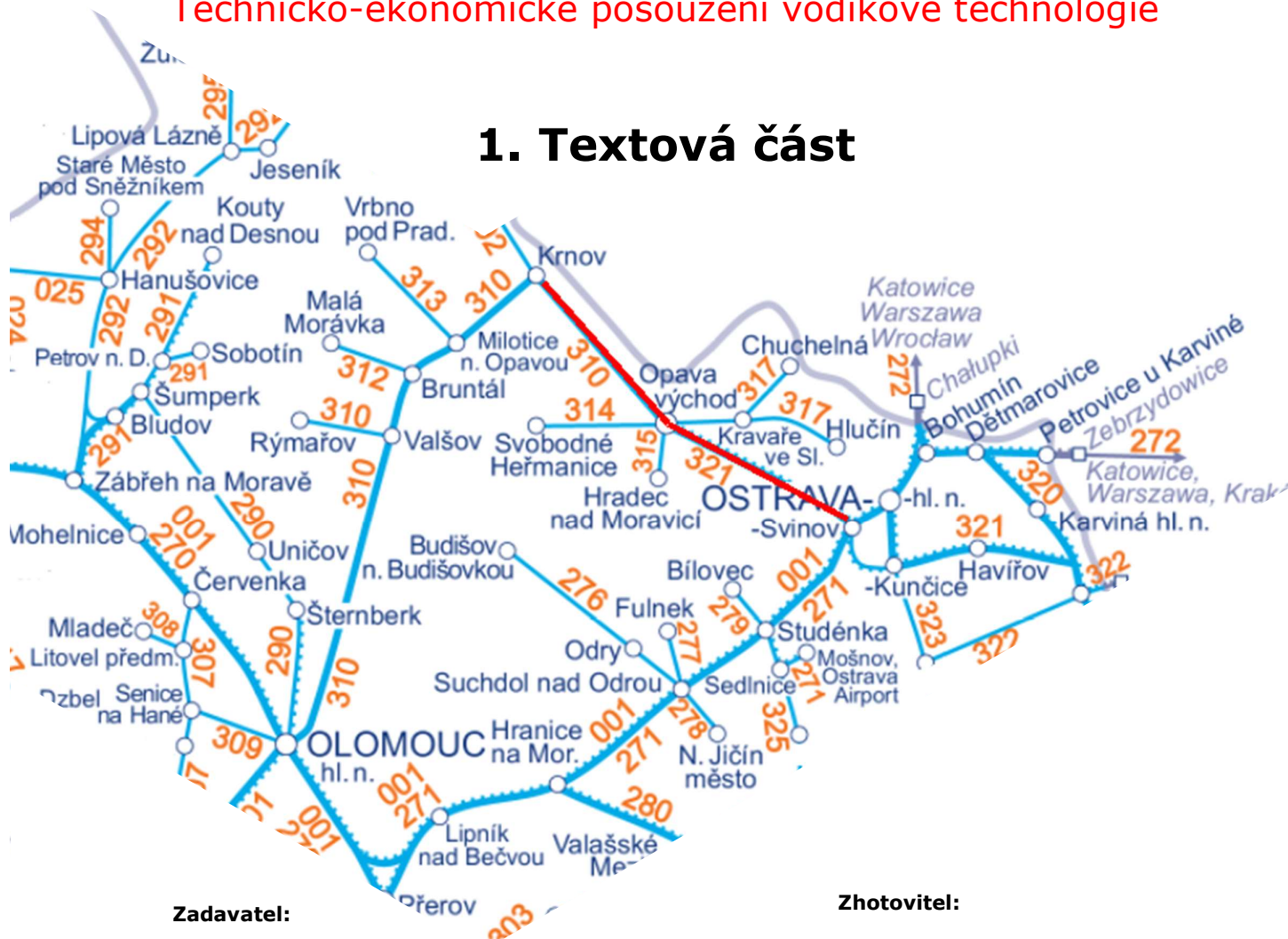


Studie proveditelnosti trati

Ostrava-Svinov – Opava východ – Krnov

Technicko-ekonomické posouzení vodíkové technologie

1. Textová část



Zadavatel:



Správa železnic, státní organizace
Dlážděná 1003/7, 110 00 Praha 1
www.spravazeleznic.cz

Zhotovitel:



AFRY CZ s.r.o.
Magistrů 1275/13, 140 00 Praha 4
www.afry.cz

Zhotovitel:
AFRY CZ s.r.o.

Datum:
09/2023

Zastoupený:
Ing. Petr Košan

Číslo zakázky:
2022/0016

Autorský kolektiv:
Ing. Jaromír Tvrdík
Ing. Martin Šustr
Ing. Petr Pavlíček
Ing. Radek Kolář

Kontrola:
Ing. Martin Vachtl

Objednatel:
Správa železnic, státní organizace

Studie proveditelnosti trati Ostrava-Svinov – Opava východ – Krnov

Technicko-ekonomické posouzení vodíkové technologie

1. Textová část

09. 2023

OBSAH

0	MANAŽERSKÉ SHRNUÍ	6
1	IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE	10
2	ANALYTICKÁ ČÁST	11
2.1	VÝROBA VODÍKU	11
2.1.1	Reforming uhlovodíků	11
2.1.2	Elektrolýza	12
2.1.3	Vedlejší produkt	12
2.1.4	Čistota vodíku	12
2.2	DISTRIBUCE VODÍKU	13
2.2.1	Externí zásobování	13
2.2.2	Výroba vodíku v místě distribuce	13
2.2.3	Tankování vodíku	14
2.3	VOZIDLA	14
2.3.1	Železniční	14
2.3.2	Silniční	15
2.4	BEZPEČNOST	19
2.4.1	Identifikovaná nebezpečí pro vodíkové plnicí stanice	19
2.4.2	Kompresorová jednotka	19
2.4.3	Únik vodíku z vysokotlakého zdroje	19
2.4.4	Únik vodíku z vysokotlakého zdroje v uzavřených prostorech	19
2.4.5	Rizika během plnění vozidla	20
2.4.6	Rizika úmyslného poškození, nebo vandalismu	20
2.5	LEGISLATIVA	20
2.6	ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	21
2.7	ÚČINNOST	22
2.8	MOŽNOSTI FINANCOVÁNÍ	23
3	NÁVRHOVÁ ČÁST	24
3.1	DOPRAVNÍ ŘEŠENÍ	24
3.1.1	Železniční doprava	24
3.1.2	Silniční doprava	28
3.2	TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	32
3.2.1	Varianta 1	32
3.2.2	Varianta 2	33
3.2.3	Varianta 3	33
3.2.4	Varianta 4	33
3.3	PROVOZNÍ A INVESTIČNÍ NÁKLADY	34
3.3.1	Investiční náklady	34
3.3.2	Provozní náklady	34
3.3.3	Cena vodíku	34
3.3.4	Cena nafty	35
4	EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	36
4.1	PROBLEMATIKA VSTUPNÍCH PARAMETRŮ A METODOLOGIE HODNOCENÍ	36
4.2	INVESTIČNÍ NÁKLADY	37

4.3	PROVOZNÍ NÁKLADY INFRASTRUKTURY	37
4.4	PROVOZNÍ NÁKLADY VOZIDEL	37
4.5	EXTERNALITY	38
4.6	VÝSLEDKY EKONOMICKÉHO HODNOCENÍ	38
5	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ	40
5.1	SROVNÁVACÍ TABULKA	40
5.2	ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ	41
6	P Ř Í L O H Y	43
PŘÍLOHA 1 – NÁVRHOVÉ OBĚHY ŽELEZNIČNÍCH JEDNOTEK NA LINKÁCH S15, S17, S19 A R27		44
PŘÍLOHA 2 - CBA		46
PŘÍLOHA 3 – PN VOZIDEL		47
PŘÍLOHA 4 – EH PODLE METODIKY VERZE 1.10		48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma železničního provozu v okolí Krnova s důrazem na alternativní pohon	25
Obr. 2: Schéma sítě veřejné autobusové dopravy v okolí Krnova	28
Obr. 3: Železniční síť na severovýchodě republiky	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Požadavky na kvalitu vodíku pro použití v palivových článcích dle ČSN 14687	13
Tab. 2: Srovnání uhlíkové stopy	21
Tab. 3: Energetický mix ČR v r. 2021	22
Tab. 4: Potřebné počty vodíkových železničních jednotek	24
Tab. 5: Soupravové jízdy z/do ŽST Krnov	26
Tab. 6: Denní výkony vodíkových náležitostí	26
Tab. 7: Investiční náklady	37
Tab. 8: Výsledky ekonomického hodnocení	39

SEZNAM ZKRATEK

BRT	vysokorychlostní velkokapacitní autobusový systém (Bus-Rapid Transit)
BEMU	bateriová jednotka (Battery electric multiple unit)
CIN	celkové investiční náklady
CNG	stlačený zemní plyn (Compressed natural gas)
CÚ	cenová úroveň
ČR	Česká republika
DMU	jednotka na naftový pohon (Diesel multiple unit)
EMU	elektrická jednotka (Electric multiple unit)
ES	Evropské společenství
ETCS	zabezpečovací systém (European Train Control System)
EU	Evropská unie
FCMU	jednotka na palivové vodíkové články (Fuel cell multiple unit)
FVE	fotovoltaika, fotovoltaická elektrárna
GŘ	generální ředitel, generální ředitelství
HMU	vodíková jednotka (Hydrogen multiple unit)
HYBARI	vodíková jednotka FV-E991 (Hydrogen hybrid advanced rail vehicle for innovation)
i-OZE	intermitentní obnovitelné zdroje energie (FVE a VTE)
JE	jaderná energie, jaderná elektrárna
KODIS	Koordinátor ODIS, s.r.o.
MHD	městská hromadná doprava
MSK	Moravskoslezský kraj
ODIS	integrovaný dopravní systém Moravskoslezského kraje
OZE	obnovitelný zdroj energie
PD	projektová dokumentace
PID	Pražská integrovaná doprava
s-OZE	stabilní obnovitelné zdroje energie (biomasa a hydroelektrárny)
SP	studie proveditelnosti
SŽ	Správa železnic, státní organizace
SŽDC	Správa železnic, státní organizace
TEP	technicko-ekonomické posouzení
USA	Spojené státy severoamerické (United States of America)
ÚJV Řež	Ústav jaderného výzkumu Řež, akciová společnost
VTE	větrná elektrárna
VNVK	veřejná nakládka a vykládka
ŽST	železniční stanice

0 MANAŽERSKÉ SHRUTÍ

Předmět studie

Studie „Technicko-ekonomické posouzení vodíkové technologie“, je zadána v technické, provozní i územní souvislosti se studií proveditelnosti modernizace tratě Ostrava-Svinov – Opava východ – Krnov. Tato část se zabývá ekonomickým posouzením provozu vodíkových vlaků a autobusů na vybraných linkách regionální a meziregionální dopravy v Moravskoslezském kraji.

V rámci dopravního řešení jsou vytipovány železniční a autobusové linky, na kterých by bylo možné vyžítí vodíkového pohonu.

V technickém řešení jsou obecně popsány možnosti umístění vodíkové plnicí stanice. S ohledem na trasování vybraných linek je nejvhodnější umístění plnicí stanice v ŽST Krnov. Tato studie přímo neřeší, kdo by byl investorem plnicí stanice (Správa železnic, Moravskoslezský kraj, či jiný subjekt). Bude řešeno v navazujících stupních přípravy.

Ekonomické hodnocení je zpracováno dle Rezortní metodiky platné k 08/2023 metodou CBA (CBA tabulky verze 1.11) v CÚ roku 2023. V ekonomickém hodnocení se porovnává varianta S projektem (vodíkové vlaky) s variantou Bez projektu (diesellové vlaky) na stejné infrastruktuře. Rozdíl mezi oběma variantami je tvořen pouze vozovým parkem a infrastrukturou potřebnou k zajištění provozuschopnosti vodíkových vlaků.

Železniční doprava

V rámci návrhové části byly ve spolupráci s Moravskoslezským krajem vytipovány železniční linky, na kterých by bylo možné vyžítí vodíkového pohonu:

- S 15 Moravský Beroun – Krnov – Jeseník
- S 17 Milotice nad Opavou – Vrbno pod Pradědem
- S 19 Valšov – Rýmařov
- R 27 Olomouc – Krnov – Opava východ – Ostrava-Svinov – Ostrava střed

Na ostatních vlacích v širším okolí Krnova je v maximální možné míře uvažováno s užitím elektrických (S1, S9) i akumulátorových jednotek (R61, S11, S12, S13). Motorové diesellové jednotky najdou využití pouze na podružných lokálních výkonech a turistických tratích.

Pro uvedený rozsah vybraných linek byly zpracovány oběhy náležitostí a zpracován jízdní řád. Výsledkem je, že navržený systém vyžaduje pořízení 7 vodíkových jednotek s kapacitou 70 míst (dále jen HMU 70) a 10 vodíkovo-elektrických jednotek, s možností napájení z troleje, s kapacitou 120 míst (HEMU 120). Ve variantě bez projektu je na lince R27 uvažováno s provozem diesel-elektrických jednotek. Návrh vychází ze Studie proveditelnosti trati Ostrava-Svinov – Opava východ – Krnov.

Uvedený rozsah vlakových linek představuje celkový výkon 6 664 vlkm/24h v pracovní den vlaků obsazených cestujícími. Vzhledem k tomu, že některé náležitosti nebudou svůj denní proběh začínat / končit v ŽST Krnov, byl dopočten ještě nutný rozsah soupravných jízd těchto vlaků do ŽST Krnov, který činí 160 vlkm/24h. Denní proběh jednotlivých vozidel nepřesahuje technicky běžně dostupný dojezd vodíkových vozidel na jedno naplnění. Zároveň ale využití jednotlivých vozidel v rámci své linky prakticky neumožňuje jeho plnění 1x za dva dny. Zbrojení vlaků a provozní ošetření bude probíhat převážně během nočních hodin.

Uvedený dopravní výkon bude potřebovat 2219 kg vodíku, který bude muset být vydán převážně v průběhu nočních hodin, přibližně tedy 20:00 – 06:00. To představuje maximální hodinovou kapacitu 192 kg vodíku/h. Další vyšší kapacita vydaného vodíku bude vyžadována, bude-li stanice využita i k plnění autobusů, čemuž se studie taktéž věnuje. Přesnější hodnota špičkové kapacity může být určena až po zpracování podrobné staniční dopravní technologie ŽST Krnov, v rámci které

bude muset být vyřešena otázka manipulačních jízd vozidel k/od plnicí stanice, tomu odpovídající uspořádání obou zhlaví stanice, potřebné odstavné kolejové kapacity, související provozní ošetření souprav, počet plnicích stojanů, vlastní technologické postupy plnění a mnoho dalších technicko-provozních detailů, které jsou pro železniční dopravu specifické a v rámci dokumentace nebyly řešeny.

Silniční doprava

Převažujícím zástupcem silniční automobilové dopravy využívající vodíkovou technologii je veřejná autobusová doprava. Individuální automobilová doprava bude pravděpodobně plně orientována na elektroauta. Pro využití nákladní kamionové silniční dopravy nejsou v současné době dostupné hodnověrné podklady. Z toho důvodu se s ní v předloženém materiálu neuvažuje.

Pro určení podílu silniční dopravy na čerpání vodíku se vycházelo z linkového vedení stávající veřejné autobusové dopravy. Případná změna v rozsahu této dopravy vlivem zavedení výše uvedeného linkového vedení vlakové dopravy není uvažována. V ovlivněném prostoru jsou vymezeny čtyři různé skupiny autobusových linek hromadné dopravy, provozované na objednávku z veřejných zdrojů:

- Skupina regionálních linek ODIS Krnovsko
- Skupina regionálních linek ODIS Bruntálsko
- Skupina MHD Krnov
- Skupina MHD Bruntál

Ze sledovaných linek byly vybrány linky vhodné k plnění v Krnově. Jedná se o linky, které v rámci svého oběhu kolem plnicí stanice projíždí, nebo nocují v garážích dopravce v Krnově. Jedná se celkem o 31 vozidel, jejichž denní proběh během pracovního dne je 8050 km. Pro uvedený dopravní výkon bude potřeba přibližně 1000 kg vodíku (dle orientačního výpočtu 832 kg), který bude muset být vydán převážně v průběhu večerních až nočních hodin, uvažujeme tedy 18:00 – 22:00. To představuje průměrnou hodinovou kapacitu až 208 kg vodíku/h.

Předpokládá se, že k plnění vozidla dojde v rámci ukončení jeho denního proběhu při cestě do garáží. Řidič tedy bude vozidlo k plnění přistavovat, bude mu účasten, případně ho bude provádět a následně plnicí stanicí opustí.

Kapitola silniční dopravy je zpracována pouze pro doložení šíře uplatnění záměru. Ve výpočtu EH se s vodíkovými autobusy nepočítá.

