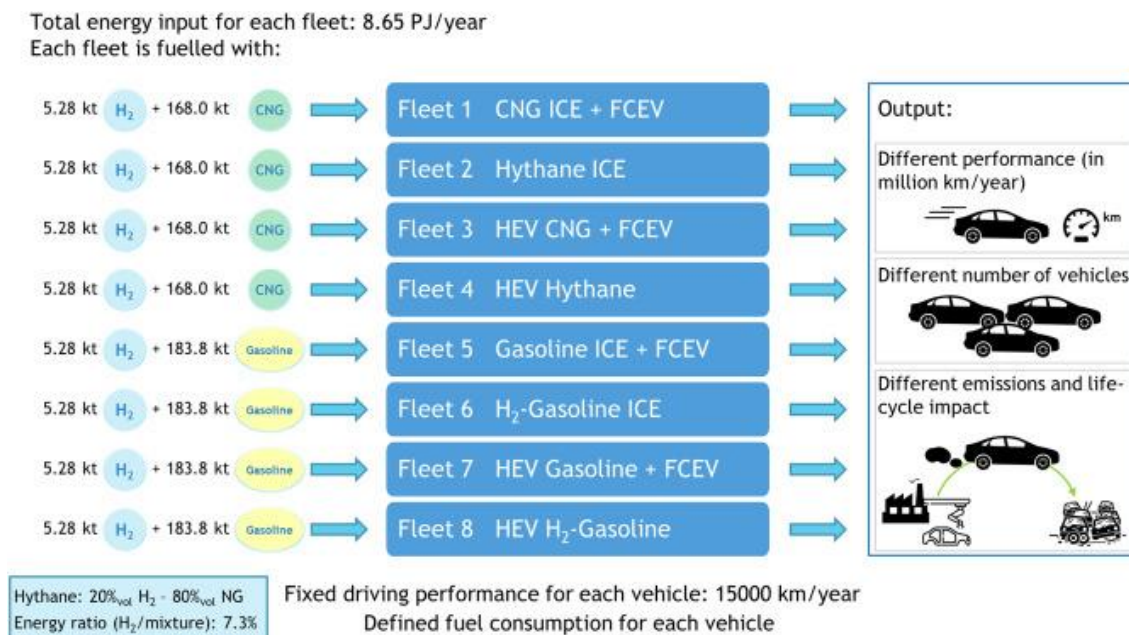
Obrázek 64 - Schémata analyzovaných vozidel [34]

Referenčním vozidlem si autoři zvolili průměrný evropský osobní automobil patřící do kompaktní třídy o výkonu 80 kW. Většina analyzovaných vozidel (FCEV, CNG, HEV CNG, Hythane, Gasoline, HEV Gasoline a H₂-Gasoline) je převzata ze starších analýz autorů ([32], [35]). K těmto vozidlům v této analýze přibyla ještě dvě hybridní vozidla, kterými jsou hybridní vozidlo využívající hytan (HEV Hythane) a hybridní vozidlo využívající směs vodíku a benzínu (HEV H₂-Gasoline) (Obrázek 64). Výkon hybridních automobilů je o 27 kW vyšší než ostatních. Spotřeba paliva, spotřeba energie a emise jednotlivých vozidel jsou uvedené v tab. 17. Zajímavostí je uvedení emisí vody, přestože neovlivňují výsledky analýzy. [34]

Vehicle	Fuel economy [km/kg]	Energy consumption ^a [MJ/km]	CO ₂ [g/km]	CO [mg/km]	HC ^b [mg/km]	NO _x [mg/km]	H ₂ O ^c [g/km]
FCEV	131.58	0.912	–	–	–	–	67.9
CNG	29.240	1.631	94	48.25	29.4	16.8	76.8
HEV CNG	44.303	1.077	66.888	32.33	20.1	4.9	50.7
Hythane	34.382	1.451	75.670	27.79	19.4	26.9	71.3
HEV Hythane	52.094	0.958	53.845	18.62	13.3	7.9	47.0
Gasoline	26.667	1.635	105.4	292.54	41.2	20.5	53.2
HEV Gasoline	40.404	1.079	75	196	28.2	6.0	35.1
H ₂ -Gasoline	31.352	1.459	87.146	102.27	25.8	33.7	52.0
HEV H ₂ -Gasoline	47.503	0.963	62.011	68.52	17.6	9.9	34.3

Tabulka 17 - Spotřeba paliva, spotřeba energie a emise analyzovaných vozidel [34]

Složení navrhovaných flotil osobních automobilů z vozidel uvedených výše je vidět na obr. 65. Autoři předpokládali roční nájezd jednoho vozidla 15 000 km s průměrnou obsazeností 1,6 pasažéra. Aby bylo možné jednotlivé flotily porovnat, tak mají všechny stejný celkový energetický vstup. Množství využitého vodíku je ve všech flotilách identické, tedy 7,3 % celkového energetického vstupu, což odpovídá energetickému poměru v hytanu. Zbývající část energie je dodávána benzinem nebo zemním plynem. S přihlédnutím ke stanovenému cíli podílu zeleného vodíku na hrubé konečné energetické spotřebě italské dopravy ve výši 0,5 % v roce 2025, byla odhadnuta dostupnost vodíku z obnovitelných zdrojů pro italské osobní automobily 5,28 kt. Z energetického poměru uvedeného výše byl dopočítán celkový energetický vstup jedné flotily 8,65 PJ. [34]



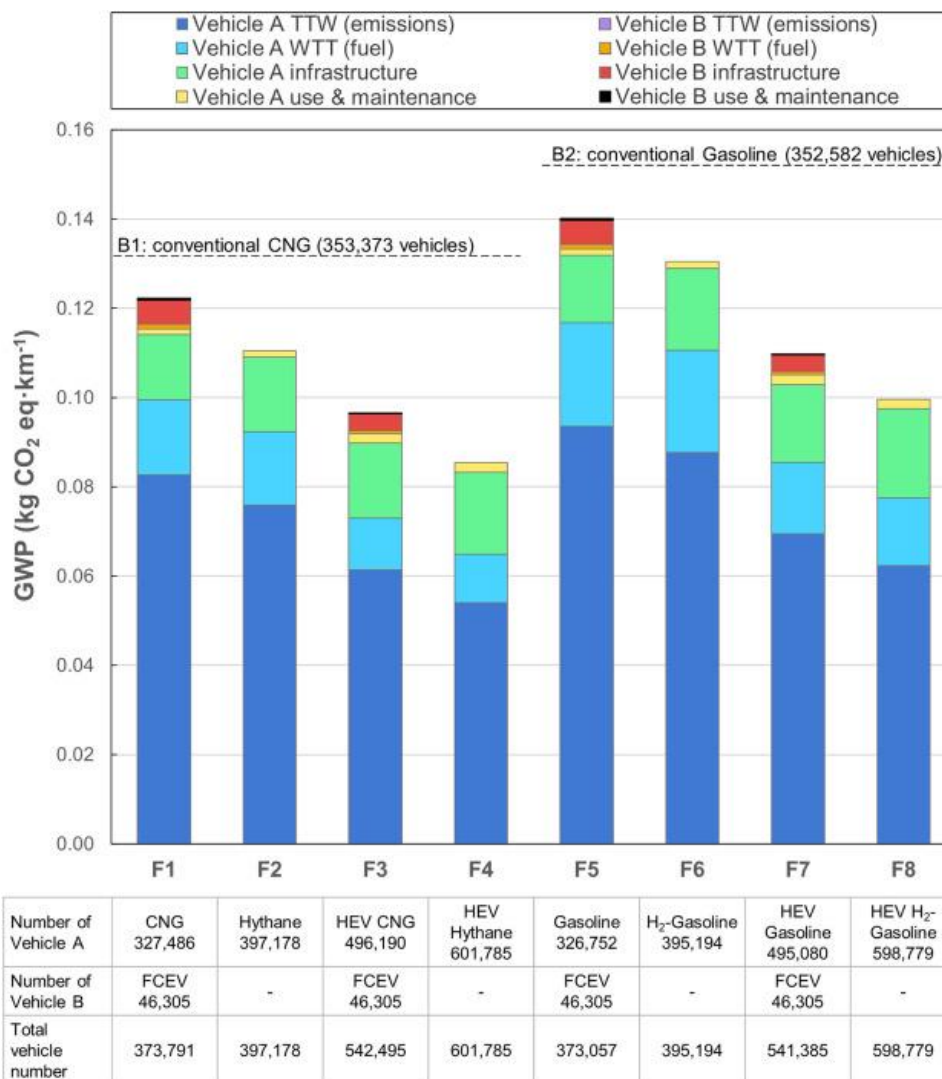
Obrázek 65 - Složení navrhovaných flotil osobních automobilů [34]

