

Optimalizace ostrovního vodíkového hospodářství v zařízení pro energetické využití odpadů

**Tento výsledek je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci
Programu Národního centra kompetence**

ZPRACOVATEL

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

APT, spol. s r.o.

Česká vodíková technologická platforma

EGÚ Brno, a.s.

Západočeská univerzita

AUTORSKÝ TÝM

Bronislav Vahalík, Vojtěch Přikryl, Petr Polanský, Roman Smutný (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.)

Vladimír Dynda, Martin Levý, Luděk Mádle (APT, spol. s r.o.)

Jan Sochor (Česká vodíková technologická platforma)

Zdeněk Přibyl, Jakub Pelčák (EGÚ Brno, a.s.)

Jakub Ševčík, Jan Přikryl (Západočeská univerzita)

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility (DP001)

Obsah

1	Úvod.....	5
2	Vstupní parametry	5
2.1	Zdroj elektrické energie a tepla	5
2.2	Vozový park v lokalitě	6
2.2.1	CNG svozové vozy.....	6
2.2.2	Autobusy MHD	6
3	Výroba vodíku.....	6
4	Varianta 1 – přímé využití vodíku	7
4.1	Technologie elektrolyzéru.....	7
4.1.1	Umístění technologií v ZEVO	8
4.1.2	Energetické nároky a provozní režim vodíkového systému	9
4.2	Spotřebiče H ₂	10
4.2.1	Množství vodíku	10
4.2.2	Spotřeba autobusů.....	10
4.2.3	Plnicí okno	10
4.3	Návrh ostrovního řešení – areál ZEVO	11
4.3.1	Výroba vodíku	11
4.3.2	Technologický celek výroby.....	11
4.4	Návrh ostrovního řešení – vodíkovod.....	12
4.5	Návrh ostrovního řešení – areál vozovny dopravního podniku.....	12
4.5.1	Vodíková čerpací stanice.....	12
4.5.2	Plnicí harmonogram.....	13
5	Ekonomické zhodnocení varianty 1	13
5.1	Vstupní náklady.....	14
5.1.1	Výrobna vodíku	14
5.1.2	Vodíková čerpací stanice.....	14
5.1.3	Úložiště.....	14
5.1.4	Vodíkovod.....	14
5.1.5	Další náklady	14
5.2	Provozní náklady.....	15
5.2.1	Elektřina	15

5.2.2	Údržba	15
5.2.3	Spotřeba vody	15
5.3	Výsledná cena	16
5.4	Alternativní provozní režim	16
6	Varianta 2 – metanizace vodíku	17
6.1	Spotřebiče metanu	17
6.2	Elektrolyzér	17
6.3	Zachytávání CO ₂	17
6.4	Metanizace	18
6.4.1	Transport metanu	18
7	Kategorizace vodíku	18
8	Dotace	19
9	Čistota vodíku	20
10	Závěr	21
11	Seznam příloh	22
12	Seznam obrázků	22
13	Seznam tabulek	22
14	Seznam literatury	22
15	Seznam zkratk	23

1 Úvod

Tento dokument se zabývá optimalizací ostrovního vodíkového hospodářství v zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO), jehož primárním účelem je přeměna směsného komunálního odpadu na teplo a elektřinu. ZEVO obecně představuje spolehlivý zdroj energie, který využívá místní suroviny, a který může být vhodný jako zdroj energie pro výrobu vodíku.

Tento dokument se zaměřuje na možnosti využití elektrické energie vyrobené v ZEVO k výrobě vodíku a popisuje optimální způsoby rozvoje vodíkového hospodářství v ostrovním řešení. Areály ZEVO se zpravidla nacházejí ve větších městských aglomeracích, kde je zároveň vysoká poptávka po městské hromadné mobilitě. Z toho důvodu se nabízí možnost využití vyrobeného vodíku jako paliva pro stávající či plánovaná vozidla městské hromadné dopravy (MHD). Dokument rovněž představuje technologické řešení pro případné využití vodíku a oxidu uhličitého z odpadních plynů ZEVO k výrobě syntetického metanu, jenž by mohl sloužit jako alternativní palivo pro autobusy MHD.

2 Vstupní parametry

Pro účely optimálního návrhu uvažovaného ostrovního řešení a ověření jeho proveditelnosti je nutné vycházet ze znalosti základní parametrizace zařízení ZEVO jakožto zdroje elektrické energie, stejně jako spotřebních charakteristik vozidel MHD.

2.1 Zdroj elektrické energie a tepla

Zdrojem energie pro plánované ostrovní řešení, jak již bylo řečeno, je uvažováno spalování odpadu v ZEVO. Tento kogenerační zdroj umožňuje flexibilní řízení výroby – podle potřeby lze upřednostnit buď produkci tepla, nebo elektřiny. Dokument vychází z předpokladu, že ZEVO je vybaveno alespoň dvěma spalovacími kotly a dvěma turbínami na výrobu elektrické energie pro zajištění stálého provozu. V opačném případě (při vybavení např. pouze jedním kotlem či turbínou) by mohlo během roku docházet až k měsíčním výpadkům ve výrobě elektřiny, což by ostrovní řešení učinilo energeticky nesoběstačným.

Zpravidla se v zimě v ZEVO klade důraz na výrobu tepla, zatímco od května do září převládá výroba elektřiny, neboť poptávka po teple klesá. Při našich výpočtech budeme dále předpokládat, že mimo topnou sezónu jsou k dispozici 1–2 MW elektrické energie, které je možné využít pro výrobu vodíku. Další 1–2 MW lze poskytnout celoročně, avšak pouze v případě, že výroba vodíku bude ekonomicky výhodnější než prodej elektřiny do distribuční sítě. Hraniční cenou elektřiny pro takové rozhodnutí je 2 000 Kč/MWh, což odpovídá ceně futures kontraktů pro rok 2027.

Navíc v areálu ZEVO budeme uvažovat dostupnost zdroje tepelné energie ve formě „ostré“ páry o teplotě 400 °C a tlaku 40 bar (za cenu 800 Kč/MWh), případně páry z regulovaného odběru o teplotě 260 °C a tlaku 11,5 bar (600 Kč/MWh).

2.2 Vozový park v lokalitě

2.2.1 CNG svozové vozy

V dokumentu uvažujeme, že společnost provozující ZEVO rovněž provozuje vozidla ke sběru komunálního odpadu. Konkrétně uvažujeme provozování osmi svozových vozidel určených ke sběru komunálního odpadu, jejichž roční spotřeba činí přibližně 80 tun CNG. Navíc budeme předpokládat známé příkladové podrobné rozložení spotřeby jednotlivých vozidel během roku.

Zpravidla, u vozidel nasazených v rámci center měst se neuvažuje o přechodu na vodíkový pohon, protože jejich denní trasy jsou dostatečně krátké a lze je efektivně pokrýt pomocí bateriových elektrických vozidel. Naopak vodíkový pohon se jeví jako vhodná alternativa pro svozová vozidla operujících v okolních menších obcích a aglomeracích, která denně najíždějí více než 150 kilometrů bez možnosti doplnění paliva, či energie.

2.2.2 Autobusy MHD

Předpokládáme, že provoz MHD je zajištěn mj. pomocí autobusů poháněných stlačeným zemním plynem. Ve větších městských aglomeracích je možné uvažovat provoz vyšších desítek až nižších stovek takových vozidel [1]. Budeme dále uvažovat, že uvažovaný areál ZEVO a vozovna dopravního podniku se nachází ve vzdálenosti méně než jeden kilometr. Tato blízkost otevírá možnost využití vodíku vyrobeného z elektrické energie zařízení ZEVO – a to buď přímo, nebo jako suroviny pro výrobu syntetického metanu. Ten by mohl sloužit jako částečná náhrada CNG pro pohon stávající flotily autobusů.

Budeme uvažovat průměrnou spotřebu jednoho autobusu přibližně 47 kg CNG na 100 km, z čehož vyplývá, že roční spotřeba celé flotily se pohybuje řádově v tisících tunách CNG.

Vedle syntetického metanu se nabízí také možnost přímého nasazení vodíkových autobusů. Jednalo by se o 12m vozidla s průměrnou spotřebou kolem 10 kg vodíku na 100 km. Pořízení těchto vozidel může být v současné době podpořeno prostřednictvím dostupných dotačních programů (viz kapitola 8).

Pro efektivní využití elektrické energie v ostrovním režimu by bylo ideální, aby se výroba vodíku během letního období zvyšovala. V této době totiž ZEVO zpravidla dodává do tepelné sítě méně tepla, což umožňuje zvýšit produkci elektrické energie. Současně je v létě cena elektřiny obvykle nižší, což je důsledkem rostoucího podílu fotovoltaických elektráren na výrobě. To činí výrobu vodíku ekonomicky výhodnější.

Tento přístup však naráží na problém: v letních měsících je poptávka po městské hromadné dopravě nižší, což znamená i menší spotřebu paliva. Proto by samotné využití vodíku v MHD nebylo dostatečné. Z tohoto důvodu zvažujeme možnost celoroční výroby vodíku, která by zajistila stabilní a efektivní využití vyrobené energie.