Plnicí stanice

Pro návrh plnicí stanice bylo uvažováno pouze s plněním vodíkových vlaků. Tzn. denní potřeba vodíku 2219 kg a maximální hodinová kapacita 192 kg vodíku/h. Pokud by bylo uvažováno i s autobusovou dopravou, musela by být celková denní kapacita plnicí stanice přibližně 3051 kg vodíku/24h, při špičkové výdejní kapacitě přibližně 400 kg vodíku/h.

Součástí plnicí stanice bude muset být i potřebná zásobní kapacita vodíku. Zatímco odběr vodíku bude pravidelný, elektřina z OZE nemusí být dostupná každý den. Pokud by k výrobě vodíku mělo dojít elektrickou energií ze sítě, nebude možné zajistit efekty ze snížení uhlíkové stopy takto realizované dopravy. Problém už se tak přenáší na dodavatele elektrické energie, protože zelený vodík lze vyrobit pouze elektřinou z OZE.

V dokumentaci bylo vytipováno umístění vodíkové plnicí stanice pouze v Krnově. Obecně jsou uvedeny i další možné lokality (místa) umístění.

Ekonomické hodnocení

Ekonomické hodnocení je zpracováno dle Rezortní metodiky platné k 08/2023 metodou CBA (CBA tabulky verze 1.11) v CÚ roku 2023.

Základní schéma hodnocení je nastaveno tak, že se porovná varianta S projektem (vodíkové vlaky) s variantou Bez projektu (dieselové vlaky) na stejné infrastruktuře, rozdíl mezi oběma variantami

tak je pouze vozový park a infrastruktura potřebná k zajištění provozuschopnosti vodíkových vlaků. Z toho tedy vyplývá, že se nejedná o komprehensivní zhodnocení, které by porovnávalo všechny možné varianty provozu, tedy neuvažuje možnosti elektrizace, provoz bateriových jednotek, atd. Pouze analyzuje, jestli případné nasazení vodíkových jednotek může za určitých podmínek přinést dostatečné socioekonomické úspory oproti provozu vlaků dieselových. Z toho také vyplývá, že nijak neovlivňuje záměr samotné studie proveditelnosti, která primárně řeší elektrizaci předmětných úseků ve variantách 3 a 4.

Ekonomické hodnocení proti sobě staví investiční a provozní náklady na infrastrukturu, kterou by bylo nutné vybudovat, aby mohly být provozovány vodíkové jednotky, konkrétně tedy na plnicí stanici v Krnově, dále provozní náklady vlaků (kde se promítají pořizovací ceny vodíkových a dieselových jednotek skrze cenu za vlakohodinu a cena vodíku skrze spotřebovanou trakční energii za vlakokilometr) a externality (emise, hluk).

Ekonomické hodnocení je zpracováno pouze pro vlakovou část této studie z důvodu jednodušší interpretovatelnosti výsledků, a také z důvodu hlavního cíle, které si ekonomické hodnocení klade, tedy jestli existují takové okrajové podmínky, za kterých by investice do vodíkové technologie oproti dieselové vozbě mohla dávat smysl.

Shrnutí výsledků

Výsledek ekonomické analýzy metodou CBA je následující:

ENPV = - 75 086 213 Kč, ERR = 2,55%, při ceně 12 €/kg H₂. Za celé hodnotící období činí rozdíl v provozních nákladech infrastruktury přibližně -553 mil. Kč, u provozních nákladů vozidel přibližně -7 909 mil. Kč a u externalit 9 114 mil. Kč. U externalit tvoří výrazně dominantní položku úspory plynoucí z nižší produkce CO₂.

Následující tabulka ukazuje výsledky ekonomického hodnocení, pokud by došlo ke změně vstupních parametrů níže uvedených.

Parametr	Cena za 1 kg vodíku včetně distribuce [EUR]				
	11	11,5	12	12,5	13
ERR [%]	4,98%	3,75%	2,55%	1,38%	0,22%
ENPV [Kč]	324 450 835	124 682 311	- 75 086 213	- 274 854 737	- 474 623 260
Pořizovací náklady vodíkových vlaků	-10%	-5%	default	5%	10%
ERR [%]	5,93%	4,20%	2,55%	0,95%	-0,63%
ENPV [Kč]	472 299 830	198 606 809	- 75 086 213	- 348 779 234	- 622 472 256
Emise CO₂ z 1 kg vodíku [g]	20	30	default	50	60
ERR [%]	2,59%	2,57%	2,55%	2,54%	2,52%
ENPV [Kč]	- 68 715 311	- 71 900 762	- 75 086 213	- 78 271 664	- 81 457 115
Cena za 1l nafty včetně distribuce [Kč]	22	23	default	25	26
ERR [%]	1,59%	2,06%	2,55%	3,02%	3,50%
ENPV [Kč]	- 240 061 218	- 159 191 117	- 75 086 213	2 549 084	83 419 184

Výsledky ekonomického hodnocení

Závěrečné vyhodnocení

V rámci studie bylo zpracováno ekonomické hodnocení metodou CBA dle Rezortní metodiky SFDI. Metodologie hodnocení vodíku není ještě pevně uchopena, což platí i pro samotnou Rezortní metodiku, která nepočítá s provozem vodíkových jednotek a nijak tuto problematiku zatím neupravuje. Základní schéma hodnocení je nastaveno tak, že se porovnává varianta S projektem (vodíkové vlaky) s variantou Bez projektu (dieselové vlaky) na stejné infrastruktuře, rozdíl mezi oběma variantami tak je tvořen pouze vozovým parkem a infrastrukturou potřebnou k zajištění provozuschopnosti vodíkových vlaků. Z toho tedy vyplývá, že se nejedná o komprehensivní zhodnocení, které by porovnávalo všechny možné varianty provozu, tedy neuvažuje možnosti elektrizace, provoz bateriových jednotek, atd. Pouze analyzuje, jestli případné nasazení vodíkových jednotek může za určitých podmínek přinést dostatečné socioekonomické úspory oproti provozu vlaků dieselových. Také se nezabývá dostupností vodíku. Okolo vodíkové technologie je stále spousta neznámých, které je těžké definovat a tato problematika dalece přesahuje rámec této studie. K výsledkům ekonomického hodnocení je tak nutné přistupovat s rezervou a jistou obezřetností. Výsledky ekonomického hodnocení jsou v závislosti na vstupních veličinách velmi volatilní, viz citlivostní analýza a jelikož některé vstupy podléhají značné nejistotě, je nutné brát v při interpretaci výsledků tento fakt v potaz. I když tedy ekonomické hodnocení dosahuje ekonomické efektivity při ceně 11,8 euro za kg vodíku, je tato efektivita velmi nestálá. Za již poměrně robustní výsledky lze považovat ty, které získáváme s tím, jak se cena vodíku včetně jeho distribuce dostává pod hranici 11 EUR/KG. Také je nutné dodat, že tyto výsledky platí při diskontní sazbě ve výši třech procent. Pokud bychom uvažili diskontní sazbu dle původní verze Rezortní metodiky ve výši 5%, robustních výsledku ekonomického hodnocení by pak bylo dosaženo s tím, jak by se cena blížila k 10EUR/kg. Nicméně výsledky ukazují na to, že pokud by se cena zeleného vodíku včetně jeho distribuce blížila k 11 EUR/kg, aplikace vodíkové technologie by čistě oproti dieselové trakci mohla z celospolečenského pohledu dávat smysl.

1 IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Objednatel	Správa železnic, státní organizace
Korespondenční adresa:	Správa železnic, státní organizace Dlážděná 1003/7 110 00 Praha 1
IČ:	70994234
DIČ:	CZ070994234
Zastoupena:	Ing. Mojmír Nejezchleb, náměstek GŘ pro modernizaci dráhy
Kontaktní osoba:	Ing. Pavel Kracík

Zhotovitel	AFRY CZ s. r. o.
Korespondenční adresa:	AFRY CZ s. r. o. Magistrů 1275/13 140 00 Praha 4
IČ:	45306605
DIČ:	CZ45306605
Zastoupena:	Ing. Petr Košan, jednatel společnosti
Hlavní zpracovatelé:	Ing. Jaromír Tvrdlík Ing. Martin Šustr Ing. Petr Pavlíček Ing. Martin Vachtl Ing. Radek Kolář

2 ANALYTICKÁ ČÁST

Tato TES „**Technicko-ekonomické posouzení vodíkové technologie**“, je zadána v technické, provozní i územní souvislosti s SP modernizace tratě Ostrava-Svinov – Opava východ – Krnov. Předmětem prací je vyhotovení Technicko-ekonomického posouzení v rozsahu:

- Možnostem využití vodíkového pohonu v souvislosti se záměry Moravskoslezského kraje a zpracovávanou SP;
- Prověření dopravních možností – železniční doprava;
- Prověření dopravních možností – autobusová doprava;
- Posouzení umístění vodíkových plnicích stanic a návazné úpravy infrastruktury;
- Rámcové ekonomické hodnocení provozu v dieselové a vodíkové trakci na dotčených linkách.

Zavedení vodíkové trakce v železniční dopravě bude mapováno zejména z hlediska dopravně technologického. (oběhy souprav, nutné soupravné jízdy) Jedná se především o relace:

- R27 Olomouc – Krnov – Ostrava;
- Os/Sp Krnov – Mikulovice (– Jeseník);
- Os/Sp Krnov – Opava (– Ostrava);
- Os Krnov – Bruntál – Moravský Beroun;
- Os Krnov – Valšov – Rýmařov;
- Případně dalších regionálních linek.

Technicky i časově související výhledové záměry na související dopravní infrastrukturu se předpokládají shodné, jako v SP. Jedná se o:

- Silniční stavby dle ZÚR
- RS1 Praha – Přerov – Ostrava
- Změna trakce z DC 3 kV na AC 25 kV, 50 Hz
- Implementace ETCS
- Rekonstrukce výpravní budovy ŽST Opava-Komárov
- Rekonstrukce železničního uzlu Ostrava

V analytické části jsou uvedeny obecné informace k vodíkové technologii – výroba vodíku, distribuce, příklady železničních vozidel a autobusů, legislativa atd. V ČR je prozatím v provozu pouze jediná veřejná plnicí stanice na vodík, umístěná v Praze Barrandově. Do dvou let se ale předpokládá dosažení počtu osmi veřejných plnicích stanic. V Německu je již 90 čerpacích stanic na vodík.

2.1 Výroba vodíku

Možnosti výroby vodíku:

- Velkokapacitní průmyslová výroba vodíku se dnes nejčastěji provádí katalytickým nebo parním reformingem zemního plynu a jiných lehkých uhlovodíků, parciální oxidací těžkých zbytků po destilaci ropy nebo konverzí vodního plynu ze zplyňování uhlí, jako součást rafinérií, nebo chemických výrobních komplexů. Do plnicí stanice, nebo k zákazníkovi se dopravuje buďto v tlakových lahvích silničními kamiony, nebo potrubím (do vzdálenosti cca 5 km).
- V místě plnicí stanice za využití elektrolýzy z demineralizované vody.
- Jako vedlejší produkt z chemického průmyslu. Do plnicí stanice se opět dopravuje.

2.1.1 Reforming uhlovodíků

Nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku, je zpracování uhlovodíků (zemní plyn, ropa, uhlí) parním reformingem. Výhodou této metody je nízká cena vodíku. Naopak nevýhodami procesu je produkce

velkého množství CO₂ a nutnosti náročného čištění vodíku před použitím ve vozidle s palivovými články. CO₂ se buď vypouští do ovzduší (šedý vodík), nebo chemicky váže (modrý vodík).

2.1.2 Elektrolýza

Elektrická energie je v procesu elektrolýzy vody „vložená“ do vodíku a zpět ji lze získat pomocí chemické reakce s kyslíkem v palivovém článku. V současnosti připadá v úvahu elektrolýza alkalická, nebo s využitím proton-výměnné membrány. Vodík je následně v závislosti na použitém elektrolyzátoru sušen. Vodík vyrobený elektrolýzou vody je oproti výrobě parním reformingem zemního plynu čistý a nemusí se čistit.

Z aktuálního návrhu legislativy, vyplývá, že obnovitelný vodík bude možné vyrobit pouze z elektřiny z nových dotovaných OZE zdrojů mimo biomasu, tj. de facto pouze FVE + VTE. Biomasa a Hydro jsou považovány za stabilní, s-OZE a FVE + VTE jsou považovány za intermitentní, i-OZE. Výjimky budou platit pouze pro elektrolyzéry uvedené do provozu do 2028.

2.1.3 Vedlejší produkt

Vodík vznikající jako vedlejší produkt průmyslové výroby může být levným a environmentálně přijatelným zdrojem energie. Problematická je ale čistota vodíku. Některé nečistoty, např. siřné sloučeniny mohou nenávratně poškodit palivový článek.

2.1.4 Čistota vodíku

Plynný vodík získaný vhodným výrobním procesem je ze své podstaty vždy směsí vodíku a dalších doprovodných látek, které se do procesu jeho výroby zapojily nebo během ní vznikly. Další nečistoty mohou vodík znečistit přímo v plnicí stanici, neboť se tyto stanice mohou znečistit i během jejich výstavby nebo samotného provozu. Kvalitu vodíku jako paliva je pak nutné posuzovat jednak dle podílu čistého vodíku v celém jeho objemu a dále pak dle míry výskytu konkrétních látek, které mají silně nepříznivý vliv na funkci a životnost samotného palivového článku.

Míra čistoty vodíku se značí tzv. stupněm čistoty, který vyjadřuje celkový podíl jednotlivých reziduí na výsledném složení vodíku. Číselné označení stupně odpovídá podílu čistého vodíku vyjádřeného v procentech, tedy např. vodíkové palivo označené stupněm 3.0 obsahuje alespoň 99,9 % čistého vodíku, zatímco jiné palivo, označené stupněm 5.0, bude čistého vodíku obsahovat alespoň 99,999 %.

Odlišné požadavky jsou pak kladeny na maximální možné koncentrace jednotlivých škodlivých reziduí, např. oxidů uhlíku, amoniaku, helia nebo různých kyselin.

Jednoznačná kritéria na čistotu a kvalitu vodíku pro použití v dopravě jako paliva pak určuje norma ČSN ISO 14687, která na něj klade následující nároky:

Celkový podíl vodíku a kontaminujících plynů	
Minimální obsah čistého vodíku	99,97%
Celkové množství plynů mimo vodík	300 $\mu\text{mol/mol}$
Maximální koncentrace jednotlivých kontaminujících plynů	
Voda / H_2O	5 $\mu\text{mol/mol}$
Uhlohydráty celkem / CH_x	2 $\mu\text{mol/mol}$
Kyslík / O_2	5 $\mu\text{mol/mol}$
Helium / He	300 $\mu\text{mol/mol}$
Dusík a argon celkem / $\text{N}_2 + \text{Ar}$	100 $\mu\text{mol/mol}$
Oxid uhličitý / CO_2	2 $\mu\text{mol/mol}$
Oxid uhelnatý / CO	0,2 $\mu\text{mol/mol}$
Sírné sloučeniny celkem / H_2S	0,004 $\mu\text{mol/mol}$
Formaldehyd / HCHO	0,01 $\mu\text{mol/mol}$
Kyselina mravenčí / HCOOH	0,2 $\mu\text{mol/mol}$
Amoniak / NH_3	0,1 $\mu\text{mol/mol}$
Halogenidy celkem	0,05 $\mu\text{mol/mol}$
Maximální koncentrace pevných částic	1 mg / kg

Tab. 1: Požadavky na kvalitu vodíku pro použití v palivových člancích dle ČSN 14687

2.2 Distribuce vodíku

Od výrobce do plnicí stanice se vodík dostává:

2.2.1 Externí zásobování

Zajištění externího zásobování vodíkem dodavatelem technických plynů je z hlediska investičních nákladů nejlevnější varianta. Z hlediska uhlíkové stopy je ale takový vodík zatížen externalitami ze silniční přepravy. Plnicí stanice je ve většině případů vybavena nízkotlakým zásobníkem stlačeného vodíku, který je doplňován z tlakových nádob na silničním návěsu. Vzhledem na transportované množství vodíku je tento přístup vhodný při zásobování plnicích stanic s denní spotřebou vodíku nepřevyšující kapacitu vodíku uloženého na silničním návěsu. Transportování vodíku vyžaduje ještě další technologické zařízení pro přečerpávání do úložiště distribuční stanice. Bude řešeno v dalším stupni dokumentace.

Výstavba potrubí. Investičně i procedurálně výrazně složitější řešení. Může být ale výhodné v případě, že elektrolyzátor bude využívat nízkou cenu elektrické energie, např. v areálu elektráren (OZE - obnovitelné zdroje) a bude poskytovat flexibilitu distribuční síti (vyrovnávání výkonových špiček OZE).

2.2.2 Výroba vodíku v místě distribuce

Tento způsob přichází v úvahu prakticky pouze v případě výroby vodíku elektrolýzou vody. Vodík je následně stlačován a krátkodobě uložen do zásobníků, z kterých je distribuován ke koncovému uživateli.