Výroba vodíku byla uvažována elektrolýzou vody využívající větrnou energii. Předpokládána byla doprava vodíku nákladním vozidlem ke 100 km vzdálené čerpací stanici. Doprava hytanu je uvažována 100 km dlouhým potrubím. [34]

Fleet	Vehicles A [million km/year]	Vehicles B [million km/year]	Total km fleet [million km/year]	Vehicles A [million pkm/year]	Vehicles B [million pkm/year]	Total pkm fleet [million pkm/year]
F1: CNG + FCEV	4912.29	694.58	5606.87	7859.67	1111.33	8970.99
F2: Hythane	5957.68	–	5957.68	9532.29	–	9532.29
F3: HEV CNG + FCEV	7442.86	694.58	8137.45	11,908.58	1111.33	13,019.91
F4: HEV Hythane	9026.79	–	9026.79	14,442.86	–	14,442.86
F5: Gasoline + FCEV	4901.29	694.58	5595.88	7842.07	1111.33	8953.40
F6: H ₂ -Gasoline	5927.92	–	5927.92	9484.67	–	9484.67
F7: HEV Gasoline + FCEV	7426.20	694.58	8120.78	11,881.93	1111.33	12,993.25
F8: HEV H ₂ -Gasoline	8981.70	–	8981.70	14,370.72	–	14,370.72

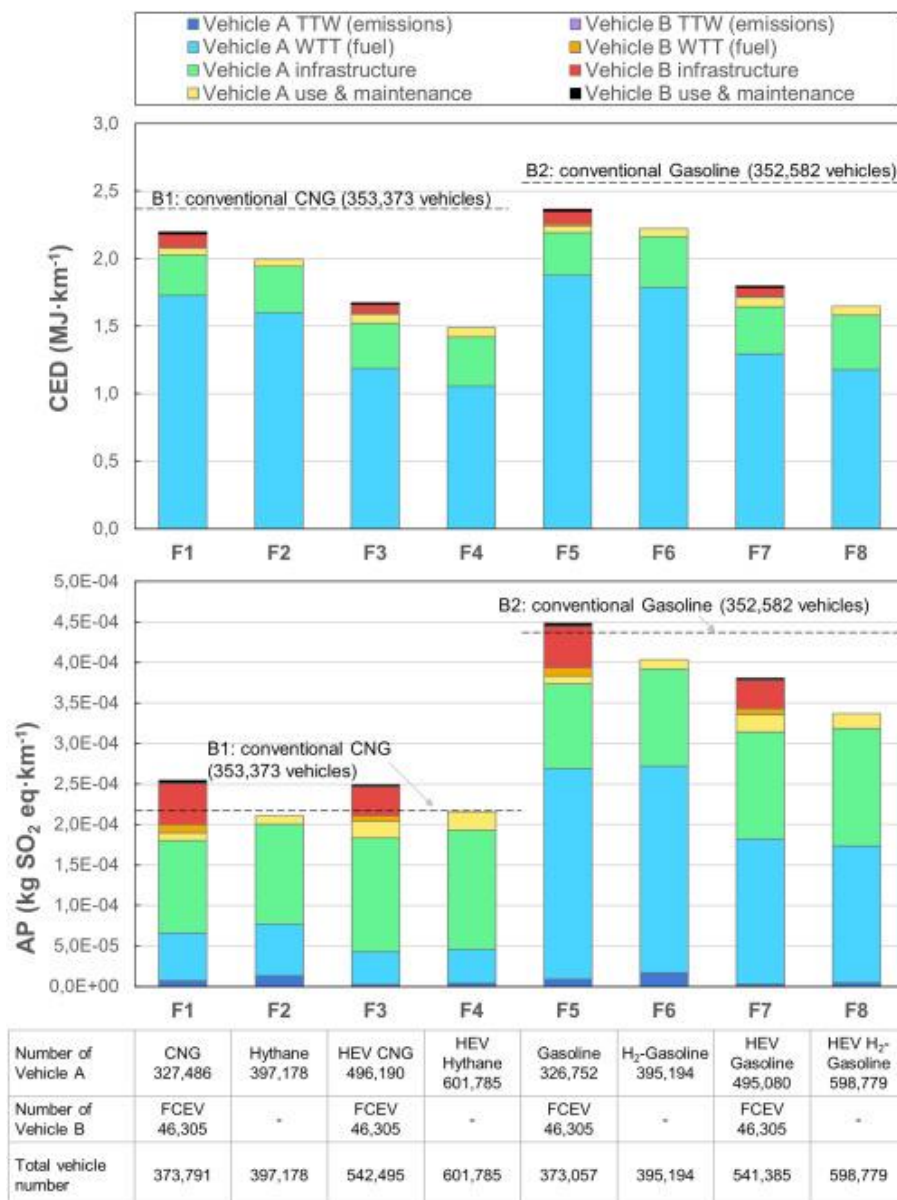
Tabulka 18 - Ujeté kilometry a osobokilometry vozidel v rámci flotil za rok [34]

Ve výsledcích autoři používají označení fuel 1 pro zemní plyn, benzin nebo hytan a fuel 2 pro vodík. Vozidla jsou označena obdobně. Vehicle A jsou označena vozidla využívající fosilní paliva či směsi paliv a vehicle B je označení pro FCEV. V tab. 18 jsou vypočítané roční ujeté kilometry a osobokilometry vozidel v rámci jednotlivých flotil. Z těchto výsledků plyne, že flotily s více ujetými kilometry dokáží ze stejného energetického vstupu pohánět více vozidel se stejným předpokládaným ročním nájezdem. Nejvíce kilometrů ujedou vozidla v rámci F4 a F8, naopak nejméně kilometrů ujedou vozidla v rámci F1 a F5. Z výsledných hodnot je patrné, že flotily využívající směsi paliv dosahují většího počtu kilometrů než flotily využívající dvě paliva separátně a také, že flotily s hybridními vozidly ujedou více kilometrů než flotily využívající vozidla poháněná čistě spalovacími motory. Lze také říci, že flotily využívající jako palivo benzin dosahují horších hodnot než flotily využívající zemní plyn. [34]



Obrázek 66 - Výsledné emise skleníkových plynů jednotlivých flotil [34]

Obrázek 66 zobrazuje výsledné emise skleníkových plynů jednotlivých flotil, a navíc je porovnává s flotilami složenými buď pouze z CNG (B1) nebo pouze z Gasoline (B2). Nejméně emisí skleníkových plynů vyprodukuje F4 a nejvíce jich vyprodukuje F5, jako jediná z analyzovaných flotil více než B1. Všechny analyzované flotily nabízejí snížení emisí CO₂ v porovnání s B2. Největší podíl na emisích skleníkových plynů všech flotil mají emise z TTW fáze vozidel, která spalují fosilní palivo buď výhradně nebo ve směsi. [34]



Obrázek 67 - Výsledky analyzovaných flotil v dalších kategoriích dopadu [34]

Výsledky analyzovaných flotil v kategorii CED (Obrázek 67) jsou velice podobné těm v kategorii GWP, což vede ke stejnému pořadí flotil. Největší podíl na dopadech flotil na tuto kategorii tvoří WTT fáze fosilních paliv či jejich směsí. V kategorii AP jsou výsledky jiné. Velkou roli z hlediska AP hraje výroba vozidel, a proto u početnějších flotil je podíl této fáze na dopadu výraznější. V této kategorii tedy nejlepšího výsledku dosáhla F2 před F4 a nejhorsího výsledku dosáhla stejně jako ve všech kategoriích F5. Výsledný dopad F5 je dokonce větší než B2, k čemuž výrazně přispívá výroba FCEV. V kategorii AP obecně dosáhli lepšího výsledku flotily využívající zemní plyn než flotily využívající benzin. [34]