3 Výroba vodíku

Vzhledem k tomu, že ostrovní řešení disponuje stabilním zdrojem elektrické energie, je možné uvažovat o využití všech čtyř hlavních technologií elektrolytické výroby vodíku: alkalického

elektrolyzéru (ALK), elektrolyzéru s proton výměnnou membránou (PEM), elektrolyzéru s aniontovou výměnnou membránou (AEM) a elektrolyzéru s pevnými oxidy (SOEC). U technologie SOEC navíc existuje možnost využití dostupného tepelného zdroje ke zvýšení účinnosti výroby.

Pro výběr nejvhodnější technologie byla provedena předběžná ekonomicko-technická analýza, jejímž cílem bylo stanovit výrobní kapacitu vodíku a co nejpřesněji odhadnout cenu za jeden kilogram vodíku podle jednotlivých technologií. Na základě výsledků analýzy byl jako nejvhodnější zvolen elektrolyzátor typu AEM, který díky své vysoké účinnosti umožňuje vyrábět větší množství vodíku za nižší náklady než ostatní posuzované varianty. Podrobnosti k analýze jsou uvedeny v Příloze 1 – Ekonomicko-technická analýza technologií elektrolyzéru.

Pokud by měl být vyrobený vodík využíván jako palivo pro autobusy s vodíkovými palivovými články, je z hlediska provozu vhodné umístit vodíkovou čerpací stanici (VČS) přímo v areálu vozovny dopravního podniku. Vozovny dopravních podniků se však mohou potýkat s prostorovými omezeními. Právě kvůli omezenému prostoru se jako praktičtější řešení může nabízet výroba vodíku v areálu ZEVO a jeho přeprava do VČS ve vozovně dopravního podniku. Tento model budeme předpokládat dále v tomto dokumentu a podrobněji je rozpracován v kapitole 4.

V případě, že by se kromě výroby vodíku přistoupilo i k zachytávání CO₂ ze spalin ZEVO a jeho kombinaci s vodíkem pro syntézu metanu, je nejvhodnější umístění elektrolyzéru přímo v areálu ZEVO. Toto řešení je blíže popsáno v kapitole 6.

4 Varianta 1 – přímé využití vodíku

4.1 Technologie elektrolyzéru

Pro ostrovní řešení byla zvolena technologie AEM (viz Příloha 1). Hodnoty uvedené v této příloze jsou pouze orientační a je nezbytné je upřesnit pro optimální výběr technologie ostrovního systému. V čase blížící se realizace projektu je nutné hodnoty aktualizovat, případně doplnit o nově dostupné technologie.

Řešení navržené ve variantě 1 počítá s umístěním VČS v areálu vozovny dopravního podniku, zatímco samotné elektrolyzéry budou instalovány v areálu uvažovaného ZEVO. Vyrobený vodík bude přepravován podzemním vodíkovodem mezi výrobním místem a čerpací stanicí. Trasa vodíkovodu může zcela nebo zčásti kopírovat stávající trasy produktovodů, např. horkovodu, mezi areálem ZEVO a vozovnou. Konkrétní příklad takové konfigurace je znázorněna na Obrázku 1, kde je trasa horkovodu vyznačena tmavě zeleně, areál vozovny modře, umístění vodíkových technologií v ZEVO fialově a prostor pro vodíkové technologie ve vozovně světle zeleně. Oranžově je označeno alternativní umístění vodíkových technologií v ZEVO.

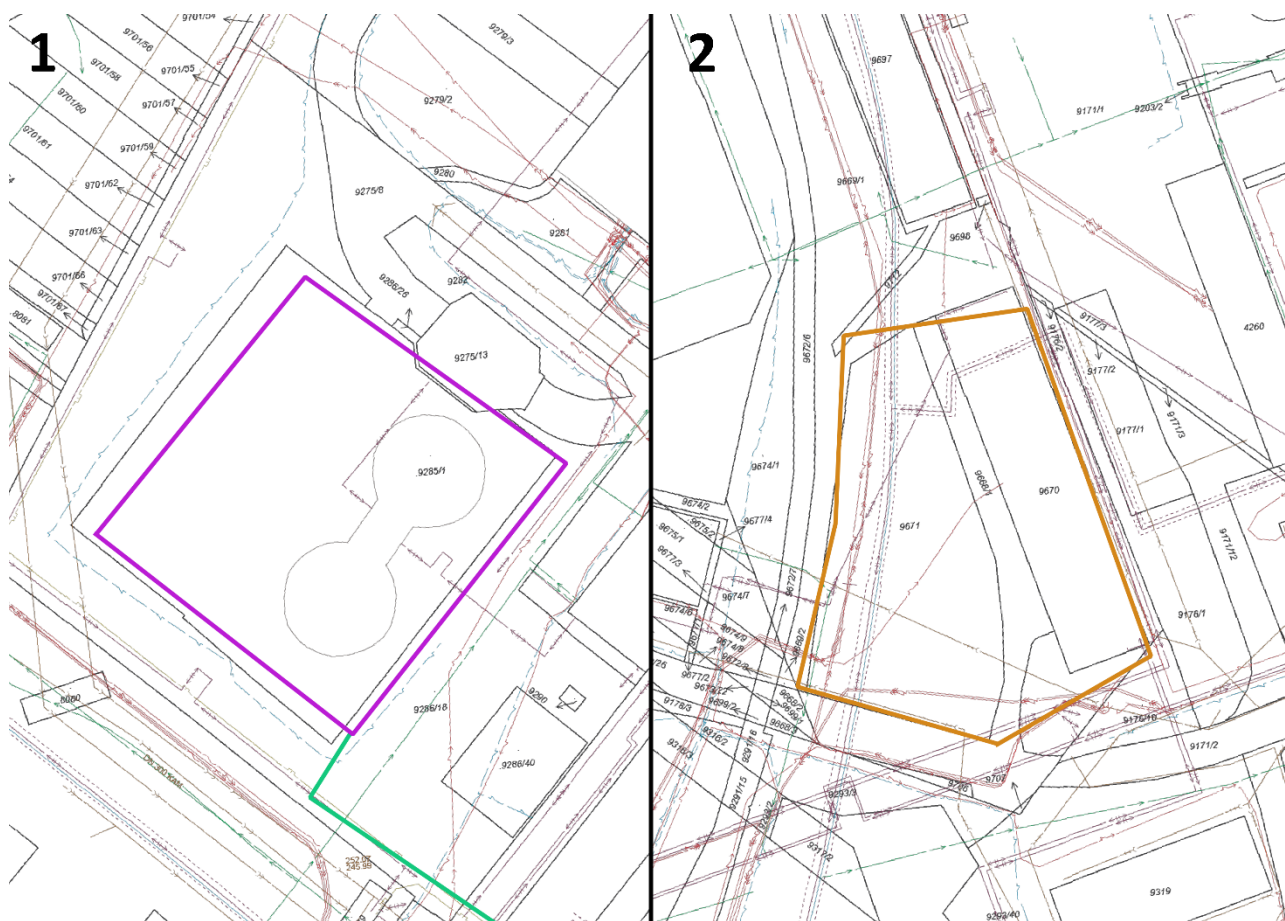


OBRÁZEK 1 – UKÁZKA MOŽNÉHO KONKRÉTNÍHO ŘEŠENÍ VARIANTY 1

4.1.1 Umístění technologií v ZEVO

Při plánování umístění vodíkových technologií do areálu ZEVO je klíčovým krokem identifikace vhodné lokality. Tento proces by měl zohlednit jak technické, tak logistické a infrastrukturní aspekty.

Příklad vhodných lokací pro konkrétní ostrovní řešení ukazuje Obrázek 2.



OBRÁZEK 2 – UKÁZKA UMÍSTĚNÍ TECHNOLOGIÍ V AREÁLU ZEVO A INŽENÝRSKÉ SÍTĚ

V rámci výběru a hodnocení vhodných lokalit pro umístění vodíkových technologií je vhodné prověřit stávající nevyužité nebo málo využívané části areálu ZEVO, které by mohly být přeměněny pro instalaci vodíkových technologií. Typicky se může jednat o plochy využívané jako parkoviště, nevyužívané manipulační prostory nebo území s vyřazenou infrastrukturou (např. staré skladovací nádrže). Výhodou je umístění v blízkosti dopravní infrastruktury (např. železnice) umožňující snadnou přepravu vodíku, například v případě jeho nadprodukce. Zásadní roli hraje také dostupnost technické infrastruktury. Např. případná přítomnost horkovodu umožňuje efektivní využití odpadního tepla z elektrolyzérů v teplárenských soustavách. Blízkost rozvodů elektřiny, vody a kanalizace je rovněž důležitým faktorem.

Při rozhodování mezi vhodnými lokalitami je vhodné porovnat nejen technickou dostupnost a prostorové možnosti, ale i vazby na ostatní provozy v areálu a dopravní vzdálenosti k odběratelům vodíku (v našem případě k vozovně dopravních podniků).

4.1.2 Energetické nároky a provozní režim vodíkového systému

V rámci navrhovaného řešení je k dispozici stálý elektrický výkon 1-2 MW po celý rok, jak bylo definováno v kapitole 2. Tento výkon bude využit nejen pro napájení elektrolyzérů, ale také pro technologie potřebné k dočištění vodíku na požadovanou kvalitu pro palivové články (99,999 %) a pro samotnou čerpací stanici.

