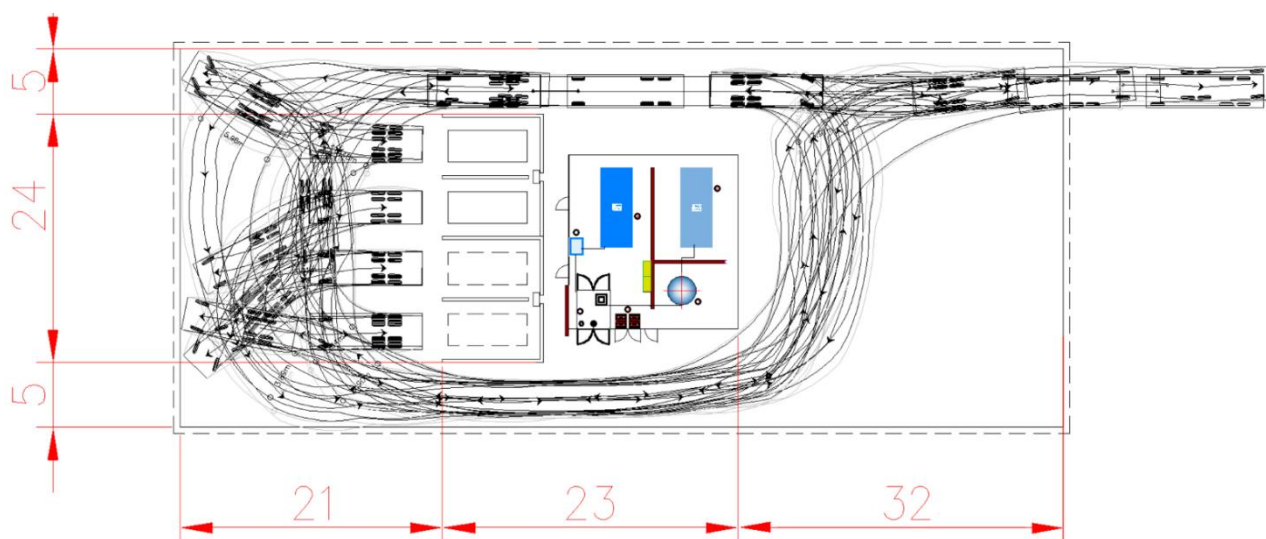


Optimalizace parametrů vodíkové čerpací stanice a jejího zásobování z externí výroby obnovitelného vodíku



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

NÁZEV VÝSLEDKU

Optimalizace parametrů vodíkové čerpací stanice a jejího zásobování z externí výroby obnovitelného vodíku

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility (DP001)

ZPRACOVATEL

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

APT, spol. s r.o.

Česká vodíková technologická platforma

EGÚ Brno, a.s.

Západočeská univerzita v Plzni

AUTORSKÝ TÝM

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

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

Jan Sochor (Česká vodíková technologická platforma)

Jan Poláček, Zdeněk Příbyl (EGÚ Brno, a.s.)

Jakub Ševčík, Jan Přikryl (Západočeská univerzita v Plzni)

Obsah

1	Úvod	5
2	Vstupní parametry předpokládané infrastruktury.....	5
2.1	Zdroj elektrické energie:	5
2.2	Lokalita vodíkové čerpací stanice	6
3	Spotřebiče H ₂	6
4	Výroba vodíku	7
4.1	Varianta 1 – „malý“ elektrolyzátor	7
4.2	Varianta 2 – „velký“ elektrolyzátor	7
4.3	Varianta 3 – „velký“ elektrolyzátor u VČS	8
5	Transport H ₂	8
6	Stacionární úložiště	9
6.1	Umístění u FVE	9
6.2	Umístění u VČS.....	10
7	Uvádění systému do provozu.....	11
8	Vodíková čerpací stanice.....	11
9	Ekonomické zhodnocení ostrovního řešení	12
9.1	Vstupní náklady.....	12
9.1.1	Cena výroby vodíku.....	12
9.1.2	Cena stacionárního úložiště	13
9.1.3	Cena přepravních prostředků	13
9.1.4	Kompresní stanice kontejnerů	13
9.1.5	Cena VČS	13
9.2	Provozní náklady	13
9.2.1	Elektřina	13
9.2.2	Cena transportu	14
9.2.3	Údržba	14
9.2.4	Voda	14
9.3	Dotace	15
9.4	Autobusy	16
10	Čistota vodíku.....	16
11	Závěr.....	17
12	Seznam příloh.....	18

13	Seznam obrázků	18
14	Seznam tabulek	18
15	Seznam literatury	18
16	Seznam zkratek	19

1 Úvod

K výrobě vodíku, především pak k výrobě obnovitelného vodíku spadajícího do kategorie obnovitelného paliva nebiologického původu (RFNBO – Renewable Fuels of Non-biological Origin), se předpokládá s výhodou využití zdrojů obnovitelné energie jako např. fotovoltaických elektráren (FVE). Tento dokument popisuje způsob ověření metody návrhu využití takto vyráběného vodíku formou výstavby vodíkové čerpací stanice a jejího zásobování z externí výroby obnovitelného vodíku případně samotné výroby vodíku elektrolyzérem při využití právě většího obnovitelného zdroje elektrické energie.