Z výsledků všech kategorií dopadu lze vyvodit, že nejvhodnější flotilou pro zavedení zeleného vodíku do italské silniční dopavy v krátkém časovém horizontu je F4, která je složena z HEV Hythane. Celkově si v analýze dobře vedly flotily využívající směsí vodíku a fosilních paliv v hybridních vozidlech. Nejhůře si napříč kategoriemi dopadu vedla F5 složená z Gasoline a FCEV. Použití FCEV ve flotile je dle výsledků analýzy vhodnější s hybridními vozidly než s klasickými vozidly se spalovacím motorem, což koresponduje s tím, že flotily s hybridními vozidly celkově dosahovaly lepších výsledků. [34]

5.3 Porovnání výsledků LCA analýz

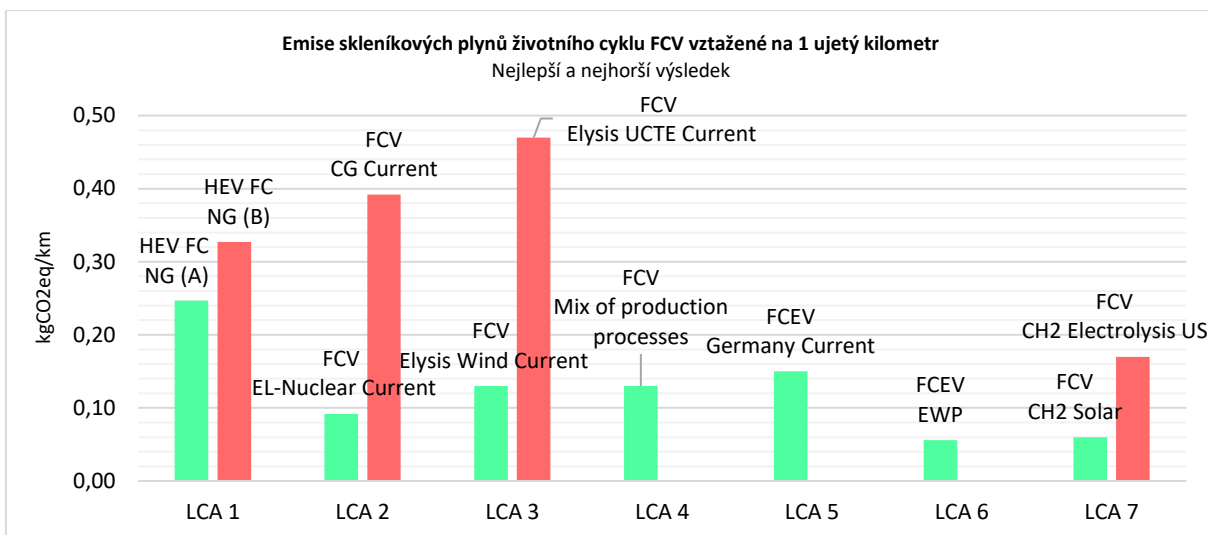
V této části jsou výsledky vybraných LCA analýz přímo porovnávány mezi sebou. Porovnání výsledků LCA analýz může být zavádějící, přestože všechny vybrané LCA analýzy v této práci mají shodnou funkční jednotku, tak se liší svými cíli a rozsahy, na kterých jsou jejich výsledky závislé. Rozdíly ve výsledcích vznikají také různými předpoklady a technickými specifikacemi v jednotlivých analýzách. Faktory, které mají potenciál nejvíce ovlivnit výsledky jsou uvedeny v tab. 19.

Číslo analýzy	Rozsah	Spotřeba energie při provozu v MJ/km	Životnost v km	Analyzované vozidlo
LCA 1	WTW, výroba, provoz a likvidace vozidla	2,52	563 250	HEV FC
LCA 2	WTW, výroba, provoz a likvidace vozidla i výroba a údržba silniční infrastruktury	1,63	240 000	FCV Current
LCA 3	WTW, výroba, provoz a likvidace vozidla i výroba a údržba silniční infrastruktury	1,26	150 000	FCV Current
LCA 4	Výroba, provoz a likvidace vozidla	1,02	150 000	FCV
LCA 5	Výroba, provoz a likvidace vozidla	0,91	150 000	FCV Current
LCA 6	WTW, výroba a provoz vozidla	0,91	190 000	FCEV
LCA 7	WTW, Výroba a provoz vozidla	0,76	neuvedeno	FCV

Tabulka 19 – Rozsah, spotřeba energie při provozu a životnost analyzovaných FCV

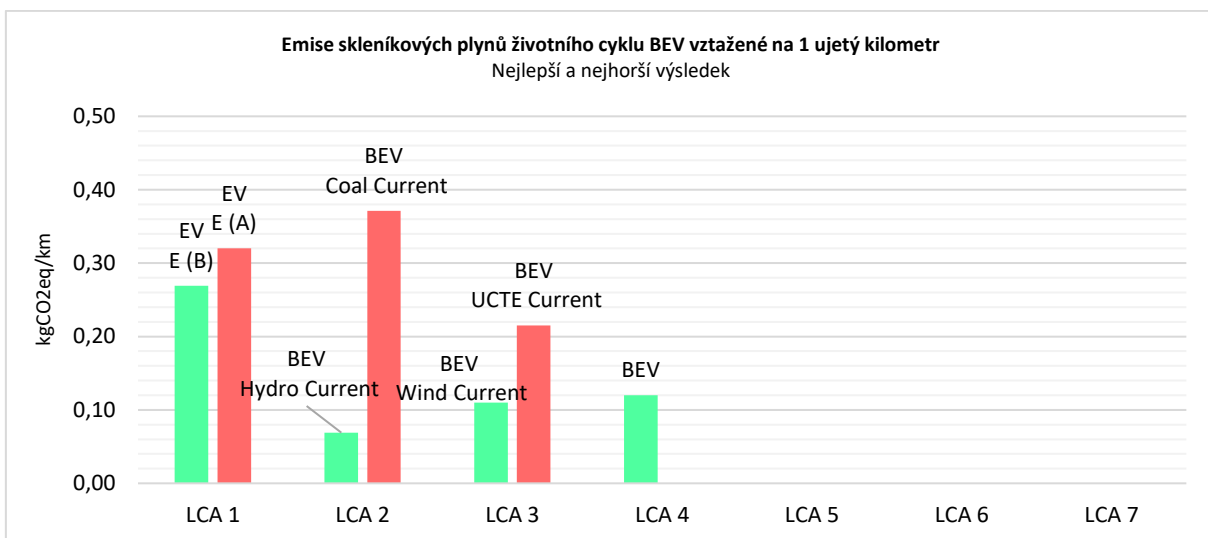
Pro přímé porovnání jsem si vybral výsledné hodnoty emisí skleníkových plynů, jelikož tyto hodnoty jsou jediným společným výstupem všech vybraných LCA analýz vodíkových vozidel. Autoři jednotlivých analýz mohou využívat odlišné výpočetní metody pro výpočet emisí skleníkových plynů. Cílem porovnání výsledných hodnot emisí je tedy spíše ukázat, do jaké míry se tyto hodnoty emisí, které mohou ovlivnit rozhodování, odlišují v rámci různých analýz. V této práci porovnávám pouze emise skleníkových plynů srovnatelných vozidel s palivovými články (FCV), plně elektrických vozidel (BEV) a vozidel se spalovacími motory (ICEV) na naftu, zemní plyn či benzin. LCA analýzu 8 jsem z tohoto porovnání vyjmul, poněvadž poskytuje výsledné hodnoty emisí pouze pro flotily vozidel, a nikoliv pro samotná vozidla. Z LCA analýzy 1 jsem k porovnání vybral HEV-FC, jelikož PHEV-FC není kvůli možnost dobíjení na nabíječce srovnatelné s ostatními FCV. Při porovnávání jsem uvažoval základní scénáře analýz odpovídající současnému stavu technologií. Budoucí scénáře ani degradaci palivového článku jsem do porovnání nezahrnul. Výsledné hodnoty ze všech analýz jsem za účelem jejich porovnání převedl na společnou jednotku $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$. Nejdříve jsem porovnal nejlepší a nejhorší hodnoty emisí FCV z jednotlivých analýz, poté jsem nejlepší výsledky FCV porovnal s nejlepšími výsledky BEV i ICEV a následně jsem porovnával výsledné hodnoty FCV využívajících vodík ze stejných výrobních procesů.