2.2.3 Tankování vodíku

Pro koncového uživatele má vodíková plnicí stanice podobnou dávkovací pistoli jako je u čerpací stanice zemního plynu. Obvykle se vodík doplňuje při tlaku 35 MPa a teplotě 15°C. Plnicí stanice tedy musí obsahovat, kompresory, skladovací nádrže pro vodík v plynné nebo kapalně formě, chladicí jednotku a diagnostiku s bezpečnostní prvky. Výdejní zařízení se instalují venku pod přístřeškem z nehořlavých materiálů. Výdejní stojan musí bezchybně pracovat při teplotách od -30°C do +50°C.

2.3 Vozidla

2.3.1 Železniční

Alstom Coradia iLint

Je nízkopodlažní osobní jednotka, která se skládá ze 2 vozů a je založená na platformě dieselové jednotky Coradia Lint 54, dlouhé 54 metrů. Jedná se o první sériově vyráběnou jednotku, která je poháněna čistě vodíkovými palivovými články. 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 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, 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. 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. Vlak dokáže pojmout celkově 300 cestujících. Je schopen dosáhnout dojezdu mezi 600 až 800 km. Maximální rychlost jednotky je 140 km/h.

Výrobce Alstom deklaruje, že je schopen vyrábět jednotku FCMU 70 s rychlostí 120 km/h, která bude vycházet z dvouvozové jednotky Alstom Coradia iLint.¹

Provoz vodíkových jednotek Alstom Coradia iLint v SRN 2022-2023

Vodíkové jednotky Alstom Coradia iLint začínají od podzimu 2022 jezdit na čtyřech regionálních trasách v okolí Frankfurtu nad Mohanem, z nichž lze jmenovat jako nejvýznamnější trasy Frankfurt-Höchst – Bad Soden, Frankfurt – Koenigstein a Bad Homburg – Friedberg. Již během nadcházejícího zimního provozu se ale provozovatel potýkal s nízkou spolehlivostí těchto jednotek, zapříčiněnou pravděpodobně jednak jejich nedostatečným množstvím (objednáno bylo 27 jednotek, k termínu plánovaného plnohodnotného spuštění provozu v prosinci 2022 ale byly k dispozici jen 2 a do jara 2023 se jich podařilo dodat a zprovoznit pouze 15) a problémy s plněním vodíkem při nízkých teplotách (pod 10°C). Nepříznivá situace dokonce opakovaně vedla k úplnému zastavení železničního provozu na několik týdnů a jejich náhradu autobusy. Na základě těchto zkušeností se ve spojení s výrazně nákladnějším provozem oproti elektrickým alternativám místní dopravce rozhodl od provozování vodíkových vlaků v průběhu letních měsíců roku 2023 ustoupit.

Siemens Mireo Plus H

Jednotka vznikla odvozením od standardní elektrické jednotky, jejím základem je platforma Mireo. Mireo Plus H existuje ve dvou nebo tříčlánkové verzi. Celkový výkon je 1700 kW pro oba typy jednotek. 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 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

¹ https://zeleznicepardubice.cz/wp-content/uploads/2023/04/02_03_Kurucz.pdf

vozidla se nachází trakční pohon a lithium-iontové baterie. Do provozu by se měla jednotka dostat v roce 2024.

Stadler 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, která má masivnější přední nárazové zóny. 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, dlouhý 43 metrů, má shodně dva osobní vozy, na jejichž představicích jsou umístěné 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, každý o výkonu 100 kW. Zásobníky vodíku jsou dimenzovány na 35 MPa a jejich naplnění trvá přibližně 30 minut. Na střeše obou vozů jsou umístěny trakční baterie typu lithium-titanite. Jednotka má trakční výkon včetně výkonu baterie 700 kW. Vlak pojme 116 sedících a 120 stojících cestujících. Je schopen dosáhnout dojezdu 480 až 600 km. [3]

HydroFLEX

Projekt Centra pro výzkum a vzdělávání na železnici Univerzity v Birminghamu (BCRRE) a britského dopravce Porterbrook. Jedná se o první osobní vlak ve Spojeném království provozovaný na vodík. Jednotka může fungovat na elektrický, bateriový nebo vodíkový pohon, což z něj dělá trimodální vlak. Byl vyvinut namontováním vodíkové technologie do stávající vlakové soupravy třídy 319, což je dvacetimetrová dvoučlánková jednotka. Jedná se o 4 vozovou jednotku, která má maximální rychlost 160 km/h. Jednotka má 4 trakční motory o celkovém výkonu 990 kW. Na palubě je uloženo až 20 kg vodíkového paliva ve 4 vysokotlakých nádržích. Vodík je přiváděn do palivových článků 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 baterií jsou poháněny trakční motory. Projekt do roku 2040 dekarbonizuje britskou železniční síť. [3]

FV-E991

Jedná se o japonskou osobní jednotku, přezdívanou HYBARI (Hydrogen-Hybrid Advanced Rail vehicle for Innovation). Jednotka je dvouvozová s maximální rychlostí 100 km/h. 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 o celkovém výkonu 240 kW. Hlavní elektrický obvod s trakčním měničem a 2 lithium-iontovými bateriemi o kapacitě 120 kWh jsou umístěné ve spodní části vlaku. Uvádí se, že jednotka bude moci být komerčně použita do roku 2024. [3]

2.3.2 Silniční

Nejrůznější pilotní projekty autobusů na vodíkový pohon lze v tuzemsku i ve světě sledovat již v závěru první dekády 21. století, většinou se ale tyto pokusy ukázaly jako nepříliš úspěšné. Většího rozšíření se autobusy na tento druh alternativního pohonu dočkaly až s dalším, zhruba desetiletým časovým odstupem, a v současnosti již lze čerpat data a zkušenosti hned z několika různých světových provozů, kde jsou užívány vodíkové autobusy od více různých výrobců. Stručně lze představit a zhodnotit několik z nich:

2.3.1.1 Zkušební, pilotní a opuštěné projekty

Projekt TriHyBus

První projekt provozu vodíkového autobusu v ČR, na kterém od roku 2005 pracoval ÚJV Řež. V roce 2009 představil autobus zn. Škoda 24FC TriHyBus, zasazený do karoserie vozu Iveco Citelis 12m v zesílené verzi „CNG“, schopné unést objemnou střešní nástavbu. Zkušební provoz s cestujícími byl prováděn na lince MHD ve středočeských Neratovicích pod záštitou společnosti Veolia Transport

Praha, s.r.o. (později Arriva Praha, s.r.o.), tehdejší provozovatel dané linky – vodíkový autobus byl této společnosti dlouhodobě pronajat a řidiči této společnosti vůz též obsluhovali.

ÚJV o vozidle uváděl následující údaje – spotřeba 7,5 – 8 kg vodíku / 100 km, nádobí na 20 kg vodíku, které pojmu vodík o objemu 820 litrů, dojezd až 300 km, maximální výkon až 200 kW. Neratovice jsou ale velmi rovinaté město s málo intenzivním provozem, kde může být snadno dosaženo provozně velmi příznivých hodnot ve srovnání s běžným velkoměstským provozem.

Provoz probíhal velmi sporadicky, nejednalo se zdaleka o každodenní nasazení, vůz se též ukázal jako nepřilíh spolehlivý, málokdy dokončil denní výkon bez poruch. Autobus přestal být vypravován pravděpodobně v průběhu roku 2014 (na jaře 2015 prošla linka MHD Neratovice integrací do systému PID, do tohoto systému již TriHyBus nezasáhl). V následujících letech se vozidlo ještě průběžně prezentovalo na různých výstavách a konferencích, od roku 2017, kdy skončila platnost revizí na tlakové vodíkové nádoby, je odstaveno v areálu společnosti ÚJV Řež.

Whistler Fuel Cell Bus Project

V rámci přípravy na pořádání zimních olympijských her ve Vancouveru v Kanadě zařadil v roce 2009 provozovatel systému hromadné dopravy v nedaleké městě Whistler, společnost „BC Transit“, 20 vodíkových autobusů kanadského výrobce New Flyer, které svou velikostí a kapacitou (cca 12,5 m délky pro cca 70 cestujících) odpovídají zhruba „běžným evropským standardním městským autobusům“. Celý projekt, včetně výstavby plnicí stanice, byl mohutně financován státními i místními samosprávnými veřejnými rozpočty. V této době se celosvětově jednalo o největší flotilu vodíkových autobusů a pravděpodobně jedinou, vypravovanou do pravidelného provozu.

O vozidlech jsou uváděny následující údaje – spotřeba 15 - 16 kg vodíku / 100 km, dojezd 330 - 380 km, maximální výkon 170 kW (dvojice elektromotorů po 85 kW). Kombinace městského i příměstského provozu v náročných terénních podmínkách, letní i zimní provoz.

Autobusy obsluhovaly běžné linky městské hromadné i regionální dopravy v nejbližším okolí města Whistler, kterých dopravce provozoval celkem 9, a byly nasazeny v každodenním provozu. Kvůli delší době, nutné na dočerpávání vodíku, oproti tankování nafty, musel na období zimních špiček (jedná se o horskou oblast se silným sezónním charakterem přepravy) do provozu přidat další 3 dieselové autobusy. Projekt byl plánován na přesně stanovenou dobu 5 let, po ukončení tohoto projektu (a s ním souvisejícím financováním z veřejných zdrojů) byly všechny zbylé provozuschopné autobusy najednou odstaveny z provozu a později bez dalšího využití vyřazeny.

Během posledního roku trvání projektu začal provozovatel jednotlivá vozidla po různých závažnějších závadách, právě s vidinou blížícího se termínu ukončení projektu, odstavovat a již neopravovat, udává ale, že pokud by projekt trval dále, prakticky všechna takto odstavená vozidla by bylo možné zprovoznit. Projekt se nepotýkal se zásadními, neřešitelnými, technickými problémy, hlavní motivací, stojící za jeho neprodloužením, byla jeho nepříznivá ekonomická stránka, kdy náklady na pohon i na údržbu vodíkových autobusů byly oproti dieselovým autobusům zhruba dvojnásobné. Stejnou měrou například vzrostla i potřeba personálního obsazení servisního střediska – vodíkové autobusy muselo obsluhovat 12 mechaniků, zatímco pro stejný počet dieselových autobusů dříve stačilo jen 6.²

² <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62317.pdf>

<https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/bc-transit-s-90m-hydrogen-bus-fleet-to-be-sold-off-converted-to-diesel-1.2861060>

<https://www.cbc.ca/news/hydrogen-powered-buses-at-olympics-under-scrutiny-1.900837>

<https://www.cbc.ca/news/canada/edmonton/hydrogen-buses-are-coming-to-edmonton-and-area-fuelling-hopes-for-a-new-energy-economy-1.6684545>

Hydrogen buses on the Veluwe

Provozovatel regionálních linek v okolí města Arnhem v Nizozemí, společnost Keolis, měla v testovacím provozu nejprve od roku 2015 vodíkový autobus polské zn. Solbus, který od roku 2018 dále doplnil druhý vodíkový autobus zn. Ursus. Společně pak byly oba autobusy v pracovní dny nasazovány na pro ně speciálně vytvořené oběhy, na nichž byly sledovány provozní vlastnosti obou vozidel, které sestávaly zejména z delších meziměstských úseků se značným podílem jízdy po dálnici.

Oba autobusy dokázaly pojmout až 30 kg vodíků, maximální udávaný výkon se lišil od 220 kW do 300 kW a v praxi dovedly na jedno plnění ujet až 400 km. Během testovacího období se ale upravil oběh tak, že denně ujely až 440 km, což pro každé z vozidel znamenalo nutnost plnění vodíkem 2x denně. Čerpací stanice na vodík nebyla v blízkosti běžných provozních tras, každé plnění tak vyžadovalo minimálně 2 hodiny prostoje vozidla (40 minut na přejezd do a z plnicí stanice + 30 minut na plnění).

V regionálním provozu po rovinatém Nizozemí dosahovala spotřeba vodíku zhruba 6 – 7 kg / 100 km, spotřeba ovšem výrazně vzrostla v zimních měsících, kdy bylo nutné autobusy vytápět, a to až na 9 kg / 100 km.

Zejména vozidlo Ursus se ukázalo jako poruchové a provozně nespolehlivé, je to však pravděpodobně způsobeno tím, že kvůli majetkoprávním problémům před začátkem zkušebního provozu v roce 2018 dlouhodobě bez pohybu stálo a nebylo provozováno, v čehož důsledku pak degradovaly jednotlivé komponenty, které ne vždy nutně souvisely i s alternativním pohonem tohoto vozidla.³

2.3.1.2 Současné vodíkové autobusy

Zhruba od roku 2020 se na evropském trhu objevuje ve větších sériích hned několik vodíkových produktů různých výrobců, které už nemají ryze zkušební či předváděcí charakter provozu a jsou místy i ve větších flotilách vypravovány do běžného provozu. Z nejrozšířenějších vozidel na současném trhu lze jmenovat následující:

Toyota-CaetanoBus H2.City Gold

Produktem spolupráce portugalského výrobce karoserie (CaetanoBus) a japonského výrobce pohonné jednotky (Toyota) je vodíkový autobus Toyota-CaetanoBus H2.City Gold. Společnost CaetanoBus již několik let vyrábí a na evropský trh dodává městské nízkopodlažní elektrobusesy ve velikostních kategoriích 10,8 m a 12 m délky, výrobní program byl v obou velikostech o vodíkové autobusy rozšířen teprve v roce 2021. Dosud se však v provozu objevily pouze běžné 12 m autobusy.

Výrobce u obou velikostí udává maximální dojezd až 500 km při maximálním naplnění zásobníků až 37,5 kg vodíku.

10 autobusů tohoto typu bylo na přelomu let 2021/2022 dodáno do dopravního podniku v německém městě Wiesbaden, kde byly zařazeny do běžného provozu městské hromadné dopravy. Na podzim 2022 došlo z důvodu technické závady k odstavení vodíkové plnicí stanice (která byla ve vlastnictví města, resp. dopravce), nicméně z důvodu opakujících se, blíže nespecifikovaných, technických závad na vodíkových autobusech se dopravce již rozhodl plnicí stanici neopravovat a celou flotilu 10 vodíkových autobusů trvale vyřadit z provozu.

Tento předváděcí vodíkový autobus byl v prosinci 2022 testován v Dopravním podniku měst Mostu a Litvínova, kde byl v provozu dva dny na lince MHD č. 17, testy však kvůli technické závadě nedokončil a zkušební provoz byl předčasně ukončen. Během tohoto krátkého zkušebního provozu dosáhl spotřeby vodíku zhruba 10-12 kg / 100 km.

³https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416_status_verslag_2BP_Hydrogen_buses_on_the_Veluwe_Eng_.pdf

Až 60 autobusů tohoto typu může být také na základě rámcového kontraktu v nejbližších letech dodáno německému koncernu DB, resp. dceřinné společnosti DB Regio Bus. Další autobusy jsou pak přímo, případně na základě rámcového kontraktu, očekávány v městských provozech ve Strasbourgu (Francie), kam lze dodat až 60 vozů během následujících 5 let, nebo ve španělském Madridu, kde je očekáváno 10 autobusů během roku 2024.⁴⁵

Solaris Urbino IV Hydrogen

Úspěšná modelová řada nízkopodlažních městských autobusů španělsko-polského výrobce Solaris Urbino, která se nyní vyrábí již v tzv. IV. generaci, je od roku 2020 doplněna i o verze „Hydrogen“, tedy na vodíkový pohon. V těchto autobusech tak nabízen i další alternativní druh pohonu k již dlouho vyráběným vozidlům na dieselový, CNG nebo elektrický pohon.

První čtyři vodíkové autobusy Solaris, zakoupené na základě výsledků výběrového řízení, jsou od 1. srpna 2023 v Bratislavě v pravidelném provozu na lince MHD č. 75. Vozy jsou, podobně jako běžná naftová verze autobusů Solaris IV, plně nízkopodlažní a klimatizovány.

Udáváný dojezd při plném naplnění vodíkových nádrží až 35 kg vodíku je až 350 km, v současnosti však v Bratislavě není k dispozici stanice s dostatečným plnicím tlakem, a proto je nyní maximální dojezd snížen, kvůli čemuž musel být upraven i provoz na lince č. 75 a vozy vypraveny pouze na oběhy s nižšími kilometrickými proběhy. Úprava plnicí stanice se předpokládá až během roku 2024. Z provozu v Bratislavě nejsou, s ohledem na skutečně nedávné zahájení provozu, prozatím k dispozici údaje o spotřebě vodíku, předpokládá se však spotřeba přibližně 10 kg / 100 km.