Na základě zkušeností řešitelského týmu a konzultací s výrobcí byly stanoveny následující energetické nároky:

- Spotřeba elektrolyzáru: 53,3 kWh/kg H₂
- Spotřeba technologie čištění: 2,0 kWh/kg H₂
- Spotřeba VČS (včetně komprese a chlazení): 4,5 kWh/kg H₂

Předpokládá se využití elektrolyzáru s příkonem 1 000 kW, které jsou běžně dostupné na trhu. Konkrétní počet a provozní režim těchto zařízení budou určeny na základě počtu spotřebičů, což je detailněji popsáno v následující části.

4.2 Spotřebiče H₂

V rámci navrhovaného ostrovního řešení jsou jako jediné spotřebiče vodíku plánovány městské autobusy o délce 12 metrů s pohonem na palivový článek. Počet těchto autobusů byl stanoven na základě několika klíčových parametrů.

4.2.1 Množství vodíku

Maximální dostupné množství vodíku je uvedeno v Příloze 1. Tyto hodnoty byly následně upřesněny na základě informací uvedených v kapitole 4.1 a dále iterativně přizpůsobovány v souladu s dalšími relevantními parametry.

4.2.2 Spotřeba autobusů

Spotřeba vodíkových autobusů délky 12 metrů se podle dostupných údajů pohybuje v rozmezí 9–11 kg [2, 3] vodíku na 100 km, přičemž konkrétní hodnota závisí zejména na profilu trasy a aktuálních povětrnostních podmínkách. Pro účely tohoto návrhu ostrovního řešení byla zvolena průměrná hodnota 10 kg H₂ na 100 km. Tato průměrná spotřeba byla dále upravena podle jednotlivých měsíců v roce tak, aby odrážela sezónní výkyvy v provozu – podobně, jako kolísá spotřeba nafty u dieselových autobusů nebo spotřeba CNG u autobusů na zemní plyn ve flotile MHD. Přehled upravených hodnot uvádí Tabulka 1.

TABULKA 1 – SPOTŘEBA VODÍKOVÉHO AUTOBUSU V JEDNOTLIVÝCH MĚSÍCÍCH (KG H₂/100 KM)

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
10,23	10,15	10,02	9,89	9,84	10,00	10,00	10,00	9,84	9,89	10,02	10,13

Maximální denní nájezd jednoho autobusu byl stanoven na 300 km. Tato hodnota vychází z kapacity vodíkových nádrží u 12metrových autobusů, která se pohybuje mezi 37,5 a 39 kg H₂. Při průměrné spotřebě 10 kg H₂ na 100 km odpovídá tento dojezd spotřebě 30 kg vodíku, což znamená, že i po absolvování maximální denní trasy zůstane v nádrži přibližně 20 % její kapacity jako provozní rezerva.

4.2.3 Plnicí okno

Na základě obvyklé praxe při provozu flotily autobusů MHD se uvažuje s plněním paliva převážně během nočních hodin, kdy jsou vozidla mimo provoz. Pro návrh vodíkového systému je počítáno s dostupným časovým oknem pro doplňování v délce přibližně 8,5 hodiny. V krajním případě lze uvažovat i s mírným prodloužením této doby, nicméně návrh primárně vychází z konzervativnějšího, kratšího časového rámce odpovídajícího běžnému provozu.

4.3 Návrh ostrovního řešení – areál ZEVO

Na základě výše uvedených vstupních parametrů – tedy průměrné spotřeby vodíkových autobusů, maximálního denního nájezdu, kapacity nádrží, délky časového okna pro plnění a dostupného výkonu pro výrobu vodíku – byly vypočteny potřebné technické parametry elektrolyzérů a zároveň odvozena velikost vodíkové flotily, kterou je možné tímto způsobem efektivně obsloužit. Výsledky těchto výpočtů tvoří základ pro návrh kapacit výrobní technologie i logistického řešení vodíkového provozu.

4.3.1 Výroba vodíku

Pro zajištění stabilní výroby vodíku v ostrovním řešení byly vybrány dva AEM elektrolyzéry s výkonem 1 MW každý. Tyto elektrolyzéry budou v provozu téměř po celý rok, což může odpovídat až 8 500 hodinám ročně. Během provozu budou pracovat na úrovni 84 % svého maximálního výkonu, tedy přibližně 1,7 MW. Zbývající dostupná energie bude využita pro technologie čištění vodíku a provoz vodíkové čerpací stanice (VČS).

TABULKA 2 – PŘEHLED VÝROBY VODÍKU V OSTROVNÍM ŘEŠENÍ

Výkon	Vyrobený H ₂ (kg/h)	Vyrobený H ₂ (kg/den)
1,7 MW	32	737

Celkem elektrolyzéry vyrobí 269 t H₂/rok. Příklad konkrétní vyhrazené plochy pro umístění elektrolyzérů a navazujících technologií ukazuje Obrázek 1 (fialově).

Výrobní kapacita umožní celoročně provozovat 24 vodíkových autobusů.

4.3.2 Technologický celek výroby

Ostrovní řešení v areálu ZEVO by mělo zahrnovat kromě samotných elektrolyzérů také další důležité technologické prvky. Součástí systému je úpravna vody s napojením na splaškovou kanalizaci, která zajišťuje požadovanou kvalitu vody pro provoz elektrolyzérů, vyrovnávací zásobníky umožňující stabilizaci výroby a ukládání vyrobeného vodíku a kompresorová jednotka, která stlačuje vodík na 300 bar v kaskádním systému. Systém je rovněž vybaven zařízením pro příjem vodíku od vnějšího dodavatele, což umožňuje dodávku vodíku pomocí přepravního trajleru, nebo naopak plnění trajleru přebytečným vodíkem.

Dále je součástí technologie malá dusíková odpařovací stanice, která slouží k inertizaci elektrolyzérů a dalších technologických částí. Provoz celého zařízení je řízen centrální řídicí jednotkou, která zajišťuje optimalizaci a bezpečný chod všech technologií. Výstupní vedení vodíku je vybaveno kontrolním průtokoměrem a filtrem pro zajištění čistoty a bezpečnosti přepravovaného plynu. V případě, že by elektrolyzéry neobsahovaly vlastní laboratorní systém pro měření kvality vodíku, je navrženo doplnění analytické laboratoře. Příklad kompletního technologického návrhu celého řešení je znázorněn v Příloze 2 – Návrh ostrovního řešení, výroba vodíku.

Vyrobený vodík má po elektrolyze výstupní tlak 35 bar. Nejprve je uložen do vyrovnávacího zásobníku tvořeného dvěma vertikálními tlakovými nádobami o objemu 95 m³ (celkem 190 m³). Následně je vodík komprimován na 300 bar prostřednictvím kompresorové jednotky a uložen ve svazcích vysokotlakých lahví. Toto úložiště se skládá ze dvou samostatných celků o vodním objemu

$2 \times 17,76 \text{ m}^3$, které mají celkovou kapacitu přibližně 730 kg H_2 při tlaku 300 bar. V Příloze 2 je tento prvek označen jako Skladovací buffer.

Jak naznačuje Příloha 2, instalace 300barového úložiště může být realizována ve dvou etapách podle potřeb výkonu a počtu vodíkových autobusů. Druhá etapa by měla být navržena tak, aby neovlivnila plynulý provoz první etapy. Toto rozšíření umožní flexibilní přizpůsobení kapacity skladování v závislosti na postupném nákupu vodíkových autobusů.

4.4 Návrh ostrovního řešení – vodíkovod

Výrobní vodíku v areálu ZEVO může být s vodíkovou čerpací stanicí (VČS) ve vozovně dopravního podniku propojena vodíkovodem. Příklad trasy takového vodíkovodu znázorňuje Obrázek 1. Vodíkovod může být veden pod zemí, kde by byl vystaven téměř konstantní teplotě 8 °C. Díky této stabilní teplotě zůstane teplota přepravovaného vodíku rovněž stálá, což výrazně sníží potřebu jeho chlazení přímo u VČS.

Celková délka vodíkovodu závisí na konkrétní vzdálenosti mezi vozovnou dopravního podniku a areálem ZEVO. V ukázkovém případě činí přibližně 1,3 km, přičemž je použita trubka o průměru DN 20. Provozní tlak vodíku v potrubí bude 300 bar, což odpovídá tlaku v úložišti popsaném v předchozí kapitole.

V rámci instalace vodíkovodu může být zároveň plánováno položit do stejného výkopu i vysokonapěťový elektrický kabel. Toto nové vedení umožní přímé napájení vodíkových technologií v ZEVO a ve vozovně dopravního podniku elektřinou vyrobenou v ZEVO. Tím se sníží náklady na provoz díky eliminaci síťových poplatků.

Vedení bude navíc koncipováno jako flexibilní řešení, které může v budoucnu sloužit také pro napájení nabíjecích stanic elektrobusů, pokud budou ve vozovně zavedeny. Současně poskytne možnost napájet přímo celý areál vozovny.

Současné předpisy nijak neupravují souběh vysokonapěťového kabelu a vysokotlakého vodíkovodu o tlaku 30 MPa. Vycházíme proto z požadavků Energetického zákona, konkrétně § 46, který stanovuje, že podzemní vedení kabelů do 110 kV musí být uloženo v ochranném pásmu o šířce 1 metru, přičemž je přesně definován způsob jeho uložení. Pokud by tedy došlo k realizaci souběhu těchto dvou infrastruktur, bude nutné provést výkop o celkové šířce přibližně 2 metry, aby byla zachována minimální bezpečná vzdálenost 1 metru mezi oběma prvky.