V grafu na obr. 68 jsou vyneseny nejlepší a nejhorší hodnoty emisí životního cyklu FCV z jednotlivých LCA analýz. V některých analýzách (LCA analýzy 4, 5 a 6) byla posuzována pouze jedna varianta FCV. Z grafu lze vyzorovat, že nejlepšími hodnotami dosahovala vozidla spotřebovávající vodík vyrobený s využitím obnovitelných zdrojů nebo jaderné energie. Nejhoršími hodnotami dosahovala naopak vozidla, která používají vodík vyrobený s využitím fosilních paliv. Hodnoty emisí FCV se napříč analýzami pohybovaly v širokém rozmezí od $0,06 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ až po $0,47 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$.



Obrázek 68 - Porovnání nejlepších a nejhorších výsledných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu FCV

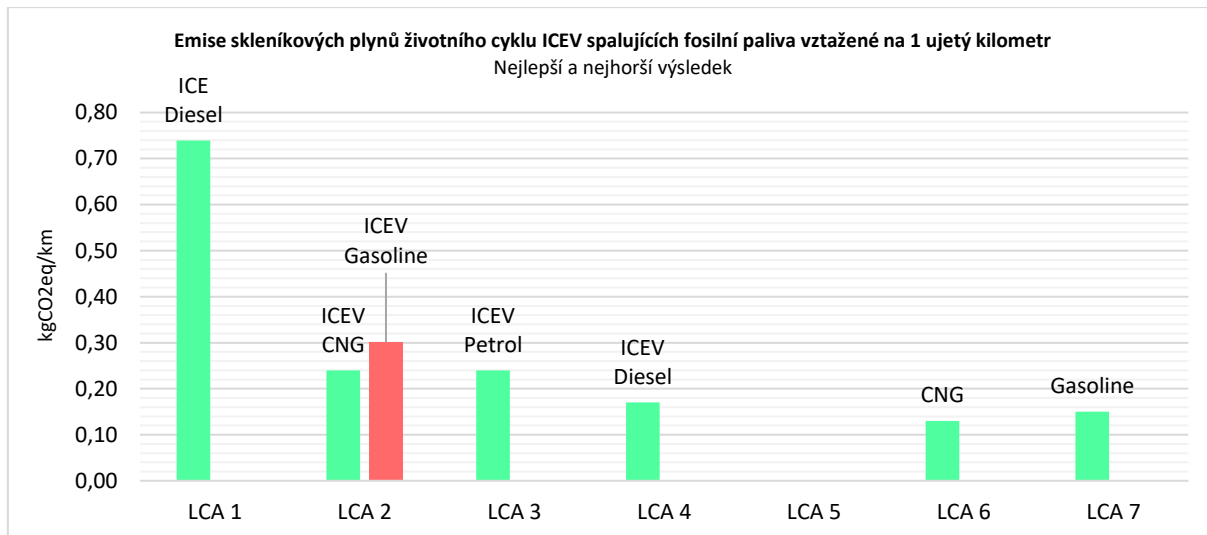
BEV byly s FCV porovnávány v LCA analýzách 1, 2, 3 a 4. V LCA analýze 4 byla posuzována pouze jedna varianta BEV. Nejlepší a nejhorší hodnoty emisí životního cyklu BEV se pohybují mezi 0,07 kgCO_{2eq}/km a 0,37 kgCO_{2eq}/km (Obrázek 69). Nejlepších hodnot dosahují BEV využívající elektřinu z obnovitelných zdrojů, zatímco nejhorší hodnoty dosáhlo BEV nabíjené elektrickou energií vyráběnou z uhlí. Hodnoty emisí BEV v porovnávaných analýzách jsou většinou podobné jako u FCV, ve třech ze čtyř analýzách jsou nižší.



Obrázek 69 - Porovnání nejlepších a nejhorších výsledných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu BEV

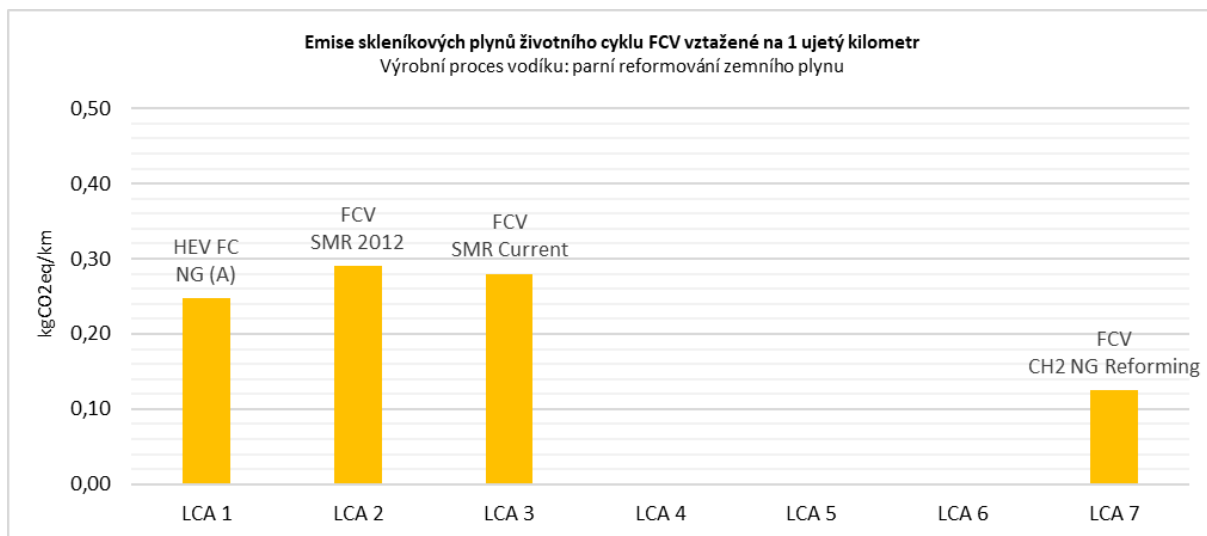
Při porovnávání nejlepších a nejhorších hodnot emisí životního cyklu ICEV (Obrázek 70) jsem uvažoval pouze ICEV spalující čistě fosilní paliva (zemní plyn, benzin a nafta). Hybridní ICEV jsem pro přehlednost srovnání neuvažoval. ICEV se objevili ve všech analýzách kromě LCA analýzy 5. Ve většině porovnávaných analýz byla hodnocena pouze jedna varianta ICEV. Výrazně nejhorší hodnota 0,74 kgCO_{2eq}/km pochází z LCA analýzy 1 a je způsobena velmi vysokou spotřebou nafty (22,8 L/100 km neboli 8,00 MJ/km) ICEV Diesel v jízdním cyklu PCO-CENEX London Taxi. Nejlepší hodnoty 0,13 kgCO_{2eq}/km dosáhlo ICEV spalující stlačený zemní plyn v LCA analýze 6. Z tohoto porovnání nelze rozhodnout, jaké fosilní palivo pro ICEV je z hlediska emisí skleníkových plynů nejlepší volbou. Jediná

analýza, která porovnávala více ICEV s různými palivy, byla LCA analýza 2. Podle výsledků této analýzy nejvyšších hodnot emisí dosahuje ICEV spalující benzin, o něco nižších hodnot dosahuje ICEV na naftu a nejnižších hodnot dosahuje ICEV spalující stlačený zemní plyn. Při srovnání dosahovaných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu ICEV, BEV a FCV lze konstatovat, že pokud FCV a BEV využívají bezemisních zdrojů, tak ICEV dosahují horších hodnot.



