

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Posouzení vhodnosti provozního nasazení vodíkové jednotky

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Maxmilián Křehota**
Osobní číslo: **D20285**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Kolejová vozidla**
Téma práce: **Posouzení vhodnosti provozního nasazení vodíkové jednotky**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

Dekarbonizace mobility je i na železnici aktuálním tématem. Jedním z řešení, která v principu umožňují náhradu motorových vozů a jednotek, poháněných spalovacími motory, je provoz vodíkových jednotek (HMU). Využití technologie vodíkových palivových článků pro pohon železničních vozidel však má jistá specifika, jež musí být v souladu s požadavky vyplývajícími z uvažovaného provozního nasazení vozidla. Cílem této práce je proto posouzení vhodnosti provozního nasazení vodíkové jednotky na vybraných výkonech v regionální osobní železniční dopravě.

Vypracujte:

1. rešerši v současnosti vyráběných vodíkových jednotek pro osobní železniční dopravu;
2. rozbor specifických vlastností železničních vozidel využívajících pro pohon vodíkové palivové články v porovnání s konvenčně poháněnými vozidly;
3. výběr traťového úseku pro realizaci trakčních výpočtů a jejich popis;
4. trakční výpočty vodíkové jednotky definovaných parametrů na vybrané trati v různých provozních podmínkách (zastávkový osobní vlak, rychlík);
5. zhodnocení výsledků provedených výpočtů.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] MICHÁLEK T., ZELENKA J.: *Trakční mechanika*. 1. vydání, 104 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [2] POHL J.: Vozidla a infrastruktura pro bezemisní provoz na neelektrifikovaných tratích. In *Sborník příspěvků XXV. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech*, s. 257-276. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021. ISBN 978-80-7560-377-7.
- [3] MICHÁLEK T., ŠLAPÁK J.: Vliv elektrifikace trati Klatovy-Železná Ruda na jízdní doby a spotřebu energie. In *Vědeckotechnický sborník ČD č. 42/2016*. Praha: GŘ ČD, 2016. 17 s. ISSN 1214-9047.
- [4] Firemní prospekty výrobců vodíkových jednotek.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. února 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2023**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 10. února 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Posouzení vhodnosti nasazení vodíkové jednotky jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 5. 2023

Maxmilián Křehota v.r.

Poděkování

Mnohokrát děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Tomášovi Michálkovi, Ph.D., za přínosné rady, vstřícný přístup, trpělivost a ochotu, se kterými ke mně přistupoval při zpracování této bakalářské práce.

Zároveň bych chtěl poděkovat svému bratrovi za podporu při studiích.

Anotace

Tato práce se zabývá rešerší současně vyráběných a vyvíjených jednotek s vodíkovým pohonem, specifickými vlastnostmi, které souvisí s provozováním těchto jednotek a v poslední řadě výpočty energetiky provozu vozidla v režimu zastávkového osobního vlaku a rychlíkového vlaku na vytipovaném úseku Olomouc hl. n. – Opava východ. Na základě těchto výpočtů je provedeno zhodnocení provozního nasazení takovéto jednotky.

Klíčová slova

vodík, vodíkové jednotky, vodíková technologie, trakční výpočty

Title

Assessment of suitability service operation of a hydrogen multiple unit

Abstract

This bachelor thesis deals with research of currently making and developing hydrogen multiple units, also specific features, which relate with operating these units and in the last place deals with calculations of energy the vehicle in the condition of local train and express train of selected route Olomouc hl. n. – Opava východ. On the base of the previous calculations is realized a assesment of service operation a hydrogen multiple unit.

Keywords

hydrogen, hydrogen units, hydrogen technology, traction caclulations

Obsah

1	Úvod	11
2	Princip energetického systému vodíkového vozidla.....	12
2.1	Princip energetického systému vozidla	12
2.2	Palivový článek	13
2.3	Požadavky na čistotu vodíku.....	13
2.4	Princip palivového článku	14
3	Specifické vlastnosti vodíku	16
3.1	Základní fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku	16
3.1.1	Důsledky fyzikálně-chemických vlastností pro vodíková vozidla.....	18
3.2	Vodíková křehkost a koroze	19
3.2.1	Důsledky vodíkové křehkosti a koroze.....	20
3.3	Skladování vodíku	20
3.3.1	Stlačený plynný vodík CGH ₂	21
3.3.2	Kapalný vodík LH ₂	22
3.3.3	Kryo-stlačený vodík.....	22
3.3.4	LOHC.....	22
3.3.5	Hydridy kovů	23
3.3.6	Hmotnosti nádob.....	23
3.3.7	Porovnání druhů skladování vodíku a hmotností nádob	24
3.4	Výroba vodíku	25
3.4.1	Výroba vodíku reformingem uhlovodíků	26
3.4.2	Výroba vodíku elektrolýzou.....	26
3.4.3	Vodík jako vedlejší produkt	27
3.4.4	Porovnání nejběžnějších způsobů výroby.....	28
3.5	Možnosti doplňování vodíku	29
3.5.1	Dovoz vodíku do plnicí stanice (off-site)	29

3.5.2	Výroba vodíku na místě (on-site)	30
3.6	Tankování vodíku	31
3.7	Celková účinnost vodíkové technologie	32
4	Současně vyráběné a vyvíjené vodíkové jednotky	34
4.1	Alstom Coradia iLint	34
4.2	Siemens Mireo Plus H	35
4.3	Stadler Flirt H ₂	36
4.4	HydroFLEX	37
4.5	FV-E991	38
4.6	Porovnání základních parametrů vodíkových jednotek	39
5	Charakteristika traťového úseku	40
5.1	Historie trati	40
5.2	Popis tratě	40
5.2.1	Rychlostní profil tratě	41
5.2.2	Výškový profil tratě	42
6	Trakční výpočty	43
6.1	Definice vstupních dat	43
6.1.1	Referenční vozidlo	44
6.1.2	Traťový úsek	45
6.2	Postup výpočtů	46
6.3	Dosažené výsledky	47
6.3.1	Osobní zastávkový vlak	47
6.3.2	Zhodnocení výsledků pro osobní zastávkový vlak	52
6.3.3	Rychlíkový vlak	53
6.3.4	Zhodnocení výsledků pro rychlíkový vlak	57
7	Závěr	58
	Bibliografie	60

Seznam symbolů

a	$[\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}]$	Koeficient měrného vozidlového odporu
B	$[\text{kN}]$	Brzdná síla
B_{EDB}	$[\text{kN}]$	Brzdná síla elektrodynamické brzdy
b	$[\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}]$	Koeficient měrného vozidlového odporu
c	$[\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kN}^{-2}]$	Koeficient měrného vozidlového odporu
E_{H2}	$[\text{kWh}]$	Energie získaná z palivového článku
E_{PP}	$[\text{kWh}]$	Energie vynaložená na pomocné pohony
E_{rek}	$[\text{kWh}]$	Rekuperovaná energie
E_{tr}	$[\text{kWh}]$	Spotřebovaná trakční energie
E_0	$[\text{kWh}]$	Kapacita vyrovnávacího akumulátoru
F_{ok}	$[\text{kN}]$	Tažná síla
g	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	Tíhové zrychlení
M_{ekv}	$[\text{t}]$	Ekvivalentní rotační hmoty
M_D	$[\text{t}]$	Hmotnost dopravovaných vozidel
M_H	$[\text{t}]$	Hmotnost hnacího vozidla
M_{red}	$[\text{t}]$	Redukovaná hmotnost
M_v	$[\text{t}]$	Hmotnost vozidla
O_r	$[\text{kN}]$	Odpor z jízdy obloukem
O_s	$[\text{kN}]$	Odpor ze sklonu
O_t	$[\text{kN}]$	Traťový odpor
O_v	$[\text{kN}]$	Vozidlový odpor
o_v	$[\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}]$	Měrný vozidlový odpor
P	$[\text{kW}]$	Výkon
P_{H2}	$[\text{kW}]$	Výkon palivového článku

P_{PP}	[kW]	Příkon pomocných pohonů
p	[Pa]	Tlak
R	[m]	Poloměr oblouku
T	[K]	Teplota
t	[s]	Čas
V	[km · h ⁻¹]	Rychlost
v	[m · s ⁻¹]	Rychlost
W_{rek}	[kWh]	Rekuperovaná práce
W_{tr}	[kWh]	Trakční práce
x	[m]	Dráha
Δ	[-]	Přírůstek
η_{bat}	[-]	Účinnost baterie
η_{celk}	[-]	Celková účinnost
$\eta_{čl}$	[-]	Účinnost palivového článku
η_{kon}	[-]	Účinnost měniče
η_{poh}	[-]	Účinnost pohonu
η_{rek}	[-]	Účinnost rekuperace
η_{stl}	[-]	Účinnost stlačení vodíku
$\eta_{výr}$	[-]	Účinnost výroby
μ_{JT}	[K · bar ⁻¹]	Joule – Thomsonův koeficient
ρ	[-]	Součinitel rotačních hmot
ρ_D	[-]	Součinitel rotačních hmot dopravovaného vozidla
ρ_H	[-]	Součinitel rotačních hmot hnacího vozidla
τ	[-]	Tunelový faktor

1 Úvod

Na neelektrifikovaných tratích se v současné době používají především diesellové jednotky nebo vlaky tažené diesellovou lokomotivou, ty ale za účelem zmírnění dopadů na změnu klimatu nebudou moct být v budoucnu provozovány. K překonání těchto problémů souvisejících se změnou klimatu vznikla Zelená dohoda pro Evropu (European Green Deal), která má Unii transformovat na konkurenceschopnou moderní ekonomiku. Hlavním cílem je do roku 2050 dosáhnout na úrovni EU klimatické neutrality. Na tuto dohodu související se snížením emisí je nutné reagovat i v železničním prostředí a najít vhodnou cestu, která přispěje ke snížení emisí a uhlíkové stopy a ke zlepšení životního prostředí. V současné době existují dvě možné technologie, které by mohly přispět ke zlepšení klimatu a snížení uhlíkové stopy. Tyto technologie jsou následující:

- BEMU (Battery Electric Multiple Unit): dvouzdrojová elektrická trakční vozidla trolej/akumulátor, využívající sekundární elektrochemické články.
- HMU (Hydrogen Multiple Unit): vodíková palivočlánková elektrická trakční vozidla, využívající primární elektrochemické články ve funkci zdroje elektrické energie v kombinaci se sekundárními elektrochemickými články ve funkci vyrovnávacího akumulátoru.

Oba typy vozidel jsou odvozeny od standardních EMU (Electric Multiple Unit), se kterými mají řadu shodných komponent, avšak musí v nich být vytvořena patřičná hmotnostní a prostorová rezerva pro instalaci příslušného zásobníku energie. [1] [2]

Jednou z těchto cest by mohly být právě vodíkové jednotky HMU, které se v současné době začínají vyrábět a uvádět do provozu. Je tedy důležité posoudit vhodnost nasazení takové jednotky na tratích a zhodnotit, zda je tato cesta za bezemisním provozem na železnici tím správným směrem, kam by měla budoucnost na neelektrifikovaných tratích směřovat.

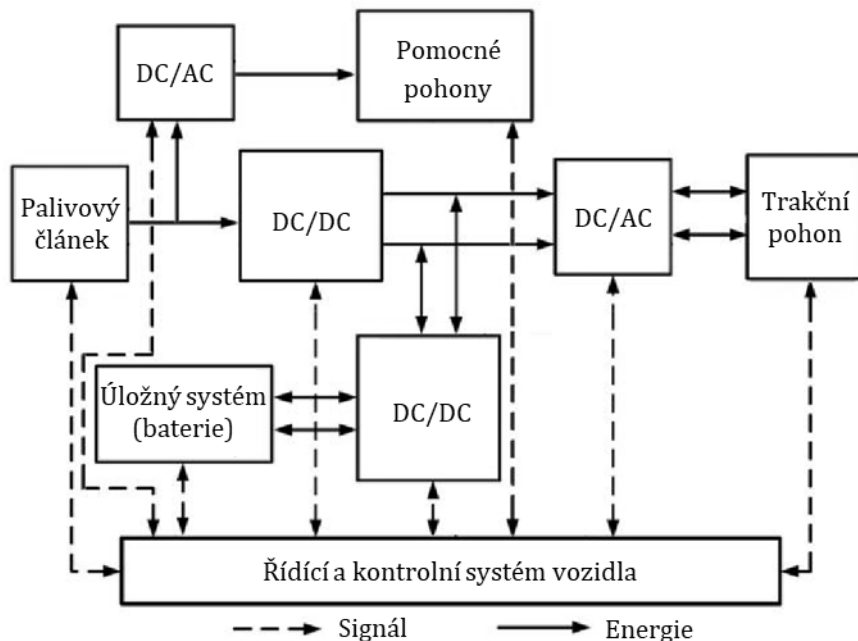
Tato práce je v první řadě věnována principu vodíkového vozidla, specifickým vlastnostem, které vodík má, a s tím spojeným nárokům na infrastrukturu a provoz, dále se zabývá rešerší současně vyráběných a vyvíjených vodíkových jednotek. V další části se zabývá simulačními výpočty jízdy vodíkové jednotky v režimu zastávkového osobního vlaku a rychlíkového vlaku a zhodnocením energetiky provozu takového vozidla. V poslední řadě se zabývá posouzením vhodnosti nasazení takovéto jednotky na tratích bez elektrického napájení.

2 Princip energetického systému vodíkového vozidla

Vodíkové vozidlo sestává z několika důležitých komponent, mezi ty nejdůležitější patří palivový článek a vyrovnávací akumulátor. V této kapitole bude uveden princip energetického systému takového vozidla a pojednání o palivovém článku, jakožto základní komponentě celého řetězce vodíkové technologie.

2.1 Princip energetického systému vozidla

Princip energetického systému vozidla je důležitý pro porozumění, jak takové vozidlo, které je vybaveno palivovými články, funguje. Palivový článek je hlavním zdrojem energie a slouží k napájení trakčních motorů a pomocných pohonů. Při případném přebytku se elektrická energie z palivového článku ukládá přes měnič do baterií. Baterie slouží k doplňování energie při velkých výkyvech výkonu, což může být důsledkem akcelerace vlaku. Do baterií se také ukládá energie při rekuperačním brzdění, která je usměrněna přes usměrňovač. Celý tento systém je propojen a řízen pomocí energetického a kontrolního systému, který funguje na principu modelování podle potřebného výkonu, energetického úložného systému nebo elektrochemického modelu palivového článku. Schéma tohoto principu je uvedeno na následujícím obr. 1. [3]



Obr. 1 Princip energetického systému vozidla [3]

2.2 Palivový článek

Palivový článek je elektrochemický článek, který se používá k přeměně chemické energie generované reakcí vodíku a kyslíku, na elektrickou energii. Existuje několik typů palivových článků a všechny obsahují anodu, katodu a elektrolyt, jak je znázorněno na obr. 2. Nejčastějšími parametry pro jejich klasifikaci jsou provozní teplota a typ použitého elektrolytu. Podle provozní teploty se palivové články dělí na [4]:

- nízkoteplotní (60 až 130 °C),
- středněteplotní (160 až 220 °C) a
- vysokoteplotní (600 až 1050 °C).

Primárně se ale palivové články rozlišují dle použitého elektrolytu. Tato klasifikace určuje druh elektrochemických reakcí, které v článku probíhají, druh požadovaných katalyzátorů, teplotní rozsah, ve kterém článek pracuje a požadovanou čistotu vodíku. Tyto charakteristiky zase ovlivňují aplikace, pro které je daný palivový článek vhodné použít. V současnosti se používají a vyvíjejí následující typy palivových článků [5]:

- palivový článek s polymerní membránou,
- palivový článek s alkalickým elektrolytem,
- palivový článek pro přímou reakci methanolu,
- palivový článek s kyselinou fosforečnou,
- palivový článek s tavenými uhličitany a
- palivový článek s tuhými oxidy.

2.3 Požadavky na čistotu vodíku

Pro mobilní aplikace se využívá palivového článku s polymerní membránou. Některé látky tuto membránu ale negativně ovlivňují. Aby nedocházelo k nežádoucí otravě anody při depolarizaci, musí být vodík zbaven nežádoucího množství oxidu uhelnatého (CO), sirných složek a nenasycených uhlovodíků. Další nežádoucí nečistotou jsou složky zahrnující amoniak a organické aminy. Tyto nečistoty se mohou adsorbovat na povrch elektrod a blokovat reakci vodíku nebo můžou reagovat se zásaditou složkou elektrolytu v palivovém článku a omezovat tak přesun protonů mezi elektrodami. To ve svém důsledku snižuje výkon palivového článku a zkracuje jeho životnost. Uvedené látky se dostávají do vodíku v procesu jeho výroby. Maximální koncentrace těchto a dalších látek

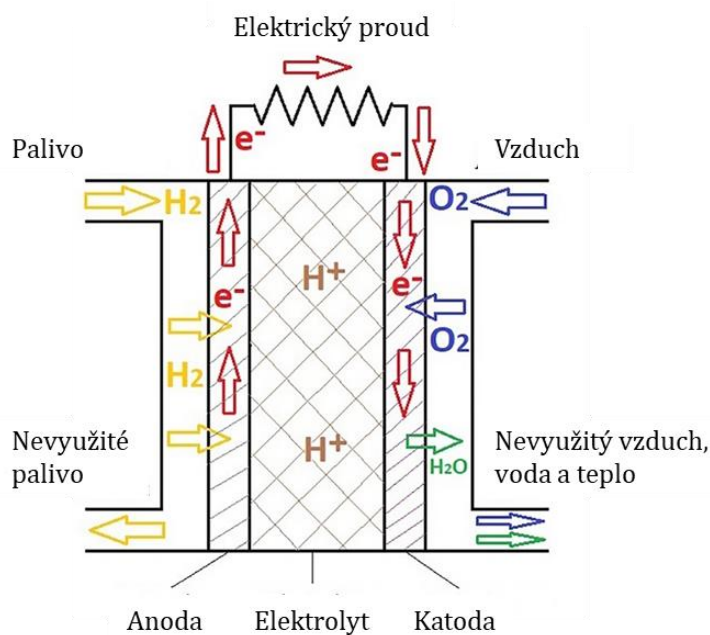
ve vodíku pro palivové články, definovanou normou ČSN ISO 14687, zobrazuje tab. 1. [6]
 [7]

Tab. 1 Maximální koncentrace látek [8]

Minimální podíl čistého vodíku	99,97 %
Maximální celkový podíl jiných plynů	300 $\mu\text{mol/mol}$
Maximální koncentrace jednotlivých složek	
Voda (H_2O)	5 $\mu\text{mol/mol}$
Celkový podíl hydrokarbonů mimo methan	2 $\mu\text{mol/mol}$
Methan (CH_4)	100 $\mu\text{mol/mol}$
Kyslík (O_2)	5 $\mu\text{mol/mol}$
Helium (He)	300 $\mu\text{mol/mol}$
Dusík (N_2)	300 $\mu\text{mol/mol}$
Argon (Ar)	300 $\mu\text{mol/mol}$
Oxid uhličitý (CO_2)	2 $\mu\text{mol/mol}$
Oxid uhelnatý (CO)	0,2 $\mu\text{mol/mol}$
Sírné sloučeniny	0,004 $\mu\text{mol/mol}$
Formaldehyd (HCHO)	0,2 $\mu\text{mol/mol}$
Kyselina mravenčí (HCOOH)	0,2 $\mu\text{mol/mol}$
Amoniak (NH_3)	0,1 $\mu\text{mol/mol}$
Halogenní sloučeniny	0,05 $\mu\text{mol/mol}$

2.4 Princip palivového článku

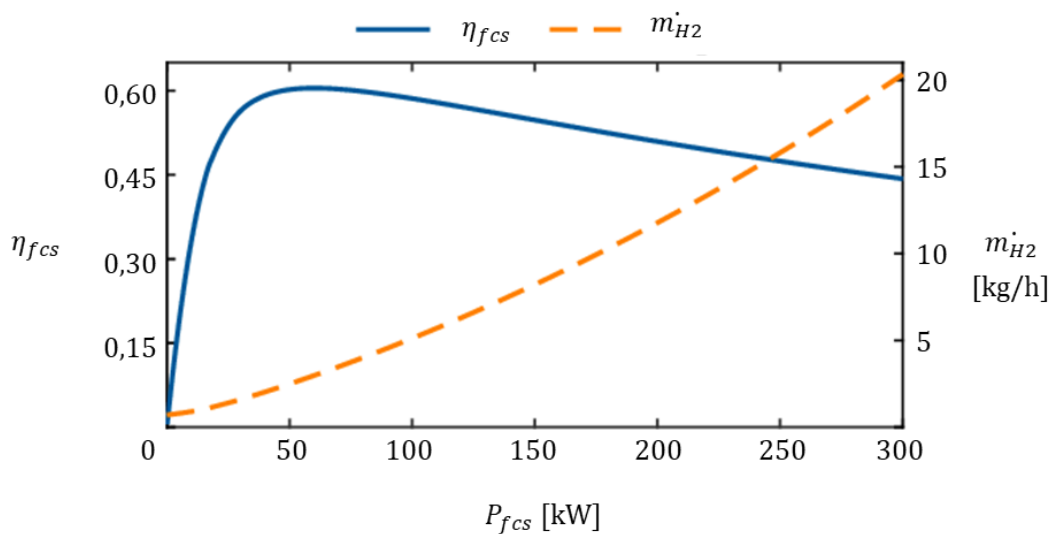
Princip palivového článku je následovný a popisuje ho i níže uvedený obr. 2.