4.5 Návrh ostrovního řešení – areál vozovny dopravního podniku

4.5.1 Vodíková čerpací stanice

V areálu vozovny dopravního podniku je uvažován vyhrazený prostor o rozměrech přibližně 30 × 20 m pro umístění vodíkových technologií. Tento prostor postačuje k instalaci vodíkové čerpací stanice spolu se všemi přidruženými zařízeními. Nikoliv však již pro technologii výroby se všemi náležitostmi. Pro takové kombinované řešení je vyhrazený prostor nedostačující. Příklad návrhu možného rozmístění technologií v areálu vozovny je uveden v Příloze 3 – Návrh ostrovního řešení, vodíková čerpací stanice.

Vodík je do areálu dopraven vodíkovodem a ukládán do úložiště s kapacitou přibližně 365 kg H₂ při tlaku 300 bar, které je v příloze označeno jako Vyrovnávací buffer. Následně je vodík komprimován pomocí kompresorové jednotky na tlak 500 bar a rozdělen do kaskádního systému rozděleného do čtyř sekcí. Každá sekce má kapacitu kolem 225 kg H₂ při 500 bar. Stejně jako v případě úložiště v areálu ZEVO může být i zde možné realizovat instalaci sekcí ve dvou etapách, což by umožnilo postupné zavádění vodíkové dopravy.

Vodík je vydáván do vozidel prostřednictvím tří samostatných výdejních stojanů. Toto řešení umožňuje současné plnění několika autobusů najednou a zvyšuje odolnost čerpací stanice vůči případným poruchám jednotlivých výdejních stojanů.

4.5.2 Plnění harmonogram

Rychlost plnění navrhované vodíkové čerpací stanice (VČS) činí 1 kg H₂ za minutu. Plnění harmonogram je třeba sestavovat s ohledem na nejnáročnější období, což je leden, kdy se denní spotřeba vodíku blíží hodnotě 737 kg. V tomto měsíci je průměrná spotřeba vodíku 10,23 kg H₂ na 100 km, jak uvádí Tabulka 1.

Při nejvyšší zátěži, tedy s dojezdem kolem 300 km, trvá naplnění nádrže jednoho autobusu přibližně 30 minut. Přistavení a odstavení autobusu u čerpací stanice zabere přibližně 5 minut na každý úkon. Na základě těchto údajů je jasné, že pro naplnění všech autobusů v daném časovém rámci je nezbytné plnit více autobusů současně.

Pro flotilu o velikosti 24 autobusů jsou nezbytné alespoň dva výdejní stojany, které umožní současné plnění autobusů. Vhodnější však je využít tři výdejní stojany. S třemi stojany lze dokončit plnění celé flotily přibližně za 5 hodin a 20 minut, což poskytuje dostatečnou časovou rezervu. V případě poruchy jednoho ze stojanů je možné zbývajících dvěma stojany stále naplnit celou flotilu za požadovaných 8,5 hodiny.

5 Ekonomické zhodnocení varianty 1

Tato část se věnuje odhadu předpokládané ceny vodíku na výdejním stojanu VČS. Cena vzniká kombinací investičních nákladů rozložených do plánované životnosti ostrovního řešení a průběžných provozních nákladů. Uvedené ceny vycházejí z dat platných ke dni zpracování dokumentu, přičemž predikce jejich budoucího vývoje není součástí tohoto dokumentu. Pro další výpočty byly použity směnné kurzy 1 € = 25,46 Kč a 1 \$ = 23,51 Kč.

Životnost většiny prvků ostrovního řešení je odhadována na 20 let. Nicméně, náklady a odpisy zařízení jsou zde rozpočítány na období 10 let, aby druhá polovina životnosti mohla přinášet zisk a umožnila tak případnou obnovu technologií. K cenám všech vstupních nákladů je navíc připočteno 10 % pro pokrytí neočekávaných výdajů a možných nepřesností v kalkulaci.

Ceny uvedené v této kapitole platí pro kompletní ostrovní řešení po dokončení všech fází výstavby 4.3.2 a 4.5.1).

5.1 Vstupní náklady

5.1.1 Výrobní vodíku

V rámci ostrovního řešení je plánováno využití dvou elektrolytických celků s výkonem 1 MW, které používají aniontovou výměnnou membránu (AEM). Součástí elektrolyzérů je také úprava vody, která zajišťuje potřebnou čistotu pro jeho provoz. Podle informací od dodavatele činí cena za oba AEM elektrolyzéry celkem 61 000 000 Kč.

Kromě samotných elektrolyzérů jsou součástí výroby i další prvky: dva transformátory a elektroinstalace v hodnotě 9 600 000 Kč, řídicí jednotka za 800 000 Kč, ventilový blok za 900 000 Kč a odpařovací stanice dusíku, která slouží k inertizaci výroby, za 1 500 000 Kč. Celková cena výroby vodíku tak dosahuje 73 800 000 Kč.

Během životnosti AEM elektrolyzérů se počítá s pravidelnou výměnou opotřebovaných komponent přibližně každých 7 let. Náklady na tuto výměnu jsou odhadovány na 20 % z pořizovací ceny elektrolyzérů.

5.1.2 Vodíková čerpací stanice

Vodíková čerpací stanice (VČS) zahrnuje několik klíčových technologických prvků. Mezi tyto komponenty patří kompresorová jednotka s tlakem 500 bar, vyrovnávací buffer, úložiště vodíku s tlakem 500 bar, chladicí jednotka a výdejní stojany. Podle odhadu dodavatele se celkové náklady na výstavbu stanice popsané v tomto dokumentu pohybují okolo 103 390 000 Kč.

5.1.3 Úložiště

Úložiště vodíku tvoří dva vyrovnávací zásobníky, dva skladovací kontejnery s provozním tlakem 300 bar a kompresorová jednotka s kompresním tlakem 300 bar. Celkové náklady na toto úložiště jsou odhadovány na 43 750 000 Kč.

5.1.4 Vodíkovod

S využitím příkladu konkrétního umístění areálu ZEVO a areálu vozovny uvažujeme vodíkovod zahrnující potrubní propojení o délce 1,3 km, tvořené trubkou Tr 26,9 x 3,6 s tlakem 300 bar (DN 20, PN 400). Náklady na výstavbu zahrnují nejen samotné potrubí, ale také práce spojené s jeho instalací, jako je protlak trubek, montáž a další stavební úpravy. Celková cena vodíkovodu pro ostrovní řešení činí přibližně 63 000 000 Kč.

V trase vodíkovodu je zároveň plánováno i vedení vysokonapětového elektrického vedení. Cena za 2 km tohoto vedení je stanovena na 5 200 000 Kč.

5.1.5 Další náklady

Kromě výše uvedených investic je nutné počítat také s náklady na projektovou přípravu ostrovního řešení. Tyto přípravné náklady byly vyčísleny na 17 675 000 Kč.

TABULKA 3 – VSTUPNÍ NÁKLADY OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ

CAPEX celkem ¹	350 531 000	Kč
Elektrolyzéry	73 800 000	Kč
Výměna komponent	12 200 000	Kč
Vodíková čerpací stanice	103 390 000	Kč

Úložiště + kompresor	43 750 000	Kč
Vodíkovod	63 000 000	Kč
VN kabel	5 200 000	Kč
Projektová příprava	17 675 200	Kč
Promítnutí CAPEX do nákladu H₂	130	Kč/kg H₂

¹Suma obsahuje 10 % navýšení na pokrytí dodatečných výdajů a financování navýšení v důsledku nepřesné kalkulace ceny.

5.2 Provozní náklady

5.2.1 Elektřina

Pro výrobu vodíku se v tomto řešení počítá s celkovou spotřebou 59,8 kWh na každý kilogram vyrobeného vodíku. Tato spotřeba zahrnuje:

- Výroba samotného vodíku: 53,3 kWh/kg H₂.
- Čištění a sušení vodíku: 2,0 kWh/kg H₂.
- Ostatní technologie (komprese, chlazení a provoz čerpací stanice): 4,5 kWh/kg H₂.

Plánuje se využívat výhradně elektřinu z uvažovaného energetického zdroje ZEVO. Na základě odhadu předpokládáme cenu elektřiny na 80 €/MWh, tedy cca 2 000 Kč/MWh. Tato cena bude použita pro všechny výpočty související s výrobou vodíku.

Vzhledem k přímému propojení obou částí ostrovního řešení s výrobním zdrojem v ZEVO se nepočítá s žádnými poplatky za využívání elektrické sítě.

5.2.2 Údržba

Údržba všech technologických komponent ostrovního řešení je spojena s každoročními výdaji. Na základě zkušeností a běžné praxe byly tyto náklady odhadnuty jako procentní podíl z pořizovací ceny jednotlivých zařízení:

- Elektrolyzéry: 1,5 % z pořizovací ceny.
- Vodíková čerpací stanice: 2 % z pořizovací ceny.
- Úložiště a kompresory: 1 % z pořizovací ceny.