V rámci ČR jsou autobusy tohoto typu vybrány také pro městský provoz v Ústí nad Labem, město pro ně však stále ještě nemá zajištěno financování. Vodíkové autobusy Solaris Urbino IV Hydrogen jsou dále provozovány nebo objednány i v dalších evropských městech, například v menších městských provozech v okolí města Köln (Německo), Frankfurt am Main (Německo), Hamburg (Německo) nebo v Bolzanu (Itálie). Vůz je také nabízen i v kloubové 18 metrové verzi, kterou má, společně s dalšími standardními 12 metrovými autobusy, v současnosti objednan provozovatel městské dopravy v německém městě Aschaffenburg.⁶

Van Hool FuelCell A12, A13, A18

Belgický výrobce autobusů Van Hool nabízí své nízkopodlažní městské vodíkové autobusy FuelCell již ve třech délkových kategoriích – A12 (12 metrů), A13 (13 metrů) a A18 (18 metrů článkový). Předchozí generace standardních vodíkových vozů – A330 FuelCell – je již nyní v menších kusových sériích provozována v několika městských provozech západní Evropy, asi největší ucelené flotily jsou v počtu 35 kusů v Cologne (Německo), 10 kusů v provozu městské hromadné dopravy ve městě Emmen (Nizozemí) nebo 10 vozů ve Wuppertalu (Německo).

Odlišná řada článkových vodíkových autobusů Van Hool Exqui.City FC je od roku 2019 v počtu 8 ks v provozu v novém BRT systému ve francouzské městě Pau. V uplynulých letech se ale provozovatel potýkal se soustavnými problémy se zajištěním dodávek vodíku a provoz byl často nahrazován klasickými dieselovými autobusy, v současnosti je systém BRT nadále v provozu s vodíkovými autobusy, ale neplánuje se jeho další rozšiřování.

⁴<https://www.hydrogeninsight.com/transport/german-city-to-retire-its-one-year-old-hydrogen-fuel-cell-buses-after-2-3m-filling-station-breaks-down/2-1-1375568>

⁵ <https://www.toyota-europe.com/news/2023/caetanobus-in-european-cities>

⁶ <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/1054/Solaris-Urbino-12-hydrogen>

Mercedes-Benz eCitaro FuelCell

Vodíkové městské autobusy Citaro, vycházející z úspěšné řady nízkopodlažních dieselových, plynových a elektrických autobusů, v roce 2023 do své nabídky zařadil po fázi testování i německý koncern Daimler. V nabídce je standardní 12 metrová i článková 18 metrová varianta. Autobusy prozatím ale nikde v běžném provozu nejsou, první objednávky od evropských zákazníků jsou teprve očekávány.

Škoda H'City

Prozatím pouze ve stadiu zkušebního testovacího provozu je vodíkový autobus Škoda H'City, sestávající z karoserie tureckého výrobce Temsa, do kterého je doplněna pohonná jednotka od Škody. Autobus je od července 2023 v každodenním provozu na lince pražské MHD č. 170, zkušební provoz se prozatím předpokládá po dobu dvou let s možností prodloužení o další dva roky. U tohoto standardního třídvéřového městského nízkopodlažního autobusu se předpokládá spotřeba okolo 10 kg vodíku / 100 km, výrobce udává dojezd až 300 km, přičemž právě linka 170, na kterou je vůz vypravován, patří mezi ty sklonově náročnější.

2.4 Bezpečnost

Pro všechny typy vodíkových plnicích stanic lze identifikovat celou řadu rizik vyplývajících ze základních vlastností vodíku. Tento plyn je za normálních podmínek bezbarvý, bez zápachu a ve směsi se vzduchem tvoří ve velmi širokých mezích (4 – 75 %) zápalnou směs. Současně je v případě plnicích stanic skladován za vysoké tlaku. S ohledem na celosvětové zkušenosti s provozem velkého množství různých typů vodíkových plnicích stanic, lze dnes velké množství rizik minimalizovat a při dodržení stávajících bezpečnostních standardů tak předejít potenciálnímu nebezpečí.

2.4.1 Identifikovaná nebezpečí pro vodíkové plnicí stanice

V následujícím textu jsou popsány scénáře neakceptovatelných rizik včetně diskuze jejich možné minimalizace. Současně jsou uvedeny aspekty spojené s nutností dodržení bezpečnostních vzdáleností a ochrana proti úmyslnému poškození (sabotáži) technologie.

2.4.2 Kompresorová jednotka

Jedním z hlavních rizik spojených s kompresorem vodíku je možnost přísání vzduchu (kyslíku) na jeho vstupní části. Toto riziko by vedlo k vnitřnímu zahoření či explozi a následným materiálovým škodám na zařízení. Z tohoto důvodu je vodíkové kompresory používáno speciální konstrukce zamezující přísávání vzduchu, čímž je toto riziko významně omezeno. Druhým rizikem v případě kompresoru je únik vodíku. Ke snížení tohoto rizika je použito minimalizace počtů spojů a dalších rizikových míst a použití speciálních těsnění.

2.4.3 Únik vodíku z vysokotlakého zdroje

Vysoký tlak v zásobníku včetně veškerých potrubních rozvodů za kompresorem představuje, v případě úniku, zdroj výrazně vyššího rizika. Při úniku vzniká mrak zápalného plynu, jehož pravděpodobnost vzplanutí je vysoká. Významná je i skutečnost, že vodíkový plamen je za denního světla téměř neviditelný.

2.4.4 Únik vodíku z vysokotlakého zdroje v uzavřených prostorech

V případě vysokotlakého úniku vodíku v uzavřeném prostoru (kompresorový kontejner či kontejner s vysokotlakými zásobníky), proudění a nízká hustota vodíku významně ovlivní jeho rozptýlení. Ve všech případech jsou kontejnery vybaveny odvětrávacími otvory, nebo bývají používány systémy

detekce plynu spojené s automatickou ventilací. Pokud to okolnosti umožňují, je preferovanou variantou venkovní umístění vysokotlakých zásobníků s dobrými rozptylovými podmínkami.

K úniku může dojít i přes bezpečnostní ventily, které mají za úkol zamezit nekontrolovanému nárůstu tlaku. Veškeré provozní a bezpečnostní ventily bývají svedeny do potrubí, které bývá k tomu určené a konstruované (odfukové komíny). Tam dojde ke kontrolovanému zahoření směsi, nebo jeho inertizaci.

2.4.5 Rizika během plnění vozidla

Značné riziko může představovat zahájení, průběh, ukončení a kontrolink procesu plnění vozidla. Během procesu musí dojít k řadě technologických postupů, které v případě detekce chyb musí zajistit bezpečné přerušování plnění s případným regulovaným únikem vodíku z plnicího systému.

2.4.6 Rizika úmyslného poškození, nebo vandalismu

V případě provozu vodíkových plnicích stanic je nutné zvážit i rizika spojená s možností úmyslného poškození či vandalismu. Za účelem snížení těchto rizik se instalují kamerové systémy, vstupní systémy, ochranné zdi či ploty.⁷

2.5 Legislativa

Z hlediska vodíkové mobility je relevantní především níže uvedená legislativa:

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2007/46/ES, kterou se stanoví rámec pro schvalování motorových vozidel a jejich přípojných vozidel, jakož i systémů, konstrukčních částí a samostatných technických celků určených pro tato vozidla.

Nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č. 79/2009 o schvalování typu vozidel na vodíkový pohon a o změně směrnice 2007/46/ES.

Směrnice ES č. 79/2009 mění směrnici ES č. 46/2007 ve věci legislativní úpravy pravomocí Evropské komise v oblasti schvalování typu vozidel na vodíkový pohon. Dále směrnici rozšiřuje pravomoci ES ve věci stanovení požadavků a zkušebních postupů týkajících se nových forem skladování a užívání vodíku, přídavných vodíkových konstrukčních částí a pohonného systému. Komise dále zmocňuje ke stanovení zvláštních postupů, zkoušek a požadavků s ohledem na ochranu při nárazu vozidel na vodíkový pohon a ke stanovení bezpečnostních požadavků na integrovaný systém. Směrnice také definuje nové požadavky na výrobce vozidel, zejména týkající se bezpečnostních a technických parametrů.

Klíčovým dokumentem pro obor alternativních paliv je směrnice Evropského parlamentu a rady 2014/94/EU ze dne 22. října 2014, kterou měly členské státy povinnost implementovat do 18. 11. 2016. Směrnice v oblasti vodíkové mobility především stanovuje, že členské státy, které se rozhodnou do svého vnitrostátního rámce politiky zahrnout veřejně přístupné vodíkové plnicí stanice, musí zajistit, aby byly do 31. prosince 2025 dostupné přiměřený počet plnicích stanic.

V evropské legislativě je pak jedním z důležitých dokumentů sdělení Evropské komise týkající se strategie rozvoje nízkoemisní mobility jako reakci na zvyšující se emise skleníkových plynů z dopravy, a to v souladu s Bílou knihou, Pařížskou dohodou a Agendou 2030.

⁷ Výbuch plnicí stanice v Norsku 06/2019:

<https://www.carsales.com.au/editorial/details/hydrogen-fuel-station-explodes-in-norway-118954/>

Zákon č. 311/2006 Sb. o pohonných hmotách v rámci příslušných předpisů ES (Evropského společenství) upravuje podmínky pro prodej a výdej pohonných hmot, registraci distributorů pohonných hmot, evidenci čerpacích stanic a požadavky na složení a jakost pohonných hmot (tedy jakýchkoliv paliv určených k pohonu vozidla).

V české legislativě nicméně taktéž dojde k určitým změnám, které reflektují vývoj nízkoemisních vozidel v souladu s nařízením Evropské komise. Jednou z nich je zákon č. 542/2016 Sb., který mění aktuálně platný zákon č. 311/2006 Sb. o pohonných hmotách a čerpacích stanicích pohonných hmot.

Vyhláška č. 133/2010 Sb. vyhláška o požadavcích na pohonné hmoty, o způsobu sledování a monitorování složení a jakosti pohonných hmot a o jejich evidenci;

Vyhláška č. 18/1979 Sb. vymezuje rozsah typů tlakových zařízení a stanovuje některé podmínky k zajištění jejich bezpečnosti.

Vyhláška č. 516/2020 Sb., Vyhláška o požadavcích na pohonné hmoty a provedení některých dalších ustanovení zákona o pohonných hmotách.

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2003/87/ES, ze dne 13. října 2003, o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů v Unii a o změně směrnice Rady 96/61/ES. (Úř. věst. L 275, 25.10.2003, s. 32.)

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:02003L0087-20230605> (CZ)

Obecně se projektování vodíkové plnicí stanice řídí stejnými předpisy, jako projektování jakýchkoliv jiných staveb, tj. stavebním zákonem č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) a jeho prováděcími předpisy.

2.6 Životní prostředí

Z pohledu životního prostředí je nejpřívětivější variantou elektrolytická výroba vodíku v místě, v návaznosti na obnovitelné zdroje elektrické energie. Tato varianta se sebou nese pouze emise spojené s výrobou samotných zařízení, jejich instalací. Samotný proces elektrolýzy neprodukuje žádné emise. Je však nutno přihlídnout na původ elektrické energie. V případě energetického mixu ČR je emisní stopa srovnatelná s parním reformingem zemního plynu.

Uhlíková stopa výroby 1 MJ energie	gCO _{eq} /MJ
Krakování metanu s vypouštěním CO ₂ do ovzduší (šedý vodík)	100 – 140
Krakování metanu s vázáním CO ₂ (modrý vodík)	35 – 45
Elektrolýza elektřinou z obnovitelných zdrojů energie (zelený vodík)	4
Elektrolýza elektřinou z JE (růžový vodík)	9 - 10
Elektrolýza elektřiny z distribuční sítě (žlutý vodík)	165 - 180
Vedlejší produkt (bílý vodík)	-

Tab. 2: Srovnání uhlíkové stopy

Zdroj: [1]

PS: 1 MJ = 3,6 kWh

Energetický mix ČR za rok 2021⁸ je:

⁸ <https://www.elektrina.co/blog/elektrina/energeticky-mix-v-cr-z-jakych-zdroju-ziskavame-energii-k-vyrobe-elektriny>

Zdroj energie	Podíl v %
Tepelné elektrárny - využívají fosilní paliva v podobě černého a hnědého uhlí (47 %), nebo zemní plyn (7 %)	58
Jaderná energetika	35
Vodní elektrárny včetně přečerpávacích	3
OZE FVE	3
OZE VTE	1

Tab. 3: Energetický mix ČR v r. 2021

Celková výroba elektřiny brutto v roce 2021 dosáhla hodnoty 84,9 TWh. Na obnovitelné zdroje vychází tedy 3,396 TWh. Lze očekávat, že v příštím desetiletí se bude energetické portfolio ČR odklánět od fosilních zdrojů paliva a poroste podíl obnovitelných zdrojů energie.

Průměrná spotřeba nafty u moderních jednotek se pohybuje kolem 0,7 l/km. Zatímco vodíková jednotka spotřebuje kolem 0,230 kg/km [5]. Po přepočtu na ekvivalent energie vyjde v případě nafty 6,86 kWh, pro vodík vyjde 7,20 kWh. Z jednoho kg vodíku lze získat 13.75 kW·h energie [4]. Z jednoho litru nafty je vyprodukováno 2,64 kg CO₂ [4].

2.7 Účinnost

Pokud budeme mít bezemisně vyrobený vodík, což jediné dává vzhledem k environmentálnímu důvodu zavedení vodíkové technologie smysl, tak jsou dílčí účinnosti realizace dopravního výkonu od okamžiku výroby elektrické energie(mimo), po trakční elektromotor vozidla (mimo) přibližně následující:

- elektrolýza 60 %
- stlačení vodíku na 35 MPa na plnicí stanici je 70 %
- palivový článek 60%
- kompenzační lithiová baterie zhruba 90 %
- měnič baterií 96 %.

Výsledná celková účinnost vodíkového pohonu je cca 22 %. [4, 5]. Do celkové účinnosti může ještě negativně vstupovat efektivita uskladnění, tj. difuze (samovolný únik) ze skladových zásob. Vzhledem k připravované konverzi trakčního napájení na železniční síti ČR na systém 25 kV AC lze ve výhledovém stavu počítat s účinností napájecích stanic a trakčního vedení přibližně 90 - 95%. Účinnost vodíkového pohonu je sice výrazně menší, na některých méně zatížených tratích však může vyvažovat investiční náklady na pořízení trakčního vedení a systému napájení. Dalším pozitivem jsou pak environmentální efekty oproti dieselové trakci, které rovněž ke svému provozu nepotřebují elektrizaci.

Porovnání účinnosti vodíkového a dieselového pohonu

Vycházíme ze situace, kdy vozidlo je již naplněno palivem (nafta, vodík). Současné vyspělé dieselové motory používané v moderních vozidlech dosahují účinnosti až 40%. Standardně se v současné době uvažuje průměrná účinnost 30 % [4]. Pro porovnávání ve výhledu budeme uvažovat s obnoveným parkem vozidel, a tedy hodnotou účinnosti 40 %.

Pro vozidlo poháněné vodíkem odhadujeme odpovídající účinnost:

- palivový článek 60%
- kompenzační lithiová baterie zhruba 90 %
- měnič baterií 96 %.
- elektromotor 90 %

Výsledná celková účinnost je 47 %. Pokud tedy výpočet účinnosti omezíme na přeměnu energií pouze v samotném vozidle, lze předpokládat vyšší účinnost ($47 > 40$) pro vozidla poháněná vodíkem.

2.8 Možnosti financování

Mezinárodní: The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking disponuje rozpočtem na podporu demonstračních projektů pokrývajících řadu oblastí, včetně autobusů na palivové články. Některé prvky projektu je možné financovat také prostřednictvím jiných iniciativ, jako je například program Nástroj pro propojení Evropy, který podporuje zavádění infrastruktury pro čistá paliva v hlavní evropské dopravní síti.

Národní vlády: Vlády mnoha evropských zemí si uvědomují schopnost autobusů na palivové články přispívat k plnění národních cílů (jako je snížení emisí uhlíku, zlepšení kvality ovzduší, bezpečnost dodávek energie). V důsledku toho může být k dispozici vnitrostátní financování na podporu projektů usilujících o přispění ke komercializaci této technologie a/nebo k „ekologizaci“ autobusových flotil.

Místní/regionální vlády: je možné usilovat o příspěvek z místního veřejného sektoru na podporu zavedení autobusů na palivové články v daném městě nebo regionu. Tento případ obvykle vychází z místních výhod, které tato činnost přináší zlepšení kvality ovzduší a nové ekonomické příležitosti. V některých případech, jako je např. Londýn nebo Hamburk, jsou města připravena stát se průkopníky a podporovat technologický rozvoj, který je nezbytný pro dosažení environmentálních cílů.

3 NÁVRHOVÁ ČÁST

V rámci návrhové části je popsáno dopravní a technické řešení tohoto projektu včetně výpočtu ekonomického hodnocení.

V technickém řešení je obecně popsáno několik možných umístění vodíkové plnicí stanice. S ohledem na trasování vybraných linek je obecně nejvhodnější umístění plnicí stanice v ŽST Krnov. V blízkosti ŽST Krnov je připravován záměr vybudování plnicí stanice v areálu společnosti VEOLIA.