Obr. 2 Princip palivového článku [3]

Na anodě palivo prochází oxidační reakcí s katalyzátorem, který generuje protony (kladně nabitě vodíkové ionty) a elektrony. Protony se mohou přes elektrolyt pohybovat z anody na katodu. Současně elektrony proudí z anody na katodu vnějším obvodem a generují stejnosměrný proud (DC). Na katodě reagují protony, elektrony a kyslík spolu s dalším katalyzátorem a tvoří vodu, teplo a případně další produkty v závislosti na zdroji paliva. Energetická účinnost palivového článku je obecně mezi 40 a 60 %. [3]

Palivový článek má uvedenou účinnost pouze v určitém rozsahu výkonu, ve kterém by měl i fungovat pro dosažení nejlepšího využití výkonu. Článek, jehož charakteristiku znázorňuje graf 1, má jmenovitý výkon 300 kW. Pokud bychom využívali tento článek pod 7 % (20 kW) jmenovitého výkonu jeho účinnost by byla natolik malá, že by se nevyplatilo ho využívat, jelikož zde účinnost dramaticky klesá. Nejlepší využití výkonu vzhledem k účinnosti je na 17 % (50 kW) jmenovitého výkonu, to je ale vzhledem k dobíjení akumulátoru nežádoucí a výkon, který se využívá, je daleko větší. Využití většího výkonu než je 17 % sebou nese snižování účinnosti, a to z 0,6 až na konečných 0,45 při využití maximálního výkonu.



Graf 1 Závislost účinnosti palivového článku na výkonu a spotřebě [9]

3 Specifické vlastnosti vodíku

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru, tvoří 75 % hmotnosti normální hmoty a je třetím nejrozšířenějším prvkem na zemském povrchu. Jeho popularita je způsobena právě energetickým průmyslem, který si od tohoto prvku slibuje, že se bude používat jako efektivní, ekonomický a ekologický zdroj energie. Vodík jako pohonná hmota se již používá v raketové technice a v palivových článcích, které vyrábějí elektrický proud a jsou tedy vhodné pro použití v dopravní technice. [10] [11]

3.1 Základní fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku

Za běžných podmínek může na Zemi vodík existovat v plynné formě jako dvouatomová molekula H_2 . Jedná se o bezbarvý, netoxický a vysoce hořlavý plyn, který je navíc bez chuti a zápachu. Je asi 14,5× lehčí než vzduch, jelikož hustota vodíku je $0,0826 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ při atmosférickém tlaku a teplotě, což je nejmíň ze všech prvků. Další důležitou vlastností je vysoký difuzní součinitel a malý atomový poloměr, díky čemuž dokáže vodík pronikat i do zdánlivě kompaktních materiálů a způsobovat jim křehkost, což může mít za následek prasknutí či porušení nádoby a následný únik vodíku. Je velmi reaktivní a vysoce hořlavý, se vzduchem vytváří výbušnou směs. Sloučeniny utváří se všemi prvky periodické tabulky s výjimkou vzácných plynů, které jsou inertní. Čistý vodík hoří za vzniku vodní páry nesvítilým až mírně namodralým plamenem. Pro přehlednost je níže uvedena tab. 2 se základními fyzikálně-chemickými vlastnostmi vodíku. [10]

Tab. 2 Základní fyzikálně-chemické vlastnosti [12]

Atomový poloměr [pm]	53
Relativní atomová hmotnost [-]	1,00797
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,0826
Dynamická viskozita [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]	8,42*
Střední rychlost molekul [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	1693,7*
Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	-259,34
Teplota varu [$^{\circ}\text{C}$]	-252,87
Kritická teplota [$^{\circ}\text{C}$]	-239,91
Kritický tlak [MPa]	1,298
Hustota v kritickém stavu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	30,1
Měrné spalné teplo [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	142
Měrná výhřevnost [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	120

Poznámka k tab. 2, pokud není poznamenáno jinak, jsou hodnoty uvedeny při teplotě 20 °C a tlaku 101,325 kPa; *při teplotě 0 °C.

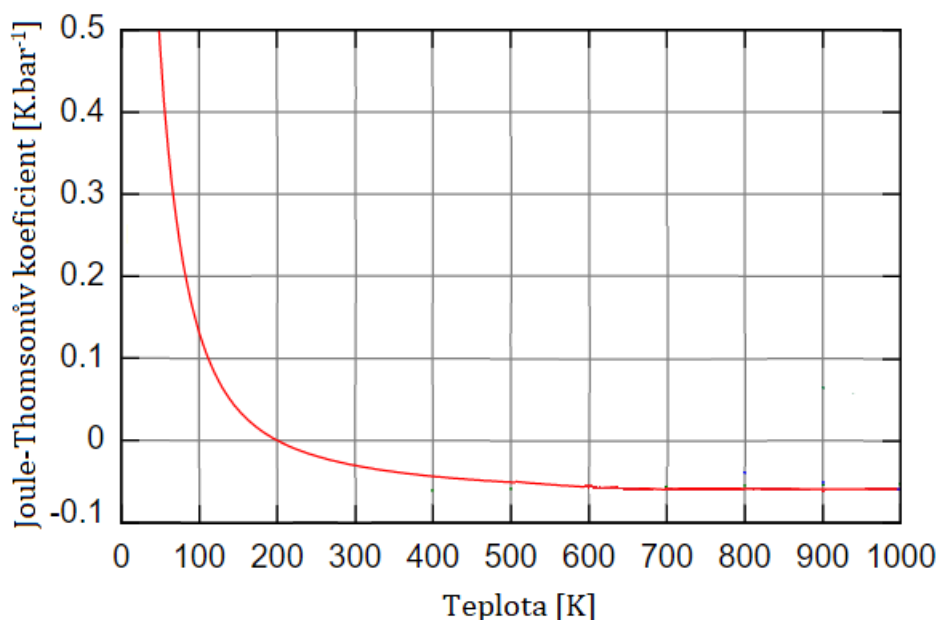
Joule-Thomsonův koeficient

Joule-Thomsonův koeficient μ_{JT} popisuje rozsah a smysl teplotní změny pro izoentalpickou změnu stavu (za konstantní entalpie h), je dán následovným vztahem (1):

$$\mu_{JT} = \frac{(\partial T)}{(\partial p)_h} \quad (1)$$

Pozitivní Joule-Thomsonův koeficient znamená, že pokles teploty probíhá při izoentalpickém poklesu tlaku. V T-s diagramu tuto změnu reflektuje klesající izoentalpická křivka při současném poklesu tlaku (tzn. že dochází k ochlazení látky během poklesu tlaku). [13]

Naopak negativní Joule-Thomsonův koeficient znamená, že zvýšení teploty probíhá při izoentalpickém poklesu tlaku. V T-s diagramu tuto změnu reflektuje rostoucí izoentalpická křivka při současném poklesu tlaku (tzn. že dochází k zahřívání látky během poklesu tlaku). [13]



Graf 2 Průběh Joule-Thomsonova koeficientu v závislosti na teplotě [14]

U každého plynu existuje inverzní teplota T_i , při které koeficient mění znaménko. Inverzní teplota závisí především na druhu plynu, je však i funkcí jeho tlaku. Přibližný výpočet

Joule-Thomsonova koeficientu vychází z předpokladu, že plyn se řídí Van der Waalsovou stavovou rovnicí a tlak plynu není extrémně velký (<10 MPa). Pro vodík vychází inverzní teplota T_i na 195,37 K. Tzn. že nad touto teplotou se expandující vodík zahřívá a pod ní naopak ochlazuje. Na grafu 2 je ukázáno, jak se mění Joule-Thomsonův koeficient vodíku v závislosti na teplotě při tlaku 1,013 baru. [15]

3.1.1 Důsledky fyzikálně-chemických vlastností pro vodíková vozidla

Důsledky základních fyzikálně-chemických vlastností

V porovnání s konvenčními jednotkami, které pro svůj pohon využívají v drtivé většině případů naftu, má vodík v jedné fyzikálně-chemické vlastnosti nepřekonatelnou výhodu. Touto výhodou je daleko vyšší měrná výhřevnost, která činí 120 MJ.kg⁻¹. Zatímco u nafty je měrná výhřevnost pouze 43 MJ.kg⁻¹. Další vlastnosti už ale tak výhodné nejsou. Jedná se především o malou hustotu, která činí jen 0,0826 kg.m⁻³ a z toho důvodu je nutné vodík stlačit na 35 nebo 70 MPa, což sebou přináší požadavky na další infrastrukturu, především na stlačování a uchovávání vodíku, která u běžných diesellových jednotek není vůbec potřeba. Dalším úskalím vodíku je vysoký difuzní součinitel a malý atomový poloměr, díky čemuž dokáže narušovat materiál, o čemž pojednává i kapitola 3.2. Tento problém ale u nafty opět odpadá. Poslední důležitou fyzikálně-chemickou vlastností, je výbušnost směsi, která se tvoří, pokud je vodík smíchán se vzduchem, a to v širokém pásmu objemu vodíku ve vzduchu (4 až 77 %). Nafta sice také může tvořit výbušnou směs, ale v daleko menším rozsahu objemu nafty ve vzduchu (0,6 až 6,5 %). Tudíž jsou na vodíkovou technologii na jednotkách kladeny daleko větší požadavky na bezpečnost než u klasických diesellových jednotek. Tuto skutečnost reflektuje i jednotka Stadler Flirt H₂ zmíněná v kapitole 4.3, která má vodíkovou technologii uloženou zvlášť v článku mezi dvěma částmi tak, aby byla oddělena od cestujících.

Důsledky záporného Joule-Thomsonova koeficientu

Jak bylo popsáno v předešlé kapitole 3.1, vodík má od tzv. inverzní teploty záporný Joule-Thomsonův koeficient, tzn. že se při expanzi zahřívá. To lze vyčíst i z grafu 2, kde můžeme říct, že tato teplota je zhruba 200 K. Tato skutečnost je velice důležitá pro zbrojení jednotky vodíkem, jelikož se vodík doplňuje ze zásobníku o vyšším tlaku, než je tlak v nádrži jednotky. Dochází zde k expanzi a je nutné, aby teplota vodíku nepřesáhla úroveň, která by iniciovala výbuch či požár. Z toho důvodu je nutno při tankování vodíku dbát na komunikaci mezi nádrží a výdejním stojanem a zároveň celý proces tankování

intenzivně chladit. Tato problematika u dieselových jednotek naprosto odpadá, jelikož nafta se skladuje za normálních atmosférických podmínek a není zde potřeba brát v potaz Joule-Thomsonův jev. Z toho vyplývá, že zde nejsou kladeny žádné nároky, jako je tomu u vodíkových jednotek.

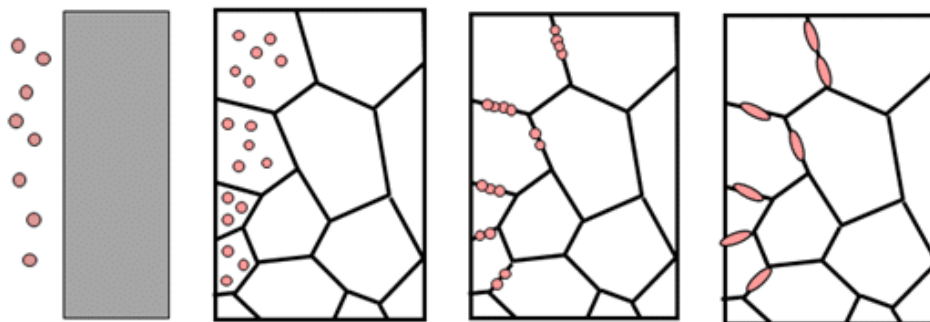
3.2 Vodíková křehkost a koroze

Jak už bylo zmíněno, vodík má malý atomový poloměr a vysoký difuzní součinitel, který má za následek vnikání vodíku do krystalické mřížky některých materiálů. I velmi malé množství vodíku v materiálu může způsobit celou řadu negativních změn vlastností. Mezi ty nejčastější patří především pokles meze kluzu a meze pevnosti. [16]

Rozpuštěný vodík může v materiálu způsobovat vodíkovou křehkost. Tato degradace materiálu se projevuje při normálních a nízkých teplotách. Naopak při vyšších teplotách rozpuštěný vodík může reagovat s uhlíkem či jinými prvky, a tak způsobovat vodíkovou korozi. [17]

Vodíková křehkost

Atomy vodíku mohou být absorbovány do kovové mřížky materiálu. Tento absorbovaný vodík může být přítomen buď jako atomární nebo kombinovaná molekulární forma. Bez ohledu na tuto formu se atomy nebo molekuly spojují a vytvářejí malé bublinky na hranicích zrn, které působí jako koncentrátoři napětí. Toto vytvářené napětí (až 10 000 MPa) se mezi zrny může zvýšit až na úroveň, kdy má kov natolik sníženou tažnost, že způsobí iniciaci drobných trhlin uvnitř materiálu. Tyto trhliny poté mohou způsobit mezikrystalické prasknutí. To znamená, že trhlina roste podél hranic kovových zrn. Na obr. 3 je schematicky ukázaný proces křehnutí. [18]



Obr. 3 Proces křehnutí vlivem působení vodíku [19]

Materiály náchylnější ke vzniku vodíkové křehkosti jsou obecně vysokopevnostní oceli, oceli s vysokým obsahem manganu, hliníkové, titanové a hořčíkové slitiny. Snížení vodíkové křehkosti lze dosáhnout legováním pomocí molybdenu a niklu nebo použitím povlaků uvnitř nádoby, které jsou odolné vůči pronikání vodíku. Jedná se hlavně o pryžové, plastové nebo cihlové obklady. [20]

Vodíková koroze

Při vyšších teplotách se zvětšuje rychlost prostupu vodíku ocelí a obsažený vodík je schopný rozkládat karbidy kovů. Vodíková koroze oceli spočívá v chemické reakci, a to nejčastěji při oduhličení a vysokých tlacích za vzniku metanu, tvořícího se zejména rozkladem karbidu železa. Tato reakce probíhá podle následující rovnice (2).



Nebo reakcí vodíku s uhlíkem rozpuštěným v železe podle následující rovnice (3).



V obou případech si můžeme všimnout, že vzniká metan, který díky své velikosti není schopen difundovat do materiálu. Metan se tedy začíná hromadit v místech vzniku, a to zejména na hranicích zrn, v místech vměstků nebo dutinách, čímž dochází k vysokým pnutím uvnitř materiálu. Toto pnutí má za následek iniciaci trhlin či puchýřů, které degradují ocel. Ta tudíž křehne a zhoršuje své mechanické vlastnosti, které mohou vést až k porušení nádoby. [17] [21]

3.2.1 Důsledky vodíkové křehkosti a koroze

Vodíková křehkost a koroze jsou závažné problémy pro materiál vodíkové nádrže. Ty jsou proto vybaveny vložkou, která brání atomům vodíku v pronikání do materiálu. Tím je tedy zamezeno křehnutí materiálu. Pro vodíkové jednotky je tato skutečnost problémem hlavně co se týče ekonomické stránky a hmotnosti. Stěny nádoby jsou totiž daleko širší a také celková technologie výroby nádrží je dražší v porovnání s dieselovou jednotkou, která má nádrž sice také z oceli, ale daleko menší tloušťky, a tudíž jsou tyto ekonomické náklady poměrně malé.