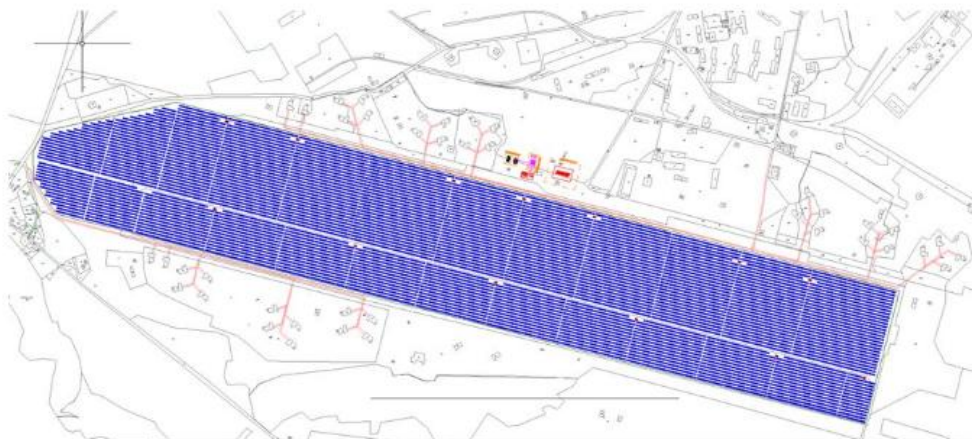
Tato navržená vodíková čerpací stanice je plánována pro uspokojení spotřeby vodíku při přechodu k vodíkové mobilitě v příměstské dopravě. Dokument diskutuje a ověřuje možnost transferu a umístění výroby vodíku mezi lokalitou zdroje elektrické energie (FVE) a navrhovanou výdejní vodíkovou čerpací stanicí (VČS). Dokument dále řeší a ověřuje návrh technických parametrů infrastruktury nutné k zavedení vodíkové dopravy do příměstských autobusů vybraného většího (např. krajského) města v podmínkách České republiky.

2 Vstupní parametry předpokládané infrastruktury

Pro účely ověření metody návrhu vodíkové čerpací stanice a jejího zásobování z externí výroby obnovitelného vodíku je uvažována znalost parametrů výchozí infrastruktury sestávající ze zdroje elektrické energie pro výrobu H_2 a znalost alespoň rámcových požadavků na umístění plánované VČS a požadavků na její dimenzování (např. množství vydávaného H_2).

2.1 Zdroj elektrické energie:

Pro další návrh se předpokládá existence většího (ve smyslu špičkového výkonu) obnovitelného zdroje elektrické energie s případnou sezónní variabilitou ve výrobě. Takovým konkrétním zdrojem může být například fotovoltaická elektrárna. Dále v dokumentu budeme konkrétně uvažovat FVE o špičkovém výkonu větším než 100 MWp, ačkoliv i varianty s nižším špičkovým výkonem (vyšší desítky MWp) by výrazně převyšovaly dále definovanou energetickou poptávku elektrolyzéru nutného pro výrobu vodíku určeného ke spotřebě navrhovaným množstvím vodíkových autobusů.



OBR. 1 – PŘÍKLAD NÁVRHU PLOCHY VĚTŠÍ FVE, PŘEVZATO Z [1]

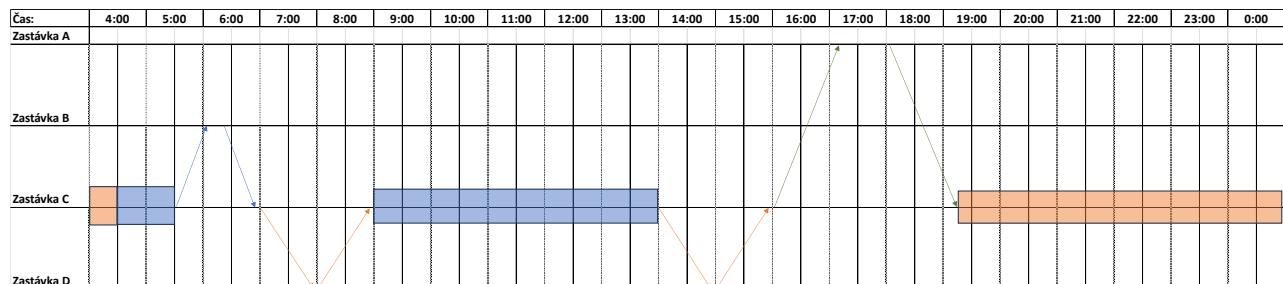
2.2 Lokalita vodíkové čerpací stanice

Při výstavbě vodíkových čerpacích stanic pro uspokojení spotřeby plánovaných vodíkových autobusů operujících v rámci příměstské/městské dopravy se zpravidla jako vhodná umístění zvažují vozovny dopravce či využívané dopravní terminály, kam bývá autobusová doprava hromadně sváděna. V tomto dokumentu budeme uvažovat umístění vodíkové čerpací stanice v areálu právě dopravního multimodálního terminálu umístěném v širším centru většího (např. krajského) města.