Tato studie přímo neřeší, kdo by byl investorem plnicí stanice (Správa železnic, Moravskoslezský kraj, či jiný subjekt). Potřebná energie pro elektrolýzu by mohla být dodávána z výše uvedeného zdroje případně z jiného zdroje.

3.1 Dopravní řešení

Návrh dopravního řešení vzešel z požadavků objednatelů veřejné dopravy a dále byl upřesňován vzájemnými konzultacemi mezi zpracovatelem a objednatelem dopravy, tedy počty spojů a polohy jednotlivých vlaků, odpovídají těmto požadavkům.

3.1.1 Železniční doprava

Provoz vodíkových jednotek je uvažován na následujících linkách a vozebních ramenech:

- S 15 Moravský Beroun – Krnov – Jeseník
- S 17 Milotice nad Opavou – Vrbno pod Pradědem
- S 19 Valšov – Rýmařov
- R 27 Olomouc – Krnov – Opava východ – Ostrava-Svinov – Ostrava střed

přičemž na ostatních železničních výkonech v širším okolí Krnova je dále v maximální možné míře uvažováno s užitím elektrických jednotek trakčních (S 1, S 9, R 61) i akumulátorových (S10, S 11, S 12, S 13) a motorové dieselové jednotky dále najdou využití pouze na podružných lokálních výkonech a turistických tratích (úzkorozchodná trať Třemešná ve Slezsku – Osoblaha a víkendový turistický provoz na trati Bruntál – Malá Morávka). Ve variantě bez projektu je na lince R27 uvažováno s provozem diesel-elektrických jednotek. Návrh vychází z dohody ze Studie proveditelnosti.

Pro obsluhu výše uvedených linek je v denním provozu potřeba 17⁹ jednotek, předpokládáno je nasazení jednotek druhu HMU70 a HEMU120, konkrétní výrobce či typová řada bude pravděpodobně zvolen na základě veřejného výběrového řízení a jejich výběr není předmětem této studie.

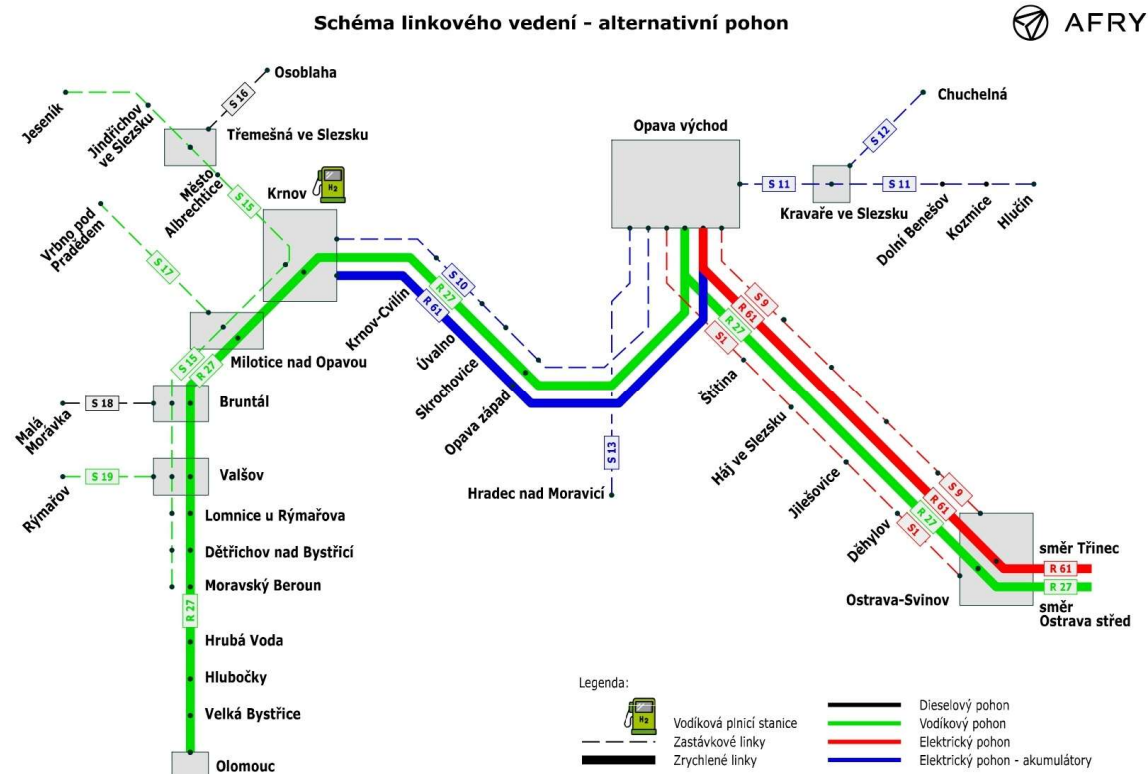
Počty jednotek		
linka	typ	počet
S 15	HMU70	5
S 17	HMU70	1
S 19	HMU70	1
R 27	HEMU120	10
celkem	HMU70	7
celkem	HEMU120	10
celkem		17

Tab. 4: Potřebné počty vodíkových železničních jednotek

⁹ Počet 17 jednotek obsahuje i záložní vozidlo

Na základě dostupných podkladů a dřívějších zkušeností z testování vodíkových železničních jednotek v ČR, byly určeny základní okrajové podmínky pro sestavení rámcové dopravní technologie a oběhy vozidel. Těmi je předpoklad dojezdu jednotky na jedno natankování cca 600 km¹⁰.

Jediná vodíková plnicí stanice je plánována v Krnově, její konkrétní podoba a umístění je nutno zpřesnit v dalším stupni projektové přípravy.



Obr. 1: Schéma železničního provozu v okolí Krnova s důrazem na alternativní pohon

Navrhované časové polohy vlaků a jízdní doby vychází z požadavků objednatele dopravy, které lze shrnout do několika základních bodů:

- základem konstrukce je rychlíková linka **R 27 Olomouc – Krnov – Opava východ – Ostrava-Svinov – Ostrava střed**, která je provozována v intervalu 120 minut a její časové polohy se odvíjí od uzlu Valšov, kde se vždy v sudou hodinu (S:00) vzájemně křížuje
- do uzlu Olomouc tato linka přijíždí i odjíždí „okolo celé liché hodiny“, ale ne tak, aby se dokázala okamžitě obracet na navazující spoj opačného směru – na základě vzájemných jednání jsou stanoveny polohy příjezdu v L:04 (7:04, 9:04, ...) a naopak odjezdu v S:56 (6:56, 8:56, ...)
- do uzlu Valšov je zapojena lokální linka **S19 Valšov – Rýmařov**
- zastávkovou obsluhu „podél“ linky R 27 zajišťuje linka **S 15 Moravský Beroun – Krnov – Jeseník**, jejímž jádrem jsou spoje Bruntál – Krnov, provozované v intervalu 120 minut a to v takových polohách, aby s linkou R 27 byly v přibližném prokladu do cca hodinového intervalu

¹⁰ některé oběhy linky R 27 mají denní proběh 612 km (z toho 464 km na vodík), tuto hodnotu pro účely tohoto technicko-ekonomického posouzení považujeme za ještě akceptovatelnou. Dojezd vodíkových jednotek vždy závisí na možnostech výrobce a požadavcích odběratele vodíkových jednotek

- v úseku Moravský Beroun – Bruntál je S 15 provozována pouze v omezeném rozsahu cca 4 párů denně, stejně jako v úseku Jindřichov ve Slezsku – Jeseník
- v úseku Krnov – Jindřichov ve Slezsku je linka S15 provozována v pravidelném intervalu 120 minut, který je ve špičkovém období zahuštěn až na 60 minut
- ve stanici Milotice nad Opavou je zaústěna lokální linka **S 17 Milotice nad Opavou – Vrbno pod Pradědem**, která zde navazuje na osobní vlaky linky S 15, není zde umožněna návaznost na oba směry linky S 15, ale její polohy jsou zvoleny tak, aby umožňovaly co nejpríznivější vazbu během rána a dopoledne z Vrbna pod Pradědem ke Krnovu a v ostatních provozních obdobích ve směru opačném, zároveň je zachována i alternativa přestupu směrem na Bruntál s přijatelnými přestupními dobami.
- linky S 16 do Osoblahy a S 18 do Malé Morávky do vodíkového prověření nevstupují, jsou v grafických přílohách uváděny pouze pro úplnost a dokreslení kontextu linkového vedení v širší oblasti

Předpokládaná existence jediné plnicí stanice v lokalitě ŽST Krnov vyvolává společně s nutností denního zbrojení vozidel potřebu vyššího podílu režijních a soupravových jízd v systému. Zatímco na linkách S 15 a R 27, které jsou přes samotný Krnov vedené, lze jejich množství minimalizovat a případně jejich spoje a oběhy plánovat tak, aby vždy v Krnově začínaly, končily nebo zde měly v průběhu výkonu dostatečný čas na zbrojení, u zbylých linek S 17 a S 19 se režijním soupravovým jízdám vyhnout nelze. Jsou tedy uvažovány v následujícím rozsahu:

oběh	odj.	přij.	km
17/1	3:37 Krnov	4:30 Vrbno pod Pradědem	34
17/1	19:37 Vrbno pod Pradědem	20:30 Krnov	34
19/1	4:15 Krnov	5:23 Rýmařov	46
19/1	20:42 Rýmařov	21:50 Krnov	46
celkem soupravových km			160

Tab. 5: Soupravové jízdy z/do ŽST Krnov

Celý systém vodíkových železničních linek má následující předpokládané denní výkony ujetých vlkm (bez rozlišení jednotlivých druhů souprav):

linka	výk.	Sv	vlkm
S 15 (Moravský Beroun -) Bruntál - Krnov - Jindřichov ve Slezsku (- Jeseník)	1855	0	1855
S 17 Vrbno pod Pradědem - Milotice nad Opavou (- Krnov)	320	68	388
S 19 Rýmařov - Valšov (- Krnov)	240	92	332
R 27 Olomouc - Krnov - Opava východ - Ostrava-Svinov - Ostrava střed	2448	0	4089
celkem vlkm			6664

Tab. 6: Denní výkony vodíkových náležitostí

Rozpis plnění jednotek v Krnově									
oběh	typ	proběh	z toho na vodík	spotřeba H ₂ (0,34 kg/km)	spotřeba H ₂ (0,23 kg/km)	konec oběhu	začátek plnění	konec plnění	začátek oběhu
15/4	HMU70	402 km	402 km	83 kg	70 kg	22:10	0:00	0:30	4:30
15/1	HMU70	525 km	525 km	108 kg	91 kg	22:30	1:00	1:30	4:25
27/8	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	21:24	1:55	2:25	5:24
27/1	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	20:35	2:55	3:25	4:35
27/2	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	21:24	3:55	4:25	5:24
27/10	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	22:35	4:50	5:20	6:35
27/9	HMU120	438 km	290 km	120 kg	78 kg	19:24	7:00	7:30	8:35
27/5	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	19:24	10:00	10:30	6:35
15/3	HMU70	161 km	161 km	33 kg	28 kg	17:30	11:00	11:30	6:30
27/4	HMU120	351 km	203 km	84 kg	55 kg	19:04	12:00	12:30	6:56
27/6	HMU120	459 km	348 km	144 kg	94 kg	20:35	13:00	13:30	4:35
15/5	HMU70	360 km	360 km	74 kg	62 kg	17:30	18:00	18:30	7:30
15/2	HMU70	407 km	407 km	84 kg	71 kg	19:30	20:00	20:30	5:10
17/1	HMU70	388 km	388 km	80 kg	67 kg	20:30	21:00	21:30	3:37
27/7	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	20:35	22:00	22:30	4:35
19/1	HMU70	332 km	332 km	69 kg	58 kg	21:50	23:00	23:30	4:15
27/3	HMU120	612 km	464 km	192 kg	125 kg	22:35	5:45	6:15	6:35
			6664 km	2219 kg	1552 kg				

jed. 15/3, 15/5, 27/4 a 27/6 plněny v průběhu denního nasazení během přestávek v ŽST Krnov

*spotřeba vodíku vypočtená v rámci studie

**teoretická spotřeba, pokud by byl vzat v úvahu údaj uváděný výrobcí vozidel

Tab. 7: Rozpis plnění vodíkových železničních jednotek

Hodnota spotřeby vodíku je po zohlednění traťových parametrů za předpokladu, že 1 kg vodíku obsahuje 16 kWh energie. (z tohoto důvodu se liší od průměrné hodnoty udávané výrobcí vozide 0,23 kg/km).

Pro navržený provozní koncept byl i navržen rozpis plnění souprav na obězích na plnicí stanici v Krnově, přičemž je uvažováno s 30 minutovým trváním plnění jedné soupravy. Mezi jednotlivými plněními je též 30 minutový odstup za účelem opětovného natlakování plnicí stanice, který bude v mezinárodním využití pro manipulační pohyb jednotek po obvodu ŽST mezi místy jejich odstavení a plnicí stanicí.

Navržený provozní koncept, orientovaný na plnění jednotek v Krnově zejména v období noční přestávky, vyvolává velké prostorové nároky na noční odstav železničních souprav v prostoru této stanice, neboť pouze turnusová potřeba bez záložních a rezervních vozidel sestává minimálně z 15 jednotek¹¹, které lze bude nutné každou noc odstavit.

V prostoru ŽST Krnov bude dále nutné uvažovat s vhodnými prostory a zázemím na běžné provozní denní ošetření, údržbu, mytí a vnitřní čištění železničních souprav. Zároveň bude muset být vyřešeno přistavování a odstavování jednotlivých jednotek k/od plnicí stanice a obsluha této stanice.

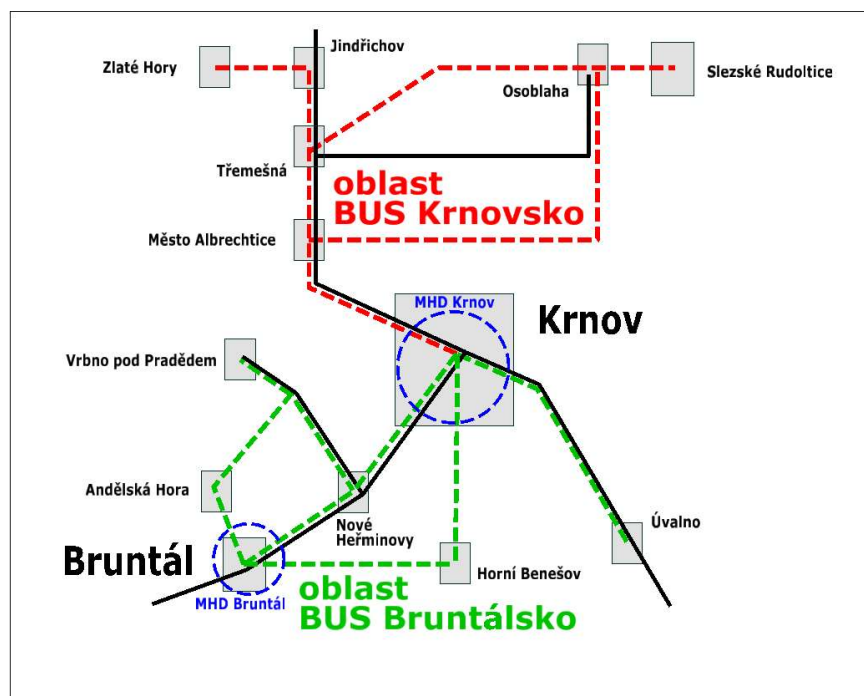
¹¹ Pro zajištění provozu celého svazku vodíkových železničních linek je sice potřeba 17 jednotek, dvě z nich ale nocují v Olomouci a v Krnově jsou plněny vodíkem v denní době nekolidující s nočním odstavem.

3.1.2 Silniční doprava

Pro zefektivnění nově zřízeného plnicího místa bylo úkolem prověřit, zda by mohlo být využíváno i pro provozování pravidelné autobusové dopravy v Krnově a okolí. V oblasti jsou čtyři různé skupiny autobusových linek hromadné dopravy, provozované na objednávku z veřejných zdrojů:

- Svazek regionálních linek ODIS Krnovsko
- Svazek regionálních linek ODIS Bruntálsko
- MHD Krnov
- MHD Bruntál

Všechny provozuje TRANSDEV MORAVA, viz následující obrázek. Smlouvy jsou jednotlivými objednateli uzavřeny do roku 2028 nebo 2029.



Obr. 2: Schéma sítě veřejné autobusové dopravy v okolí Krnova

Krnovsko

Svazek sestává z příměstských autobusových linek, vyjíždějících z Krnova po silnici I/57 směrem na severozápad, kde se v okolí Města Albrechtice dělí a míří buď k polským hranicím, zejména k okolí Zlatých Hor a Osoblaha, nebo k Jeseníku. V této oblasti obsahuje i některé linky, které do Krnova vůbec nezajíždí.

Dopravce zajišťuje provoz na základě desetileté smlouvy vzešlé z výběrového řízení MSK / KODIS, její předpokládaný konec je v prosinci 2028.