3.3 Skladování vodíku

Vodík je kvůli jeho nízké hustotě energie, jak je ukázáno v tab. 3, nutné stlačit, zkapalnit nebo materiálově vázat, aby se dosáhlo vyšších energetických hustot. To klade nárok

na tlakové nádoby, které musí být odolné vůči již zmíněné vodíkové křehkosti, přetlaku a úniku. Samotné stlačení vodíku je ale velmi energeticky náročné. Ve srovnání s naftou má vodík výrazně nižší objemovou a gravimetrickou hustotu energie na úrovni systému skladování energie, což v některých případech výrazně omezuje koncept vozidla. Tato okolnost má vliv nejen na systém skladování energie vozidla, ale také na proces tankování jako takový a odpovídající koncepty distribuce. V zásadě lze rozlišovat mezi dvěma technologiemi skladování, prvním z nich je konvenční (někdy též fyzikální) a alternativní (chemická). Ke konvenčním technologiím patří stlačený plyný vodík (CGH₂ – Compressed Gaseous Hydrogen), kryo-stlačený vodík (CCH₂ – Cryo-compressed Hydrogen) a kapalný vodík (LH₂ – Liquid Hydrogen), kdy každá z technologií je udržována na různých úrovních tlaku. Vyšší tlak a nižší teplota mají za následek vyšší hustotu energie. S tím rostou i nároky na skladovací systémy. Mezi alternativní technologie potom patří především hydridy kovů a kapalné organické nosiče vodíku (LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carrier). [3] [22]

Tab. 3 Hustoty a energetický obsah vodíku při různém fyz. stavu ve srovnání s naftou [3]

	Tlak [MPa]	Teplota [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Energetický obsah	
				[MJ]	[kWh]
1 Nm³ plynného H₂	0,1	25	0,0899	10,7	3
1 m³ plynného H₂	35	25	23,3	2630	731
1 m³ plynného H₂	70	25	39,3	4276	1188
1 kg kapalného H₂	0,1	-253	70,8	120	33,3
1 l nafty	0,1	25	875	35,3	9,8

3.3.1 Stlačený plyný vodík CGH₂

Stlačený plyný vodík je typicky skladován při tlaku 35 nebo 70 MPa ve vysokotlakých skladovacích lahvích. Samotné skladování je poměrně jednoduchá záležitost, neboť zde nedochází k žádné fázové přeměně, a tedy stačí zvolit vhodnou nádobu. Skladovací nádoby CGH₂ pro vozidla se skládají z různých typů a materiálů. Láhve jsou rozděleny do pěti úrovní. Typy I a II jsou celokovové nádoby s kovovou vložkou, dodatečně vyztuženou uhlíkovými vlákny. Tyto typy se používají převážně pro stacionární aplikace z důvodů jejich velké hmotnosti. Typ III a IV jsou hliníkové nádoby s polyethylenovou vložkou. Posledním typem V jsou nádrže vyrobené z kompozitních materiálů bez vložky. Poslední dva typy jsou vhodné pro aplikaci v dopravních prostředcích. V dopravních aplikacích je nutné dbát na rozměry a váhu skladovací nádrže, jelikož čím vyšší váha, tím

vyšší je i spotřeba. Rozhodujícím faktorem při skladování vodíku v plynné fázi je tlak, rozhoduje totiž nejen o objemu nádrže, ale také o množství energie, které je nutno do systému dodat. Energie potřebná na stlačení vodíku na 35 MPa dosahuje přibližně 30 % energie v palivu. [3] [22]

3.3.2 Kapalný vodík LH2

Kapalný vodík je nutno skladovat při teplotě -253 °C a tlaku 0,4 MPa z důvodu nízkého bodu varu, s tím souvisejí i zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění. Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů. Při skladování kapalného vodíku v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování, čímž se zvyšuje tlak uvnitř nádrže. Aby nedošlo k její destrukci, je přebytečný tlak regulován odpouštěním odpařeného vodíku. Pro běžně používané nádrže dosahují tyto ztráty až 3 % z objemu za den. Proto je takto unikající vodík jímán a stlačován do přídavných tlakových lahví. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu. I přesto však má tato technologie své uplatnění zejména v transportu vodíku na velké vzdálenosti pomocí nákladních lodí či cisteren. [3] [22]

3.3.3 Kryo-stlačený vodík

Kryo-stlačený vodík se skladuje za vysokého tlaku od 35 do 50 MPa ve vakuově izolovaných vysokotlakých nádržích za nízkých teplot v rozmezí od -240 °C do -73 °C . Podstatou je stlačit kapalný vodík na kritický tlak a poté ho ukládat jako kryo-stlačený vodík v izolované nádobě schopné odolávat změnám těchto nízkých teplot a danému provoznímu tlaku. Nádoby jsou konstruovány velice podobně jako pro kapalný vodík, jedná se o kompozitní nádobu, která je vyztužená karbonovými vlákny s kovovou vložkou. Skladování kryo-stlačeného vodíku má oproti jiným možnostem některé výhody, a to např. vysokou skladovací kapacitu. [23]

3.3.4 LOHC

Princip LOHC spočívá v absorpci vodíku do média, kde reaguje dehydratovaná forma LOHC (většinou aromatická sloučenina) s vodíkem v hydrogenační reakci. Hydrogenace je exotermická reakce a provádí se za zvýšeného tlaku (cca 30-50 bar) a teplot cca 150–200 °C v přítomnosti katalyzátoru. Tím se vytvoří odpovídající nasycená sloučenina, která může být skladována nebo přepravována za okolních podmínek, což je velká výhoda.

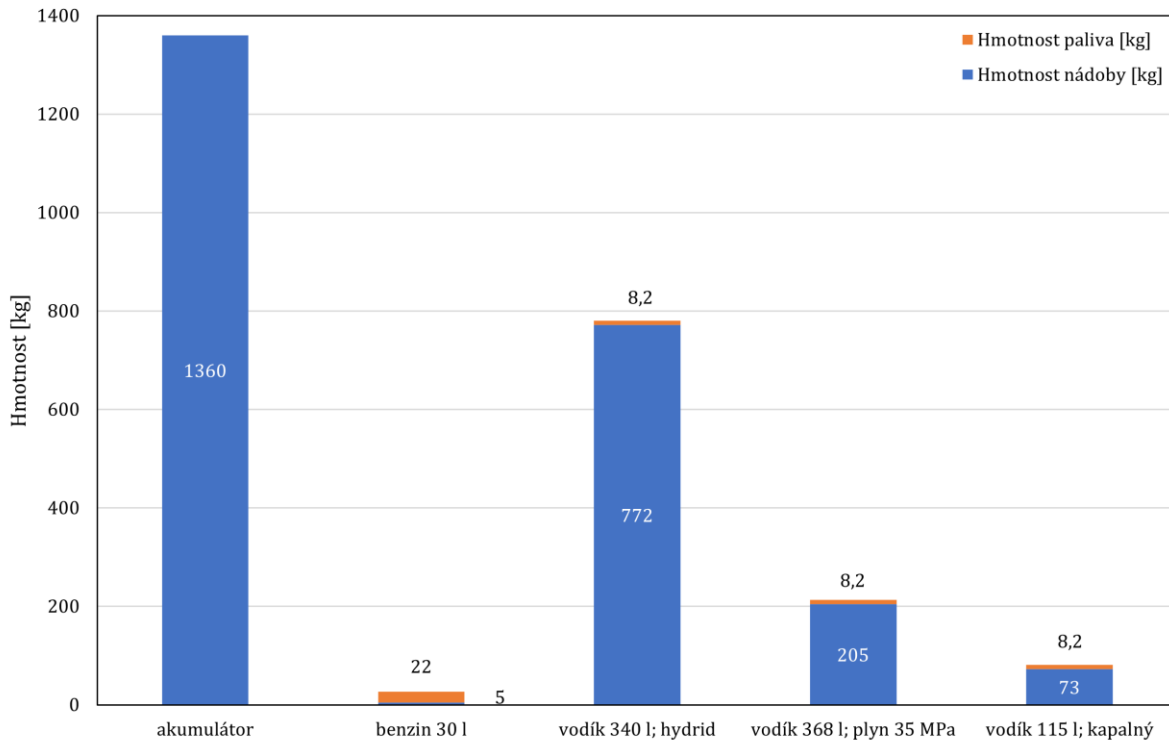
Pokud je vodík znovu potřeba, nyní hydrogenovaná, na vodík bohatá forma LOHC se dehydrogenuje, přičemž se vodík opět uvolňuje z LOHC. Tato reakce je endotermická a probíhá při zvýšených teplotách (250–320 °C) opět v přítomnosti katalyzátoru. Hlavní nevýhodou tohoto procesu je endotermální dehydrogenace následovaná čištěním vodíku na požadovanou čistotu, která snižuje celkovou účinnost tohoto skladovacího cyklu. Technologie LOHC má ale potenciál nabídnout velkou výhodu tím, že využívá stávající infrastrukturu pro benzin a naftu. O prokázání proveditelnosti použití této formy skladování se v současné době pokouší společnost Siemens Mobility a Helmholtzův institut Erlangen-Norimberk pro obnovitelné energie, které se dohodly na spolupráci při výzkumu použití LOHC v železniční dopravě. [24] [25]

3.3.5 Hydridy kovů

Systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Vodík je, díky velmi malému atomovému poloměru, schopen proniknout mezi atomy kovu do tzv. intersticiálních poloh. U této technologie není hlavním sledovaným parametrem tlak, ale především provozní teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu. Mezi další sledované vlastnosti patří hmotnostní a objemová kapacita a v neposlední řadě také cena. Vyšší cena metalhydridových nádrží je dána především použitou slitinou. Materiály vhodné pro absorpci vodíku jsou nejčastěji slitiny hořčíku, hliníku, titanu, vanadu či sodíku, které se v závislosti na jejich poměru či kombinaci liší svou cenou, absorpčními vlastnostmi i celkovou hmotností. Tato technologie se využívá v současné době pouze pro specifické aplikace, a to z důvodů své vysoké hmotnosti. [22]

3.3.6 Hmotnosti nádob

I přes nízkou objemovou energetickou hustotu disponuje vodík nejvyšším poměrem energie k hmotnosti ze všech známých paliv. Tuto výhodu však zastíňuje velká hmotnost zásobníku a návazných zařízení. Většina zásobníků vodíku je značně rozměrných a hmotných, a to víc než používané nádrže pro benzin či naftu. Na následujícím grafu 3 je uveden objem vodíku v porovnání s hmotností úložného zařízení vztahujícímu se k již dříve zmíněným způsobům skladování (kap. 3.3). Je zde dále uvedeno porovnání objemu benzínu ku hmotnosti nádrže a hmotnost akumulátoru. Všechny uvedené druhy technologií jsou vztaženy na energetický ekvivalent 1 044 MJ. [26]



Graf 3 Porovnání hmotností nádob vůči přepravovanému palivu [26]

Z uvedeného grafu 3 lze vypočítat i značnou neefektivnost přepravy vodíku na vyšší vzdálenosti, která může vzniknout v případě závozu vodíku do výdejního místa. Pro přepravu 8,2 kg vodíku je potřeba značně hmotnější nádrž. V případě plynného vodíku je potřeba zhruba 25x hmotnější nádoba, než je samotné přepravované palivo. U kapalného vodíku jsme na tom o poznání lépe, kdy je potřeba zhruba 9x hmotnější nádoba. Tato neefektivnost se poté projeví v ekonomické náročnosti celého procesu, jelikož platí čím větší hmotnost, tím větší spotřeba. Jedním z možných řešení by mohlo být právě již zmíněné LOHC, kdy se vodík uloží do kapaliny, která může být přepravována za normálních atmosférických podmínek jako benzín či nafta, a tudíž by odpadly zvýšené náklady na přepravu vodíku na větší vzdálenosti.

3.3.7 Porovnání druhů skladování vodíku a hmotností nádob

Porovnání jednotlivých druhů skladování vodíku

Co se týče skladování vodíku na vodíkových vozidlech, nabízí se v tuto chvíli pouze jedna možnost, a tou je stlačený plynný vodík CGH_2 . To ale sebou přináší velké nároky na skladovací nádoby. V dopravních aplikacích se povětšinou používají nádoby typu IV. Kapalný vodík LH_2 by mohl být řešením pro zavážení vodíku do výdejních míst, jelikož je








to lepší z ekonomického hlediska, a to z důvodu menší hmotnosti nádoby než pro plynný vodík. Tuto skutečnost popisuje graf 3. Jediným úskalím této technologie je teplota, při které se vodík skladuje. Jelikož žádná nádoba, nemůže být dokonale izolována, dochází zde ke ztrátám v podobě přestupu tepla. V budoucnu by možným řešením skladování vodíku mohla být technologie LOHC, která by využila současnou infrastrukturu pro výdej nafty. V porovnání s dieselovými jednotkami je skladování nafty daleko snazší. Jelikož je nafta skladována při atmosférických podmínkách a nejsou zde kladeny zvýšené nároky na nádoby, ve kterých je nafta skladována. Další výhodou je i skutečnost, že naftu na rozdíl od vodíku není potřeba dále stlačovat. Což v případě vodíku přináší další energetickou náročnost celého procesu.

Porovnání hmotností nádob

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.6 přeprava vodíku na větší vzdálenosti je značně ekonomicky neefektivní, kdy náklady na přepravu daleko převyšují cenu přepravovaného paliva. Jelikož se na vodíkových jednotkách využívá nejenom zásobník vodíku, ale i vyrovnávací akumulátor, je celková hmotnost vodíkových jednotek významně vyšší než je tomu u dieselových jednotek, ze kterých jsou často odvozeny. Například u vodíkové jednotky Coradia iLint, která vychází z dieselové jednotky Lint 54, je hmotnost zhruba 107 tun. Ale původní dieselová jednotka Lint 54 má 98 tun. Navýšení hmotnosti je způsobeno především nádobami na vodík a vyrovnávacím akumulátorem, což reprezentuje i graf 3, kdy nádoba na benzin či naftu má daleko nižší hmotnost než akumulátor a nádoba na plynný vodík. Navýšení hmotnosti ve svém konečném důsledku způsobuje i vyšší spotřebovanou trakční energii, než je tomu u dieselových jednotek. Na druhou stranu, ale vodíkové jednotky disponují rekuperací.

3.4 Výroba vodíku

Ačkoliv je vodík nejrozšířenějším prvkem na Zemi, za normálních podmínek neexistuje ve volném stavu a je třeba jej extrahovat ze sloučenin, které vodík obsahují. Vodík lze vyrábět z různých zdrojů, jako je voda, fosilní paliva a biomasa, pomocí různých metod. V závislosti na výrobním procesu je vodík označován pomocí barev. Tuto systematiku označování znázorňuje obr. 4. Celosvětová produkce vodíku dosahuje množství zhruba 50 mil. tun za rok, z čehož 59 % je vyráběno parním reformingem, 35 % separací z rafinérských a petrochemických procesů (katalytický reforming, pyrolýza), 3 % parciální oxidací a 3 % vodíku pochází z ostatních zdrojů. [27]

Barva		Výrobní proces CGH2	Emise CO ₂ [gCO _{eq} /MJ]
šedá		krakování metanu, vzniklý CO ₂ se uvolňuje do prostředí	98 - 140
modrá		krakování metanu, vzniklý CO ₂ se váže	35 - 43
tyrkysová		krakování metanu, vzniklý CO ₂ se váže, energie z obnovitelných zdrojů	12 - 53
zelená		elektrolýza pomocí elektřiny z obnovitelných zdrojů	4,2
růžová		elektrolýza pomocí elektřiny z jaderné energie	9 - 10
žlutá		elektrolýza pomocí elektřiny z distribuční sítě	168 - 182
bílá		vedlejší produkt z chemických procesů (chlor-alkalická elektrolýza)	-

Obr. 4 Klasifikace označování vodíku v závislosti na výrobním procesu [28]

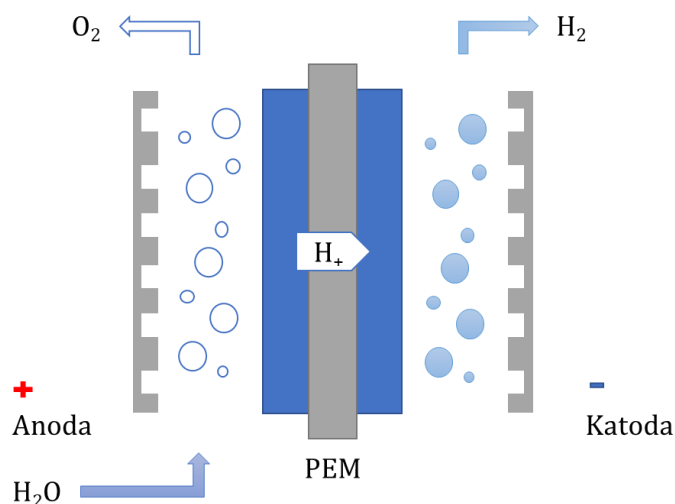
3.4.1 Výroba vodíku reformingem uhlovodíků

Prvním zmiňovaným, a zároveň nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku, je zpracování uhlovodíků parním reformingem; uhlovodíky jsou nejčastěji zemní plyn, ropa, černé uhlí nebo zkapalněný ropný plyn. Proces reformingu je popsán rovnicemi (4) a (5). Výhodou této metody je nízká cena vodíku. Naopak nevýhodami procesu je produkce velkého množství CO₂ a nutnosti čištění vodíku před použitím ve vozidle s palivovými články. Celková účinnost tohoto procesu se pohybuje kolem 75 %. [27]



3.4.2 Výroba vodíku elektrolýzou

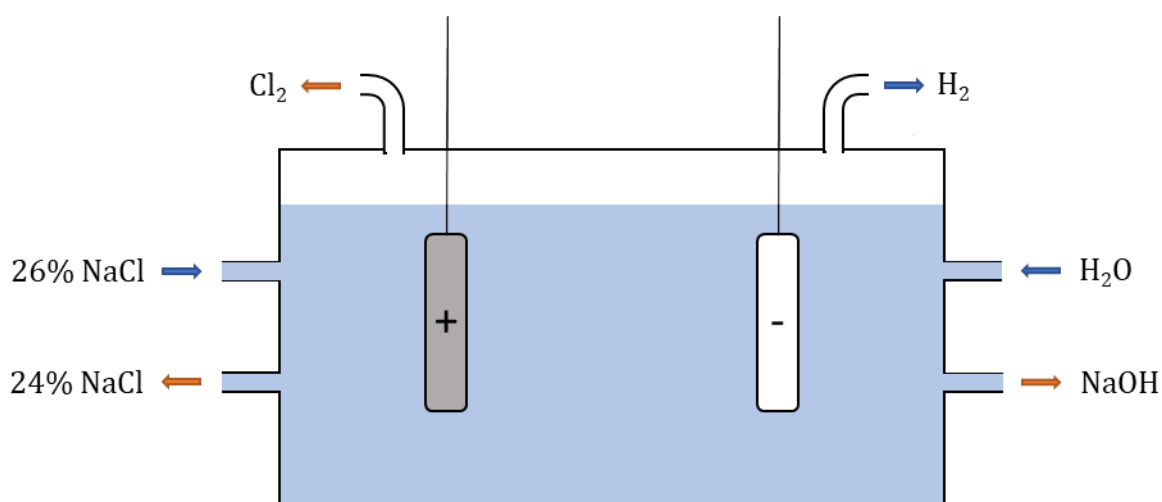
Při elektrolýze vody se průchodem elektrického proudu štěpí vazby mezi vodíkem a kyslíkem, při tom vznikají právě tyto dva plyny. K výhodám elektrolýzy patří možnost použití různých zdrojů vstupní elektrické energie a vysoká čistota elektrolytického vodíku, který nepotřebuje další čištění pro zajištění požadované čistoty vodíku v palivových článcích. Nevýhodou jsou vysoké náklady na membránu, která je obsažena v elektrolýzátoru a vysoká cena elektrické energie. Účinnost samotného procesu je 55 až 60 %. Na následujícím obr. 5 je schématicky zobrazen princip výroby vodíku pomocí elektrolýzy, jedná v principu o opak palivového článku. Kdy v prvním případě elektřinu a vodu dodáváme a v případě druhém elektřinu a vodu získáváme. [27]



Obr. 5 Princip výroby vodíku elektrolýzou

3.4.3 Vodík jako vedlejší produkt

Vodík může vznikat i jako vedlejší produkt v chemickém průmyslu. Typickým příkladem je proces chlor-alkalické elektrolýzy, který se používá primárně pro výrobu chloru, jejímž vedlejším produktem je vodík. Základní princip je následovný dle obr. 6, na anodě jsou oxidovány chloridové ionty za vzniku chloru. Zatímco na katodě vzniká vodík a hydroxidové ionty. Výhodou této metody je poměrně velká čistota vodíku a nízké náklady. Nevýhodou je zátěž na životní prostředí v podobě vzniku rtuťových par. Účinnost tohoto procesu dosahuje asi 70 %. [27]



Obr. 6 Princip výroby vodíku jako vedlejšího produktu z chlor-alkalické elektrolýzy [27]

3.4.4 Porovnání nejběžnějších způsobů výroby

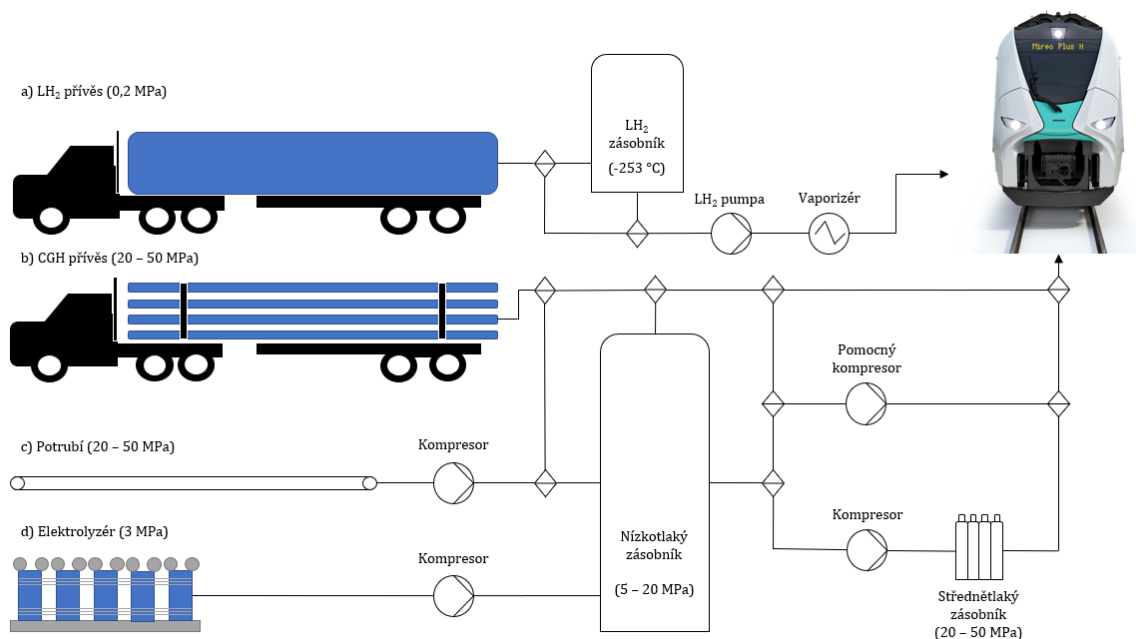
V následující tab. 4 je ukázáno porovnání tří výše zmíněných metod výroby vodíku s ohledem na cenu, kvalitu vodíku, místě výroby, logistice dopravy, závislosti na dodávce a na emisích CO₂.