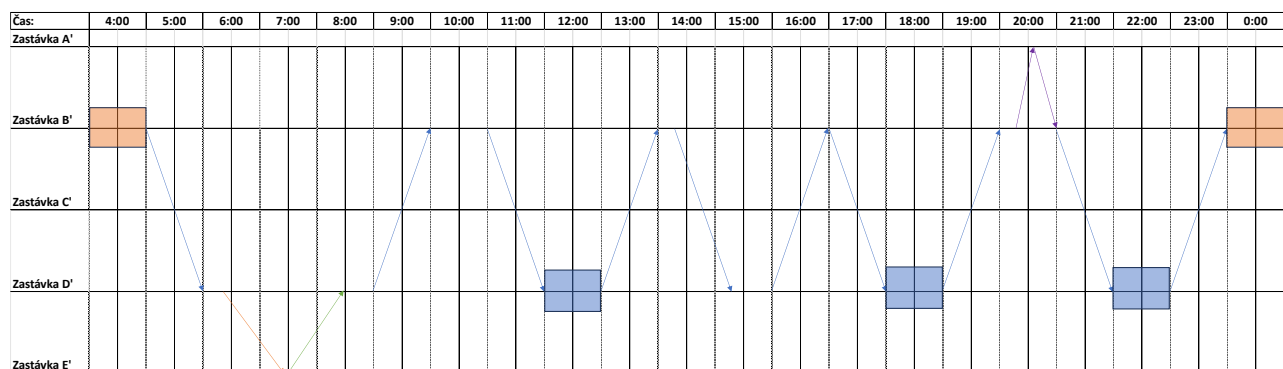
Ve spojitosti s diskutovaným větším zdrojem elektrické energie je nutné upozornit na rozdílné přístupy v umísťování těchto infrastrukturálních objektů. Zatímco multimodální dopravní terminály se umísťují zpravidla do hustě zalidněných center měst, větší obnovitelné zdroje energie (jako např. FVE o špičkovém výkonu větším než 100 MWp a v podmínkách ČR tak o implikované rozloze dosahující cca 1 km²) se většinou umísťují mimo tato sídla. Z tohoto důvodu je nutné v úvahách počítat také s případným transportem vodíku či elektrické energie. Pro náš konkrétní příklad budeme uvažovat vzdálenost cca 50 km mezi FVE a navrhovanou VČS.

3 Spotřebiče H₂

Jak již bylo řečeno, jako spotřebičem H₂ v návrhu ostrovního řešení jsou uvažována vozidla příměstské hromadné dopravy. Konkrétně v tomto dokumentu uvažujeme pro příkladné ověření metody návrhu vodíkové čerpací stanice a jejího zásobování z externí výroby obnovitelného vodíku dva 12 m vodíkové autobusy operující v pracovní dny na dvou linkách/obězích. V nepracovní dny tyto oběhy nejsou provozovány. Pro příklad uvažujeme konkrétní jízdní řády vybraných linek příměstských autobusů na Obr. 2 a Obr. 3 (modře jsou znázorněny pauzy v blízkosti terminálu – tj. v předpokládané lokalitě VČS, oranžově doba odstávky na konečné stanici).



OBR. 2 – ČASOVÝ HARMONOGRAM OBĚHU I



OBR. 3 – ČASOVÝ HARMONOGRAM OBĚHU II

Pro výpočet předpokládané spotřeby plánovaných vodíkových autobusů je možné využít hodnoty spotřebované nafty stávajících dieselových autobusů [2]. Pro diskutovaný příklad jsme od dopravce získali skutečné hodnoty spotřebované nafty současně operujících autobusů na daných oběžích za jednotlivé měsíce v roce 2023. Na základě těchto hodnot, spotřeby vodíkových autobusů v příměstském provozu a počtu pracovních dní v roce 2023 byla vypočtena denní spotřeba pro plnohodnotně ekvivalentní 12 m vodíkový autobus – viz Tabulka 1.

TABULKA 1 – DENNÍ SPOTŘEBY VODÍKU NA DISKUTOVANÝCH OBĚŽÍCH DLE MĚSÍCE (KG H₂)

Měsíc	Denní spotřeba – oběh I	Denní spotřeba – oběh II	Celková spotřeba
Leden	18,75	32,63	51,38
Únor	17,84	36,44	54,28
Březen	18,10	28,04	46,14
Duben	18,48	36,85	55,33
Květen	17,33	38,92	56,25
Červen	17,98	32,16	50,14
Červenec	15,86	36,57	52,43
Srpen	17,52	35,51	53,03
Září	18,15	34,39	52,54
Říjen	14,85	33,61	48,46
Listopad	18,20	36,14	54,34
Prosinec	18,09	34,51	52,60
Roční spotřeba	4 397,60	8 632,93	13 030,53

Celoroční spotřeba obou nahrazovaných vozidel tedy lehce přesahuje 13 t H₂.

4 Výroba vodíku

Získaná elektrická energie z FVE bude využita k výrobě vodíku za pomoci elektrolyzáru. Pro výkon navrhovaného elektrolyzáru se nabízí dvě varianty:

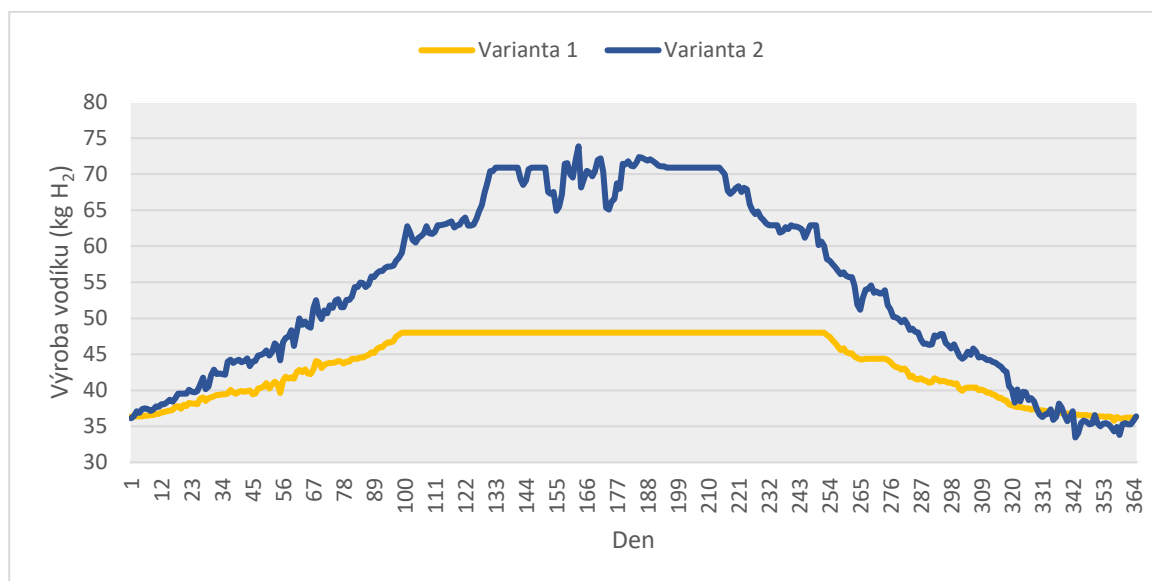
4.1 Varianta 1 – „malý“ elektrolyzáru

Tato varianta počítá s umístěním 110 kW elektrolyzáru a bateriového úložiště s výkonem 1 MW a kapacitou 1 MWh. Elektrolyzáru o tomto výkonu vyrobí za den o něco méně vodíku, než je průměrná spotřeba obou autobusů, ale tento fakt vykompenzuje víkendová výroba. Vzhledem k velikosti FVE dosahuje v této variantě elektrolyzáru vysokého stupně využití. Ve variantě 1 se vyrobí cca 16 t H₂ ročně s maximální výrobou 2 kg H₂/h.

4.2 Varianta 2 – „velký“ elektrolyzáru

Tato varianta počítá s umístěním 220 kW elektrolyzáru. Tento elektrolyzáru je v provozu, pokud je dostupná elektřina z FVE a je tedy v nočních hodinách odstavený. Ve variantě 2 se vyrobí cca 20 t H₂ ročně s maximální výrobou 4 kg H₂/h.

Výstupní tlak obou uvažovaných elektrolyzáru je 30 bar.



OBR. 4 – GRAF DENNÍ VÝROBY VODÍKU PRO OBĚ VARIANTY

V obou variantách je předpokládáno, že elektrolyzátor má prioritu v odběru elektrické energie, tedy pokud FVE produkuje elektřinu, tak může elektrolyzátor vyrábět vodík.

Jelikož mnoho prvků ostrovního řešení je totožných pro obě varianty platí dále uvedené pro obě, pokud není výslovně uvedeno jinak.

Pro umístění elektrolyzátoru se nabízí dvě lokality: 1) umístění elektrolyzátoru poblíž FVE, 2) umístění elektrolyzátoru poblíž VČS.

Ad 1): Tato varianta umožňuje přímé propojení FVE a elektrolyzátoru, je ale nutné vodík transportovat do VČS. Umístění elektrolyzátoru v blízkosti FVE by mělo být z hlediska české legislativy méně problematické než ve 2) [3].

Ad 2): Tato varianta by vyžadovala přenos elektrické energie pomocí elektrické distribuční soustavy. Odpadá tedy transport, zato je potřeba započíst do ceny energie poplatky za rezervovaný příkon a distribuční poplatky. Také může nastat problém při umístění výroby vodíku do prostoru VČS, jelikož umístění elektrolyzátoru ke stanici je z hlediska českých zákonů „velmi problematické“ [3].

Zhodnocení obou variant blíže popisuje Příloha 1.

4.3 Varianta 3 – „velký“ elektrolyzátor u VČS

Na základě výše uvedeného a ekonomické analýzy popsané v kapitole 9 je dále uvažována varianta 3, která sestává z „velkého“ elektrolyzátoru popsaného ve variantě 2 umístěného v bezprostřední blízkosti VČS.

5 Transport H₂

Tato sekce se zabývá transportem vodíku v případě umístění elektrolyzátoru u FVE. Z Tabulka 1 je zřejmé, že nejvyšší množství vodíku spotřebováno za den oběma autobusy je cca 56 kg, tedy týdenní množství je pod 300 kg. Nabízí se tedy možnost využít jako úložiště u VČS pár AB-Roll kontejnerů jejichž využitelná kapacita je cca $2 \times 168 = 336 \text{ kg H}_2 @ 300 \text{ bar}$. Tato kapacita vystačí autobusům po

celý pracovní týden, a to s dostatečnou rezervou. Nákladní vozidlo vybavené hákovým nakladačem a vlekem může vyprázdněné kontejnery odvést k elektrolyzáru pro opětovné naplnění v dostatečně dlouhém časovém okně, které je mezi pátečním a pondělním plněním.