Obrázek 70 - Porovnání nejlepších a nejhorších výsledných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu ICEV

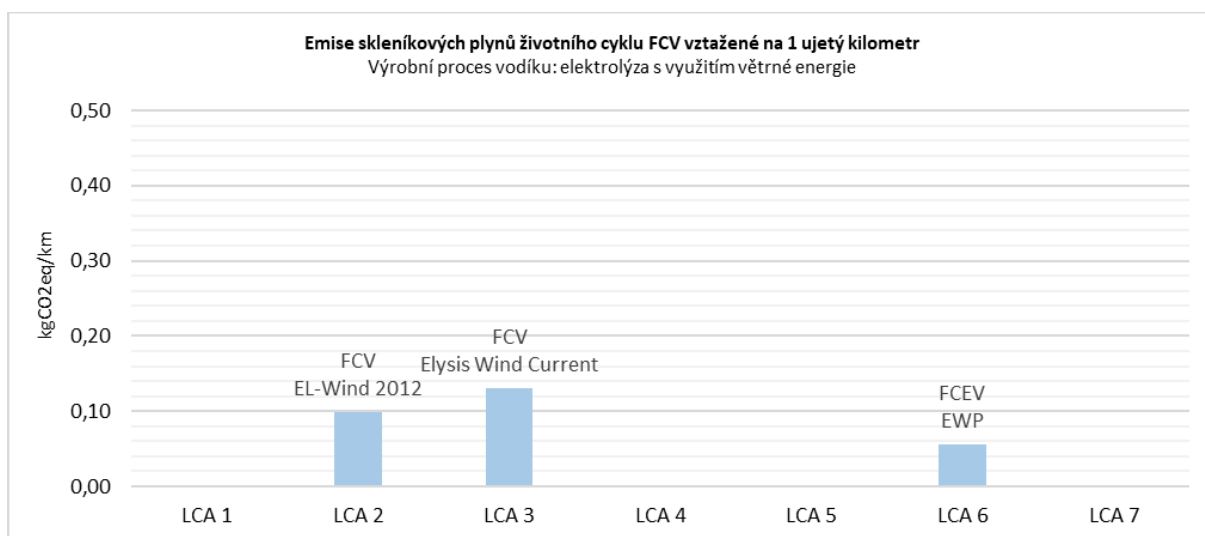
Výsledné hodnoty emisí FCV využívajících vodík vyrobený parním reformováním zemního plynu se v LCA analýzách 1,2 a 3 pohybují v úzkém rozmezí kolem hodnoty 0,27 kgCO_{2eq}/km (Obrázek 71). Výsledná hodnota emisí v LCA analýze 7 je ale výrazně nižší (0,14 kgCO_{2eq}/km). To bude nejpravděpodobněji způsobeno rozdílnými výsledky WTT fází životního cyklu paliva, jelikož tyto fáze se na emisích FCV dle LCA analýz 1,2 a 3 podílí nejvíce. K této teorii přispívá fakt, že LCA analýza 7 počítá s nejmenší spotřebou paliva FCV z porovnávaných analýz. Rozdíly mezi výsledky LCA analýz 1,2 a 3 mohou být způsobeny rozdílnou životností a spotřebou paliva FCV.



Obrázek 71 - Porovnání emisí skleníkových plynů FCV využívajících vodík z parního reformování zemního plynu

Porovnání výsledných hodnot emisí FCV spotřebovávajících vodík vyrobený elektrolýzou s využitím větrné energie (Obrázek 72) ukazuje, že výsledné hodnoty v LCA analýzách 2 a 3 mají mezi sebou

poměrně malý odstup (0,099 kgCO_{2eq}/km a 0,130 kgCO_{2eq}/km), zatímco výsledná hodnota v LCA analýze 6 je oproti nim nižší (0,056 kgCO_{2eq}/km), což může být důsledek toho, že FCV v LCA analýze 6 má nejnižší spotřebu paliva. Rozdíl mezi LCA analýzami 2 a 3 bude nejspíše z velké části způsoben rozdílnou životností hodnoceného FCV.



Obrázek 72 - Porovnání emisí skleníkových plynů FCV využívajících vodík vyrobený elektrolýzou s využitím větrné energie

Provedená porovnání v této části práce ilustrují rozdíly v konečných hodnotách emisí skleníkových plynů životního cyklu srovnatelných variant vozidel z jednotlivých analýz. Přestože jsou porovnávány zdánlivě srovnatelné výsledky LCA analýz, tak se hodnoty i násobně liší. Významnými předpoklady ovlivňujícími výsledné hodnoty emisí jsou předpokládaná spotřeba paliva a životnost vozidla.

5.4 Diskuse zjištěných poznatků

V této části jsou diskutovány zjištěné poznatky získané při analýze a porovnávání vybraných LCA studií. Obecně lze z výsledků konstatovat, že vodíková vozidla mají potenciál redukovat dopady automobilové dopravy na globální oteplování (emise skleníkových plynů), zejména pokud jsou pro výrobu vodíku využity obnovitelné zdroje energie. Výsledky LCA analýz 2 a 3 ukazují, že použití fosilních paliv (např. zemní plyn nebo neobnovitelné zdroje elektrické energie) při výrobě vodíku pro vodíková vozidla nevede k výrazné redukci emisí skleníkových plynů v porovnání s vozidly poháněnými spalovacími motory na fosilní paliva a v některých případech dokonce dochází k nárůstu produkovaných emisí. Výsledky LCA analýz 1 a 7 ale toto nepotvrzují a dle nich při využití vodíku vyráběného parním reformováním zemního plynu ve vodíkových vozidlech dochází k výrazné redukci emisí CO₂ oproti motorovým vozidlům spalujícím benzin či naftu. Výsledky vybraných analýz se shodují na tom, že výroba vodíku parním reformováním zemního plynu je z hlediska emisí skleníkových plynů lepší než výroba vodíku elektrolýzou při využití elektřiny z energetického mixu s velkým podílem fosilních paliv. Tento poznatek je nutné uvažovat při zavádění vodíkových vozidel do vozového parku, tak aby nedocházelo ke zvyšování produkce emisí skleníkových plynů. K největší redukci emisí skleníkových plynů produkovaných vodíkovými vozidly dochází při výrobě vodíku elektrolýzou využívající obnovitelné zdroje energie (např. větrná, vodní a sluneční energie) nebo jadernou energii. Vhodným výrobním procesem vodíku pro vodíková vozidla, který dosahuje podobných hodnot produkovaných emisí jako elektrolýza s využitím obnovitelných zdrojů, je dle LCA analýzy 7 thermochemický cyklus využívající odpadní teplo z jaderné elektrárny.

S využíváním vodíkových vozidel místo vozidel spalujících fosilní paliva může docházet ke zvyšování dopadu na některé další kategorie dopadu. Např. dopad životního cyklu vodíkových vozidel s palivovými články na kategorii lidská toxicita je, bez ohledu na výrobu vodíku, vždy větší, a to i mnohonásobně než vozidel spalujících fosilní paliva. Podobně negativní enviromentální výkon vykazují vodíková vozidla i v kategoriích acidifikace a tvorba prachových částic. To je způsobeno zejména výrobou palivových článků a výrobou vodíku.

Fází životního cyklu vodíkového vozidla s největšími dopady na životní prostředí je fáze výroby. Výroba tlakových nádob, hlavně typu 4, pro skladování vodíku a palivových článků je z hlediska enviromentálních dopadů výrobní fáze vozidla nejvýznamnější. Největší část dopadů výroby palivového článku tvoří těžba platiny. Výsledné dopady výroby tlakové nádoby typu 4 nejvíce ovlivňuje množství použitých uhlíkových vláken v konstrukci nádoby. Největší část dopadů životního cyklu vodíku jakožto paliva tvoří jeho výroba, a proto je pro ekologický provoz vodíkových vozidel stěžejní, jak je již uvedeno výše, zajistit výrobu vodíku z bezemisních zdrojů.