Tab. 4 Porovnání druhů výroby v závislosti na ceně, kvalitě a emisích [27]

	Fosilní (SMR)		Vedlejší průmyslový produkt	Elektrolýza
Cena	Nízká		Vedlejší produkt	Vysoká
Kvalita vodíku	Obsahuje nečistoty		Závisí na procesu	Čistý vodík
Místo výroby	Mimo lokalitu	Na místě	Mimo lokalitu	Na místě
Logistika dopravy	Náklady na dodávku	Ne	Náklady na dodávku	Ne
Závislost na dodávce	Ano	Ne (pouze plyn)	Ano	Ne (pouze elektřina)
Emise CO₂	Vysoké		Ne (pokud se považuje za vedlejší produkt)	V závislosti na elektrickém zdroji

Pokud je cílem dekarbonizace železnice, je jediným možným a logickým řešením výroba vodíku pomocí elektrolýzy vody. I když je v tomto případě nevýhodou vysoká výrobní cena, tak výhodou je naopak plně bezemisní výroba, pokud budeme uvažovat elektřinu z obnovitelných zdrojů jako jsou větrné či vodní elektrárny. Další výhodou je, že odpadají dodávky s vodíkem, který by musel být zavážen pomocí kamionů do výdejního místa. V tu chvíli by cena přepravy daleko převyšovala cenu přepravovaného vodíku. Je ale samozřejmě vhodné mít záložní řešení závozu vodíku do plnicí stanice v případě poruchy výrobních jednotek. Jiné způsoby výroby vodíku nedávají smysl vzhledem k velké produkci CO₂ a dalších látek, které zatěžují životní prostředí. Pokud srovnáme výrobu vodíku pomocí elektrolýzy vody s výrobou nafty, která se běžně využívá v konvenčních železničních jednotkách, tak výroba nafty, která je vyráběna pomocí destilace a rafinace, je nesrovnatelně větší zátěží pro životní prostředí, protože produkuje vysoký podíl CO₂ a dalších znečišťujících látek.

3.5 Možnosti doplňování vodíku



Obr. 7 Možnosti doplňování vodíku [3]

Technická volba mezi závozem vodíku z externího zdroje a výrobou na místě bude mít velmi významný vliv na místní požadavky, investice, provozní náklady, náklady na vodík a organizaci dodavatelského řetězce. Konečná konfigurace vodíkové plnicí stanice by měla být navržena především s ohledem na:

- kapacitu denního množství vydávaného vodíku,
- výrobu vodíku na místě nebo externí dodávku,
- tlakovou úroveň vydávaného vodík (tzn. 35 nebo 70 MPa),
- tlak vodíku dodávaného do vodíkové plnicí stanice,
- kompresor a skladovací kapacitu,
- propojení a přípravné práce na místě.

Důležitým parametrem pro plnicí stanici, jak je popsáno výše, je zdroj vodíku. Vodík může být zavážen nejlépe od nejbližšího dodavatele nebo ho lze vyrábět na místě. Tyto dvě možnosti jsou ukázány na obr. 7 a popsány níže. [27]

3.5.1 Dovoz vodíku do plnicí stanice (off-site)

Vodík může být zavážen v cisterně v plynném nebo kapalném stavu, či dodáván potrubím, tzn. způsobem, jakým se v současné době dopravují na stanice kapalná paliva v podobě

benzínu a nafty. Předností takovéto vodíkové stanice je snadnější integrace do stávajících stanic kapalných paliv, tudíž následné uvedení do provozu může být podstatně levnější. Externí distribuce vodíku může být na krátké vzdálenosti realizována nízkotlakým potrubím nebo zavážením vodíku kamionem, který je vhodný i na větší vzdálenosti. Výhodou potrubí je, že dokáže přenášet velké objemy vodíku, ale na druhou stranu je počáteční investice vysoce nákladná, zejména v zastavěných oblastech. Vodík může být dodáván buď ve formě plynu nebo ve zkapalněné formě. Jak už bylo zmíněno výše, při zkapalňování vodíku se spotřebovává značná část energie, při současném stavu je to zhruba 30 % obsahu energie obsažené ve vodíku. Ve srovnání s dodávkou plynného vodíku je v jedné nákladce kapalného vodíku přepravováno výrazně větší množství. Kapalný vodík se obvykle dováží na přívěsech s kapacitou přes 3 t, z toho důvodu můžou být náklady na přepravu na kilogram nižší u kapalného vodíku než u plynného. Pokud je tedy nutné dovážet vodík z velké vzdálenosti, je vhodné zvážit variantu se zkapalněným vodíkem, která může být ve výsledku ekonomicky výhodnější. Při případné dodávce vodíku v plynném stavu je vodík, kvůli již zmíněné nízké hustotě, stlačován na 20 až 50 MPa pro přepravu až do 1000 kg vodíku v jedné nákladce. [27]

Ve studii „Městské autobusy: alternativní hnací ústrojí pro Evropu“ z roku 2012 se uvádí, že dodávka kapalného vodíku bude ekonomicky výhodná u vzdáleností větších než 275 km podle individuálních předpokladů a při zohlednění nákladových dopadů na investice do vodíkových plnicích stanic. Dále se uvádí, že při použití potrubí dojde k nižším distribučním nákladům pouze na velmi krátké vzdálenosti do 5 km. [27]

3.5.2 Výroba vodíku na místě (on-site)

Při výrobě vodíku na místě se využívá v zásadě dvou metod: elektrolýzy nebo parního reformingu. Zmíněné typy výroby vodíku ale vyžadují specifické požadavky. U elektrolýzy vody se spotřebovává velké množství elektrické energie, tudíž síťové připojení musí zajistit dostatečný elektrický příkon a je nutné mít vyhrazené připojení k elektrické síti. Pro parní reforming se potřebný metan často odebírá ze sítě zemního plynu nebo se používají jiné zdroje uhlovodíků, např. zkapalněný ropný plyn LPG (Liquid Petroleum Gas). Obě zmíněné metody potřebují vodu, která se obvykle musí vyčistit v jednotce pro předúpravu, aby splňovala požadované specifikace kvality vody. Výhodou výroby vodíku na místě je to, že vylučuje dodavatelský řetězec dodávek vodíku, a tím eliminuje

závislost na externích dodavatelích, samozřejmě je ale na místě zvážit případné záložní řešení. [27]

3.6 Tankování vodíku

Cílem je dosáhnout „zákaznický přijatelných“ postupů doplňování paliva, což znamená včasnou plnou nádrž vodíku, aniž by se překročilo povolené rozmezí teploty, tlaku a hustoty. Poslední parametr se používá z toho důvodu, že vzhledem k nekapalné povaze vodíku je mnohem komplikovanější definovat množství vodíku potřebné pro plnou nádrž. Tento parametr je důležitý k tomu, kdy lze nádrž vozidla považovat za plnou a je třeba proces tankování ukončit. Hustota se však mění v závislosti na tlaku a teplotě. Parametr, který lze použít k vyhodnocení natankování, je tzv. stav nabití, který je definovaný jako poměr mezi hustotou vypočtenou při konečné teplotě a tlaku s ohledem na hustotu při 15 °C a 35 MPa. Při tankování je nutno vzít v úvahu tři hlavní podmínky:

- kompresní teplo,
- zvyšující se teplotu v důsledku záporného Joule-Thomsonova koeficientu a
- konstrukci vodíkové nádrže, která snižuje přenos tepla, což může zvýšit teplotu v nádrži.

Z toho důvodu je nutno regulovat průtok vodíku tak, aby nedošlo k překročení teploty 85 °C, tlakových limitů a stav nabití se musí pohybovat mezi 90 a 100 % v závislosti na úrovni okolní teploty. Tankovací stanice tedy musí obsahovat následující komponenty:

- kompresory,
- skladovací nádrže pro vodík v plynné nebo kapalně formě,
- chladicí jednotku, aby se zajistilo, že teplota v nádrži nepřekročí teplotu 85 °C při rychlém doplňování, z bezpečnostního důvodu je tedy plynný vodík zchlazen na -40 °C a
- bezpečnostní prvky k řešení netěsností a možného požáru, jako např. pojistné ventily, čidla a hasící zařízení, která nejsou na bázi vody.

Nicméně to, co nejvíce charakterizuje tankovací stanici, je fyzikální stav vodíku, tzn. jestli je vodík v kapalně nebo plynně formě. Zatímco off-site řešení může využít obě formy, tak on-site řešení je určeno pouze pro plynnou formu, protože ho v tomto fyzickém stavu dodávají výrobní jednotky. [29]

Porovnání tankování vodíkové a diesellové jednotky

Tankování vodíku je v porovnání s tankováním nafty daleko složitější a je nutno brát ohled na tři výše uvedené podmínky. V závislosti na těchto podmínkách je vhodné dosáhnout přijatelných časů natankování, který je uváděn výrobcem kolem 30 minut. Aby bylo dosaženo těchto časů je důležité celý proces tankování intenzivně chladit a zajistit komunikaci mezi výdejním stojanem a nádrží. Pokud tento čas, který je uváděn pro vodíkové jednotky srovnáme s časem dotankování diesellových jednotek, tak jsou tyto časy velice podobné, jelikož musíme brát v potaz nejen doplnění samotné nafty, která se u některých jednotek doplňuje do 2 nádrží, ale i doplnění AdBlue, které se u moderních motorů používají z důvodů snížení emisí.

3.7 Celková účinnost vodíkové technologie

Pro výpočet celkové účinnosti vodíkové technologie je nutno brát především ohled na to, jakým způsobem je vodík vyráběn a skladován. Pokud bychom chtěli mít bezemisně vyrobený vodík, což by dávalo smysl vzhledem k důvodu použití vodíkové technologie, tak se účinnost výroby pomocí elektrolýzy pohybuje kolem 60 %. Dalším aspektem je skladování vodíku, který je v současné době nejvíce realizován pomocí stlačeného plynného vodíku nebo zkapalněného vodíku. Účinnost stlačení vodíku na 35 MPa je kolem 70 %. Dalšími vstupy do výpočtu jsou účinnosti palivového článku, který má účinnost přibližně 60 %. Jelikož palivové články musí pracovat na kontinuální úrovni výkonu, která není příliš vysoká, musí být v trakčním obvodu zásobník energie pro přebytečnou energii, tedy kompenzační lithiová baterie. Ta má účinnost zhruba 90 %, k tomu připojený měnič baterií má účinnost 96 %. Výsledný výpočet celkové účinnosti při zohlednění výroby vodíku elektrolýzou, skladování pomocí stlačeného plynného vodíku a účinnosti důležitých komponent vodíkové jednotky, jako jsou palivové články, kompenzační lithiové baterie a měniče, je následovný.

$$\eta_{celk} = \eta_{výr} \cdot \eta_{stl} \cdot \eta_{čl} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{kon} \cdot 100 = 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,9 \cdot 0,96 \cdot 100 \cong 22 \%$$

Porovnání účinnosti vodíkového a diesellového pohonu

Účinnost vodíkové jednotky pouze při zohlednění účinnosti palivových článků (60 %), vyrovnávací baterie (90 %) a měniče s pohonem (85 %) by byla něco kolem 46 %. V porovnání s konvenčními jednotkami, které pro svůj pohon využívají Diesellov motor s účinností až 40 %, vychází, že vodíkové jednotky mají o něco málo vyšší účinnost. Dále

bychom měli zohlednit i spotřebu, která přímo souvisí s účinností. Průměrná spotřeba nafty u moderních jednotek se pohybuje kolem 0,7 l/km. Zatímco vodíková jednotka spotřebuje kolem 0,230 kg/km. Pokud bychom tyto spotřeby přepočítali na ekvivalent energie vyšlo by nám v případě nafty 6,86 kWh, zatímco pro vodík nám vyjde 7,2 kWh.

[30]

4 Současně vyráběné a vyvíjené vodíkové jednotky

V následujících kapitolách je zpracována rešerše současně vyráběných a vyvíjených vodíkových jednotek.

4.1 Alstom Coradia iLint



Obr. 8 Coradia iLint, zdroj: © Alstom/Sabrina Adeline Nagel

Coradia iLint zobrazená na obr. 8 je nízkopodlažní osobní jednotka z produkce firmy Alstom, která se skládá ze 2 vozů a je založená na platformě diesellové jednotky Coradia Lint 54. Jedná se o první sériově vyráběnou jednotku, která je poháněna čistě vodíkovými palivovými články. To z ní činí plně bezemisní vozidlo. Na střeše každého z vozů tohoto vlaku se nachází nádrž, která pojme až 94 kg vodíku, který je stlačen na tlak 35 MPa a palivový článek řady Heavy-Duty HD od kanadské firmy Hydrogenics o trvalém výkonu 200 kW, výstupním napětí 360 až 720 V a proudu 0 až 500 A. Tyto palivové články využívá jednotka jako primární zdroj energie. Ve spodní části jednotky jsou umístěny trakční kompenzační lithium-iontové baterie o celkové kapacitě 220 kWh od firmy Akasol, které fungují v hybridním režimu s palivovými články a pokrývají výkyvy ve spotřebě elektrické energie včetně rekuperace při brzdění. Dále jsou zde umístěny 2 trakční elektromotory, každý o výkonu 314 kW, uspořádání náprav je tedy B' 2' + 2' B'. Pomocný měnič, též umístěný ve spodní části vozidla, napájí klimatizaci, pohon dveří, informační systém a osvětlení. Spolu s ním je zde trakční měnič, který slouží k převádění energie z palivových článků do baterií a trakčních motorů, tento měnič také převádí elektrickou energii zpět

do baterií při rekuperačním brzdění. Vlak dokáže pojmout celkově 300 cestujících, z toho 150 sedících a 150 stojících. Je schopen dosáhnout dojezdu mezi 600 až 800 km v závislosti na obsazení cestujícími, počtu zastávek, sklonu a dalších specifikách tratě. Maximální rychlost jednotky je 140 km/h. V současné době je provozováno 14 těchto jednotek v Německu ve spolkové zemi Dolní Sasko. [31] [32] [33]

4.2 Siemens Mireo Plus H



Obr. 9 Mireo Plus H, zdroj: © Siemens

Jedná se o nízkopodlažní osobní jednotku od Siemensu zobrazenou na obr. 9, která vznikla odvozením od standardní elektrické jednotky, tudíž jejím základem je platforma Mireo. Mireo Plus H existuje ve dvou nebo tříčlánkové verzi. Jednotka má uspořádání náprav $Bo' 2 Bo'$ s Jakobsonovým podvozkem pro dvoučlánkovou jednotku a $Bo' 2' 2' Bo'$ pro tříčlánkovou jednotku. Celkový výkon je 1700 kW pro oba typy jednotek. Zrychlení, které může vlak vyvinout při rozjezdu, je udáváno výrobcem na $1,1 \text{ m/s}^2$. Délka dvoučlánkové jednotky činí 47 metrů, zatímco tříčlánková má 63 metrů. Dojezd vlaku je udáván až 600 km pro dvoučlánkovou a 1000 km pro tříčlánkovou jednotku. Vlak dokáže pojmout 120 sedících cestujících ve dvoučlánkové verzi a 160 cestujících ve tříčlánkové verzi. Na jednotce jsou dva palivové články od Ballard Power Systems o výkonu 200 kW a palivové nádrže, ve kterých je vodík udržován při tlaku 35 MPa a ty jsou umístěny na střeše vozu. Spolu s tím je zde i trakční měnič. Ve spodku vozidla se nachází trakční pohon a lithium-iontové baterie. Do provozu by se měla jednotka dostat v roce 2024 na jihozápadě

Německa. V rámci projektu H2goesRail, na kterém spolupracuje Siemens a německý dopravce Deutsche Bahn, vytvořili způsob dotankování vodíkových vozidel během provozu za 15 minut, což je velmi krátký čas. Tohoto času je dosaženo na základě datové komunikace mezi stacionárním a mobilním zásobníkem, které si vyměňují informace o tlaku a teplotě, díky kterým je možno nastavit co nejefektivnější doplňovací křivku za současného intenzivního chlazení. [34] [35]