Jelikož kontejnery budou po celý týden u VČS je třeba u elektrolyzáru vybudovat úložiště. Toto úložiště může být realizováno druhým párem AB-Roll kontejnerů a vhodně dimenzovaným stacionárním úložištěm menší kapacity s pracovním tlakem 30 bar. Funkcí stacionárního úložiště menší kapacity je také vyrovnávání tlaku vodíku mezi elektrolyzárem a kompresní stanicí pro plnění kontejnerů. Pro plnění kontejnerů bude potřeba kompresor pro stlačení H_2 na 300 bar o min. výkonu 2 kg/h resp. 4 kg/h pro variantu 2 – „velký“ elektrolyzáru. Pro tuto funkci je vhodné zvolit standardní kompresor o výkonu 5 kg/h, který s rezervou obslouží obě varianty. Technologický návrh řešení pro plnění kontejnerů ukazuje Příloha 2 – Technický návrh kompresní stanice. Součástí tohoto návrhu je také laboratoř pro kontrolu kvality H_2 . Kontejnery se budou plnit vyrobeným vodíkem přímo z výstupu kompresoru. Druhý pár AB-Roll kontejnerů sníží časovou náročnost zavážení. Řidič po přivezení vyprázdněných kontejnerů od VČS tyto složí a bez prodlevy naloží kontejnery plné.

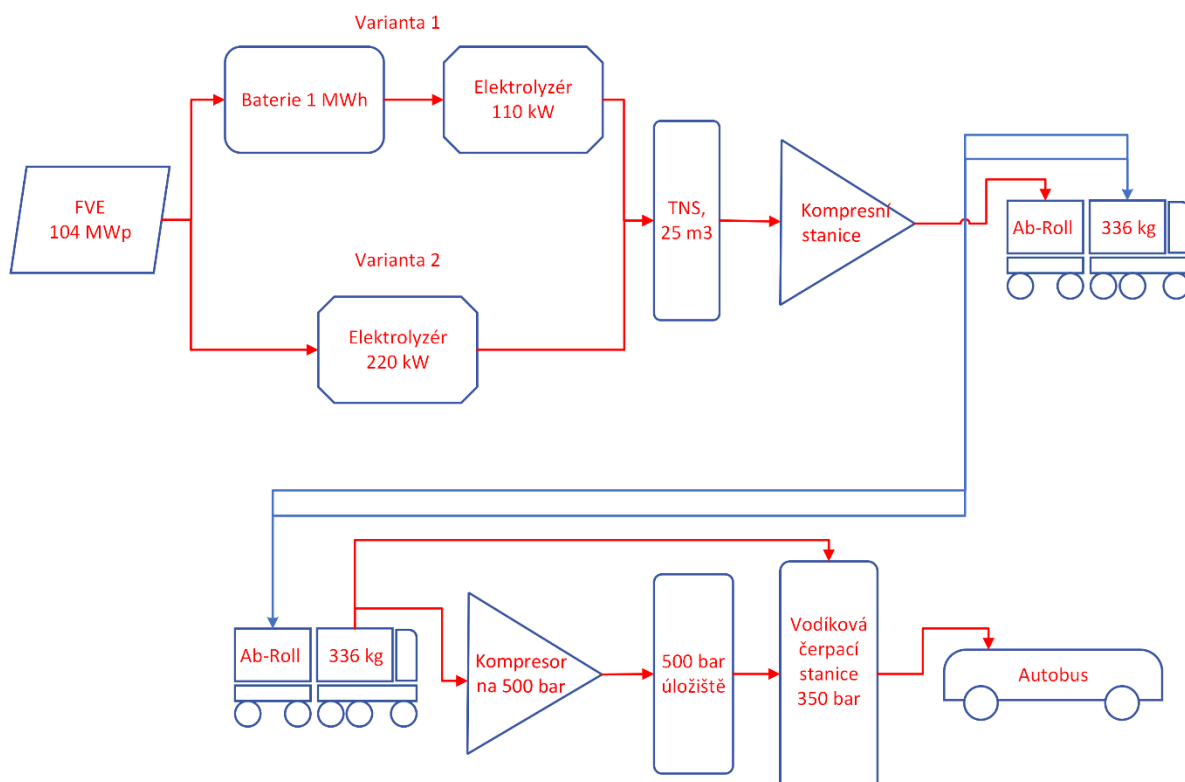
6 Stacionární úložiště

U obou uvažovaných výrobních výkonů elektrolyzáru převyšuje roční výroba vodíku nad spotřebou autobusů. Ve variantě „malý“ přebývá asi 3 t H_2 , ve variantě „velký“ přebývá až 7 t H_2 . Vzhledem k takto vysokým každoročním přebytkům je nepraktické budovat úložiště, které by pokrylo takto velké množství. Navíc vzhledem k celoročnímu dostatku obnovitelné energie není v žádném z navrhovaných variant nutnost skladovat vodík na zimní měsíce. Z tohoto důvodu se nabízí vodík prodávat na trhu. Vodík vyrobený v ostrovním řešení by měl v obou variantách splnit legislativní podmínky pro RFNBO (tedy bude plně obnovitelný). Lze tedy předpokládat, že vzhledem k pravděpodobně omezené nabídce v ČR bude o nákup zájem. Jelikož však není možné s jistotou říct, že se pro přebývajícím vodík vždy najde odběratel, je třeba počítat s variantou, kdy elektrolyzáru bude provozován pouze po dobu nezbytně nutnou pro výrobu paliva pro autobusovou dopravu. Místo výroby vodíku určeného k prodeji tedy dojde k odstávce elektrolyzáru.

Potřebná kapacita stacionárního úložiště se liší podle umístění výroby vodíku.