Porovnání životních cyklů vodíkového a elektrického vozidla vyznívá častěji lépe pro elektrické vozidlo. Autoři analýz ale často předpokládají využití baterií o nízké kapacitě v elektrických vozidlech. Tyto baterie limitují efektivní dojezd vozidel a zároveň zkreslují výsledky LCA analýz. Některé analýzy také pracují s rozdílnou životností těchto vozidel odůvodněnou nízkou životností baterie či palivového článku, což také výrazně ovlivňuje jejich výsledky. Degradaci palivového článku se zabývala LCA analýza 7, ve které autoři zjistili nárůst spotřeby vodíku o 14,3 % po 6000 h používání vodíkového vozidla.

LCA analýza 6 nabízí porovnání různě poháněných vodíkových vozidel. Výsledky této analýzy naznačují, že využití motorových vozidel spalujících vodík by mohlo být z hlediska enviromentálních dopadů lepší volbou, než využití vodíkových vozidel poháněných palivovým článkem. V kombinaci s výsledky LCA analýzy 8, kterou vypracovali stejní autoři, lze doporučit využití palivových směsí vodíku s jinými palivy v silniční dopravě pro dosažení krátkodobých enviromentálních cílů. Nejvhodnější směsí se jeví hytan, který může být přepravován stávající infrastrukturou pro zemní plyn po provedení drobných úprav.

V budoucnu autoři některých analýz očekávají, že dojde k technologickému rozvoji a pozitivním změnám v energetických mixech. Autoři v rámci technologického rozvoje předpokládají snížení množství platiny používané v palivových člancích a také snížení množství uhlíkových vláken potřebných na konstrukci tlakové nádoby. Za těchto předpokládaných podmínek bude docházet k trvalému snižování dopadů životního cyklu vodíkových vozidel. Autoři LCA analýzy 3 se ale domnívají, že i přes rozvoj technologií a nárůst objemu výroby budou náklady životního cyklu vodíkového vozidla v budoucnu vyšší než u alternativ.

Závěr

V této bakalářské práci byly analyzovány dva různé druhy pohonu vodíkových vozidel, a to spalování vodíku ve spalovacích motorech a využití palivových článků k výrobě elektrické energie pro elektromotor. V současné době jsou palivové články preferovány pro svou vysokou účinnost a kompletně bezemisní provoz oproti vodíkovým spalovacím motorům. Díky své nízké provozní teplotě a nízké hmotnosti se jeví palivové články s polymerní elektrolytickou membránou jako nejvhodnější pro aplikaci ve vozidlech. Vyšší výkon, nižší náklady na výrobu a vyspělost pístových motorů činí ze spalování vodíku atraktivní alternativu, která může být rychle zavedena v masovém měřítku. Spalování směsí vodíku s jinými palivy, např. vodíku s metanem, může dále snížit náklady, avšak vozidla využívající tato paliva generují během svého provozu více emisí skleníkových plynů než ta, která využívají čistý vodík.

Z představených výrobních procesů vodíku se do budoucna jeví jako nejvýznamnější elektrolýza vody. V práci je proto představeno hned několik technologií elektrolýzy vody. Při elektrolýze vody nedochází k uvolňování skleníkových plynů ani jiných škodlivých látek, ale pro dosažení CO₂ neutrální výroby vodíku elektrolýzou vody je nezbytné využívat elektrickou energii z bezemisních zdrojů. Také termochemický cyklus s využitím odpadního tepla jaderných elektráren je perspektivním výrobním procesem pro ekologickou a efektivní výrobu vodíku, neočekává se však na rozdíl od elektrolýzy, že by mělo dojít k jeho masivnímu rozšíření. Parní reformování, parciální oxidace a zplyňování nejsou z hlediska environmentálních dopadů perspektivní kvůli využití fosilních paliv.

Vyrobený vodík může být dopravován a skladován jak v kapalném, tak v plynném skupenství. Kapalný vodík má vyšší energetickou hustotu než plynný, ale jeho skladování a doprava je velice náročná. Kapalný vodík totiž musí být skladován a přepravován při teplotách menších než -252,8 °C. Pokud není zásobník na kapalný vodík aktivně chlazen, tak dochází k jeho ztrátám při skladování. Kapalný vodík je nejčastěji dopravován v zásobnících nákladními automobily a vlaky. Plynný vodík je skladován stlačený v tlakových nádobách a při jeho skladování v uzavřených systémech nedochází ke ztrátám. Ve vozidlech se nejčastěji skladuje plynný vodík stlačený na 350 barů nebo 700 barů a výroba vhodných tlakových nádob má rozsáhlé dopady na životní prostředí. Doprava plynného vodíku je nejčastěji zajištěna nákladními automobily, vlaky či loděmi, ale pro dopravu většího množství plynného vodíku je ekonomičtější využívat potrubí. Směs plynného vodíku se zemním plynem je možné dopravovat stávajícím potrubím pro zemní plyn, avšak po provedení menších úprav.

V práci je také popsána metodika LCA analýzy. V rámci tohoto popisu je uvedeno, jaké fáze životního cyklu by měla obsahovat kompletní LCA analýza vozidla.

V druhé polovině bakalářské práce bylo z dostupných LCA analýz vybráno osm LCA analýz životního cyklu vodíkových vozidel. Tyto LCA studie jsou dále v práci detailněji analyzovány a jejich výsledky shrnuty a následně porovnávány mezi sebou.

Z výsledků vybraných LCA analýz lze vyvodit, že vodíková vozidla mohou při využití bezemisních zdrojů k výrobě vodíku efektivně přispět k redukci emisí skleníkových plynů v silniční dopravě. Ve srovnání s elektrickými vozidly dosahují vodíková vozidla podobných hodnot produkovaných emisí skleníkových plynů v rámci jejich životního cyklu. Zavedení vodíkových vozidel do provozu místo vozidel spalujících fosilní paliva může mít za následek zvýšení dopadů na jiné kategorie dopadu jako jsou např. lidská toxicita nebo tvorba prachových částic. Z hlediska environmentálních dopadů je nejdůležitější fází životního cyklu vozidla jeho výroba. Výroba palivových článků vyžaduje těžbu platiny, která výrazně

zatěžuje životní prostředí. Také výroba uhlíkových vláken pro tlakové nádoby určené ke skladování vodíku výrazně přispívá k celkovým dopadům výrobní fáze vozidla na životní prostředí. V rámci životního cyklu paliva je výroba vodíku nejvýznamnějším přispěvatelem k celkovým dopadům. Pro minimalizaci těchto dopadů je nutné vodík vyrábět s využitím bezemisních zdrojů.

Porovnání výsledných hodnot emisí skleníkových plynů z jednotlivých analýz ukázalo, že výsledné hodnoty se mezi analýzami mohou i násobně lišit. Tyto rozdíly jsou způsobeny kromě rozdílných cílů a rozsahů analýz i různými předpoklady autorů.

Zjištěné poznatky z výsledků vybraných LCA analýz a jejich porovnání jsou detailněji uvedeny v závěrečné diskusi.