4.3 Stadler Flirt H₂



Obr. 10 Stadler Flirt H₂, zdroj: © Marek Bičan

Flirt H₂ je nízkopodlažní osobní jednotka založená na platformě Flirt, která je u nás známá jako ř. 480. Jednotky pro provoz v USA mají obecněji robustnější konstrukci, což platí i pro jednotku zobrazenou na obr. 10, která má masivnější přední nárazové zóny. Jednotku lze flexibilně a individuálně přizpůsobit podle potřeb a trasy nasazení. Jednotka bude k dispozici i ve verzi s pantografem. Jednotky na vodíkový pohon jsou v podstatě identické s DMU (Diesel Multiple Unit), samozřejmě kromě pohonu. FLIRT H₂ má shodně dva osobní vozy, na jejichž představicích jsou umístěny trakční měniče a uprostřed je 8 m dlouhý Power Module, který ukrývá vodíkovou technologii (palivové články, nádrže na vodík a chlazení). Toto umístění je v souladu s legislativou USA, požadující úplné oddělení tlakových nádob s vodíkem od prostoru pro cestující. Na vozidle je použito šest palivových článků FCmove-HD+ (Fuel Cell, Heavy-Duty), každý o výkonu 100 kW. Byly

vyrobeny společností Ballard Power Systems a jsou navrženy pro 25 000 provozních hodin. Zásobníky vodíku HSS (Hydrogen Storage System) jsou dimenzovány na 350 barů (35 MPa) a jejich naplnění trvá přibližně 30 minut. Na střeše obou vozů jsou umístěny trakční baterie typu lithium-titanate (LTO). Jednotka má uspořádání náprav B₀' 2' 2' B₀', trakční výkon včetně výkonu baterie je 700 kW (tedy stejný jako FLIRT DMU), nicméně při rekuperačním brzdění může vozidlo dosáhnout brzdného výkonu až 1 450 kW. Jednotka dokáže vyvinout až 160 kN tažné síly. Vlak pojme 116 sedících a 120 stojících cestujících. Je schopen dosáhnout dojezdu 300 až 380 mil (480 až 600 km), a to i za velmi horkého počasí (je konstruována na teplotu 49 °C), a tedy i s vysokým výkonem klimatizace. Maximální rychlost jednotky je 79 mph (127 km/h). Jednotka by měla být uvedena do provozu v roce 2024 na východním předměstí Los Angeles v USA. [36]

4.4 HydroFLEX

Jedná se o britský projekt, za kterým stojí Centrum pro výzkum a vzdělávání na železnici Univerzity v Birminghamu (BCRRE) a britský dopravce Porterbrook. Jedná se o první osobní vlak (viz obr. 11) ve Spojeném království provozovaný na vodík. Jednotka může fungovat na elektrický, bateriový nebo vodíkový pohon, což z něj dělá první „trimodální“ vlak na světě. Byl vyvinut namontováním vodíkové technologie do stávající vlakové soupravy třídy 319. Tato jednotka vznikla v roce 1987–1988. Jedná se o 4 vozovou jednotku, která má maximální rychlost 100 mph (160 km/h). Uspořádání pojezdu dle UIC klasifikace je 2'2' + B₀'B₀' + 2'2' + 2'2'. Jednotka má tedy 4 trakční motory o celkovém výkonu 990 kW. Délka jednoho vozu je 19,83 m nebo 19,92 m, záleží na tom, zda se jedná o vložený či řídicí vůz. Na palubě HydroFLEXu je uloženo až 20 kg vodíkového paliva ve 4 vysokotlakých nádržích, jejichž tlak je regulován a udržován na 8,5 baru regulátorem tlakové ztráty. Vodík je přiváděn do palivových článků řady FCveloCity-HD od společnosti Ballard Power Systems, kde se pomocí chemického procesu přeměňuje vodík s pomocí kyslíku ze vzduchu na elektřinu o výkonu až 100 kW. Elektřina, generovaná palivovým článkem, je přiváděna přes měnič do 2 lithium-iontových baterií, jedna o kapacitě 42 kWh. Tato zmíněná technologie je uložena v hnacím voze z důvodu toho, že ve spodku vozidla již nebylo místo pro osazení a pro případné osazení na střeše by vozidlo nesplňovalo průjezdný průřez, který je v Anglii značně malý. Z baterií jsou poté poháněny trakční motory. Jelikož se jedná o „trimodální“ vlak, může být jednotka napájena nejenom z palivových článků nebo baterií, ale i z trakčního vedení. HydroFLEX lze provozovat

pomocí napájení ze třetí kolejnice 750 V DC nebo pomocí střešního sběrače z trolejového napájení 25 kV AC beze změny jeho provozního systému, což nabízí plynulý přechod mezi systémy. Očekává se, že tento projekt dekarbonizuje britskou železniční síť, která v současnosti využívá dieselové a elektrické vlaky, a to nahrazením dieselových vlaků projektem HydroFLEX do roku 2040. Projekt podporuje vláda Spojeného království, která se zavázala snížit do roku 2050 emise uhlíku o 80 %. V provozu je od září roku 2020. [37] [38] [39]



Obr. 11 Class 319 HydroFLEX, zdroj: ©Alamy

4.5 FV-E991

Jedná se o japonskou osobní jednotku, přezdívanou HYBARI (Hydrogen-Hybrid Advanced Rail vehicle for Innovation), zobrazenou na obr. 12. Vznikla spoluprací firem JR East, Hitachi a Toyota. Jednotka je dvouvozová s maximální rychlostí 100 km/h a zrychlením 2,3 km/h/s. Pohon zajišťují 4 trakční motory o výkonu 95 kW. Palivové nádrže s vodíkem jsou nainstalovány na střeše vlaku, nádrže jsou rozděleny na 4 části a do každé z nich se vejde 51 litrů vodíku pod tlakem 70 MPa. Dojezd vozidla je až 140 km. Ve spodní části je umístěn palivový článek od firmy Toyota o celkovém výkonu 240 kW. Hlavní elektrický obvod s trakčním měničem a 2 lithium-iontovými bateriemi o kapacitě 120 kWh jsou od firmy Hitachi a jsou též umístěné ve spodní části vlaku. Uvádí se, že jednotka bude moct být komerčně použita do roku 2024. [40] [41]



Obr. 12 FV-E991, zdroj: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=125561857>

4.6 Porovnání základních parametrů vodíkových jednotek

V následující tab. 5 jsou uvedeny základní parametry současně vyráběných vodíkových jednotek uvedených v kapitole 4. Jedná se hlavně o parametry jako maximální rychlost, výkon, tlak vodíku, délka, hmotnost, dojezd, uspořádání pojezdu a počet míst k sezení či stání. Některé z těchto parametrů bohužel výrobci neuvádějí ve svých prospektech a z toho důvodu ani nejsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Základní parametry vodíkových jednotek

Vodíkové jednotky	Coradia iLint	Mireo Plus H		Stadler Flirt H ₂	HydroFL EX	FV-E991
		Dvouvozová jednotka	Třívozová jednotka			
Max. rychlost [km/h]	140	160	160	127	160	100
Výkon [kW]	628	1700	1700	700	990	380
Tlak uloženého vodíku [MPa]	35	35	35	35	8,5	70
Délka [m]	54	47	63	51,5	79,5	-
Hmotnost [t]	107	93	-	-	-	-
Dojezd [km]	600 až 800	600	1000	480 až 600	480	140
Uspořádání pojezdu	B' 2' + 2' B'	B ₀ ' 2' B ₀ '	B ₀ ' 2' 2' B ₀ '	B ₀ ' 2' 2' B ₀ '	2'2' + B ₀ 'B ₀ ' + 2'2' + 2'2'	-
Míst k sezení	150	120	160	116	316	-
Míst k stání	150	200	200	120	-	-

5 Charakteristika traťového úseku

Pro trakční výpočty byl vytipován úsek Olomouc hl. n. – Opava východ. Jedná se o jednokolejnou neelektrifikovanou železniční trať, která je součástí celostátní dráhy.

5.1 Historie trati

Historie trati sahá až do 19. století, kdy se díky soukromé společnosti MSCB (Moravskoslezská centrální dráha) umožnila stavba trati z Olomouce do Krnova a Glubczyc s odbočkami do Opavy, Gluchořaz a Nysy. Stavba tratě trvala od roku 1870 až do roku 1872, kdy byl zahájen pravidelný provoz. Jednalo se o druhé vlakové spojení, kdy první končilo ve stanici Opava severní nádraží (neboli Troppau-Nordbahnhof), kde byl provoz zahájen roku 1855. Tento název se stanici udržel až do roku 1921, kdy byla přeznačena na Opava – východní nádraží. Současný název Opava východ nese od roku 1961. Druhé nádraží, které vybudovala MSCB, se jmenovalo Opava centrální nádraží (neboli Troppau-Centralbahnhof), které mělo nejenom výpravní budovu (zničenou v roce 1945), ale i zázemí ve formě depa. Jeho budovy dosud existují, ale jsou využívány pro nedrážní účely. Obě opavská nádraží nebyla až do roku 1895 propojena a fungovala jako koncová. Teprve po zestátnění Moravskoslezské centrální dráhy byla otevřena nová spojovací trať, která je využívána dosud. Oběma stanicím vydržela až do roku 1963 samostatnost po stránce administrativně-správní, kdy každá měla svého přednostu. [42]

5.2 Popis tratě

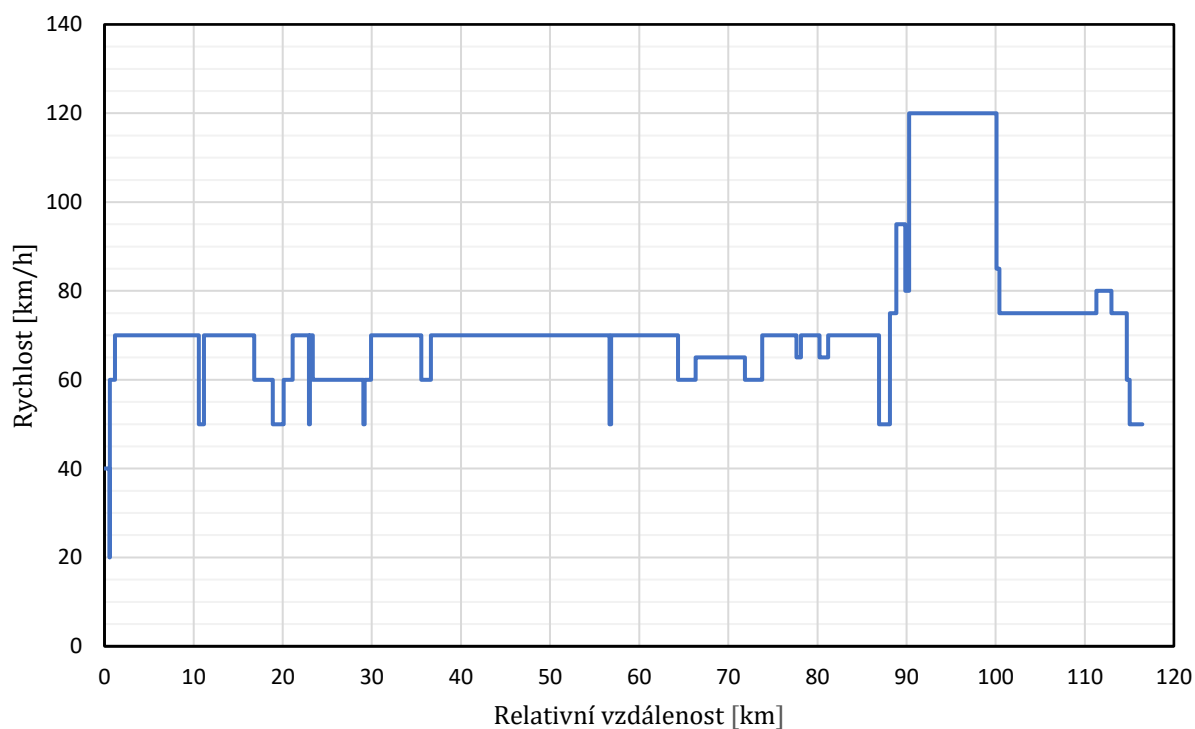
Trať se nachází v Olomouckém a Moravskoslezském kraji, začíná v Olomouci a vede přes Valšov, Bruntál, Milotice nad Opavou a Krnov do Opavy. Současným provozovatelem dráhy je státní organizace Správa železnic. V jízdním řádu pro cestující je tato trať označena číslem 310. V tabulce traťových poměrů je trať označena jako 310A. Trať je v celém úseku jednokolejná a neelektrifikovaná. Trať je poměrně velmi sklonově a směrově náročná, maximální sklon činní 20,14 ‰. Maximální možná rychlost je až 120 km/h. Dovolené traťové zatížení je 20 t na nápravu a 7,2 t na metr, což odpovídá traťové třídě C3. V úseku Olomouc hl. nádraží – Valšov a Krnov – Opava východ (v tomto úseku je i vlakový zabezpečovač LS) je traťové zabezpečení pomocí automatického hradla, zatímco v úseku Valšov – Krnov je zavedeno telefonické dorozumívání (více informací o uvedených parametrech je možné vyhledat na stránkách Správy železnic [43]). V celém úseku se nachází 16 stanic, 13 zastávek a 5 tunelů s výchozí stanicí Olomouc hl. nádraží

a konečnou stanicí Opava východ. Celý tento úsek je dlouhý 116,4 km a na následující tab. 6 jsou uvedeny významné stanice s kilometrází a nadmořskou výškou. [43]

Tab. 6 Významné stanice s kilometrází a nadmořskou výškou

Významné stanice	Kilometráž [km]	Nadmořská výška [m. n. m.]
Olomouc hl. n.	0	215
Hlubočky-Mariánské Údolí	10,8	265
Domašov nad Bystřicí	29,2	495
Moravský Beroun	36,2	535
Dětřichov nad Bystřicí	44,9	620
Lomnice u Rýmařova	49,2	595
Valšov	56,4	525
Bruntál	64,3	555
Milotice nad Opavou	73,4	445
Krnov	87,2	325
Skrochovice	100,1	285
Opava západ	112,2	270
Opava východ	116,4	255

5.2.1 Rychlostní profil tratě

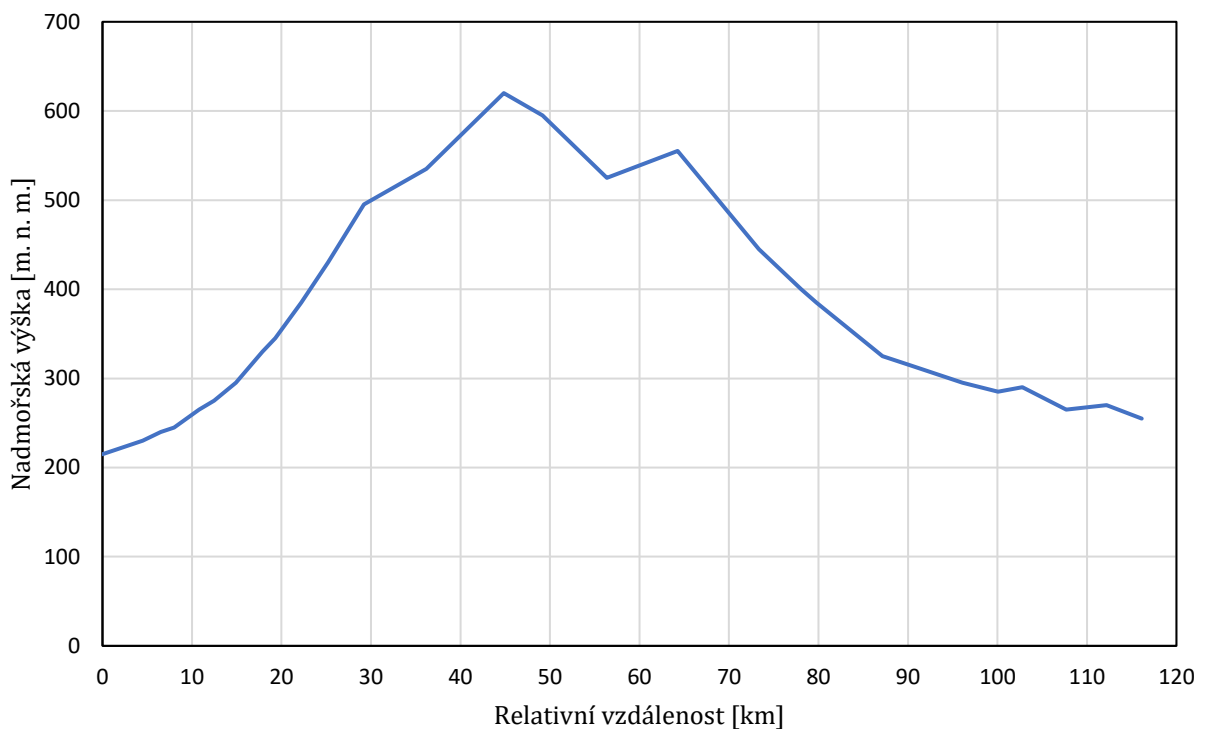


Graf 4 Rychlostní profil tratě Olomouc hl. nádraží – Opava východ

Vzhledem k směrové a sklonové náročnosti trati je i traťová rychlost poměrně nízká. Převažující rychlost v úseku Olomouc hl. nádraží – Krnov je 70 km/h, jak můžeme vidět na grafu 4. V dalším úseku Krnov – Skrochovice se traťová rychlost zvýší na 120 km/h. Od stanice Skrochovice téměř až do stanice Opava východ je rychlost 75 km/h.

5.2.2 Výškový profil tratě

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2.1 trať je poměrně sklonově náročná. To lze vidět i na grafu 5, na kterém je ukázán výškový profil tratě. Od stanice Olomouc hl. n. převažuje stoupání zhruba až do stanice Dětrichov nad Bystřicí. Poté mezi zmíněnou stanicí Dětrichov nad Bystřicí a stanicí Bruntál je klesání do stanice Valšov a z ní naopak stoupání do stanice Bruntál. Poté už následuje jen klesání, a to až do cílové stanice Opava východ. Pro lepší orientaci poloh významných stanic lze využít tab. 6.



Graf 5 Výškový profil tratě Olomouc hl. n. – Opava Východ

6 Trakční výpočty

Tato kapitola je zaměřena na provedené výpočty, způsob a postup jakým byly provedeny. Pro tyto výpočty byl vybrán již zmíněný úsek Olomouc hl. n. – Opava východ a tzv. referenční vozidlo, které má podobné parametry jako vodíkové jednotky zmíněné v kapitole 4 a tab. 5.

6.1 Definice vstupních dat

Pro potřeby výpočtu tachogramů (tzn. závislosti rychlosti jízdy vlaku na ujeté dráze) a spotřeb energie byla využita data z programu RailCalc 2.0, který numericky řeší pohybovou rovnici vlaku (6) v integračním kroku 10 metrů bez uvažování výběhu vozidla.

$$M_{red} \cdot \frac{d(v^2)}{2 \cdot dx} = F_{ok} - B - O_v - O_t \quad (6)$$

Význam jednotlivých veličin obsažených v pohybové rovnici vlaku je následovný:

- M_{red} je tzv. setrvačná hmotnost, která se spočítá následovně dle vztahu (7):

$$M_{red} = M_H \cdot (1 + \rho_H) + M_D \cdot (1 + \rho_D), \quad (7)$$

- M_H je hmotnost hnacího vozidla,
- ρ_H je součinitel rotačních hmot hnacího vozidla,
- M_D je hmotnost dopravovaných vozidel,
- ρ_D je součinitel rotačních hmot dopravovaného vozidla,
- F_{ok} je tažná síla na obvodu kol,
- B je brzdná síla,
- O_v je vozidlový odpor, který může zahrnovat i zvýšení aerodynamického odporu v důsledku jízdy tunelem (tzv. tunelový faktor τ , viz vztah (11)),
- O_t je traťový odpor, který je součtem odporu z jízdy obloukem O_r a odporu ze sklonu O_s , jak je uvedeno ve vztahu (8):

$$O_t = O_r + O_s, \quad (8)$$

- v je rychlost jízdy,
- x je ujetá dráha.

Pro tyto potřeby bylo nutno definovat vstupní data, tudíž samotné vozidlo (tzv. referenční vozidlo) a traťový úsek, což je popsáno v následujících kapitolách 6.1.1 a 6.1.2.