6.1 Umístění u FVE

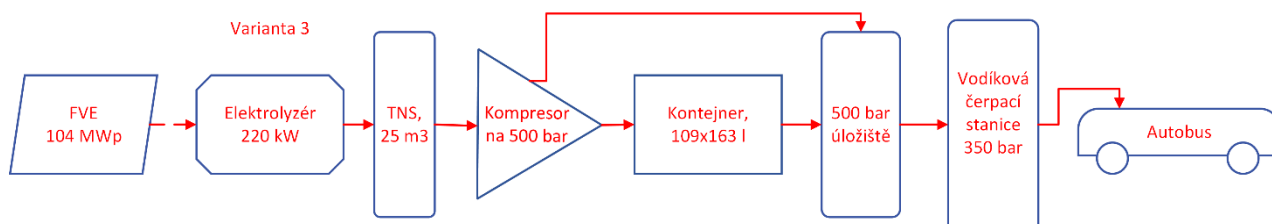
V případě umístění výroby vodíku u FVE je třeba úložiště vodíku dimenzovat tak, aby bylo schopné pojmout vodík vyrobený během doby kdy jsou kontejnery odpojené od elektrolyzáru při zavážení. Tudiž při konzervativním předpokladu, že výměna prázdných kontejnerů za plné trvá 2 h musí úložiště pojmout 4, resp. 8 kg H_2 pro variantu 1, resp. 2. Pro optimální provoz kompresoru je vhodné, aby se tlak ve stacionárním úložišti pohyboval mezi 25–30 bar, proto je vhodné použít jako úložiště standardní tlakovou nádobu stabilní (TNS) o objemu 25 m³, která kapacitní požadavky splňuje pro oba uvažované výkony elektrolyzáru.

**OBR. 5 – DIAGRAM OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ PŘI UMÍSTĚNÍ VÝROBY VODÍKU U FVE**

6.2 Umístění u VČS

V případě umístění výroby vodíku u VČS je vhodné uvažovat se stejnou 25 m³ TNS jako v předchozí sekci. V tomto případě bude nádoba sloužit pouze jako prvek vyrovnávající tlak mezi elektrolyzérem a kompresorem VČS.

Vzhledem k absenci AB-Roll kontejnerů v této variantě je nutné přidat také úložiště o pracovním tlaku 300 bar, které bude sloužit ke skladování vodíku v průběhu týdne a jako první tlakový stupeň pro plnění vozidel. Vzhledem k tomu, že o víkendu nebude docházet k odběru vodíku je třeba, aby toto úložiště pojmul alespoň tří denní výrobu vodíku v době nejvyšší výroby (2 víkendové dny + 24 h mezi plněním autobusu). Pro „velký“ elektrolyzér je nejvyšší denní výroba cca 74 kg H₂ za den. Toto množství lze i s kapacitní rezervou uskladnit např. v kontejneru se svazkem 109 lahví o objemu 163 litrů, který má využitelnou kapacitu přes 300 kg H₂.

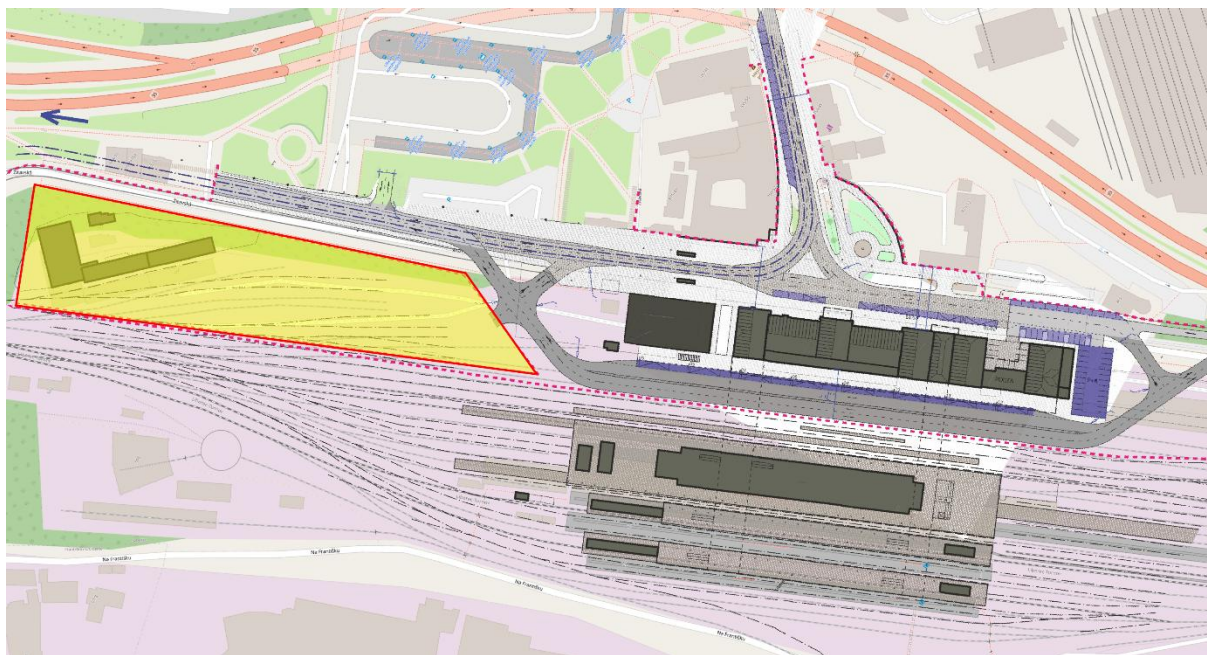
**OBR. 6 – DIAGRAM OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ PŘI UMÍSTĚNÍ VÝROBY VODÍKU U VČS**

7 Uvádění systému do provozu

V závislosti na datu spuštění ostrovního řešení se může stát, že první týden provozu vyrobí elektrolyzátor menší množství vodíku, než je potřeba pro celotýdenní provoz autobusů. Výše uvedená situace může nastat v zimních měsících. Aby se zamezilo nedostatku paliva je třeba, aby při první jízdě vodíkových autobusů bylo již naskladněno dostatečné množství vodíku. Toho lze dosáhnout nákupem dostatečného množství vodíku z externího zdroje, a tedy přednaplněním vodíkových kontejnerů. Druhou možností je pak spuštění výrobní části ostrova s předstihem oproti první jízdě autobusů.