Seznam použité literatury

- [1] KLELL, Manfred, Helmut EICHLSEDER a Alexander TRATTNER. *Hydrogen in Automotive Engineering* [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023 [cit. 2024-01-03]. ISBN 978-3-658-35061-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-35061-1
- [2] IEA. *Global Hydrogen Review 2022* [online]. Paris: IEA, 2022. Dostupné také z: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- [3] BLAGOJEVIĆ, Ivan a Saša MITIĆ. HYDROGEN AS A VEHICLE FUEL. *Mobility and Vehicle Mechanics* [online]. 2018, 2018-12-31, **44**(2), 37-49 [cit. 2024-01-03]. ISSN 14505304. Dostupné z: doi:10.24874/mvm.2018.44.02.04
- [4] FAYAZ, H., R. SAIDUR, N. RAZALI, F.S. ANUAR, A.R. SALEMAN a M.R. ISLAM. An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, **16**(8), 5511-5528 [cit. 2024-01-03]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.06.012
- [5] HEID, Bern, Christopher MARTENS a Anna ORTHOFER. How hydrogen combustion engines can contribute to zero emissions. *McKinsey & Company* [online]. McKinsey Global Publishing, 2021 [cit. 2024-01-03]. Dostupné z: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-hydrogen-combustion-engines-can-contribute-to-zero-emissions>
- [6] MAKARYAN, Iren A., Igor V. SEDOV, Eugene A. SALGANSKY, Artem V. ARUTYUNOV a Vladimir S. ARUTYUNOV. A Comprehensive Review on the Prospects of Using Hydrogen–Methane Blends: Challenges and Opportunities. *Energies* [online]. 2022, **15**(6), 2265 [cit. 2024-01-03]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15062265
- [7] BREEZE, Paul. *Fuel Cells* [online]. Elsevier Science & Technology, 2017 [cit. 2024-01-03]. ISBN 9780128095157. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=4803605#>
- [8] SELLA, Andrea. Grove's gaseous voltaic battery. ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. *Chemistry world* [online]. c2024 [cit. 2024-01-03]. Dostupné z: <https://www.chemistryworld.com/opinion/groves-gaseous-voltaic-battery/4011756.article>
- [9] CORBO, Pasquale, Fortunato MIGLIARDINI a Ottorino VENERI. *Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles* [online]. Springer London, Limited, 2011 [cit. 2024-01-03]. ISBN 9780857291363. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=666646>
- [10] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, 2002 [cit. 2024-01-03]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [11] LÉON, Aline, ed. *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008 [cit. 2024-01-03]. Green Energy and Technology. ISBN 9783540699255. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-69925-5
- [12] MITSUSHIMA, Shigenori, HACKER, Viktor, ed. *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research* [online]. Elsevier, 2018 [cit. 2024-01-03]. ISBN 9780128115374. Dostupné z: doi:10.1016/C2016-0-01053-7
- [13] KOTHARI, Richa, D. BUDDHI a R.L. SAWHNEY. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, **12**(2), 553-563 [cit. 2024-01-03]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2006.07.012

- [14] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. Zplyňování – principy a reaktory. *TZB-info* [online]. c2001-2024 [cit. 2024-01-03]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [15] DOUCEK, Aleš a Luděk JANÍK. Úvod do vodíkového hospodářství. *Pro-energy magazin* [online]. 2009, **2009**(3), 71-75 [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/FY2MP_ENVI/um/vodikospod4.pdf
- [16] HOLLADAY, J.D., J. HU, D.L. KING a Y. WANG. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today* [online]. 2009, **139**(4), 244-260 [cit. 2024-01-04]. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2008.08.039
- [17] KAMARODDIN, Mohd Fadhzir Ahmad, Nordin SABLİ a Tuan Amran Tuan ABDULLAH. Hydrogen Production by Membrane Water Splitting Technologies. In: EYVAZ, Murat, ed. *Advances In Hydrogen Generation Technologies* [online]. InTech, 2018, 2018-08-22, s. 19-37 [cit. 2024-01-04]. ISBN 978-1-78923-534-0. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.76727
- [18] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* [online]. 2019, **2**(3), 442-454 [cit. 2024-01-04]. ISSN 25892991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [19] JIN, Zeping, Ying SU, Hong LV, Min LIU, Wenbo LI a Cunman ZHANG. Review of Decompression Damage of the Polymer Liner of the Type IV Hydrogen Storage Tank. *Polymers* [online]. 2023, **15**(10), 2258 [cit. 2024-01-04]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym15102258
- [20] *ISO 14040:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. 2nd ed. International Organization for Standardization, 2006.
- [21] KOČÍ, Vladimír. *Posuzování životního cyklu: Life Cycle Assessment - LCA*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2009. ISBN 9788086832425.
- [22] KLÖPFER, Walter a Birgit GRAHL. *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice* [online]. John Wiley & Sons, Incorporated, 2014 [cit. 2024-01-04]. ISBN 9783527655656. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1658826&pq-origsite=summon>
- [23] JOLLIET, Olivier, Myriam SAADE-SBEIH, Shanna SHAKED, Alexandre JOLLIET a Pierre CRETТАZ. *Environmental Life Cycle Assessment* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2015 [cit. 2024-01-04]. ISBN 9780429111051. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/oa-mono/10.1201/b19138/environmental-life-cycle-assessment-olivier-jolliet-alexandre-jolliet-shanna-shaked-pierre-crettaz-myriam-saade-sbeih>
- [24] HAUSCHILD, Michael Z., Ralph K. ROSENBAUM a Stig Irving OLSEN, ed. *Life Cycle Assessment* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [cit. 2024-01-04]. ISBN 978-3-319-56475-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-56475-3
- [25] *ISO 14044:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization, 2006.
- [26] FOLEGA, Piotr a Dorota BURCHART-KOROL. ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF ROAD TRANSPORT IN A PASSENGER CAR USING THE LIFE CYCLE APPROACH. *Transport Problems* [online]. 2017, **12**(2), 147-153 [cit. 2024-01-04]. ISSN 1896-0596. Dostupné z: doi:10.20858/tp.2017.12.2.14

- [27] BAPTISTA, Patrícia, João RIBAU, João BRAVO, Carla SILVA, Paul ADCOCK a Ashley KELLS. Fuel cell hybrid taxi life cycle analysis. *Energy Policy* [online]. Elsevier, 2011, **39**(9), 4683-4691 [cit. 2024-01-04]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2011.06.064
- [28] BAUER, Christian, Johannes HOFER, Hans-Jörg ALTHAUS, Andrea DEL DUCE a Andrew SIMONS. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied Energy* [online]. Elsevier, 2015, (vol. 157), 871-883 [cit. 2024-01-04]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.019
- [29] MIOTTI, Marco, Johannes HOFER a Christian BAUER. Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. Springer, 2017, **22**(1), 94-110 [cit. 2024-01-04]. ISSN 0948-3349. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-015-0986-4
- [30] EVANGELISTI, Sara, Carla TAGLIAFERRI, Dan J.L. BRETT a Paola LETTIERI. Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2017, (vol. 142), 4339-4355 [cit. 2024-01-04]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.159
- [31] BENITEZ, Alicia, Christina WULF, Andreas DE PALMENAER, et al. Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2021, (vol. 278) [cit. 2024-01-04]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.123277
- [32] CANDELARESI, Daniele, Antonio VALENTE, Diego IRIBARREN, Javier DUFOUR a Giuseppe SPAZZAFUMO. Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, **46**(72), 35961-35973 [cit. 2024-01-04]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.034
- [33] 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. 2024-01-04]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.06.215
- [34] CANDELARESI, Daniele, Antonio VALENTE, Diego IRIBARREN, Javier DUFOUR a Giuseppe SPAZZAFUMO. Novel short-term national strategies to promote the use of renewable hydrogen in road transport: A life cycle assessment of passenger car fleets partially fuelled with hydrogen. *Science of The Total Environment* [online]. 2023, **859**, 160325 [cit. 2024-01-04]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160325
- [35] VALENTE, Antonio, Diego IRIBARREN, Daniele CANDELARESI, Giuseppe SPAZZAFUMO a Javier DUFOUR. Using harmonised life-cycle indicators to explore the role of hydrogen in the environmental performance of fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, **45**(47), 25758-25765 [cit. 2024-01-04]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.09.059