Smlouva vyžaduje 100% podíl vozidel na alternativní pohon, přičemž uvádí jako jeho možnosti pohon na CNG nebo elektrobusesy. V praxi jsou nasazeny autobusy na CNG, jehož jediná plnicí stanice v širším okolí se nachází v Krnově. Jde o vozidla standardní velikosti pro cca 90 cestujících, 12 m délky (podle smlouvy 11,5 – 13 m)

V pracovní dny je turnusová potřeba tohoto svazku 14 vozidel, v sobotu a v neděli je provoz zajišťován 7 vozidly. Z těchto 14 vozidel lze v Krnově doplňovat pohonné hmoty do 9 z nich během delších přestávek, které v Krnově v rámci svých oběhů mají, a dále do dalších 4 vozidel, jejichž oběhy jsou v Krnově zahájeny a/nebo ukončeny. O víkendu ze 7 vypravených vozidel má delší přestávku v

Krnově 5 vozidel. Pořadí mají různé kilometrické průběhy, v PD od 100 do 400 km denně, o víkendech od 100 do 450 km denně.

Bruntálsko

Svazek obsahuje zejména příměstské linky z Krnova po silnici I/45 směrem na jihozápad, dále též linky, vycházející z Krnova podél polských hranic po silnici I/57 na jihovýchod a pak regionální linky v širším okolí města Bruntál, vyjíždějící jak k městům Vrbno pod Pradědem a Nové Heřminovy, tak též k východu, k Hornímu Benešovu. Výrazná část tohoto svazku nijak s obsluhou Krnova a jeho bezprostředního okolí nesouvisí, ale nezanedbatelný počet oběhů do Krnova alespoň jednou denně zajíždí.

Dopravce zajišťuje provoz na základě desetileté smlouvy vzešlé z výběrového řízení MSK / KODIS, její předpokládaný konec je v červnu 2029. Většinou menší autobusy na cca 70 cestujících délky 10,5 m, část vozů (menšina) je i větších. Ve smlouvě není požadován alternativní pohon, pravděpodobně proto, že v Bruntále není žádná plnicí stanice CNG.

V pracovní dny je turnusová potřeba 31 vozidel, sobota + neděle 19 vozidel. Zejména o víkendech je zde silný rekreační a sezónní charakter přepravy, který ještě zvyšuje potřebu vozidel. Čtyři oběhy mají v Krnově delší pauzu v pracovní dny (a další oběh má v rámci oběhu přestávku v Krnově až 60 minut), dalších 7 oběhů může v Krnově nocovat.

Pořadí mají různé kilometrické průběhy, od 100 do 350 km denně. O víkendu existuje ještě oběh linky Krnov – Olomouc (2 kola tam a zpět) s ještě vyšším proběhem.

MHD Krnov

Městská hromadná doprava v Krnově sestává ze 7 různých linek označených čísly 801-807, ale rozumný intervalový provoz v intervalu cca každých 20-30 minut probíhá pouze na lince č. 801. Zbylé linky jsou buď různé účelové špičkové spoje nebo spojují odlehlé menší městské části, spadající katastrálně pod Krnov, s jádrem Krnova, obvykle v intervalu zhruba 120 minut. Zdejší MHD nemá jasný centrální přestupní bod, ale v systému této velikosti nelze moc uvažovat se vzájemnými přestupy, které nahrazuje spíše pěší docházka. Různá jednotlivá přímá spojení jsou řešena větvením jednotlivých spojů.

Dopravce zajišťuje provoz na základě smlouvy uzavřené na 5 let, od ledna 2023 do prosince 2027, přičemž byl vybrán v poptávkovém řízení, vypsáném Městem Krnov. Dopravce pro tuto zakázku doplnil a obnovil vozový park – nakoupil 4 nové a 2 starší ojeté autobusy, ale na běžný naftový pohon. Žádný druh alternativního pohonu smlouva nevyžaduje.

„Hlavní“ linka 801 nejede přes zastávku Krnov, žel.st. (!), ale projíždí v její blízkosti, zastavuje v zast. Krnov, slévárna, cca 300 m od výpravní budovy. Naopak jede přes Krnov, aut.st., které je blíže centru města.

Městská doprava má poměrně velký časový rozsah provozu, hlavně na „páteřní“ lince č. 801, první spoje vyjíždí cca 4:35, poslední příjezdy cca 23:20. Všechny oběhy zjevně v noci odstavují v Krnově.

Oběhy vozidel nejsou přiloženy ke smlouvě, ale celý systém má denní průběh 930 km v pracovní dny a 453 km za víkend, odborný odhad zpracovatele je, že turnusová potřeba sestává z 5 vozidel v pracovní dny a 2-3 vozidel o víkendu. Kilometrický průběh denně na vozidlo vychází cca 100 - 250 km v pracovní dny a max. 200 - 250 km o víkendech.

MHD Bruntál

Městskou hromadnou dopravu v Bruntále tvoří linky 851 a 852. Obě jedou polookruh po městě s výchozím bodem Bruntál, žel.st. (aut.st. je v těsné blízkosti). Nelze hovořit o pravidelném intervalovém provozu, dohromady obě linky vytvoří ve špičkách interval cca 30-60 minut ve společném úseku, v sedle 60-120 minut. O víkendu jsou v provozu jen jednotlivé spoje na obou linkách, interval zhruba 4 hodiny.

Smlouva na provoz městské dopravy, uzavřená dopravcem Transdev s Městem Bruntál, je platná do prosince 2028. Na vypravené autobusy nejsou ve smlouvě kladeny prakticky žádné požadavky (věk, typ pohonu, nízkopodlažnost, klimatizace). Ve městě není plnicí stanice CNG.

Kilometrické proběhy smlouva uvažuje 73 000 km/rok. Z toho lze odhadnout cca max. 200 - 220 km za den celkem za obě vozidla.

MHD má poměrně velký rozsah provozu, první spoje od 05:00, poslední spoje do 22:30. Poměrně intenzivní provoz i v dopoledním období. Vypraveny 2 kmenové autobusy v pracovní dny a 1 autobus o víkendu.

Vozidla provozovaná na MHD Bruntál lze dobíjet či plnit v Krnově pouze za předpokladu, že v pracovní dny režijně přejedou na plnění do Krnova a zpět (2x režijní přejezd 20 km), a to v okrajových obdobích večer a v noci, tj. až po konci provozu. Vzhledem k nízkým proběhům lze prověřit i variantu plnění obden. O víkendu je s ohledem na velmi slabý rozsah provozu možné uvažovat i s plněním v průběhu dne během dlouhých přestávek, v průběhu dne se vyskytují přestávky i delší než 3 hodiny.

Potenciál plnění vodíkem z plnicí stanice v Krnově

Provozní soubor	Celkem vozů	Lze plnit v Krnově	Z toho ve dne	Z toho v noci
BUS Krnovsko	14	13	9	4
BUS Bruntálsko	31	11	4	7
MHD Krnov	5	5	0	5
MHD Bruntál	2	2	0	2
Celkem	52	31	13	18

Tab. 8: Počty autobusů, potenciálně denně plněných v Krnově

Tabulka uvádí maximální možný potenciál využití plnicí stanice v Krnově pro potřeby autobusové dopravy, přičemž jako vhodné oběhy k plnění v Krnově „ve dne“ jsou vybírány pouze ty, které mají ve svém oběhu **alespoň jednu přestávku v délce trvání minimálně 120 minut**. Vozidla z některých dalších oběhů lze plnit „v noci“, jedná se o oběhy, které jsou výchozí nebo koncové z/v Krnově a lze předpokládat, že zde v noci parkují a mohou se tedy během nočního odstavu doplňovat pohonnými hmotami.

Výjimku tvoří autobusy z provozu MHD Bruntál, u kterých je uvažováno s režijním přejezdem na trase Bruntál – Krnov tam a zpět v noční době (po ukončení výkonu na MHD Bruntál). Ve dnech pracovního klidu lze tento přejezd realizovat i v průběhu dne v některé vhodně dlouhé přestávce.

Odhad spotřeby vodíku na autobusový provoz

kg vodíku / 100 km		
Nizozemí - SOLBUS 2018-2020	7,00	zkušební provoz, rovinatá trasa
TriHyBus Neratovice	7,50	zkušební provoz, rovinatá trasa
Nizozemí - URSUS 2018-2020	9,00	zkušební provoz, rovinatá trasa
DP Bratislava 08/2023	10,00	běžný provoz
DP Most 07/2023	10,00	zkušební provoz, midibus
DP Praha 07/2023	11,50	běžný provoz
DP Most 12/2022	12,00	zkušební provoz, zima
Whistler (Kanada) 2009-2014	15,67	běžný celoroční provoz
Nizozemí – Van Hool - 2016	17,00	běžný provoz, zima

Tab.9: Výběr z empiricky měřených hodnot spotřeby na 100 km v autobusovém provozu

Výše uvedená tabulka představuje hodnoty spotřeby vodíku, uváděné v jednotlivých městských provozech v uplynulých zhruba 10-15 letech. Je z ní patrný velký rozptyl hodnot, závisející zejména na velikosti vozidla, ročním období provozu a charakteru provozu, přičemž platí, že většina uváděných hodnot se vztahuje k velkým provozům městské hromadné dopravy, kde doposud byly vodíkové autobusy s oblibou testovány a případně dále provozovány. Příměstský provoz se obvykle vyznačuje ekonomičtějším provozem s nižší spotřebou pohonných hmot.

Na základě zjištěných údajů je tak pro potřeby této studie uvažováno se spotřebou

- **10 kg** vodíku na **100** ujetých **km** v regionálním / příměstském autobusovém provozu
- **12 kg** vodíku na **100** ujetých **km** v provozech městské hromadné dopravy.

Provozní soubor	Počet plněných vozů	Množství ujetých km	Kg doplněného vodíku
BUS Krnovsko	13	3 700 km	370 kg
BUS Bruntálsko	11	3 000 km	300 kg
MHD Krnov	5	1 000 km	120 kg
MHD Bruntál	2	350 km	42 kg
Celkem	31	8 050 km	832 kg

Tab. 10: Úhrn denně doplněného vodíku na plnicí stanici v Krnově pro autobusový provoz

Tabulka uvádí rámcový výpočet denně spotřebovaného vodíku autobusovým provozem s uvážením rezervních ujetých kilometrů pro potřeby dalších režijních, servisních a ostatních neplánovaných jízd. Nad rámec potřeb pro dobíjení či doplňování železničních náležitostí je tedy vhodné uvažovat s doplňováním cca 850 kg vodíku denně pro potřeby linkové autobusové dopravy.

Potřebné množství naplněného vodíku v plnicí stanici v Krnově, tedy potažmo hodnoty, na které je nutné plnicí stanici dimenzovat, jsou uvedeny v následující tabulce, v závislosti na tom, zda bude uvažováno i s plněním autobusů. Podrobněji se možnostem plnění autobusů v této stanici věnuje následující kapitola této studie.

	za plovoucí 24h	špička 1h
železniční provoz	2219 kg	192 kg
autobusový provoz	832 kg	208 kg
celkem	3051 kg	400 kg

Tab. 11: Potřebná kapacita vodíkové plnicí stanice

Vzorové oběhy náležitostí i samotných železničních jednotek jsou přiloženy v samostatné příloze.

3.2 Technické řešení



Obr. 3: Železniční síť na severovýchodě ČR

V rámci úvah o možné lokalizaci plnicích stanic vodíku byly prověřovány umístění:

- Krnov (je předmětem předložené studie)
- Olomouc (areál teplárny Olomouc)
- Ostrava-Svinov
- ŽST Ostrava střed

V rámci prostoru zpracovávaného v SP Ostrava-Svinov – Opava východ – Krnov (předmět předložené studie), se předpokládá existence plnicí stanice pouze v Krnově. Zde se nabízí následující možnosti umístění plnicí stanice:

3.2.1 Varianta 1

V lokalitě Krnov se nachází Teplárna Krnov ve vlastnictví VEOLIA Česká republika, a.s. V areálu teplárny je připravován projekt výstavby technologického celku na výrobu vodíku pomocí elektrolýzy vody. Kromě výroby elektrické energie zajišťuje produkci tepla pro vytápění města Krnov. Aktuálně je v teplárně využíváno jako palivo biomasa. Společnost VEOLIA ČR plánuje v areálu teplárny výstavbu fotovoltaické elektrárny (FVE), která by také sloužila k napájení technologií pro výrobu vodíku. Výroba i plnicí stanice jsou v areálu teplárny.

- Pozitiva
 - Vysoký stupeň připravenosti
 - Bez přepravy vodíku z místa výroby do místa distribuce
 - S ohledem na současné podmínky pro taxonomii zdrojů by jako zelený vodík byl považován pouze vodík z FVE nebo VTE
- Negativa
 - Stavba je na soukromém pozemku soukromého vlastníka
 - Je FVE dostatečně výkonná i kapacitní pro potřeby silniční i železniční dopravy?
 - Pro plnění je nutné zajíždět do areálu teplárny, železniční vozidla po vlečce teplárny, silniční po vnitrozávodové komunikaci, která železniční vlečku kříží pomocí přejezdů.
 - Tato vnitrozávodová komunikace není v současnosti ani vybudována
 - Železniční vlečka není ve vlastnictví SŽ

Tato varianta je nevhodná jak pro železniční dopravu, tak pro spoluúčast Správy železnic, státní organizace na realizaci záměru. Varianta vhodná především pro autobusovou dopravu.

3.2.2 Varianta 2

Další možnost je umístění výroby i distribuce vodíku v prostoru ŽST Krnov. K tomu je vhodný pozemek na bruntálském zhlaví stanice, vlevo. V současné době se zde nacházejí plochy pro nakládku a vykládku vybavené železniční rampou s přílehlými kusými kolejemi 3a a 5a. Ty by sloužily i pro přistavení železničních vozidel k plnění vodíkem. Prostor poskytuje dostatek prostoru pro manipulaci silničních vozidel a lze i snadno napojit přímo na veřejnou pozemní komunikaci.

- Pozitiva
 - Bez přepravy vodíku z místa výroby do místa distribuce
 - Umístění na pozemku ČD (v rámci UMVŽST určeno pro SŽ)
- Negativa
 - Bez připravenosti
 - V místě není zdroj elektrické energie z obnovitelných zdrojů

Tato varianta je vhodná pro železniční i autobusovou dopravu.

3.2.3 Varianta 3

Další z možných variant řešení je využití technologie pro výrobu vodíku v areálu teplárny, ale vybudování plnicí stanice u nádraží a propojení těchto dvou lokalit nadzemním potrubním vedením umožňujícím transport vodíku od zdroje k místu plnění. Dosud byly zvažovány 4 možné alternativy vedení potrubí [2]. Vzhledem k rizikům spojeným s vložením dalšího konstrukčního prvku do výrobně-distribučního řetězce považujeme tuto alternativu za nevhodnou. Možnost dovozu vodíku silničními návěsy považujeme pouze za teoretickou.

3.2.4 Varianta 4

Další možností je kombinace variant 1 a 2. Výrobu i distribuci vodíku ponechat podle varianty 1, tedy v prostoru ŽST Krnov. Společnost VEOLIA by pro daný projekt byla pořizovatelem zařízení pro výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů a jejím dodavatelem. Dodávání elektrické energie z OZE by bylo realizováno samostatným vedením (kabel, nebo nadzemní vedení) do místa výroby a distribuce vodíku, tedy ŽST Krnov.

- Pozitiva
 - Vlastníkem výroby i distribuce vodíku by byla pravděpodobně SŽ
 - Umístění na pozemku ČD (v rámci UMVŽST určeno pro SŽ)
- Negativa
 - Bez připravenosti
 - Nebude vytvořen funkčně samostatný celek, bude závislý na dodávce elektřiny z OZE
 - V místě není zdroj elektrické energie z obnovitelných zdrojů

3.3 Provozní a investiční náklady

3.3.1 Investiční náklady

Investiční náklady na vybudování vodíkové plnicí stanice se mohou pohybovat v rozmezí přibližně od 20 do 200 mil. Kč. Ačkoliv se jedná o velmi široké rozpětí, tak pro nejčastější koncept v podobě stanice s instalovanou denní kapacitou 200 – 300 kg vodíku se celkové investiční náklady pohybují v rozmezí 45 – 60 mil. Kč, přičemž náklady na vlastní technologii představují 65 – 75%. Pro Českou republiku jsou o něco relevantnější data uváděné pro Německo, kde se uvádí náklady na technologii cca 25 mil. Kč.

Pro konkrétně uvažovanou plnicí stanici v Krnově se uvažuje pro plnění vlaků s potřebnou denní kapacitou cca 2200 kg vodíku / 24 h (viz kapitola 3.1). Z důvodů rozdílných velikostí stanic ve smyslu denní kapacity vydaného vodíku je vhodnější porovnávat měrné investiční náklady. Pro malé stanice mohou dosahovat až 350 tis. Kč/kg/den, zatím v případě stanic s velkou denní kapacitou mohou dosáhnout 65 tis. Kč/kg/den.