8 Vodíková čerpací stanice

VČS může být navržena jako soukromá stanice pro využití dopravním podnikem pro diskutované vodíkové autobusy. Z tohoto důvodu je navrhován plnicí tlak stanice 350 bar, což vystačí pro všechny typy autobusů, které jsou aktuálně komerčně dostupné. Ukázka umístění VČS v přímém sousedství s uvažovaným dopravním terminálem je znázorněna na Obr. 7.



OBR. 7 – UKÁZKA UMÍSTĚNÍ NAVRHOVANÉ VČS (ŽLUTĚ) V LOKALITĚ DOPRAVNÍHO TERMINÁLU¹

Při plánování umístění VČS je třeba zohlednit vedení stávajících inženýrských sítí. Pro námi konkrétně diskutovaný příklad, se v oblasti vyznačené na Obr. 7 nenacházejí žádné inženýrské sítě. Je třeba brát v potaz vedení středotlakého plynovodu podél ulice sousedící s navrhovanou oblastí (na obrázku zcela vlevo od žlutě vyznačené plochy). V případě volby varianty 3 je třeba na tomto místě vymezit dostatečný prostor pro výrobu vodíku.

Návrhu VČS je pro příklad uveden v Příloha 3 – Technický návrh VČS. Z tohoto konkrétního návrhu je zřejmé, že samotné komponenty stanice vyžadují obdélníkový prostor o délce 11 m a šířce 6,55 m.

¹ Zdrojem podkladové mapy je [OpenStreetMap](https://www.openstreetmap.org/)
Umístění budov dopravního terminálu upraveno z [4]

Po započtení prostorů pro uložení kontejnerů pak celá stanice zabere čtvercový prostor se stranou cca 20 m. Při stavbě stanice je nutné zajistit dostatečný prostor pro manipulaci s kontejnery. Prostor potřebný k výměně kontejnerů je naznačen v Příloze 4 – Prostor pro manipulaci s kontejnery.

Provozní parametry stanice musejí odrážet harmonogram plnění autobusů a jejich denní spotřeby. V konkrétním diskutovaném příkladě oběh I končí svůj provoz v 19:00 a znovu ho začíná v 5:00. Existuje tak deseti-hodinové okno pro plnění, které stráví v zastávce v rámci diskutovaného dopravního terminálu (viz Obr. 2). Aby se plnicí okna obou autobusů rozprostřela do co největšího časového období nabízí se tento autobus plnit ráno před směnou, tedy 4:00 – 5:00. Pro oběh II je důležité zmínit, že odhad denní spotřeby v květnu tj. 38,92 kg H₂ se blíží kapacitě nádrže 12m vodíkových autobusů dostupných na trhu (37,5 – 39 kg H₂). Z tohoto důvodu je nutné, aby autobus doplnil palivo dvakrát v průběhu směny. Z Obr. 3 je zřejmé, že vozidlo oběhu II má v průběhu směny tři hodinové pauzy – od 11:30, 17:30 a 21:30, které autobus tráví na zastávce umístěné na diskutovaném dopravním terminálu, a tedy v blízkosti navrhované VČS. Nabízí se tedy zahrnout plnění do časových oken mezi 17:30 a 18:30 a mezi 21:30 a 22:30.

9 Ekonomické zhodnocení ostrovního řešení

Tato sekce se zabývá vyhodnocením předpokládané hodnoty vodíku na výdejním stojanu VČS. Cena je kombinací investičních nákladů rozložených do předpokládané životnosti ostrovního řešení a provozních nákladů. Ceny uvedené v této sekci vycházejí z údajů platných v době zhotovení dokumentu, predikce jejich budoucích vývojů není předmětem tohoto dokumentu. Pro následující výpočty jsou uvažovány kurzy 1 € = 25,46 Kč, 1 \$ = 23,51 Kč.

Předpokládaná doba životnosti pro komponenty uvažované v ostrovním řešení je 20 let. Níže uvedené náklady jsou vztaženy na 10 let, aby ostrovní řešení mohlo v druhé polovině životnost generovat zisk pro případné pozdější obnovení technologií.

K cenám všech vstupních nákladů uvedených níže je přičteno 10 % na pokrytí dodatečných výdajů a financování navýšení v důsledku nepřesné kalkulace ceny. Ceny jsou vztaženy k roku 2025, tedy cena všech vstupů je navýšena o 2 %, což je očekávaná meziroční inflace [5].

9.1 Vstupní náklady

9.1.1 Cena výroby vodíku

Vzhledem k využití FVE jako zdroje energie je nejvhodnější použít v ostrovním řešení elektrolyzátor typu PEM (s proton výměnnou membránou). U tohoto typu elektrolyzátoru se předpokládá výměna opotřebovaných komponent každých 7 let, což si pokaždé vyžádá 35 % z pořizovacích nákladů.