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Celosvětový počet vodíkových vozidel s palivovými články dle segmentů [2]	11
Obrázek 2 - Schémata vodíkových vozidel poháněných spalovacím motorem a palivovým článkem [vlastní tvorba]	11
Obrázek 3 - Motor z vodíkového autobusu MAN [1]	13
Obrázek 4 - Palivový článek Sira Williama Roberta Grovea [8]	14
Obrázek 5 - Princip palivového článku [11]	14
Obrázek 6 - Princip funkce AFC [1]	15
Obrázek 7 - Princip funkce PEMFC [1]	16
Obrázek 8 - Princip funkce PAFC [1]	17
Obrázek 9 - Princip funkce MCFC [1]	18
Obrázek 10 - Princip funkce SOFC [1]	19
Obrázek 11 - Účinnosti jednotlivých výrobních procesů vodíku [vlastní tvorba]	20
Obrázek 12 - Mix produkce vodíku [2]	21
Obrázek 13 - Spotřeba vodíku v silniční dopravě podle segmentů vozidel [2]	21
Obrázek 14 - Proces parního reformování zemního plynu [11]	22
Obrázek 15 - Proces parciální oxidace [vlastní tvorba]	23
Obrázek 16 - Podprocesy procesu zplyňování [14]	23
Obrázek 17 - Schéma siřičito-jodového cyklu s jaderným reaktorem jako zdrojem tepla [11]	24
Obrázek 18 - Princip elektrolyzátoru pro elektrolyzu vody [1]	25
Obrázek 19 - Schéma alkalického elektrolyzátoru [17]	26
Obrázek 20 - Schéma systému alkalického vodního elektrolyzátoru pro výrobu vodíku a kyslíku [vlastní tvorba]	27
Obrázek 21 - Schéma elektrolyzátoru s pevným polymerním elektrolytem [18]	27
Obrázek 22 - Schéma vysokoteplotního elektrolyzátoru s tuhým oxidem [18]	28
Obrázek 23 - Objemové energetické hustoty skladovacích systémů [1]	29
Obrázek 24 - Typy tlakových nádob pro skladování plynného vodíku [19]	30
Obrázek 25 - Tlaková nádoba pro skladování vodíku v automobilu při 700 barech [1]	31
Obrázek 26 - Výdejní stojan vodíkové čerpací stanice [1]	32
Obrázek 27 - Schéma zásobníku na kapalný vodík [1]	32
Obrázek 28 - Rámec LCA [20]	34
Obrázek 29 - Schéma rozsahu kompletní LCA analýzy vozidla [26]	35
Obrázek 30 - Schéma fáze hodnocení dopadů [20]	36

Obrázek 31 - Rychlostní profil PCO-CENEX London Taxi [27].....	39
Obrázek 32 - Analyzované vybíjecí strategie vodíkových vozidel taxi [27]	41
Obrázek 33 - Výsledné hodnoty spotřeby energie analyzovaných typů vozidel taxi [27]	42
Obrázek 34 - Výsledné hodnoty emisí CO ₂ analyzovaných typů vozidel taxi [27]	42
Obrázek 35 - Zjednodušené schéma rozsahu LCA analýzy 2 [28]	43
Obrázek 36 - Hmotnost analyzovaných typů vozidel dle komponent (vlevo) a jejich spotřeba paliva (vpravo) [28].....	44
Obrázek 37 - Emise skleníkových plynů analyzovaných typů vozidel [28].....	45
Obrázek 38 - Emise skleníkových plynů BEV a FCV s různými zdroji elektřiny a vodíku [28].....	46
Obrázek 39 - Výsledky analyzovaných typů vozidel v dalších kategoriích dopadu [28].....	47
Obrázek 40 - Výsledky BEV a FCV s různými zdroji elektřiny a vodíku v dalších kategoriích dopadu [28]	48
Obrázek 41 - Specifikace analyzovaného FCS ve všech scénářích [29]	49
Obrázek 42 - Specifikace analyzovaných FCV, BEV a ICEV ve všech scénářích [29].....	50
Obrázek 43 - Výsledky dopadů na životní prostředí a nákladů životního cyklu FCS [29].....	51
Obrázek 44 - Výsledky porovnání FCV, BEV a ICEV [29].....	52
Obrázek 45 - Hranice systému analýzy [30]	53
Obrázek 46 - Součásti a jejich hierarchie v modelu FCV [30].....	53
Obrázek 47 - Rozložení hmotnosti FCV [30].....	54
Obrázek 48 - Výsledky porovnání FCV, BEV a ICEV ve třech klíčových kategoriích dopadu [30].....	55
Obrázek 49 - Výsledky porovnání výrobní fáze analyzovaných vozidel [30].....	56
Obrázek 50 - Analyzované fáze životního cyklu FCEV [31].....	57
Obrázek 51 - Výrobní proces uhlíkových vláken [31].....	57
Obrázek 52 - Výrobní proces analyzované tlakové nádoby [31].....	58
Obrázek 53 - Výsledky analýzy produkce uhlíkových vláken [31]	59
Obrázek 54 - Výsledky analýzy výrobní fáze FCEV [31]	60
Obrázek 55 - Výsledky analýzy celého životního cyklu FCEV [31]	61
Obrázek 56 - Hranice systému analýzy [32]	61
Obrázek 57 - Porovnávaná vozidla [32].....	62
Obrázek 58- Relativní dopady vodíkových vozidel a vozidel na zemní plyn [32].....	64
Obrázek 59 - Srovnání spotřeby paliva nového a používaného palivového článku [33].....	65
Obrázek 60 - Elektrické energie dodávaná z baterie a z palivového článku motoru v FCV při opakovaných cyklech NEDC [33]	65

Obrázek 61 - Složení energetických mixů USA a Kanady [33]	66
Obrázek 62 - Porovnání výsledných hodnot emisí CO ₂ [33].....	66
Obrázek 63 - Výsledné hodnoty emisí CO, těkavých organických látek a NO _x [33].....	67
Obrázek 64 - Schémata analyzovaných vozidel [34]	68
Obrázek 65 - Složení navrhovaných flotil osobních automobilů [34]	69
Obrázek 66 - Výsledné emise skleníkových plynů jednotlivých flotil [34]	71
Obrázek 67 - Výsledky analyzovaných flotil v dalších kategoriích dopadu [34].....	72
Obrázek 68 - Porovnání nejlepších a nejhorších výsledných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu FCV	74
Obrázek 69 - Porovnání nejlepších a nejhorších výsledných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu BEV	74
Obrázek 70 - Porovnání nejlepších a nejhorších výsledných hodnot emisí skleníkových plynů životního cyklu ICEV	75
Obrázek 71 - Porovnání emisí skleníkových plynů FCV využívajících vodík z parního reformování zemního plynu.....	75
Obrázek 72 - Porovnání emisí skleníkových plynů FCV využívajících vodík vyrobený elektrolýzou s využitím větrné energie	76

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání vlastností vodíku s benzinem, naftou a metanem [1].....	12
Tabulka 2 - Porovnání různých palivových článků [1]	15
Tabulka 3 - Emise CO ₂ produkované výrobními procesy [13]	20
Tabulka 4 - Porovnání technologií elektrolýzy vody [1][12].....	26
Tabulka 5 - Hustota a obsah energie vodíku v různých skupenstvích [1]	29
Tabulka 6 - Seznam vybraných LCA analýz.....	38
Tabulka 7 - Specifikace analyzovaných typů vozidel taxi [27].....	40
Tabulka 8 - Uvažované způsoby výroby a dopravy energií [27]	41
Tabulka 9 - Specifikace analyzovaných typů vozidel střední třídy [28]	44
Tabulka 10 - Analyzované kategorie dopadu [31].....	57
Tabulka 11 - Specifikace analyzované tlakové nádoby [31]	58
Tabulka 12 - Specifikace analyzovaného FCEV v obou scénářích [31]	59
Tabulka 13 - Specifikace analyzovaných vodíkových vozidel [32].....	62
Tabulka 14 - Údaje o spotřebě paliva a hodnoty emisí při provozu porovnávaných vozidel [32]	63
Tabulka 15 - Charakterizační profily porovnávaných vozidel [32]	63
Tabulka 16 - Specifikace vozidla Toyota Mirai [33]	64
Tabulka 17 - Spotřeba paliva, spotřeba energie a emise analyzovaných vozidel [34].....	69
Tabulka 18 - Ujeté kilometry a osobokilometry vozidel v rámci flotil za rok [34].....	70
Tabulka 19 – Rozsah, spotřeba energie při provozu a životnost analyzovaných FCV	73