Navíc se u elektrolyzérů počítá s pravidelnou výměnou KOH elektrolytu, což představuje každoroční náklad přibližně 300 000 Kč.

5.2.3 Spotřeba vody

Při výrobě 1 kg vodíku elektrolyzér spotřebuje přibližně 9 kg demineralizované vody. V praxi však kvůli procesu úpravy vody tato spotřeba dosahuje až 13 kg na kilogram vodíku [4].

Cena vody (vodné a stočné) v České republice pro rok 2024 je stanovena na 128 Kč za 1 000 litrů [5]. K této ceně je nutné připočítat přibližně 25 % nákladů na provoz demineralizační technologie. Tento odhad vychází z konzultací s výrobcí zařízení pro reverzní osmózu a byl stanoven na základě zkušeností s menšími systémy.

Vzhledem k tomu, že náklady na úpravu vody mají jen zanedbatelný vliv na celkovou cenu vyrobeného vodíku, není nutné tyto náklady stanovovat s vysokou přesností.

TABULKA 4 – PROVOZNÍ NÁKLADY OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ

OPEX celkem	36 064 000	Kč/rok
Elektřina / rok	32 308 000	Kč/rok
Údržba Elektrolyzér	1 216 000	Kč/rok
Údržba VČS	2 068 000	Kč/rok
Údržba úložiště	437 500	Kč/rok
Spotřeba vody	34 500	Kč/rok
Promítnutí OPEX do nákladu H₂	134	Kč/kg H₂

5.3 Výsledná cena

TABULKA 5 – CENA VODÍKU V OSTROVNÍM ŘEŠENÍ

Promítnutí CAPEX do nákladu H ₂	Promítnutí OPEX do nákladu H ₂	Celková cena H ₂
130 Kč/kg H ₂	134 Kč/kg H ₂	264 Kč/kg H ₂

5.4 Alternativní provozní režim

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.2, využití vodíku v městské hromadné dopravě (MHD) neumožňuje zvýšit spotřebu vodíku v letních měsících. Současný provozní režim elektrolyzérů je nastaven tak, aby vyráběly pouze tolik vodíku, kolik je potřeba pro flotilu 24 autobusů, a to rovnoměrně po celý rok.

Elektrolyzéry tak mají po většinu roku určitou výkonovou rezervu, kterou nelze plně využít kvůli absenci odběratele. Navíc je celoroční provoz omezen tím, že část dostupného výkonu (2 MW) musí být použita na napájení kompresorů, chladicích zařízení a dalších souvisejících technologií.

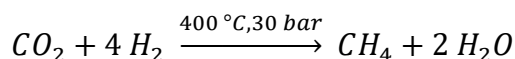
V letních měsících je však dostupný výkon navýšen na 4 MW, což umožňuje provozovat elektrolyzéry na plný výkon (2 MW) a zároveň zajistit chod všech podpůrných technologií. V tomto režimu maximální výroby by se roční produkce vodíku zvýšila na 300 tun, což je o 31 tun více než v běžném režimu.

Pokud by se podařilo najít odběratele pro tento dodatečný vodík, bylo by možné rozpočítat investiční náklady, která uvádí Tabulka 3 na větší množství vyrobeného vodíku. Tím by se snížila jednotková cena vodíku na přibližně 248 Kč/kg, tedy o 25 Kč/kg méně.

Zajištění odběratelů pro tento dodatečný vodík je proto velmi žádoucí, a to nejen kvůli ekonomické efektivitě projektu, ale i z důvodu lepšího využití elektřiny ze ZEVO v letních měsících.

6 Varianta 2 – metanizace vodíku

Tato varianta počítá s výrobou syntetického metanu kombinací vodíku získaného elektrolýzou a oxidu uhličitého (CO₂) produkovaného při spalování odpadu v zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO). Proces výroby metanu je založen na Sabatierově reakci:



Z této chemické rovnice vyplývá, že k vytvoření jednoho kilogramu metanu (CH₄) je potřeba 0,45 kg vodíku (H₂) a 2,5 kg oxidu uhličitého.

6.1 Spotřebiče metanu

Syntetický metan by byl v této variantě primárně využíván jako palivo pro autobusy na CNG provozované dopravním podnikem. Vzhledem k rozsahu vozového parku MHD ve větších městských aglomeracích však nebude možné touto produkcí plně pokrýt jejich spotřebu, což znamená, že syntetický metan bude sloužit jako doplňkový zdroj. Pokud by nebyl využit v městské dopravě, lze jej vtlačet přímo do plynárenské sítě.

6.2 Elektrolyzér

V této variantě se počítá s využitím stejných elektrolyzérů jako ve variantě 1 (viz kapitola 3). Pro prvotní posouzení této varianty je uvažován identický provozní režim jako ve variantě 1. Pro účely počátečního vyhodnocení je uvažován stejný provozní režim elektrolyzérů, i když vzhledem k odlišné energetické náročnosti procesu metanizace (v porovnání s kompresí a distribucí na vodíkové čerpací stanici) může být v praxi režim odlišný.

Jednou z hlavních výhod syntetického metanu je jeho kompatibilita se stávající plynárenskou infrastrukturou a vozidly na zemní plyn, což znamená, že do nákladů této varianty není započítána technologie vodíkové čerpací stanice a vodíkovodu. Po odečtení těchto nákladů se výrobní cena vodíku pohybuje kolem 165 Kč/kg H₂ a předpokládaná roční produkce činí 269 tun.

6.3 Zachytávání CO₂

Zdrojem oxidu uhličitého (CO₂) pro výrobu syntetického metanu v tomto řešení je CO₂ uvolněný při spalování odpadů v zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO). Sabatierova reakce, která je základem procesu výroby metanu, vyžaduje na každý kilogram vodíku 5,5násobné množství CO₂, což v tomto případě odpovídá přibližně 1 500 tunám CO₂ ročně. Toto množství je však jen zlomkem celkové produkce CO₂ v uvažovaném ZEVO, která dosahuje cca 250 000 tun ročně.

Během průzkumu trhu se ukázalo, že kapacita běžně dostupných separačních jednotek CO₂ výrazně převyšuje potřeby tohoto ostrovního řešení. Současně nebylo identifikováno další smysluplné využití zachyceného CO₂, což znamená, že by v případě realizace této varianty mohl vzniknout problém s jeho nadbytečným množstvím. V krajním případě by bylo nutné CO₂ dovážet externě.

Pro účely tohoto dokumentu však předpokládáme využití jednotky na separaci CO₂ přizpůsobené plánovaným objemům. Podle dostupných studií se náklady na separaci CO₂ z proudu spalin odrážejí v ceně syntetického metanu částkou přibližně 0,54 €/kg, tedy 14 Kč na kilogram CH₄, při uvažované životnosti technologie 20 let [6].

6.4 Metanizace

Samotný proces metanizace probíhá podle Sabatierovy reakce, která se odehrává při tlaku 30 bar a teplotě 400 °C. Vzhledem k tomu, že vodík produkovaný elektrolyzérem je již pod tlakem 30–40 bar, není nutná žádná další komprese. Potřebné teplo je navíc snadno dostupné přímo v areálu ZEVO, kde je k dispozici pára o teplotě 400 °C.

Podle odborných zdrojů se náklady na samotnou metanizaci promítají do výsledné ceny syntetického metanu částkou přibližně 0,4 €/kg, což odpovídá 10 Kč/kg CH₄, a to při uvažované životnosti technologie 20 let. Potenciální množství vyrobeného metanu je rovné dvojnásobku množství vyrobeného vodíku, tedy 538 t/rok.

Po zahrnutí všech nákladů – výroby vodíku, zachytávání CO₂ a samotné metanizace – dosahuje výrobní cena syntetického metanu v rámci ostrovního řešení 189 Kč/kg CH₄. Tato cena však nezahrnuje náklady na přepravu metanu do plnicí stanice CNG ve vozovně dopravního podniku.

6.4.1 Transport metanu

Transport syntetického metanu do vozovny je možné zajistit dvěma způsoby. První možností je přeprava pomocí silničních traktorů, zatímco druhou představuje vtlačení metanu do plynárenské sítě. V případě využití plynárenské sítě je však nutné metan před vtlačáním propanizovat, aby jeho složení odpovídalo standardu zemního plynu.

Oba tyto způsoby přepravy s sebou nesou obtížně vyčíslitelné dodatečné náklady, které mohou dále zvýšit výslednou cenu metanu na plnicí stanici. Současná cena CNG na veřejných stanicích činí přibližně 40 Kč/kg. V této cenové hladině je nepravděpodobné, že by varianta 2 byla ekonomicky přijatelná. Navíc je cena syntetického metanu výrazně vyšší než průměrná cena CNG během energetické krize v roce 2022, která dosahovala 72 Kč/kg [7].

Při srovnání s variantou 1, tedy přímým využitím vodíku v autobusech, je nutné vzít v úvahu, že na ujetí 10 km spotřebuje autobus 1 kg H₂ nebo 5 kg CNG. To znamená, že výrobní cena syntetického metanu bez dalších nákladů činí 945 Kč na 10 km, zatímco u vodíku je to 288 Kč. Z těchto údajů je patrné, že varianta 1 je výrazně výhodnější, a proto varianta 2 nebude dále rozvíjena.