Pro potřeby našeho úkolu předpokládáme investiční náklady na realizaci plnicí stanice včetně kompletního technologického vybavení a pozemku na 160 mil. Kč. [2]. Jde o náklady bez samotného zařízení pro výrobu vodíku.

Uvádí se, že vlivem sériové výroby a rozvinutím trhu by měly investiční náklady na vodíkové plnicí stanice poklesnout až o 50 % do roku 2025 v porovnání s rokem 2017 (zdroj: CEC/CARB 2017).

Náklady na pořízení samotného elektrolyzérů s adekvátními provozními parametry včetně nákladů na instalaci jsou odhadovány na 100 mil. Kč> [2]

3.3.2 Provozní náklady

Souvisí s pravidelnou údržbou, servisem, opravami a případně náklady na obslužný personál. Většina výrobců a dodavatelů vodíkových plnicích stanic uvádí provozní náklady na úrovni 3 – 10 % počátečních investičních nákladů ročně. Poměrně široké rozpětí souvisí opět s velikostí stanice ve smyslu denní kapacity vydaného vodíku, využitím stanice.

Pro potřeby našeho úkolu předpokládáme provozní náklady plnicí stanice ve výši 8% investičních nákladů.

Energie uložená ve vodíku v kombinaci s palivovým článkem je přibližně 16kWh/kg vodíku. [4]. Energie uložená v naftě je rovna přibližně 10 kWh/l [4]. S těmito rovnostmi se bude uvažovat ve výpočtech pro železniční dopravu.

Pravděpodobně nebude možné zajistit potřebné množství elektrické energie z OZE. V dalším stupni bude nutno řešit zdroje OZE.

3.3.3 Cena vodíku

Cenově nejprůzračnější je vodík pocházející z chemického průmyslu jako vedlejší produkt. U vodíku z elektrolyzy se na ceně projeví investiční náklady na pořízení elektrolyzérů, a hlavně cena elektrické energie. Příznivějších podmínek lze dosáhnout, když se lokální výroba vodíku naváže na existující

infrastrukturu – v areálu elektráren (ať už obnovitelné zdroje nebo ne), měníren a obecně všude, kde lze počítat s nižší cenou elektrické energie.

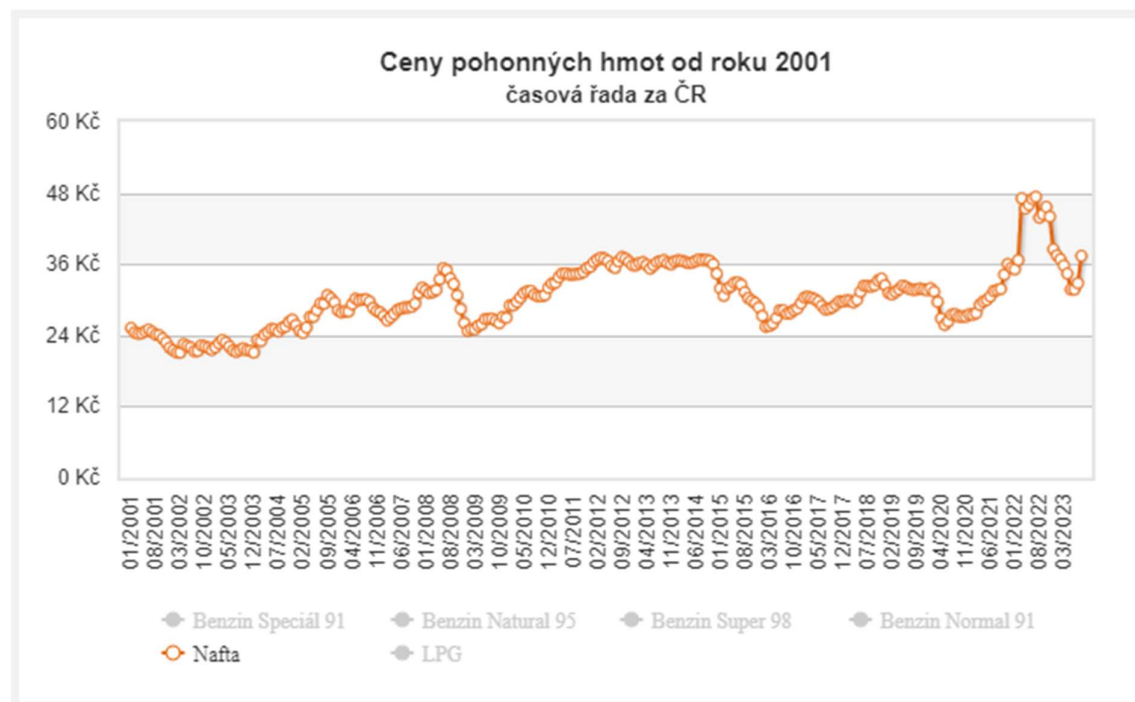
Z technické dokumentace konkrétního elektrolyzátoru H-TEC PEM 10 MW HCS bylo zjištěno, že průměrná spotřeba demineralizované H₂O pro výrobu 1 kg H₂ činí 16 l. Průměrná spotřeba elektrické energie pro výrobu 1 kg H₂ činí 61,8 kW·h.

Za předpokladu, že odhad průměrné cena demineralizované vody činí 2 Kč/l (<https://vodadestilovana.cz/>) a odhad průměrné ceny elektrické energie činí 5 Kč/kW·h (<https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>), lze vypočítat celkové náklady na výrobu 1 kg vodíku ve výši 342 Kč (14 €)/kg H₂.

Výrobní ceny obnovitelného vodíku <7 €/kg (175 Kč/kg) indikované různými zahraničními studiemi pro pobřežní, resp. jižní regiony s vysokými load faktory VTE a FVE nejsou pro vnitrozemí střední Evropy dosažitelné.

3.3.4 Cena nafty

Jak se bude vyvíjet cena nafty, je otázka velmi složitá a dalece přesahuje možnosti této studie. Globální trend v ČR lze vysledovat z následujícího obrázku.



Obr. 4: Graf vývoje ceny nafty

Zdroj: <https://www.czso.cz/csu/czso/ceny-pohonných-hmot-od-roku>

Již v minulosti prošla cena ropných produktů řadou zlomů a výchylek způsobených jak vlivy geopolitickými, environmentálními a v důsledku technologického vývoje. Upozorňujeme ale, že ekonomické hodnocení v této studii s tímto vývojem nepočítá. Cenu nejen nafty, ale i zeleného vodíku, emise, účinnost, atd. nastavuje jako konstantní a po celou dobu hodnocení je nemění.

4 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Vzhledem ke složitosti této problematiky, absenci metodiky pro výpočet nákladů, značného stupně variability vstupních údajů a ne zcela dokončenou a stabilní legislativu, je ekonomické hodnocení provedeno na úrovni porovnávání investičních nákladů, provozních nákladů a externalit:

- Varianta bez projektu (dieselové vlaky)
- Varianta s projektem (vodíkové vlaky)

Ekonomické hodnocení je zpracováno dle Rezortní metodiky platné k 08/2023 metodou CBA (CBA tabulky verze 1.11) v CÚ roku 2023.

4.1 Problematika vstupních parametrů a metodologie hodnocení

Úvodem je třeba říci, a bylo to již konstatováno výše v rámci této studie, že využitelnost vodíkové technologie v dopravním sektoru je ovlivněna celou řadou parametrů, které se v čase významně mění a měnit budou, zejména vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně novou technologii. Tento vývoj je samozřejmě obtížné predikovat. To je pro CBA analýzu, která standardně dle metodiky počítá s hodnotícím obdobím třiceti let, kritické. Také je nutné si uvědomit, že metodologie hodnocení vodíku v rámci sociologických analýz ještě není pevně uchopena a není tedy jednoduché nalézt relevantní data. To platí i pro samotnou Rezortní metodiku, která nepočítá s provozem vodíkových jednotek a nijak tuto problematiku zatím neupravuje.

Zejména s těmito skutečnostmi se bylo nutné na začátku vypořádat a nastavit parametry takovým způsobem, aby ekonomické hodnocení mohlo poskytnout aspoň nějaké relevantní výsledky a směrodatné informace. Po dohodě se zadavatelem bylo základní schéma hodnocení nastaveno tak, že se porovná varianta S projektem (vodíkové vlaky) s variantou Bez projektu (dieselové vlaky) na stejné infrastruktuře, rozdíl mezi oběma variantami tak bude pouze vozový park a infrastruktura potřebná k zajištění provozuschopnosti vodíkových vlaků. Z toho tedy vyplývá, že se nejedná o komprehensivní zhodnocení, které by porovnávalo všechny možné varianty provozu, tedy neuvažuje možnosti elektrizace, provoz bateriových jednotek, atd. Pouze analyzuje, jestli případné nasazení vodíkových jednotek může za určitých podmínek přinést dostatečné socioekonomické úspory oproti provozu vlaků dieselových. Z toho také vyplývá, že nijak neovlivňuje záměr samotné studie proveditelnosti, která primárně řeší elektrizaci předemtných úseků ve variantách V3 a V4. Referenční délka doby hodnocení byla nastavena na 30 let, a to zejména z toho důvodu, že plánovaná životnost vodíkových vlaků a jejich délka provozování je minimálně právě 30 let.

Typů vodíků (dle způsobu výroby) je celá řada. Dle způsobu výroby je samozřejmě rozdílná cena za 1 kg a také produkované emise CO₂. Ty nejméně ekologické jsou bohužel nejlevnější. Vzhledem k vývoji legislativy na ochranu životního prostředí a cílům snižovat celkové emise CO₂, se jeví jako relevantní hodnotit pouze zelený vodík (vodík vyrobený elektrolýzou vody za pomoci el. energie čistě z obnovitelných zdrojů). Jak je uvedeno výše, pokud by se uvažil současný energetický mix, cena takového vodíku by byla sice nižší, ale z pohledu dopadů na emise CO₂ by oproti dieselu nedošlo k jakémukoli zlepšení (naopak by dopady byly ještě horší). Zde se také ukazuje další stěžejní kritický bod hodnocení, a to otázka vývoje celého energetického mixu ČR, případně i dalších států EU. Otázka, jak bude probíhat transformace energetického sektoru je samozřejmě velmi složitá a dalece přesahuje možnosti této studie. Je zde nicméně nutné konstatovat, že je stěžejní a je nutné brát v potaz, že toto ekonomické hodnocení s tímto vývojem nikterak nepočítá. K této problematice přistupuje tak, že parametry jako cenu zeleného vodíku, cenu ropy, emise, účinnost, atd. nastavuje jako konstantní a po celou dobu hodnocení je nemění. Tedy například uvažuje s tím, že na výrobu 1 kg vodíku je potřeba 60 kWh energie a tento 1 kg vodíku vyprodukuje 16 kWh. Problematikou toho, že při přímém napojení do sítě je samozřejmě účinnost mnohem vyšší, se nezabývá, jelikož by to právě znamenalo nutnost analýzy vývoje struktury energetického sektoru – jestli budou v síti vznikat

velké přebytky, které se vyplatí ukládat do vodíku, atd. Jinými slovy, tím jak bude vodík dostupný, se hodnocení nezabývá. Pouze nastavuje vstupní parametr cenu (včetně distribuce) a emise CO₂ za 1 kg. Tento přístup má výhodu v tom, že se dá jednoduše provést citlivostní analýza, kdy celá tato problematika se schová pod cenu za 1 kg, respektive cenu za 1 kWh.

Ekonomické hodnocení tedy proti sobě staví investiční a provozní náklady na infrastrukturu, kterou by bylo nutné vybudovat, aby mohly být provozovány vodíkové jednotky, konkrétně tedy na plnicí stanici v Krnově, dále provozní náklady vlaků (kde se promítají pořizovací ceny vodíkových a dieselových jednotek skrze cenu za vlakohodinu a cena vodíku skrze spotřebovanou trakční energii za vlakokilometr) a externality (emise, hluk).

Ekonomické hodnocení je zpracováno pouze pro vlakovou část této studie z důvodu jednodušší interpretovatelnosti výsledků, a také z důvodu hlavního cíle, které si ekonomické hodnocení klade, tedy jestli existují takové okrajové podmínky, za kterých by investice do vodíkové technologie oproti dieselové vozbě mohla dávat smysl.

4.2 Investiční náklady

Investiční náklady reprezentují náklady pouze na pořízení nové čerpací stanice. Tyto náklady jsou doplněny o související vedlejší náklady dle standardního přístupu Správy železnic. V souladu s metodikou vstupují do ekonomického hodnocení v roce výstavby. Vybudování plnicí stanice je předpokládáno v roce 2027 s tím, že od roku 2028 by už byla provozována vodíková vozba. Tento předpoklad vychází ze současné situace ohledně legislativy a požadavků na implementaci bezemisních technologií. Investiční náklady shrnuje následující tabulka v CÚ roku 2023.

	CIN (Kč)
Projektová dokumentace	6 000 000
Zábory a nákupy pozemků	10 000 000
Stavby a konstrukce (stavební náklady)	150 000 000
Stroje a zařízení	
Technická asistence, propagace	7 000 000
Technický dozor	300 000
Celkové investiční náklady bez rezervy	173 300 000
Rezerva	7 500 000
Celkové investiční náklady včetně rezervy	180 800 000
DPH 21 %	35 868 000
Celkové investiční náklady včetně DPH	216 668 000

Tab. 7: Investiční náklady

4.3 Provozní náklady infrastruktury

Provozní náklady infrastruktury jsou uvažovány ve výši 8 % ročně ze stavebních nákladů. Životnost vodíkové plnicí stanice je uvažována ve výši 10 let. Po této lhůtě je vždy počítáno s reinvesticí.

4.4 Provozní náklady vozidel

Provozní náklady vlaků jsou zpracovány za pomoci přílohy č. 6 Rezortní metodiky. V rámci ekonomického hodnocení se počítá s provozováním linek R27, S15, S17 a S19. Je počítáno s provozováním jednovozových (DMU70, HEMU70) a dvouvozových (DMU120, HEMU120) jednotek buď ve vodíkové, či dieselové trakci. Výjimku tvoří linka R61 a S10, která je uvažována jako bateriová jednotka pro obě varianty, tedy z pohledu ekonomického hodnocení je invariantní. Linka R27 je v obou variantách uvažována hybrid el./(diesel/vodík). Jelikož metodika nepočítá s provozováním

vodíkových jednotek, bylo nutné se podrobněji zabývat cenou vodíkových souprav a poměrem údržby a oprav. Pořizovací náklady vodíkových vlaků byly stanoveny odborným odhadem dle dostupných údajů a materiálů. Byly také zohledněny již uskutečněné tendry. Výsledkem je cena za HEMU120 – 10,8 mil. CHF, za HMU70 – 7,5 mil. CHF. Ohledně rozdílu v provozování vodíkových vlaků oproti dieselovým vlakům nebylo nalezeno mnoho relevantních informací, nicméně v celkovém kontextu se jeví, že by náročnost na údržbu a opravy měla být u vodíkových jednotek o něco nižší než u těch dieselových. Poměr údržby a oprav mají tedy vodíkové vlaky nastaveny o něco lepší.

Do výpočtů trakční a netrakční energie nebylo nijak zasahováno. Jednoduše je uvažováno, že vodíkové jednotky by byly vybaveny obdobným elektrickým motorem, který by získával el. energii z vodíkového článku. Nicméně bylo nutné stanovit stěžejní parametr cenu energie. Tento problém byl již popsán výše, jako výchozí hodnota byla nastavena částka 12 EUR za 1 kg zeleného vodíku. Tato cena je uvažována včetně distribuce vodíku. Dle dostupných zdrojů se v tuto chvíli tato hodnota jeví jako ta nejvíce optimistická, které by bylo možné v rámci podmínek ČR dosáhnout.

Další parametry jsou nastaveny invariantně. Ještě je nutné konstatovat, že jako stěžejní se jeví parametr poměr časového využití vlaku. I když je pro obě varianty stejný, vzhledem k tomu, že pořizovací náklady vodíkových vlaků jsou podstatně vyšší než u dieselových, znamená pokles časového využití vlaku zhoršení výsledků ekonomického hodnocení. Také je potřeba říci, že v ekonomickém hodnocení není nikterak zohledněn fakt, že elektrické motory umožňují dosažení lepšího dynamického průběhu rychlosti.

Výkony ve vlně a vlkm dle jednotlivých linek byly stanoveny v rámci dopravní technologie a takto byly pro účely ekonomického hodnocení převzaty.

4.5 Externality

V rámci externalit je zohledněn vliv na klimatické změny, vliv na znečištění ovzduší a dopady v rámci hlukové problematiky.

Naprostě stěžejní je v rámci této kapitoly produkce CO₂, tedy vliv na klimatické změny. Hodnoty produkce CO₂ má metodika u dieselové trakce definovány, u vodíkové trakce bylo ale nutné tyto hodnoty doplnit. Pro účely tohoto hodnocení je počítáno se vstupním parametrem produkce CO₂ na 1 kg vodíku ve výši 40 gramů. Tento údaj pokrývá celý životní cyklus vodíku.