6.1.1 Referenční vozidlo

Referenční vozidlo bylo na základě konzultace s vedoucím práce zvoleno s podobnými parametry jako současně vyráběné vodíkové jednotky. Důležitými parametry pro následné výpočty jsou hmotnost vozidla, součinitel rotačních hmot (tzv. ekvivalentní rotační hmoty), výkon jednotky, palivového článku a pomocných pohonů, dále kapacita baterie, účinnost pohonu a rekuperace, maximální tažná síla na obvodu kol a provozní zpomalení vozidla. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tab. 7.

Tab. 7 Parametry referenčního vozidla

Hmotnost vozidla	110 t
Ekvivalentní rotační hmoty	5 t
Výkon vozidla	900 kW
Výkon palivového článku	200 kW
Příkon pomocných pohonů	60 kW
Kapacita baterie	250 kWh
Maximální tažná síla na obvodu kol	150 kN
Provozní zpomalení vozidla	-0,45 m/s ²
Účinnost pohonu	0,82
Účinnost rekuperace	0,80

Ekvivalentní rotační hmoty vychází ze součinitele rotačních hmot a hmotnosti vozidla, tento přepočít je následující dle vztahu (9). Pro uvažované referenční vozidlo se součinitel rotačních hmot pohybuje kolem hodnoty 0,045.

$$\rho = \frac{M_{ekv}}{M_v} \quad (9)$$

Pro definici referenčního vozidla v prostředí programu RailCalc 2.0 bylo nutné zkonstruovat trakční charakteristiku a charakteristiku vozidlového odporu. Trakční charakteristiku je možné sestavit ze vstupních dat pomocí vztahu (10). Omezením charakteristiky je maximální tažná síla na obvodu kol a maximální rychlost vozidla.

$$F_{ok} = \frac{3,6 \cdot P}{V} \quad (10)$$

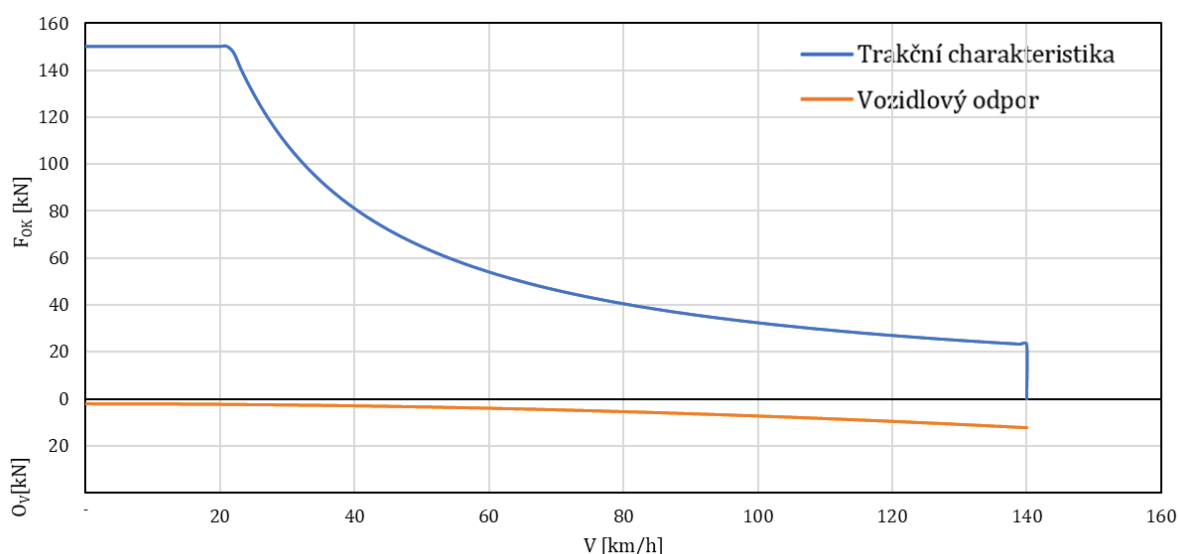
Měrný vozidlový odpor je definovaný podle obecného vzorce (11), kde koeficienty a , b , c byly definovány podobně jako u stávajících dieselových jednotek, ze kterých jsou vodíkové jednotky často odvozeny. Pro vynesení vozidlového odporu je nutné měrný

vozidlový odpor vynásobit hmotností vozidla a tíhovým zrychlením, jak je ukázáno ve vztahu (12).

$$o_v = a + b \cdot V + \tau \cdot c \cdot V^2 \quad (11)$$

$$O_v = o_v \cdot M_v \cdot g \quad (12)$$

Na následujícím grafu 6 je ukázána uvažovaná trakční charakteristika spolu s charakteristikou vozidlového odporu.



Graf 6 Trakční charakteristika spolu s vozidlovým odporem

6.1.2 Traťový úsek

Zvolený traťový úsek byl již popsán v kapitole 5, tudíž zde nemusí být podrobně popisován. Pro potřeby výpočtů bylo nutné definovat v programu RailCalc 2.0 celou trať, mezi tato data patří sklonový, směrový a rychlostní profil, poloha a délka tunelů a místa zastavení. Tyto vstupní data byla získána z nákrešného přehledu železničního svršku a zadána do programu RailCalc 2.0.

V programu RailCalc 2.0 bylo nutné následně definovat tunelový faktor τ , ten se obvykle pohybuje okolo hodnoty 2 v tunelu a v otevřené krajině se uvažuje hodnota 1. Tunelový faktor se vkládá do vztahu vozidlového měrného odporu (11) ke koeficientu c .

Měrný odpor z oblouku je možné definovat několika způsoby, pro potřeby výpočtů v této práci je tento odpor definovaný následovně dle vztahu (13).

$$o_r = \frac{600}{R} \quad (13)$$

6.2 Postup výpočtů

Pro výpočet jízdních dob, spotřebované energie, rychlosti, okamžitého zrychlení, trakčního výkonu a působících sil, které jsou potřeba k dalším výpočtům energetiky provozu vodíkové jednotky byl použit zmíněný program RailCalc 2.0. Podrobný popis, způsob výpočtů a použité vzorce lze najít v Technické a uživatelské dokumentaci k tomuto programu. [44]

S daty získanými z programu RailCalc 2.0 je nutno dále pracovat, protože je důležité nejen vykreslit tachogramy, ale i zhodnotit energetiku vodíkové jednotky v režimu osobního zastávkového vlaku a rychlíkového vlaku. Je nutné dopočítat celkovou spotřebovanou energii, energii vydanou na pomocné pohony, energii získanou z palivového článku a rekuperace (pokud je na vozidle) a jako poslední získat stav nabití vyrovnávacího akumulátoru na vozidle. Stav nabití je důležitý pro zhodnocení nasazení vodíkového vozidla v režimu osobního zastávkového vlaku a rychlíkového vlaku. Postup je tedy následující dle vztahů (14) až (19).

Přírůstky spotřebované trakční energie se spočítají z trakční práce, která se získala z výpočtu v programu RailCalc 2.0. Samotný výpočet je dle vzorce (14), do kterého vstupuje trakční práce a účinnost pohonu stanovená pro referenční vozidlo v tab. 7.

$$\Delta E_{tr} = \frac{\Delta W_{tr}}{\eta_{poh}} \quad (14)$$

Přírůstek energie získané z rekuperace se spočítá z přírůstkem práce brzděné síly elektrodynamické brzdy, která je vykonávána při brzdění. Jelikož je brzděná síla ve výstupních datech z programu RailCalc 2.0 prezentována jako záporná tažná síla, bylo nutné ji přepočítat na kladnou hodnotu. Brzděná síla, ale pořád působí proti pohybu vozidla, což v pohybové rovnici vlaku (6) reprezentuje záporné znaménko. Pro výpočet přírůstkem energie získané z rekuperace bylo nutné definovat účinnost rekuperace; uvažovaná hodnota je definovaná v tab. 7, kde jsou obsaženy základní parametry referenčního vozidla. Výpočet byl následovný dle vztahů (15) a (16).

$$\Delta W_{rek} = B_{EDB} \cdot \Delta x \quad (15)$$

$$\Delta E_{rek} = \eta_{rek} \cdot \Delta W_{rek} \quad (16)$$

Přírůstky energie spotřebované pomocnými pohony se spočítají z přírůstku času a příkonu pomocných pohonů, který je definovaný v tab. 7. Výpočet tohoto přírůstku se spočítá dle následujícího vztahu (17).

$$\Delta E_{PP} = P_{PP} \cdot \Delta t \quad (17)$$

Přírůstek energie získané z palivového článku se získá z výkonu palivového článku a přírůstku času. Výkon palivového článku je uveden v základních parametrech referenčního vozidla v tab. 7.

$$\Delta E_{H2} = P_{H2} \cdot \Delta t \quad (18)$$

Využitelná kapacita baterie v průběhu její životnosti klesá. Z toho důvodů je při výpočtech uvažovaná maximální hodnota nabití 80 % celkové kapacity. Zároveň je nežádoucí baterii vybit do nulové kapacity, minimální stav nabití by měl být 20 % celkové kapacity. Výsledný stav se tedy potom spočítá jako kapacita baterie (ponížená o 20 %), ke které se přičte rekuperovaná energie a energie získaná z palivového článku, a naopak se odečte spotřebovaná trakční energie a energie vynaložená na pomocné pohony. Tudíž rovnice pro vyjádření stavu nabití baterie v čase je následovná dle vztahu (19).

$$E(t) = E_0 - E_{tr}(t) - E_{PP}(t) + E_{rek}(t) + E_{H2}(t) \quad (19)$$

Energetiku provozu vodíkové jednotky v režimu zastávkového osobního a rychlíkového vlaku v podobě průběhu dílčích energií (spotřebovaná energie, rekuperovaná energie, energie získaná z palivových článků, energie vydaná na pomocné pohony a výsledný stav nabití vyrovnávací baterie) v závislosti na dráze můžeme vidět na grafu 8, 9, 11 a 12, a to pro oba uvažované směry.

6.3 Dosažené výsledky

Cílem práce bylo provést výpočty pro osobní zastávkový a rychlíkový vlak a zhodnotit energetiku provozu vozidla na vybrané trati v těchto režimech. Dosažené výsledky jsou ukázány v následujících kapitolách 6.3.1 a 6.3.3.

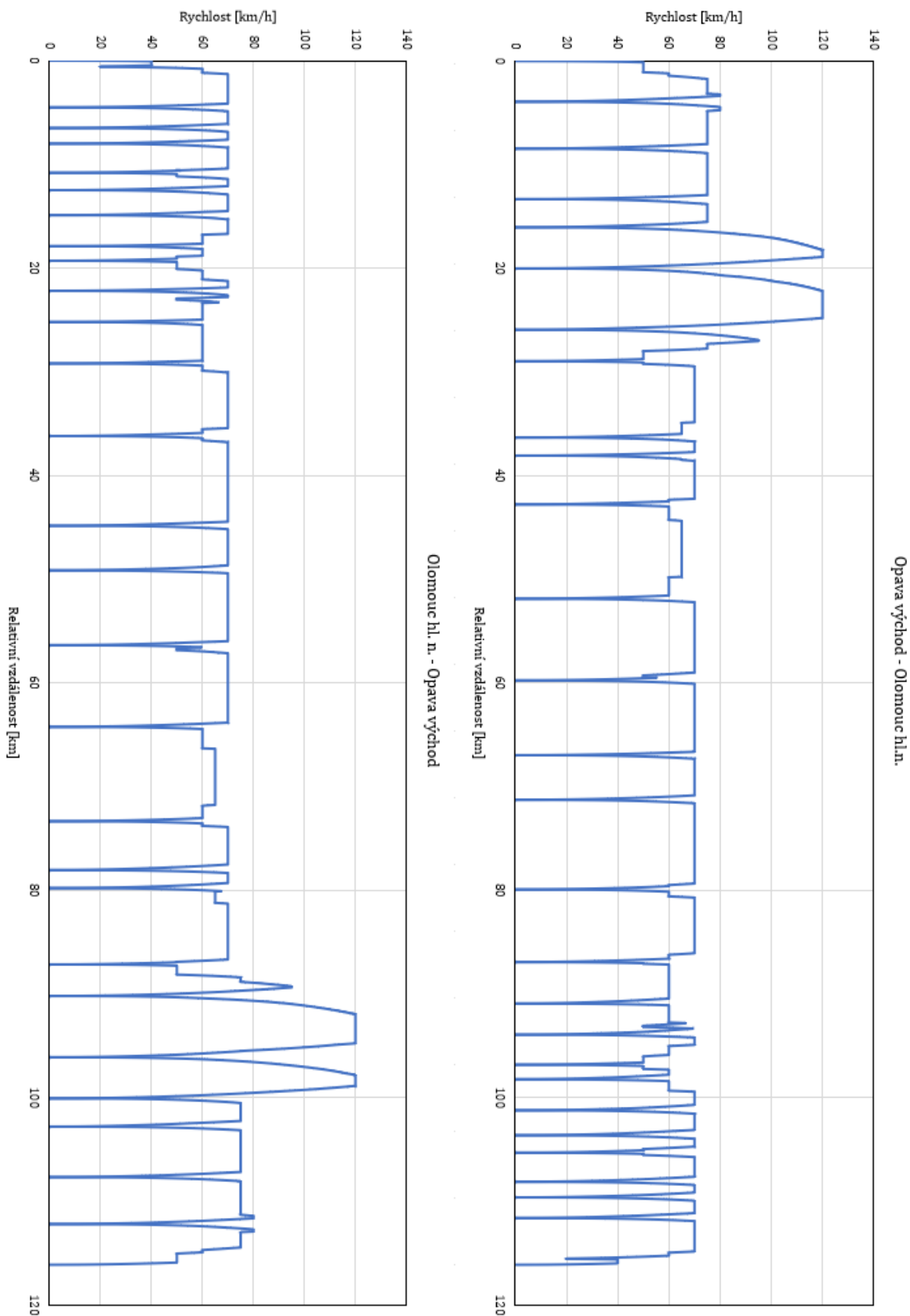
6.3.1 Osobní zastávkový vlak

Jak název napovídá vlak zastavuje na každé zastávce s uvažovanou dobou pobytu 1 minuta, v případě stanic je předpokládána doba pobytu 2 minuty. Jediná výjimka je stanice Krnov, kde vlak může čekat na přípoj z jiného směru. Z toho důvodu je zde navýšena doba pobytu na 8 minut. Na následující tabulce je uvedena teoretická jízdní

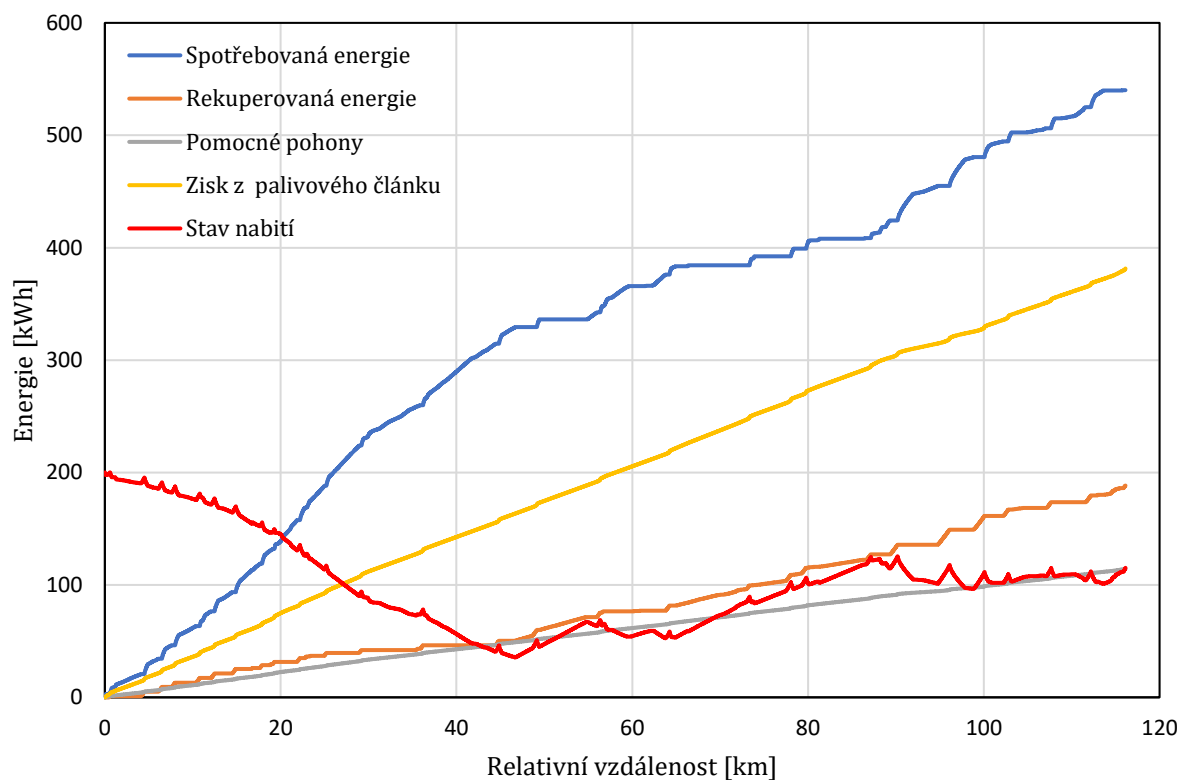
doba v obou směrech, tj. Olomouc hl. n. – Opava východ a Opava východ – Olomouc hl. n. (viz tab. 8). V současné době na této trati neexistuje spojení, které by bylo v režimu osobního zastávkového vlaku. Pokud bychom ale vybrali současná spojení jen osobních vlaků s tím, že bychom neuvažovali dobu přestupu mezi jednotlivými spojeními, vyšla by jízdní doba na 160 minut. V porovnání s teoretickou jízdní dobou, která vyšla z výpočtů pro směr Olomouc hl. n. – Opava východ též na 160 minut a v opačném směru na 161 minut, lze usoudit, že provoz vodíkového vlaku na této trati z hlediska jízdních dob je podobný.

Tab. 8 Jízdní doby osobního zastávkového vlaku, Olomouc hl. n. – Opava východ a Opava východ – Olomouc hl. n.