7 Kategorizace vodíku

V navrhovaném ostrovním řešení je pro výrobu vodíku využívána elektrická energie získaná spalováním odpadu. Jelikož však energetické využití odpadu není považováno za obnovitelný zdroj energie, nelze tímto způsobem vyrábět plně obnovitelný RFNBO vodík, jak jej definuje evropská legislativa [8].

Podle údajů v praxi provozovaných ZEVO dosahuje emisní stopa elektřiny vyrobené v zařízení ZEVO hodnoty kolem 1 t CO₂ na 1 t spáleného směsného komunálního odpadu (SKO). Z tohoto množství může biologická složka tvořit např. až 60 %, což znamená, že emise z této části představují uhlík, který byl dříve zachycen biologickými procesy. Pokud vezmeme v úvahu pouze emise CO₂ nebiologického původu a zohledníme využití nejúčinnějšího elektrolyzáru SOEC, emisní stopa vodíku vyrobeného v tomto řešení podle přibližného výpočtu překračuje hranici 3,38 kg CO₂ na 1 kg H₂.

zhruba dvojnásobně. Tato hodnota představuje limit pro nízkouhlíkový vodík podle evropských pravidel.

Z tohoto důvodu nelze očekávat, že by navrhované řešení mohlo získat dotační podporu jako nízkouhlíkový projekt, protože podpora je navázána primárně na výrobu obnovitelného vodíku. Je však důležité zdůraznit, že v době dokončení tohoto dokumentu nebyla finální legislativní definice pravidel pro výrobu nízkouhlíkových paliv dosud přijata. Výše uvedené závěry tak vycházejí z aktuálně dostupných návrhů, které se mohou ještě změnit.

Pozn.: Uvedený výpočet emisní stopy nezohledňuje snížení emisí dosažené nahrazením fosilních paliv ve vozovém parku dopravního podniku vodíkem nebo syntetickým metanem. Současné návrhy pravidel pro výrobu nízkouhlíkových paliv totiž neumožňují tyto úspory zahrnout do kategorizace finálního produktu.

8 Dotace

Jak bylo popsáno v kapitole 7 výroba vodíku v ostrovním řešení nesplňuje podmínky pro současně dostupné dotační tituly které jsou zaměřené primárně na RFNBO vodík. Pro výstavbu VČS je možné dotační podporu získat, nicméně podmínkou všech dotačních „vodíkových“ titulů vypsanych k datu tvorby tohoto dokumentu je, že se příjemce dotace zavazuje vydávat od roku 2035 pouze RFNBO vodík. Tato podmínka přináší nejistotu ohledně zdroje vodíku po tomto roce a ukazuje se jako významná překážka k realizaci vodíkových dopravních projektů v České republice. Z tohoto důvodu se pro ostrovní řešení neuvažuje s běžnou dotační podporou na VČS.

Alternativní cestou je podpora v rámci programu OP TAK Služby infrastruktury (např. běžící výzva II - <https://optak.gov.cz/sluzby-infrastruktury-vyzva-ii/a-522/>), který je zaměřen na vytvoření výzkumné infrastruktury (zařízení sloužící pro výzkum – sběr provozních dat a možnost provádět výzkum, vývoj a inovace a zároveň je potřeba reálné využívání a provozní uplatnění, aby data vznikala). Tento program nabízí vytvoření výzkumné infrastruktury – experimentální pracoviště pro inovace v oblasti CNG a vodíkových vozidel ve spojitosti s lokální výrobou vodíku v ZEVO. Míra dotační podpory pro dopravní podnik na vědeckou infrastrukturu je 20 % a zahrnuje všechny prvky ostrovního řešení (výroba, uskladnění, vodíkovod, plnění, vtláčení). Výhodou je možnost dotační podpory, a hlavně přístup výzkumným organizacím k této unikátní infrastruktuře, což povede k posunu znalostí v rámci ČR. Nevýhodou zůstává poměrně větší administrativní náročnost.

Alternativou výzkumného pojetí řešení a podnikových inovací je nástroj daňových odpočtů, případně odpočty na smluvní výzkum. Daňové odpočty na výzkum, vývoj a inovace (podle § 34 zákona o daních z příjmů) jsou klíčovým nástrojem podpory výzkumných a vývojových aktivit v podnikovém sektoru, a to včetně spolupráce s výzkumnými organizacemi a centry typu Národní centrum vodíkové mobility. Zde je celkový dopad výraznější s menší administrativní náročností.

Dotace na pořízení vodíkových autobusů nejsou podmíněny emisní stopou používaného vodíku, což znamená, že jsou dostupné i pro navrhované ostrovní řešení. Cena 12metrového vodíkového autobusu se v současnosti pohybuje kolem 15,5 milionu Kč, dle vysoutěžených cen [9] a informací od výrobců.

V rámci programu IROP (výzva č. 39) je možné získat podporu na nákup těchto vozidel, přičemž oprávněnými žadateli jsou kraje, obce nebo dopravci na základě smlouvy o veřejných službách v přepravě cestujících. Pro přechodové regiony je míra financování stanovena až na 70 %. Na tuto výzvu je alokována částka 3 miliardy korun a bude otevřena až do 31. prosince 2027 nebo do vyčerpání finančních prostředků.

Dále se plánuje spuštění programu TransGov v rámci Modernizačního fondu v letech 2025–2026, který by měl rovněž podpořit nákup bezemisních vozidel. Detaily tohoto programu, včetně možnosti zahrnutí autobusů třídy M2, zatím nejsou k dispozici.

V případě využití dotace z IROP by se pořizovací cena jednoho vodíkového autobusu snížila na přibližně 4,65 milionu Kč, což znamená celkovou cenu 111,6 milionu Kč za 24 vozidel.

9 Čistota vodíku

V případě využití vodíku v autobusech s palivovými články je nezbytné zajistit jeho čistotu na úrovni 5.0 (99,999 %), což odpovídá normám ČSN ISO 14687 [10] a ČSN EN 17124 [11], které definují maximální přípustné koncentrace nečistot ve vodíku určeném pro mobilitu. Standardní technologická sestava elektrolyzérů obsahuje zařízení pro sušení a dočištění vodíku, což znamená, že vodík produkovaný tímto zařízením splňuje požadovanou čistotu. Tato čistota však musí být garantována i na koncovém bodě vodíkového řetězce, což vyžaduje akreditované měření.

Prvotní odběr vzorku vodíku pro kontrolu čistoty by měl proběhnout přímo na výdejní pistoli čerpací stanice. Toto místo odběru je klíčové, protože představuje poslední bod řetězce před spotřebou, a tedy zajišťuje, že vodík splňuje všechny požadavky na čistotu. V případě zjištění nečistot mimo povolený rozsah je nutné analyzovat další odběrové body v systému a identifikovat zdroj znečištění. Návrh ostrovního řešení proto již počítá se základním měřením kvality vodíku u elektrolyzérů.

V České republice aktuálně neexistuje legislativa stanovující frekvenci měření čistoty vodíku, ale je pravděpodobné, že s rozvojem vodíkové infrastruktury budou tyto standardy zavedeny. Například v Kalifornii se kontrola provádí před spuštěním stanice, každých šest měsíců a po každém zásahu do systému [12]. Podobný přístup lze doporučit i v ČR, a to zejména kontrola při spuštění a po údržbě, které mohou způsobit kontaminaci.

Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2023/1804 o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva (AFIR) [13] již specifikuje, že nové nebo rekonstruované vodíkové čerpací stanice musí splňovat následující požadavky:

- Dodržení interoperability a palivového algoritmu podle normy EN 17127:2020 (ČSN EN 17127 [14]).
- Zajištění kvality vodíku podle normy EN 17124:2020 (ČSN EN 17124) [11]).
- Použití konektorů odpovídajících normě EN ISO 17268:2020 (ČSN EN ISO 17268) [15]).

Ačkoli toto nařízení zatím nebylo transponováno do českého právního řádu, jeho implementace je jen otázkou času. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby plánovaná čerpací stanice již v projektové fázi zohlednila tyto požadavky.

10 Závěr

Tato studie zkoumá možnosti výroby vodíku z energie získané spalováním odpadu v zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO), přičemž jsou hodnoceny dvě varianty využití tohoto vodíku. Varianta 1 se zaměřuje na přímé využití vodíku v autobusech MHD s palivovými články, zatímco varianta 2 uvažuje o jeho přeměně na syntetický metan pro provoz stávajících CNG autobusů MHD.

Ve variantě 1 je v areálu ZEVO navržena instalace elektrolyzérů o výkonu 2 MW, které stabilně vyrábějí vodík po celý rok. Tento vodík je následně stlačen na tlak 300 bar a přepravován vodíkovodem do vozovny dopravního podniku, kde slouží jako palivo pro flotilu 24 autobusů s palivovými články. Celkové řešení je navrženo s ohledem na maximální efektivitu provozu a umožňuje postupnou realizaci projektu ve více etapách. Výsledná cena vodíku na výdejním stojanu je 264 Kč/kg H₂, což je vzhledem k podmínkám v České republice velmi konkurenceschopná hodnota, zejména s ohledem na absenci dotační podpory. Možné snížení této ceny lze dosáhnout rozšířením odběratelské základny a zvýšením využití elektrolyzérů.