U znečištění ovzduší polutanty jako je NO_x, SO₂, atd. bylo uvažováno, že ve variantě s projektem by byly generovány jako by vlaky jezdily v elektrické trakci. I když nejsou k dispozici adekvátní data pro vodíkovou technologii, tato část byla počítána zejména z důvodu, aby byly zachyceny nevýhody dieselové technologie vzhledem k její velké produkci oxidů dusíku a tento přístup by měl být dostatečně opatrný, aby nedošlo k nadhodnocení benefitů.

V rámci hluku je zohledněn fakt, že vodíkové jednotky jsou tišší.

4.6 Výsledky ekonomického hodnocení

Při výše nastavených parametrech je výsledek ekonomické analýzy metodou CBA následující:

ENPV = - 75 086 213 Kč, ERR = 2,55%, při ceně 12 €/kg H₂. Za celé hodnotící období činí rozdíl v provozních nákladech infrastruktury přibližně -553 mil. Kč, u provozních nákladů vozidel přibližně -7 909 mil. Kč a u externalit 9 114 mil. Kč. U externalit tvoří výrazně dominantní položku úspory plynoucí z nižší produkce CO₂.

Celkový výsledek ekonomického hodnocení je tedy záporný. Během studie došlo k aktualizaci Resortní metodiky, původní výpočty, které šly k připomínkám, byly podle verze 1.10 a výsledek byl

tehdy také záporný a o cca 100 mil. Kč horší. Nicméně oproti původní verzi došlo ke snížení diskontní sazby z 5% na 3%. Také došlo ke změně výkonů v rámci dopravní technologie a některým vstupním předpokladům ekonomického hodnocení. Tyto výsledky tak nejsou úplně srovnatelné (původní výsledky jsou součástí samostatné přílohy). Pokud bychom v aktuální verzi uvažili diskontní sazbu v původní výši 5%, výsledek ekonomické analýzy by byl ve výši ENPV = - 316 199 439 Kč, ERR = 2,55%.

Jako stěžejní u vodíkové technologie se jeví parametry cena energie, pořizovací náklady vozidel a emise CO₂. Jako nejvíce volatilní a obtížně stanovitelný se jeví parametr ceny energie, pod kterým je zahrnuta celá problematika dostupnosti vodíku, jako bylo již popsáno výše.

Následující tabulka ukazuje výsledky ekonomického hodnocení, pokud by došlo ke změně těchto parametrů.

Parametr	Cena za 1 kg vodíku včetně distribuce [EUR]				
	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
ERR [%]	4,98%	3,75%	2,55%	1,38%	0,22%
ENPV [Kč]	324 450 835	124 682 311	- 75 086 213	- 274 854 737	- 474 623 260
Pořizovací náklady vodíkových vlaků	-10%	-5%	default	5%	10%
ERR [%]	5,93%	4,20%	2,55%	0,95%	-0,63%
ENPV [Kč]	472 299 830	198 606 809	- 75 086 213	- 348 779 234	- 622 472 256
Emise CO₂ z 1 kg vodíku [g]	20	30	default	50	60
ERR [%]	2,59%	2,57%	2,55%	2,54%	2,52%
ENPV [Kč]	- 68 715 311	- 71 900 762	- 75 086 213	- 78 271 664	- 81 457 115
Cena za 1l nafty včetně distribuce [Kč]	22	23	default	25	26
ERR [%]	1,59%	2,06%	2,55%	3,02%	3,50%
ENPV [Kč]	- 240 061 218	- 159 191 117	- 75 086 213	2 549 084	83 419 184

Tab. 8: Výsledky ekonomického hodnocení

Jak můžeme vidět, jak se cena vodíku blíží hodnotě 11 EUR za kg při zachování ostatních parametrů, výsledek ekonomického hodnocení se dostává do vyšších kladných čísel. Jednoduše se dá říci, že ze celospolečenského pohledu jsou při ceně blížíci se 11 EUR/kg vyšší provozní náklady dostatečně kompenzovány úsporami z emisí CO₂. Nutno říci, že tyto výsledky platí při diskontní sazbě 3%. Při diskontní sazbě 5% by platilo, že ekonomické hodnocení by se dostávalo do kladných čísel, jak by se cena vodíku dostala pod 11 euro za kg, vyšších kladných čísel by bylo dosaženo při ceně, která by se blížila 10 euro za kg. Jestli je taková cena dosažitelná není předmětem této studie. Výsledky ale ukazují na to, že pokud bude technologický vývoj v rámci této technologie příznivý a bude se vyvíjet směrem, který prezentují někteří významní představitelé na poli vodíkové technologie, aplikace vodíkové technologie by čistě oproti dieselové trakci měla dávat smysl.

V rámci analýzy citlivosti byl také analyzován teoretický scénář, pokud by průměrná spotřeba vodíku za 1 vlakokilometr odpovídala údaji, tedy 0,23 kg vodíku na jeden vlakokilometr. Protože na trati jezdí různě velké, a tedy hmotnostně rozdílné soupravy, byly jednotlivé spotřeby za vlakové jednotky nastaveny tak, aby průměrná spotřeba na 1 vlkm odpovídala právě tomuto údaji, aniž by se analyzovaly nějaké další dopady. Při zachování ostatních vstupních veličin dosahují výsledky EH kladných hodnot.

Nicméně, jak již bylo zmíněno, jedná se o čistě teoretický scénář a vzhledem ke sklonovým poměrům na trati při uvážení současných parametrů technologie nemusí být dosažitelný. Dopad poklesu spotřeby vodíku, tedy zlepšení technologie v tomto směru, má na výsledky výrazný dopad. Samozřejmě je možné, že spotřeba může být i vyšší. Tyto scénáře shrnuje následující tabulka.

Parametr	Změna ve spotřebě vodíkových vlaků				
	-10,0%	-5,0%	0,0%	5,0%	10,0%
ERR [%]	4,8%	3,66%	2,55%	1,47%	0,39%
ENPV [Kč]	295 242 924	110 078 356	- 75 086 213	260 250 781	445 415 350

Tab. 9: Výsledky ekonomického hodnocení dle průměrné spotřeby vodíku

5 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ A ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ

5.1 Srovnávací tabulka

Tabulka je orientována na stěžejní rozdíly mezi situací, kdy dojde k realizaci využití vodíkové technologie jako náhrady za dieselovou trakci.

Parametr	Varianta bez vodíkové technologie	Varianta s využitím vodíkové technologie
Investiční náklady na pořízení příslušného počtu vozidel (mil. Kč), viz dopravní technologie	2 758	4 574
Uhlíková stopa ovlivněné železniční dopravy (t CO ₂ /rok 2028)	12 298	1 990
Uhlíková stopa ovlivněné autobusové dopravy (t CO ₂ /rok 2028)	1 895	85

Tab. 10: Srovnávací tabulka variant

5.2 Závěrečné vyhodnocení

V rámci studie bylo zpracováno ekonomické hodnocení metodou CBA dle Rezortní metodiky SFDI. Metodologie hodnocení vodíku není ještě pevně uchopena, což platí i pro samotnou Rezortní metodiku, která nepočítá s provozem vodíkových jednotek a nijak tuto problematiku zatím neupravuje. Základní schéma hodnocení je nastaveno tak, že se porovnává varianta S projektem (vodíkové vlaky) s variantou Bez projektu (dieselové vlaky) na stejné infrastruktuře, rozdíl mezi oběma variantami tak je tvořen pouze vozovým parkem a infrastrukturou potřebnou k zajištění provozuschopnosti vodíkových vlaků. Linka R27 je v obou variantách uvažována hybrid el./diesel/vodík). Z toho tedy vyplývá, že se nejedná o komprehensivní zhodnocení, které by porovnávalo všechny možné varianty provozu, tedy neuvažuje možnosti elektrizace, provoz bateriových jednotek, atd. Pouze analyzuje, jestli případné nasazení vodíkových jednotek může za určitých podmínek přinést dostatečné socioekonomické úspory oproti provozu vlaků dieselových. Také se nezabývá dostupností vodíku. Okolo vodíkové technologie je stále spousta neznámých, které je těžké definovat a tato problematika dalece přesahuje rámec této studie. K výsledkům ekonomického hodnocení je tak nutné přistupovat s rezervou a jistou obezřetností. Výsledky ekonomického hodnocení jsou v závislosti na vstupních veličinách velmi volatilní, viz citlivostní analýza a jelikož některé vstupy podléhají značné nejistotě, je nutné brát v při interpretaci výsledků tento fakt v potaz. I když tedy ekonomické hodnocení dosahuje ekonomické efektivity při ceně 11,8 euro za kg vodíku, je tato efektivita velmi nestálá. Za již poměrně robustní výsledky lze považovat ty, které získáváme s tím, jak se cena vodíku včetně jeho distribuce dostává pod hranici 11 EUR/KG. Také je nutné dodat, že tyto výsledky platí při diskontní sazbě ve výši třech procent. Pokud bychom uvážili diskontní sazbu dle původní verze Rezortní metodiky ve výši 5%, robustních výsledku ekonomického hodnocení by pak bylo dosaženo s tím, jak by se cena blížila k 10 EUR/kg. Nicméně výsledky ukazují na to, že pokud by se cena zeleného vodíku včetně jeho distribuce blížila k 11 EUR/kg, aplikace vodíkové technologie by čistě oproti dieselové trakci mohla z celospolečenského pohledu dávat smysl.

Externí zdroje

- [1] Technicko-ekonomické posouzení implementace vodíkového pohonu v Ústeckém kraji, Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., 2020
- [2] Snížení energetické náročnosti a negativních vlivů na životní prostředí u železniční dopravy prostřednictvím přípravy infrastruktury pro vlaky na alternativní pohon, SŽ, 6.12.2022, prezentace
- [3] Posouzení vhodnosti provozního nasazení vodíkové jednotky, bakalářská práce, Křehota M., 2023
- [4] Snížení energetické náročnosti a ekologické zátěže ze železniční dopravy prostřednictvím přípravy infrastruktury pro vlaky na alternativní pohon. Odborná zpráva o řešení projektu za rok 2022.
- [5] Budoucnost regionální železnice v ČR, (Alternativní pohony), ALSTOM, Dan Kurucz, Pardubice 13. 4. 2023.

6 PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH:

1. Návrhové oběhy železničních jednotek na linkách S 15, S 17, S 19, R 27
2. CBA
3. PN vozidel
4. Výsledky původního EH_v1.10

PŘÍLOHA 1 – NÁVRHOVÉ OBĚHY ŽELEZNIČNÍCH JEDNOTEK NA LINKÁCH S15, S17, S19 A R27

S19 Rýmařov - Valšov (- Krnov)																		
19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1	19/1
5:27	7:27	9:27	11:27	13:27	15:27	17:27	19:27	20:42	Rýmařov	5:25	6:33	8:33	10:33	12:33	14:33	16:33	18:33	20:33
5:55	7:55	9:55	11:55	13:55	15:55	17:55	19:55	21:10	Valšov	4:57	6:05	8:05	10:05	12:05	14:05	16:05	18:05	20:05
								21:20	Bruntál	4:47								
								21:31	Milotice nad Opavou	4:36								
								21:50	Krnov	4:17								
15	15	15	15	15	15	15	15	46	km	46	15	15	15	15	15	15	15	15

Skupina vyžaduje vypravení 1 náležitosti (19/1), plnění vodičem v Krnově. Jedná se o jednu jednotku HMU70

Červeně je vyznačena jízda z místa odstavy náležitosti (Krnov), vedená v odlišných časových polohách mimo pravidelný takt, která může být variantně provedena s přepravou cestujících i bez přepravy cestujících.

R27 Olomouc - Krnov - Ostrava-Svinov - Ostrava střed																		
27/6	27/5	27/9	27/8	27/2	27/1	27/6	27/7	27/10	27/9	27/4	27/5	27/10	27/7	27/8	27/2	27/1	27/3	27/5
6:56	8:56	10:56	12:56	14:56	16:56	18:56	20:56	22:10	Olomouc	27/4	27/6	27/5	27/8	27/7	27/10	27/3	27/1	27/2
8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:15	Valšov	6:50	9:04	11:04	13:04	15:04	17:04	19:04	21:04		
8:10	10:10	12:10	14:10	16:10	18:10	20:10	22:25	Bruntál	5:45	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00		
									5:35	7:50	9:50	11:50	13:50	15:50	17:50	19:50		
4:35	6:35	8:35	10:35	12:35	14:35	16:35	18:35	20:35	5:10	7:24	9:24	11:24	13:24	15:24	17:24	19:24	21:24	
5:19	7:19	9:19	11:19	13:19	15:19	17:19	19:19		6:41	8:41	10:41	12:41	14:41	16:41	18:41	20:41		
5:32	7:32	9:32	11:32	13:32	15:32	17:32	19:32		6:28	8:28	10:28	12:28	14:28	16:28	18:28	20:28		
66	66	153	153	153	153	153	153	87	87	87	87	87	153	153	153	153	66	66

Na lince R27 je 10 jednotek HEMU120. Rozvržení na jednotlivé spoje udává číslo a barva.

S17 Vrbno pod Pradědem - Milotice nad Opavou (- Krnov)																												
17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1	17/1									
4:34	6:34	8:34	10:34	12:11	14:11	16:11	18:11	19:47	Vrbno pod Pradědem											4:30	6:05	7:50	9:50	11:50	13:29	15:29	17:29	19:29
5:08	7:08	9:08	11:08	12:45	14:45	16:45	18:45	20:11	Milotice nad Opavou											3:56	5:31	7:16	9:16	11:16	12:55	14:55	16:55	18:55
								20:30	Krnov											3:37								
20	20	20	20	20	20	20	20	34	34	km																		
Skupina vyžaduje vypravení 1 náležitosti (17/1), plnění vodíkem v Krnově. Jedná se o jednu jednotku HMU70																												
Červeně je vyznačena jízda z místa odstavy náležitosti (Krnov), vedená v odlišných časových polohách mimo pravidelný takt, která může být																												
variantně provedena s přepravou cestujících i bez přepravy cestujících.																												

S15 (Moravský Beroun -) Bruntál - Krnov - Jindřichov ve Slezsku (- Jeseník)																			
15/4	15/1	15/3	15/2	15/3	15/1	15/4	15/1	15/3	15/2	15/3	15/1	15/4	15/1	15/3	15/2	15/3	15/1	15/4	15/1
			6:28	10:28	14:28	18:28			6:12	13:32	17:32				13:10	17:10			
			6:50	10:50	14:50	18:50			5:50	9:10	13:10				13:00	17:00			
			5:00	9:00	13:00	17:00	19:00	21:00	4:55	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00			21:00
			5:11	9:11	13:11	17:11	19:11	21:11	4:44	6:49	8:49	10:49	12:49	14:49	16:49	18:49			20:49
4:30	5:30	6:30	7:30	8:30	9:30	11:30	13:30	14:30	4:25	5:10	6:30	7:30	8:30	9:30	10:30	12:30	14:30	16:30	18:30
4:58	5:58	6:58	7:58	8:58	9:58	11:58	13:58	14:58	4:25	5:10	6:30	7:30	8:30	9:30	10:30	12:30	14:30	16:30	18:30
6:00			9:00			13:00													20:30
																			22:30
60	46	23	111	23	46	111	23	46	23	51	83	23	74	23	46	74	83	23	46
			60			60				60							60		
Skupina vyžaduje vypravení 4 náležitosti (15/1, 15/2, 15/3, 15/4), plnění vodíkem v Krnově. Jedná se o 5 jednotek HMU, kdy 4 jsou provozovány celodenně a pátá je jen ve špičkách																			
Červeně jsou vyznačeny jízdy z místa odstavy náležitosti (Krnov), vedené v odlišných časových polohách mimo pravidelný takt, které mohou být variantně provedeny s přepravou cestujících i bez přepravy cestujících.																			

PŘÍLOHA 2 - CBA

Viz samostatné soubory.xlsx

PŘÍLOHA 3 – PN VOZIDEL

Viz samostatné soubory.xlsx

PŘÍLOHA 4 – EH PODLE METODIKY VERZE 1.10

Parametr	Cena vodíku				
Cena za 1 kg vodíku včetně distribuce	10,5 EUR	11 EUR	11.5 EUR	12 EUR	12,5 EUR
ENPV	- 60 868 078	- 56 562 588	- 173 993 254	- 291 423 921	- 408 854 587
Pořizovací náklady vodíkových vlaků	-10%	-5%	default	5%	10%
ENPV	5 929 590	- 84 031 832	- 173 993 254	- 263 954 676	- 353 916 098
Emise CO ₂ z 1 kg vodíku	20g	30g	default	50g	60g
ENPV	- 167 585 737	-170 789 496	- 173 993 254	- 177 197 013	- 180 400 772

Výsledky původního ekonomického hodnocení – verze 1.10