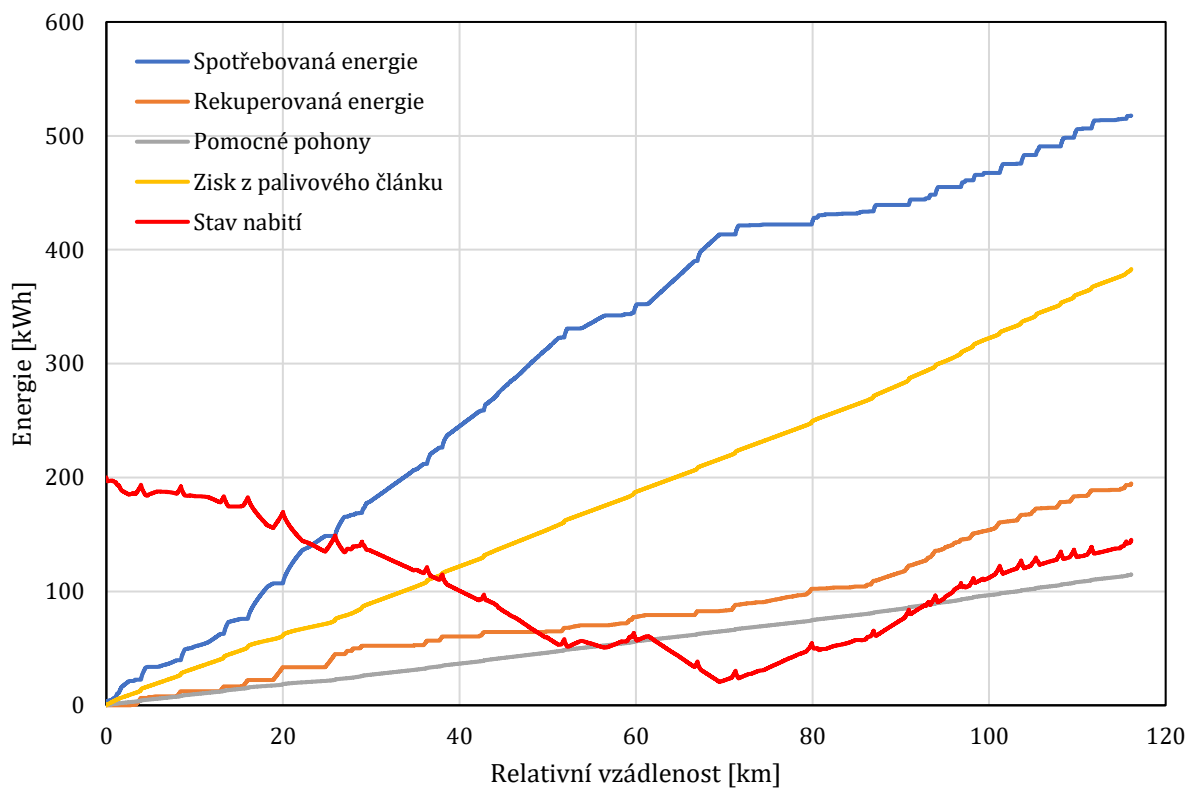
Směr	Olomouc hl. n. – Opava východ			Opava východ – Olomouc hl. n.		
	Příjezd	Odjezd	Jízdní doba	Příjezd	Odjezd	Jízdní doba
Olomouc hl. n.	-	0:00:00	-	2:41:55	-	0:04:55
Bystrovany	0:04:54	0:05:54	0:04:54	2:36:00	2:37:00	0:02:18
Velká Bystřice	0:08:08	0:10:08	0:02:14	2:31:42	2:33:42	0:01:49
Velká Bystřice zast.	0:11:55	0:12:55	0:01:47	2:28:53	2:29:53	0:03:02
Hlubočky - Mar. údolí	0:15:51	0:17:51	0:02:56	2:23:51	2:25:51	0:02:03
Hlubočky zast.	0:19:53	0:20:53	0:02:02	2:20:48	2:21:48	0:02:39
Hlubočky	0:23:29	0:25:29	0:02:36	2:16:09	2:18:09	0:03:15
Hrubá Voda zast.	0:28:37	0:29:37	0:03:08	2:11:54	2:12:54	0:02:03
Hrubá Voda	0:31:32	0:33:32	0:01:55	2:07:51	2:09:51	0:03:20
Hrubá Voda – Smilov	0:36:51	0:37:51	0:03:19	2:03:31	2:04:31	0:03:31
Jívová	0:41:13	0:42:13	0:03:22	1:59:00	2:00:00	0:04:39
Domašov n. Bystřicí	0:46:40	0:48:40	0:04:27	1:52:21	1:54:21	0:06:40
Moravský Beroun	0:55:19	0:57:19	0:06:39	1:43:41	1:45:41	0:07:58
Dětrichov n. Bystřicí	1:05:18	1:07:18	0:07:59	1:33:43	1:35:43	0:04:14
Lomnice u Rýmařova	1:11:33	1:12:33	0:04:15	1:27:29	1:29:29	0:06:39
Valšov	1:19:15	1:21:15	0:06:42	1:18:50	1:20:50	0:07:23
Bruntál	1:28:39	1:30:39	0:07:24	1:09:27	1:11:27	0:09:07
Milotice n. Opavou	1:39:45	1:41:45	0:09:06	0:58:20	1:00:20	0:04:38
Zátor	1:46:29	1:47:29	0:04:44	0:52:42	0:53:42	0:01:57
Brantice	1:49:31	1:51:31	0:02:02	0:48:45	0:50:45	0:06:56
Krnov	1:58:27	2:06:27	0:06:56	0:33:49	0:41:49	0:03:13
Krnov – Cvilín	2:09:42	2:10:42	0:03:15	0:29:36	0:30:36	0:04:05
Úvalno	2:14:48	2:15:48	0:04:06	0:24:31	0:25:31	0:03:01
Skrochovice	2:18:50	2:20:50	0:03:02	0:19:30	0:21:30	0:02:48
Holasovice	2:23:41	2:24:41	0:02:51	0:15:42	0:16:42	0:04:24
Vávrovice	2:29:09	2:30:09	0:04:28	0:10:18	0:11:18	0:04:10
Opava západ	2:34:20	2:36:20	0:04:11	0:04:08	0:06:08	0:04:08
Opava východ	2:40:27	-	0:04:07	-	0:00:00	-



Graf 7 Dráhové tachogramy v obou směrech pro osobní zastávkový vlak



Graf 8 Energetika provozu vodíkové jednotky v režimu osobního zastávkového vlaku, Olomouc hl. n. – Opava východ



Graf 9 Energetika provozu vodíkové jednotky v režimu osobního zastávkového vlaku, Opava východ – Olomouc hl. n.

6.3.2 Zhodnocení výsledků pro osobní zastávkový vlak

Pokud máme vodíkovou jednotku v režimu osobního zastávkového vlaku, který jede do stoupání, lze vidět, že stav nabití (graf 8 a graf 9) vyrovnávací baterie se dramaticky snižuje až na mezní hodnoty 37 kWh ve směru Opava východ a 22 kWh ve směru Olomouc hl. n., v tomto směru tedy dochází k vybití akumulátoru pod hodnotu 20 %, která je z hlediska životnosti baterie nežádoucí. Dalšími důležitými hodnotami pro hodnocení energetiky provozu jsou měrné spotřeby energie a rekuperované energie. Pro jednotku v tomto režimu vychází průměrná hodnota měrné spotřeby energie bez vlivu rekuperace pro oba směry na 0,041 kWh/tkm a hodnota měrné rekuperované energie je v tomto případě 0,015 kWh/tkm. Rekuperace na vozidle při těchto hodnotách dosahuje 36 % úspory energie. Pokud bychom srovnali uvedenou průměrnou měrnou spotřebu energie a měrnou spotřebu energii, která se účtuje v elektrické trakci paušálně v případě, že vozidlo není vybaveno měřením spotřeby, vychází tato hodnota na 0,042 kWh/tkm, a to v případě, že uvažujeme střídavou trakční soustavu a koeficient podzimního ročního období. Lze říci, že hodnoty měrných spotřeb energie osobního vlaku poháněným palivovými články a elektrického vlaku ve stejném režimu jsou shodné. Tabulky paušálních spotřeb a jejich výpočet pro dané kategorie lze najít v dokumentu [45].

Konstantní přísun energie získané z palivového článku nedokáže spolehlivě pokrýt spotřebu vozidla. Na těchto vozidlech je velice důležitým prvkem rekuperace, která u osobního zastávkového vlaku produkuje značnou část energie. Pokud bychom rekuperaci na vozidle neměli, tak zcela jistě by vozidlo mělo stav nabití pod mezní hodnotou, která by nedovolila vozidlu se dál pohybovat jmenovitým výkonem. Je tedy nutností zajistit na vodíkových jednotkách rekuperaci s vysokou účinností, která dokáže vozidlu část energie získat zpět. Dalším úskalím těchto jednotek jsou pomocné pohony, které jsou neustále v chodu, tudíž při delším stání se baterie vozidla stále vybíjí a je nutné zajistit výrobu elektřiny z palivového článku tak, aby pokryla minimálně výdej energie na pomocné pohony.

V případě, že takovouto jednotku budeme provozovat jako osobní zastávkový vlak na trati o podobných parametrech jako je vytipovaný úsek Olomouc hl. n. – Opava východ, je nutné, aby vozidlo mělo rekuperaci a větší výkon palivových článků, které by mohly efektivně vyrovnávat pokles nabití baterie. Ten v případě těchto hodnot výkonu sice vystačí na projetí celého úseku, ale na zpáteční cestu by již určitě nevystačil. Je tedy

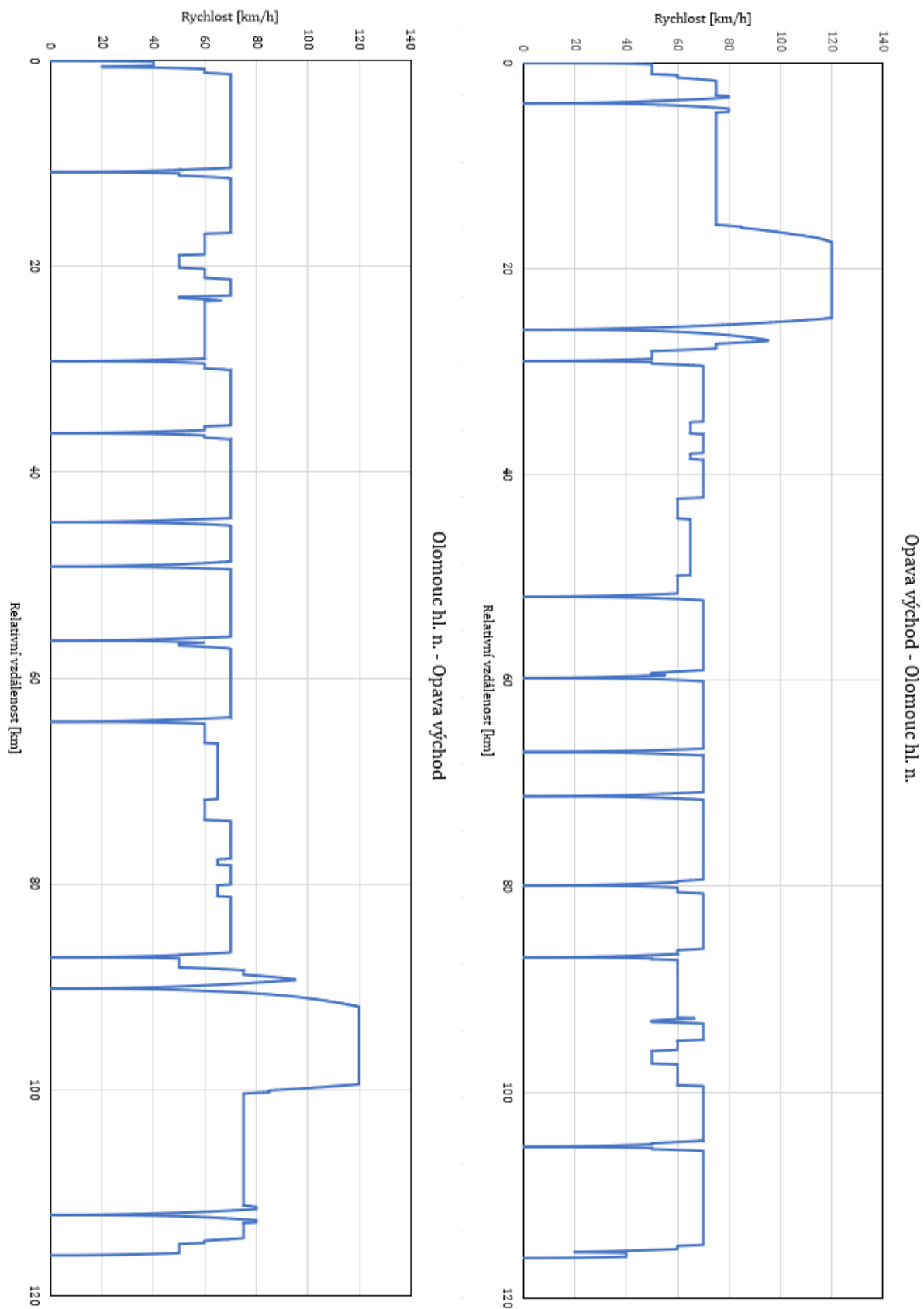
důležité mít takový čas obratu, který by vystačil na dobití baterie na hodnoty, které by umožnily zpáteční cestu. Při uvažovaných parametrech referenčního vozidla bychom museli vykonat v konečné stanici obrat v minimální výši 25 minut, aby se baterie dobila na hodnotu 200 kWh.

6.3.3 Rychlíkový vlak

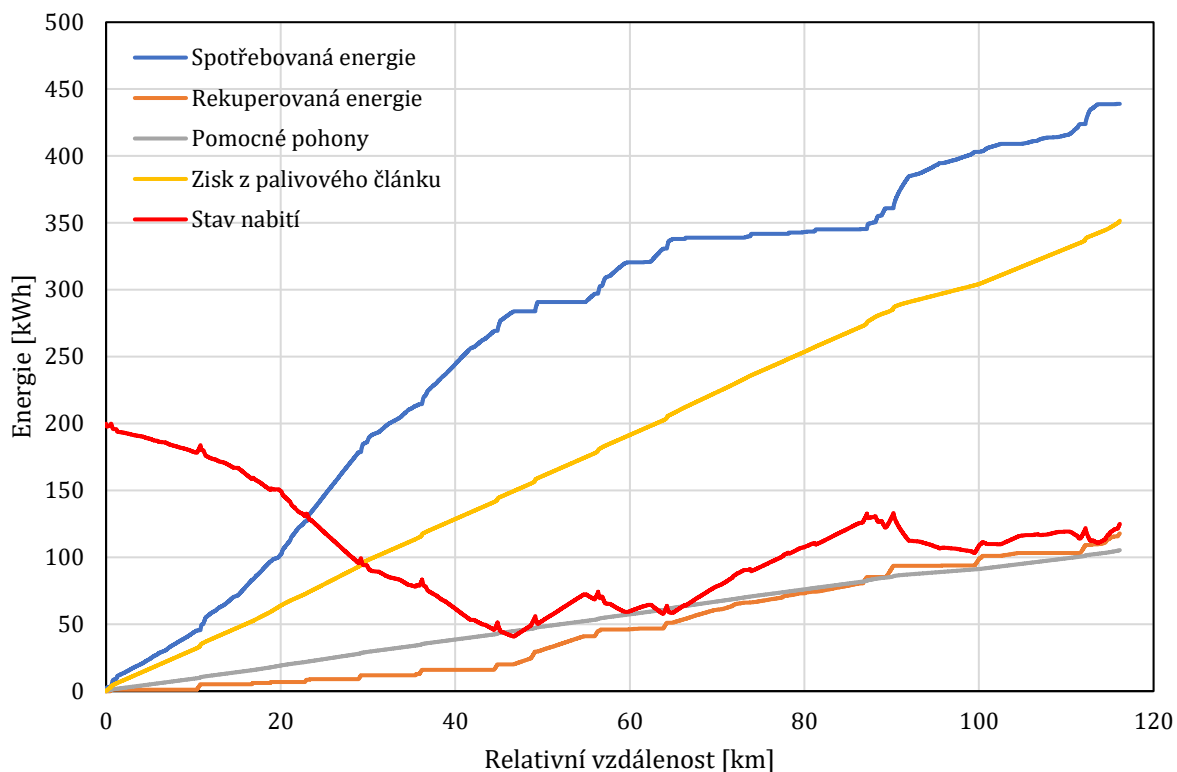
Rychlíkový vlak zastavuje pouze v některých stanicích a zastávkách (stejně jako rychlík Praděd, který tuto trať obsluhuje) s dobou pobytu 1 minuty v zastávce a 2 minuty ve stanici. Stejná výjimka jako u osobního zastávkového vlaku je i pro rychlíkový vlak ve stanici Krnov, kde vlak může čekat na přípoj z jiného směru. Na následujících tabulkách je uvedena jízdní doba v obou směrech, tj. Olomouc hl. n. – Opava východ a Opava východ – Olomouc hl. n. (tab. 9). V současné době obsluhuje tuto trať již dříve zmíněný rychlík Praděd. Tento vlak dokáže projet úsek Olomouc hl. n. – Opava východ za 146 minut. V porovnání s teoretickou jízdní dobou z výpočtu, která činí v tomto směru 132 minut je rozdíl 14 minut. Ten je daný větší dobou pobytu ve stanici Krnov, která pro rychlík Praděd činí 15 minut, zatímco v námi uvažovaném případě je tento pobyt stanoven na 8 minut. Výsledný rozdíl je tedy 7 minut. Tento rozdíl lze přiřadit motorové jednotce ř. 843, která tento rychlík dopravuje, jelikož tato jednotka má menší výkon, maximální tažnou sílu i rychlost v porovnání s referenčním vozidlem, které bylo pro výpočet použito. Provoz vodíkové jednotky s parametry referenčního vozidla by tedy mohl přispět ke snížení jízdních dob na této trati.

Tab. 9 Jízdní doby rychlíkového vlaku, Olomouc hl. n. – Opava východ a Opava východ – Olomouc hl. n.