Varianta 2 zkoumá možnost využití vyrobeného vodíku ve spojení se zachyceným CO₂ pro výrobu syntetického metanu prostřednictvím Sabatierovy reakce. Tento metan by byl následně využíván v CNG autobusech dopravního podniku. Analýza však ukazuje, že výrobní náklady na syntetický metan jsou i za nejpříznivějších podmínek výrazně vyšší než cena běžného CNG a dokonce i vyšší než přímé využití vodíku v palivových článcích. Z tohoto důvodu se výroba syntetického metanu v rámci ostrovního řešení jeví jako ekonomicky nevýhodná a její realizace se v současné době nedoporučuje.

Na základě provedené analýzy je zřejmé, že varianta 1, tedy přímé využití vodíku v autobusech s palivovými články, může představovat efektivní a udržitelnou cestu k dekarbonizaci veřejné dopravy.

11 Seznam příloh

Příloha 1 – Ekonomicko-technická analýza technologií elektrolyzérů

Příloha 2 – Návrh ostrovního řešení, výroba vodíku

Příloha 3 – Návrh ostrovního řešení, vodíková čerpací stanice

12 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Přehled varianty 1 8

Obrázek 2 – Umístění technologií v SAKO a inženýrské sítě 9

13 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Spotřeba vodíkového autobusu v jednotlivých měsících ($\text{Kg H}_2/100 \text{ km}$) 10

Tabulka 2 – Přehled výroby vodíku v ostrovním řešení 11

Tabulka 3 – Vstupní náklady ostrovního řešení 14

Tabulka 4 – Provozní náklady ostrovního řešení 16

Tabulka 5 – Cena vodíku v ostrovním řešení 16

14 Seznam literatury

- [1] *Statistická ročenka 2023* [online]. B.m.: Sdružení dopravních podniků ČR. [vid. 2025-04-28]. Dostupné z: https://www.sdp-cr.cz/uploads/_web/vyrocní-zpravy/Statisticka-roc-enka-SDP-C-R-za-rok-2023.pdf
- [2] ONDŘEJ SMÍŠEK. *SWOT analýza - porovnání využití autobusů s alternativním pohonem v rámci MHD v Mostě a Litvínově*. září 2022
- [3] VLADIMÍR ŠEFR. CaetanoBus H2.City Gold. In: *JIVE 2 Workshop k testovacím jízdám vodíkového autobusu v České republice*. Praha. 10. leden 2023.
- [4] HENRIK TÆKKER MADSEN. Water treatment for green hydrogen: what you need to know. <https://hydrogentechworld.com> [online]. 27. říjen 2022 [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>
- [5] MICHAL KRAUS. Cena vody (vodné a stočné) v roce 2024. <https://www.zakra.cz> [online]. 18. prosinec 2023 [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.zakra.cz/blog/cena-vody-vodne-a-stocene-v-roce-2024>

- [6] WELCH, Alex J., Ibadillah A. DIGDAYA, Ron KENT, Paul GHOUASSIAN, Harry A. ATWATER a Chengxiang XIANG. Comparative Technoeconomic Analysis of Renewable Generation of Methane Using Sunlight, Water, and Carbon Dioxide. *ACS Energy Letters* [online]. 2021, 6(4), 1540–1549. Dostupné z: doi:10.1021/acsenergylett.1c00174
- [7] FT SUN. Vývoj ceny CNG. CNG+ [online]. [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/vyvoj-ceny-cng.html>
- [8] EVROPSKÁ KOMISE. *Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2023/1184 ze dne 10. února 2023, kterým se doplňuje směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 stanovením unijní metodiky, v níž jsou vymezena podrobná pravidla pro výrobu kapalných a plyných paliv z obnovitelných zdrojů nebiologického původu používaných v odvětví dopravy* [online]. [vid. 2025-03-06]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1184>
- [9] REBUS. V Ústí nad Labem budou jezdit Solaris Urbina na vodík. <https://www.busportal.cz> [online]. 13. prosinec 2021 [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/v-usti-nad-labem-budou-jezdit-solaris-urbina-na-vodik-17734>
- [10] ČSN ISO 14687 (656520) *Kvalita vodíkového paliva - Specifikace produktu*. září 2020
- [11] ČSN EN 17124 (697281) *Vodíkové palivo - Specifikace produktu a zajištění kvality pro čerpací stanice s výdejem plynného vodíku - Aplikace palivových článků s protonvýměnnou membránou (PEM) pro vozidla*. září 2022
- [12] TRANSPORTATION AND TOXICS DIVISION CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. *Appendix C Hydrogen refueling station requirements* [online]. 2. září 2020 [vid. 2025-03-06]. Dostupné z: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-08/fy1920_ccssolicitation_appc_h2fuelingstation.pdf
- [13] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU (Text with EEA relevance)*. 13. září 2023
- [14] ČSN ISO 17127 (697280) *Venkovní výdejní vodíkové čerpací stanice na plyný vodík s plnicími protokoly*. srpen 2024
- [15] ČSN EN ISO 17268 (656521) *Plynný vodík - Spojovací zařízení pro doplňování paliva pro pozemní vozidla na plyný vodík*. červenec 2022

15 Seznam zkratk

MHD – městská hromadná doprava

FVE – fotovoltaická elektrárna

CNG – stlačený zemní plyn (compressed natural gas)

LNG – zkapalněný zemní plyn (liquified natural gas)

TNS – tlaková nádoba stabilní

VČS – vodíková čerpací stanice

DN – jmenovitá světlost (diametre nominal)

PN – jmenovitý tlak (pressure nominal)

DPH – daň z přidané hodnoty

PEM – (elektrolyzér) s proton výměnnou membránou (proton exchange membrane)

ČNB – Česká národní banka

CAPEX – Investiční náklady (Capital expenditures)

OPEX – Provozní náklady (Operational expenditures)

OPD – Operační program Doprava

IROP – Integrovaný regionální operační program

SFŽP – Státní fond životního prostředí

ČR – Česká republika

EU – Evropská unie

NTL – Nízkotlaký (plynovod)

Příloha 1 – Ekonomicko-technická analýza technologií elektrolyzáru

1 Technologie a provozní režimy

Uvažované technologie pro ostrovní řešení jsou následující:

- Alkalický elektrolyzáru (ALK)
- Elektrolyzáru s proton výměnnou membránou (PEM)
- Elektrolyzáru s aniontovou výměnnou membránou (AEM)
- Elektrolyzáru s pevnými oxidy (SOEC)

Pro všechny typy elektrolyzáru platí, byly porovnávány 3 provozní režimy:

1. Pro elektrolyzáru a přidružené systémy je k dispozici 2 MW elektrického výkonu po celý rok
2. Pro elektrolyzáru a přidružené systémy je k dispozici 2 MW elektrického výkonu po celý rok a dalších 2 MW mezi květnem a zářím
3. Pro elektrolyzáru a přidružené systémy je k dispozici 2 MW elektrického výkonu mezi květnem a zářím

V 2. provozním režimu je uvažované využití dvojnásobného množství elektrolyzáru.

2 Výkony elektrolyzáru

Výše uvažované technologie mají odlišné nároky na technologické prvky doprovodných technologií. Tedy nebude možné využít všechen výkon (2, resp. 4 MW) pouze pro napájení elektrolyzáru. Pro zjednodušení tato analýza neuvažuje technologie navazující na výrobu vodíku (např. vodíkovou stanici). Měrné spotřeby uvažovaných technologií elektrolyzáru a doprovodných technologií ukazuje Tabulka 1. Výkony elektrolyzáru byly dopočítány poměrově.

TABULKA 1 – VÝKON ELEKTROLYZÁRU PODLE DOPROVODNÝCH TECHNOLOGIÍ

Technologie elektrolyzáru	Spotřeba elektrolyzáru (kWh/kg H ₂) ¹	Spotřeba doprovodných technologií (kWh/kg H ₂)	Příkon elektrolyzáru (MW)
ALK	53,0	8	1,8
PEM	55,0	2	1,9
AEM	53,3	2	1,9
SOEC	39,4	8	1,7

¹ Hodnoty získány konzultací s dodavateli elektrolyzáru

Zvýšená spotřeba doprovodných technologií pro ALK a SOEC je způsobena tím, že vodík vyrobený v těchto typech elektrolyzáru má nižší čistotu než při využití PEM a AEM.

3 Množství vyrobeného vodíku

Odlišné výkony elektrolyzáru povedou k odlišnému množství vyrobeného vodíku. Hrubé množství vyrobeného vodíku pro jednotlivé technologie a provozní režimy ukazuje Tabulka 2.

TABULKA 2 – MNOŽSTVÍ VYROBENÉHO VODÍKU

Technologie elektrolyzáru	Provozní režim ¹	Hodinová výroba (kg)	Denní výroba ² (kg)	Roční výroba ³ (t)
ALK	1.	33	754	255
	2.	66	1 508	361
	3.	33	754	106
PEM	1.	35	807	270
	2.	70	1 614	383
	3.	35	807	113
AEM	1.	36	832	307
	2.	72	1 664	440
	3.	36	832	133
SOEC	1.	42	970	325
	2.	84	1 941	460
	3.	42	970	135

¹ 23h provoz

² 23 h denně, 7 dní v týdnu, 4 týdny v měsíci, 12 měsíců v roce

Na základě hodnot ve výše uvedených tabulkách byl spočten velmi hrubý odhad výrobní ceny 1 kg H₂. Tento odhad uvažuje využití odpadního tepla z elektrolyzáru pro ohřev teplé vody a nezahrnuje vodíkovou čerpací stanici. Ceny jsou uvedeny pro provozní režim 2, tedy provoz jednoho elektrolyzáru celoročně a provoz druhého elektrolyzáru mezi květnem a zářím. Počítá se s využitím veškeré dostupné energie.