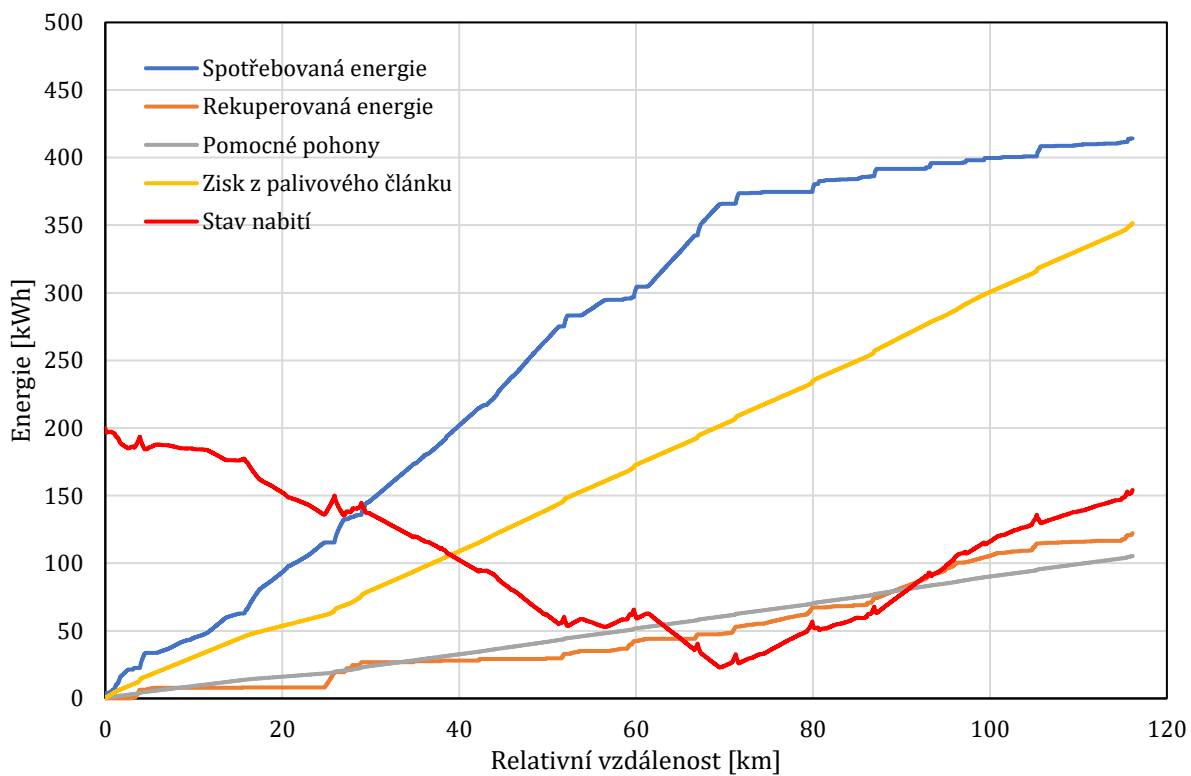
Směr	Olomouc hl. n. – Opava východ			Opava východ – Olomouc hl. n.		
	Příjezd	Odjezd	Jízdní doba	Příjezd	Odjezd	Jízdní doba
Olomouc hl. n.	-	0:00:00	-	2:11:57	-	0:10:21
Hlubočky - Mar. údolí	0:10:20	0:12:20	0:10:20	1:59:36	2:01:36	0:18:11
Domašov n. Bystřicí	0:30:28	0:32:28	0:18:08	1:39:25	1:41:25	0:06:41
Moravský Beroun	0:39:07	0:41:07	0:06:39	1:30:44	1:32:44	0:07:58
Dětřichov n. Bystřicí	0:49:06	0:51:06	0:07:59	1:20:46	1:22:46	0:04:13
Lomnice u Rýmařova	0:55:21	0:56:21	0:04:15	1:15:33	1:16:33	0:06:39
Valšov	1:03:03	1:05:03	0:06:42	1:06:54	1:08:54	0:07:23
Bruntál	1:12:27	1:14:27	0:07:24	0:57:31	0:59:31	0:09:07
Milotice n. Opavou	1:23:33	1:25:33	0:09:06	0:46:24	0:48:24	0:12:33
Krnov	1:38:06	1:40:06	0:12:33	0:25:51	0:33:51	0:03:13
Krnov – Cvilín	1:49:21	1:50:21	0:03:15	0:21:38	0:22:38	0:15:30
Opava západ	2:05:50	2:07:50	0:15:29	0:04:08	0:06:08	0:04:08
Opava východ	2:11:56	-	0:04:06	-	0:00:00	-



Graf 10 Dráhové tachogramy v obou směrech pro rychlíkový vlak



Graf 11 Energetika provozu vodíkové jednotky v režimu rychlíkového vlaku, Olomouc hl. n. – Opava východ



Graf 12 Energetika provozu vodíkové jednotky v režimu rychlíkového vlaku, Opava východ – Olomouc hl. n.

6.3.4 Zhodnocení výsledků pro rychlíkový vlak

Pokud budeme hodnotit provoz vodíkové jednotky v režimu rychlíkového vlaku, je zde obdobný problém s vybíjením vyrovnávacího akumulátoru jako je tomu u osobního zastávkového vlaku, kdy se jeho kapacita snižuje až na mezní hodnoty. Obzvláště je tomu zhruba v 70. kilometru tratě na graf 12, kdy je kapacita baterie na úrovni 20 kWh. V tuto chvíli, kdybychom pokračovali dále ve stejném tempu spotřeby energie, tak by zcela jistě došlo k vybití baterie a nemožnosti využívat jmenovité výkonové parametry vodíkové jednotky. Z toho důvodu je nutné mít na vozidle rekuperaci s vysokou účinností a palivové články s vyšším výkonem, aby nedošlo k poklesu nabití baterie pod mezní hodnotu. Ve směru Opava východ je nejnižší hodnota nabití 41 kWh, a to ve 47. kilometru úseku v uvažovaném směru. V opačném směru do Olomouce hl. n. je nejnižší hodnota nabití 24 kWh, a to v 70. kilometru úseku v tomto směru.

Ve srovnání s osobním zastávkovým vlakem je v režimu rychlíkovém o něco menší spotřebovaná energie, zhruba o 90 kWh. I měrná rekuperovaná a spotřebovaná energie vychází nižší. V případě měrné spotřebované energie se pohybujeme na hodnotě 0,033 kWh/tkm bez započtení vlivu rekuperace. Je to dáno především menším počtem zastávek. Není tedy nutností využívat častěji maximální tažné síly a výkonu na rozjezd jednotky, což je vidět i na tachogramech pro osobní zastávkové vlaky (graf 7). Nevýhodou je, že rekuperovaná energie je zde nižší v porovnání s osobním zastávkovým vlakem, což je dáno především menším počtem zastavení, kdy jednotka nemusí brzdit, a tudíž rekuperovat energii. To platí i pro měrnou rekuperovanou energii, která je na hodnotě 0,009 kWh/tkm. V tomto případě se díky rekuperaci ušetří až 28 % energie, což je sice méně v porovnání s osobním vlakem, ale je nutno vzít v úvahu dříve uvedené aspekty (menší počet zastávek, menší využití maximálního výkonu na rozjezd).

Pokud bychom měrnou spotřebovanou energii porovnali s tabulkou paušální spotřeby, jako v případě osobního vlaku, s uvažováním střídavé trakční soustavy a podzimního ročního období, tak tato hodnota vychází na 0,030 kWh/tkm. I v tomto případě uvedená hodnota měrné spotřeby zhruba koresponduje s výsledkem vodíkové jednotky v režimu rychlíkového vlaku.

7 Závěr

Provozní nasazení vodíkových jednotek ať už v režimu osobního zastávkového vlaku nebo rychlíkového vlaku je značně náročné. Jak bylo zmíněno v kapitole 6.3.2 a 6.3.4, je nutné mít na vozidlech rekuperaci s vysokou účinností a palivové články o vysokém výkonu, tak aby docházelo k dobíjení vyrovnávacího akumulátoru, který by neměl dosahovat mezních hodnot nabití (méně než 20 % celkové kapacity baterie). Tato podmínka je nutností především z hlediska provozního nasazení, kdy jednotka sice zvládne projet úsek jedním směrem, ale na zpáteční jízdu by musela vykonat prostoj na dobítí vyrovnávacího akumulátoru. Je nutné říci, že toto platí pouze pro sklonově náročné tratě, kdy je celková spotřeba daleko vyšší než na rovinných tratích či úsecích. Pro srovnání lze uvést příklad, kdy mezi 10. až 20. kilometrem tratě, kde je průměrný sklon 9,2 ‰ ve směru Opava východ, je v režimu rychlíkového vlaku měrná spotřebovaná energie 0,052 kWh/tkm a měrná rekuperovaná energie 0,005 kWh/tkm. Zatímco na rovinatém úseku s průměrným sklonem -1,36 ‰ mezi 106. až 116. kilometrem ve směru Opava východ, je v režimu rychlíkového vlaku měrná spotřebovaná energie 0,025 kWh/tkm a měrná rekuperovaná energie 0,001 kWh/tkm. V případě spotřebované energie je to dvakrát méně spotřebované energie na tunokilometr v rovinném úseku než ve stoupání. Celkovou náročnost jízdy vlaku do stoupání lze vyvodit i z grafů popisujících energetiku provozu (graf 8, 9, 11 a 12) lze vidět, že lokální minima těchto grafů jsou pro oba režimy stejné, ale celková energetická náročnost rychlíkového a osobního vlaku je jiná. Je to dáno tím, že ve zhruba 45. kilometru a 65. kilometru směr Opava východ dosahuje výškový profil tratě svého maxima (viz graf 5) a stoupání je zde nepřetržité.

Pokud bychom srovnávali osobní vlak a rychlíkový vlak, vychází průměrná měrná spotřeba osobního vlaku na 0,041 kWh/tkm a v případě rychlíkového vlaku na 0,033 kWh/tkm. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.3.4, je důležitým parametrem počet zastávek, jelikož při větším počtu zastávek je nutno se vícekrát rozjíždět a využívat maximální výkon vozidla. V případě osobního vlaku vychází průměrná vzdálenost zastávek na 4 km a u rychlíkového vlaku na 9 km.

Z hlediska energetiky provozu je také důležité vzít v úvahu spotřebu vodíku, v kapitole 2.4 a graf 1 je uvedena spotřeba kilogramu vodíku za hodinu v závislosti na výkonu palivového článku. Pokud uvažujeme referenční vozidlo v režimu osobního vlaku je spotřeba vodíku okolo 32 kilogramů, zatímco pro rychlíkový vlak je spotřeba na

29 kilogramech na celý úsek Olomouc hl. n. – Opava východ. Na dnešních jednotkách, například u iLintu (viz kapitola 4.1), je celkový objem nádrží 188 kg. Což by v tomto případě vystačilo v případě osobního vlaku na 680 km a u rychlíkové vlaku by byl dojezd 746 km. Tento objem nádrží je tedy vhodný pro úsek, který by byl tímto vozidlem obsluhován.

Dalším důležitým závěrem je otázka celkové ekonomičnosti provozního nasazení vodíkových jednotek. V ČR neexistuje v současné době žádné zařízení pro tankování vodíku do železničních vodíkových jednotek a bylo by tedy nutné zainvestovat do vodíkové infrastruktury nebo využívat mobilní tankovací stanice. Pokud ale má být vodíková technologie plně bezemisní, dávalo by smysl zainvestovat do vybudování infrastruktury pro výdej vodíku s výrobou pomocí elektrolýzy, která využívá elektřiny z obnovitelných zdrojů, přímo v místě výdeje. Žádné jiné řešení by totiž neumožnilo plně bezemisní provoz, jelikož bychom pro závoz vodíku využívali silniční dopravu.

Z této práce lze tedy vyvodit, že provozní nasazení vodíkových jednotek je možné, ale je důležité dbát na podmínky, které byly uvedeny výše, a to zejména na rekuperaci s vysokou účinností a dostatečný výkon palivových článků v kontextu plánovaného provozního nasazení. Dále je nutné zprovoznit infrastrukturu potřebnou pro provoz takových jednotek s ohledem na důvod používání vodíkové technologie, což bude ekonomicky náročné. Jednou z možností využití současné infrastruktury by mohla být technologie skladování pomocí LOHC (kap. 3.3.4), to je ale v současné době předmětem budoucnosti, jelikož o prokázání proveditelnosti použití této formy skladování se pokouší společnost Siemens Mobility a Helmholtzův institut Erlangen-Norimberk pro obnovitelné energie, které se dohodly na spolupráci při výzkumu použití LOHC v železniční dopravě. Je tedy otázkou času, zda tento směr je ten správný, anebo zda je to jen slepá ulička vývoje.

Bibliografie

- [1] Co je Zelená dohoda pro Evropu? [online]. Kurzy.cz, spol. s r.o., 2022 [cit. 2022-12-25]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/zpravy/688445-co-je-zelena-dohoda-pro-evropu/>
- [2] POHL, Jiří. Vozidla a infrastruktura pro bezemisní provoz na neelektrifikovaných tratích. In: *Sborník příspěvků XXV. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021, s. 257-276. ISBN 978-80-7560-377-7
- [3] A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations. *Railway Engineering Science* [online]. 2021, **29**(3), 212-232 [cit. 2022-12-24]. Dostupné z: doi: 10.1007/s40534-021-00256-9
- [4] PORŠ, Zdeněk. Palivové články. In: *ČEZ* [online]. Řež u Prahy: ÚJV Řež, a. s., 2002 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/eede/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [5] Types of fuel cells. *Department of Energy* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
- [6] HADRAVA, Jan a Roman VOKATÝ. Čištění vodíku pro použití v palivových člancích. *Paliva* [online]. 2014, **6**(2), 66-72 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: doi:10.35933/paliva.2014.02.06
- [7] Jaký je rozdíl mezi vodíkem a vodíkem pro palivové články?. *APT* [online]. Praha: APT s.r.o., 2021 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.apr.cz/q10>
- [8] *Kvalita vodíkového paliva - Specifikace produktu, ČSN ISO 14687*. 1. vydání. Praha: Česká agentura pro standartizaci, 2020.
- [9] FERRARA, Alessandro, Stefan JAKUBEK a Christoph HAMETNER. Energy management of heavy-duty fuel cell vehicles in real-world driving scenarios: Robust design of strategies to maximize the hydrogen economy and system

- lifetime. *Energy Conversion and Management* [online]. 2021, **232**, 5 [cit. 2023-05-02]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2020.113795
- [10] Vodík. [online]. [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>
- [11] The Hydrogen Issue. *ChemSusChem* [online]. 2011, **4**(1), 21-36 [cit. 2023-01-30]. ISSN 1864-5631. Dostupné z: doi: 10.1002/cssc.201000182
- [12] KOTLÍK, Bohumír. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro SŠ a nižší ročníky víceletých gymnázií*. 1. vydání. Havlíčkův Brod: Fragment, 2003. ISBN 80-720-0521-9.
- [13] *Handbook of hydrogen storage: New materials for future energy storage*. 1st ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. ISBN 978-3-527-32273-2.
- [14] Joule–Thomson effect. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Joule%E2%80%93Thomson_effect
- [15] Joulův-Thomsonův jev. [online]. Univerzita Karlova: Matematicko-fyzikální fakulta, [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/7_7
- [16] SOJKA, Jaroslav. *Odolnost ocelí vůči vodíkové křehkosti*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a materiálového inženýrství, 2007. ISBN 978-80-248-1648-7.
- [17] KREIBICH, Viktor. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-010-0750-2.
- [18] PFEIFER, Michael. An Introduction to Hydrogen Embrittlement. [online]. Industrial Metallurgists, LLC, 2021 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/an-introduction-to-hydrogen-embrittlement/2/2568>

- [19] HAIRY, Patrick. La fragilisation par l'hydrogène des métaux. *MetalBlog* [online]. MetalBlog, 2021 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://metalblog.ctif.com/2021/01/04/la-fragilisation-par-lhydrogene-des-metaux/>
- [20] KEHR, Alan. Identifying and Preventing Hydrogen Blistering and Embrittlement. [online]. Anti-Corrosion, LLC, 2017 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/hydrogen-blistering-and-hydrogen-embrittlement-causes-and-preventive-measures/2/1555>
- [21] JANOVEC, Jiří, Petr ZUNA a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2935-2.
- [22] DROBNÝ, Josef. Skladování vodíku. [online]. H2AC4Schools, 2019 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>
- [23] KIRCHER, Oliver. Validation of cryo-compressed hydrogen storage (Cch2) - A probabilistic approach. *Hydrogen tools* [online]. Germany: BMW Group, 2011 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2011/papers/258.pdf>
- [24] Liquid organic hydrogen carriers. *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_organic_hydrogen_carriers
- [25] LOHC technology: accelerating the deployment of hydrogen storage and fuel cell electric vehicles. *Umicore* [online]. Belgie: Umicore N.V. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.umicore.com/en/newsroom/lohc-technology/>
- [26] BUKVIČKA, Martin. *Osobní automobil s motorem na zkapalněný vodík*. Liberec, 2007. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci; Katedra vozidel a motorů.
- [27] Technicko-ekonomické posouzení implementace vodíkového pohonu v Ústeckém kraji. *Ústecký kraj* [online]. Řež: ÚJV Řež, a. s., 2020 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z:

<https://www.kr->

[ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1750654](https://www.kr-ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1750654)

- [28] KLING, Wolfgang. Mit Wasserstoffzügen das Klima retten?. *Eisenbahn Revue*. 2022, **2022**(7), 354.
- [29] GENOVESE, Mateo. Hydrogen refueling station: Overview of the technological status and research enhancement. *Journal of Energy Storage* [online]. 2023, **2023**(61), 1-22 [cit. 2023-02-27]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.est.2023.106758
- [30] KLEBSCH, Wolfgang a Nina GUCKES. Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen. *VDE* [online]. Frankfurt am Main: VDE, 2020 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.vde.com/resource/blob/1979350/a41e9c3559af76fee9c91befbc1e9216/studie-klimaneutrale-alternative-zu-dieseltriebzuegen-data.pdf>
- [31] Coradia iLint hydrogen trains have been put in commercial operation in Germany. [online]. ROLLINGSTOCK Agency, 2022 [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: <https://rollingstockworld.com/passenger-cars/coradia-ilint-hydrogen-trains-have-been-put-in-commercial-operation-in-germany/>
- [32] Fuel Cell Coradia iLint On Test. *Railvolution* [online]. Zlín: Railway Public s.r.o., 2017 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.railvolution.net/news/fuel-cell-coradia-ilint-on-test>
- [33] Palivočlánkové vlaky Alstom Coradia iLint dostanou trakční baterie Akasol. [online]. Ing. Jakub Slavík, MBA – Consulting Services, 2020 [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: https://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_technologie_106.php
- [34] Mireo Plus H Unveiled. *Railvolution* [online]. Zlín: Railway Public s.r.o, 2022 [cit. 2022-12-24]. Dostupné z: <https://www.railvolution.net/news/mireo-plus-h-unveiled>
- [35] How a hydrogen drive works – the innovative components of Mireo Plus H. *Siemens Mobility* [online]. Německo: Siemens [cit. 2022-12-24]. Dostupné z:

<https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/stories/hydrogen-drive-how-it-works.html>

- [36] InnoTrans 2022 (25). *Railvolution* [online]. Zlín: Railway Public s.r.o., 2022 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.railvolution.net/news/innotrans-2022-25>
- [37] Concept development and testing of the UK's first hydrogenhybrid train (HydroFLEX). *Railway Engineering Science* [online]. 2021, **29**(3), 248-257 [cit. 2022-12-24]. Dostupné z: doi: 10.1007/s40534-021-00256-9
- [38] HydroFLEX. *Porterbrook* [online]. Derby: Porterbrook [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.porterbrook.co.uk/innovation/hydroflex-cop>
- [39] HydroFLEX Hydrogen Train. *Railway Technology* [online]. New York: Railway Technology, 2019 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/projects/hydroflex-hydrogen-train/>
- [40] JR East, Hitachi and Toyota to Develop Hybrid (Fuel Cell) Railway Vehicles Powered by Hydrogen. *Toyota* [online]. East Japan Railway Company Hitachi, Ltd. Toyota Motor Corporation, 2020 [cit. 2022-12-24]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/33954855.html>
- [41] Toyota Announces Hydrogen Transport Partnership Projects to Develop Fuel Cell Trucks and Trains. *Toyota* [online]. Toyota (GB), 2020 [cit. 2022-12-24]. Dostupné z: <https://media.toyota.co.uk/toyota-announces-hydrogen-transport-partnership-projects-to-develop-fuel-cell-trucks-and-trains/>
- [42] PÖSEL, Miroslav. Stručná historie železniční dopravy na Opavsku a Nížkém Jeseníku. *Oživlý svět technických památek* [online]. Hradec nad Moravicí: Místní akční skupina Opavsko, 2012 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <http://www.technicke-pamatky.cz/sekce/48/historie-eleznic/>
- [43] *Portál provozování dráhy* [online]. Praha: Správa železnic [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/portal/viewarticle.aspx?oid=594598>

- [44] FIŠR, Zdeněk a Tomáš MICHÁLEK. PROGRAM RAILCALC 2.0, TECHNICKÁ A UŽIVATELSKÁ DOKUMENTACE. *Dopravní fakulta Jana Pernera* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: https://dfjp.upce.cz/sites/default/files/groups/www/st42417/railcalc-2-0_dokumentace.pdf
- [45] Smlouva o dodávkách trakční energie. *Správa železnic* [online]. Praha: Správa železnic, 2021 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/50172200/Smlouva+dod%C3%A1vky+TEE+2021/772d1ae3-99a8-4ff1-89c4-02f87eea7ce2>