TABULKA 3 – POROVNÁNÍ VÝROBNÍ CENY 1 KG H₂

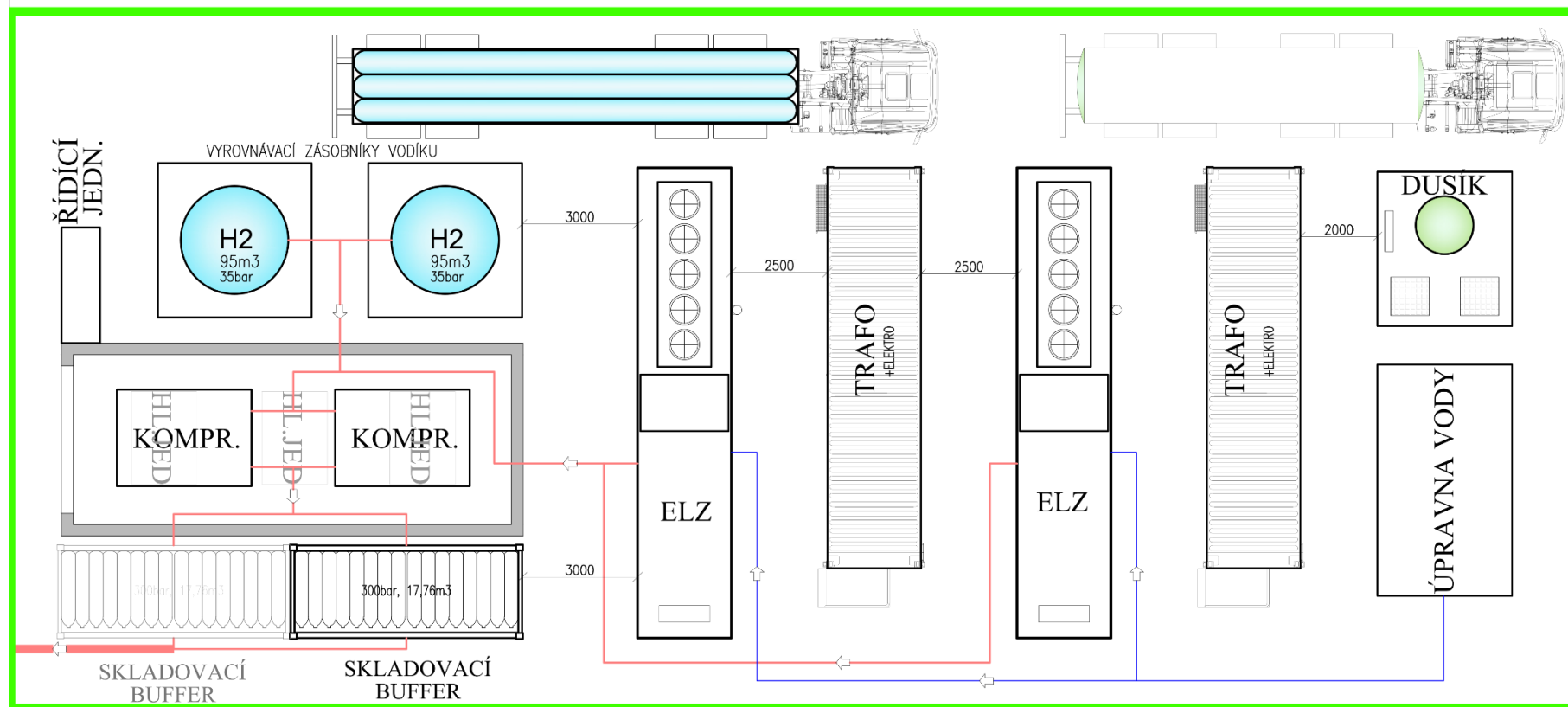
Technologie elektrolyzáru	ALK	PEM	AEM	SOEC
Cena za 1 kg H ₂	162 Kč	165 Kč	168 Kč	170 Kč
Roční výroba (t)	361	383	440	460

Tabulka 3 ukazuje, že alkalické elektrolyzáry dosahují nejnižší výrobní cenu, ale také nejnižší vyrobené množství vodíku a u SOEC elektrolyzáru je tomu naopak. Využití elektrolyzáru typu AEM je sice o něco dražší než využití PEM, nicméně značný nárůst množství vyrobeného vodíku tuto skutečnost dostatečně kompenzuje. Z tohoto důvodu je v hlavním dokumentu uvažováno pouze využití elektrolyzáru typu AEM.

4 Seznam tabulek – příloha

Tabulka 1 – Výkon elektrolyzáru podle doprovodných technologií	25
Tabulka 2 – Množství vyrobeného vodíku	26
Tabulka 3 – Porovnání výrobní ceny 1 kg H ₂	26

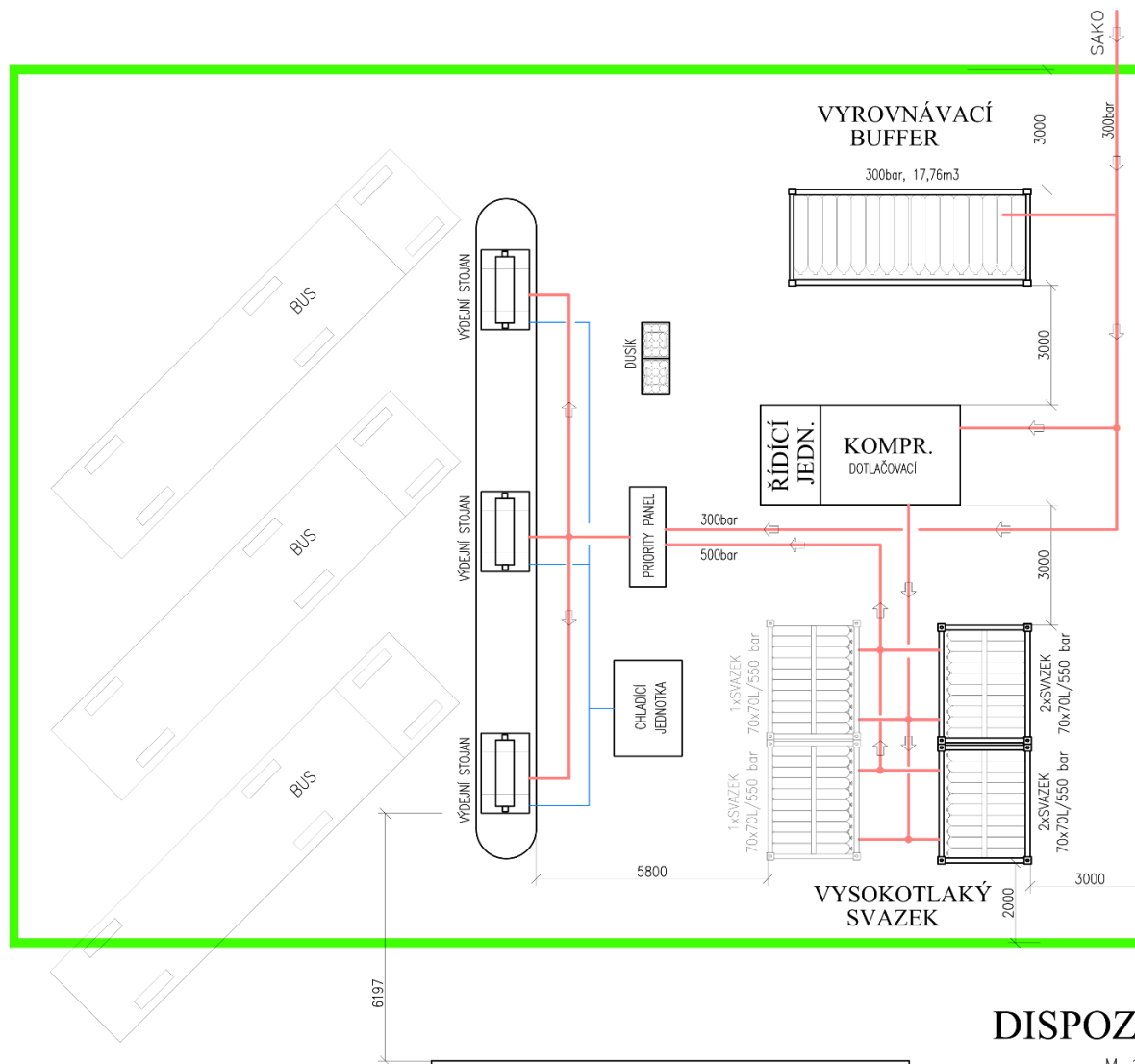
Příloha 2 – Návrh ostrovního řešení, výroba vodíku



DISPOZICE ZEVO

M 1:100

Příloha 3 – Návrh ostrovního řešení, vodíková čerpací stanice



DISPOZICE VOZOVNA

M 1:100