Z rešerše trhu vyplývá, že měrné pořizovací náklady za 1 kW příkonu PEM elektrolyzátoru jsou 2 000 \$/kW, tedy cca 47 000,- Kč, tato cena obsahuje náklady na celý systém (čištění vody, sušení vodíku, instalace atd.) [6,7,8].

Ve variantě 1 je uvažována též baterie s výkonem 1 MW a kapacitou 1 MWh. Cena za 1 kWh kapacity je dle interních informací získaných od dodavatele cca 16 000 Kč. Vzhledem k předpokládané životnosti baterie 10-15 let bude muset během životnosti ostrovního řešení dojít k výměně systému.

9.1.2 Cena stacionárního úložiště

Cena 25 m³ stacionárního úložiště uvažovaného ve všech variantách je dle dodavatele 2 400 000 Kč. Cena kontejneru uvažovaného ve variantě 3 je 4 625 000 Kč.

9.1.3 Cena přepravních prostředků

Dle informací od nejmenovaného výrobce trajlerů, je cena trajleru s ocelovými tlakovými láhvemi 440 €/kg kapacity (cca 11 200 Kč/kg). V ostrovním řešení se předpokládá využití kontejnerů o jmenovité kapacitě 220 kg @ 300 bar, které tedy mají cenu cca 2 500 000 Kč. Celková cena za všechny 4 kontejnery je cca 10 000 000 Kč.

Do ceny vodíku je vhodné také započítat poměrnou částku za nákup tahače, který bude kontejnery vozit. Běžná cena tahače je 3 500 000 Kč. Vzhledem k tomu, že tahač týdně absolvuje jednu zpáteční cestu mezi lokalitou FVE a lokalitou dopravního terminálu (v uvažované vzájemné vzdálenosti cca 50 km) bude využíván přibližně 4 h týdně. Za předpokladu provozního režimu tahače 12 h denně každý den je tak tahač pro ostrovní řešení potřeba pouze 5 % času (uvažován provozní režim 7x12 h).

9.1.4 Kompresní stanice kontejnerů

Dle dodavatele je cena kompresní stanice pro kontejnery, která vyhovuje požadavkům ostrovního řešení 17 500 000 Kč.

9.1.5 Cena VČS

Dle informací od dodavatele vodíkových čerpacích stanic by VČS splňující všechny požadavky nutné k provozu ostrovního řešení stála 28 800 000 Kč. Tato cena zahrnuje všechny technologické prvky stanice včetně kompresoru na 500 bar a vysokotlaké tlakové sekce pro plnění.

TABULKA 2 – VSTUPNÍ NÁKLADY OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	
CAPEX celkem	111 290 909	85 620 110	59 926 559	Kč
Elektrolyzér	5 172 200	10 344 400	10 344 400	Kč
PEM výměna komponent celkem	3 620 540	7 241 080	7 241 080	Kč
Baterie	31 672 240	0	0	Kč
Stacionární úložiště	2 400 000	2 400 000	2 400 000	Kč
Tahač	166 667	166 667	0	Kč
Kontejnery ¹	9 858 112	9 858 112	4 625 000	Kč
VČS	28 800 000	28 800 000	28 800 000	Kč
Kompresorová stanice	17 500 000	17 500 000	0	Kč
Promítnutí CAPEX do nákladu H₂	854	657	460	Kč/kg H₂

¹ Ve variantě 1 a 2 se jedná o AB-Roll kontejnery, ve variantě 3 jde o 300 bar stacionární kontejnery

9.2 Provozní náklady

9.2.1 Elektřina

Tento dokument uvažuje cenu elektrické energie vyrobené pomocí diskutované FVE o hodnotě 2 500 Kč/MWh. Tato cena je využita ve variantách 2 a 3. Ve variantě 1 se díky přítomnosti bateriového úložiště předpokládá cena nižší – 2 000 Kč/MWh. Elektřina nutná k výrobě vodíku je vypočtena pro obě varianty za předpokladu spotřeby 55 kWh/kg H₂.

Ve výpočtu se dále předpokládá, že elektřina pro provoz kompresorové stanice a VČS je brána ze sítě. Cena elektrické energie ze sítě je uvažována 90 €/MWh, tedy cca 2 300 Kč/MWh.

Ve variantě 3 vstupují do ceny elektřiny také poplatky za využívání přenosové soustavy. Tyto poplatky zahrnují poplatek za rezervovanou kapacitu (předp. rezervovanou kapacitu 105 % jmenovitého příkonu elektrolyzáru), poplatek za využití sítě, poplatek za podporované zdroje energie, poplatek za systémové služby a platbu OTE. Celkově tyto poplatky dávají cenu za využívání sítě ve variantě 3 ve výši cca 1 215 000 Kč/rok.

9.2.2 Cena transportu

Do ceny transportu byly započteny náklady na pohonné hmoty pro tahač, servis tahače a plat řidiče. Ceny byly získány od nejmenovaného provozovatele VČS v Česku.

Průměrná cena nafty v listopadu 2024 je 35,52 Kč/l, spotřeba tahače je 45 l/100 km, servis stojí 2 Kč/km a plat řidiče je 600 Kč/h. Dopravní vzdálenost mezi výrobnou a VČS je cca 50 km. Předpokládaná pracovní doba řidiče zahrnuje zpáteční cestu mezi výrobnou a stanicí a vyložení/naložení kontejnerů. Délka pracovní doby je odhadována na 4 h. Celkově je potřeba provést závoz 1x týdně, tedy 52x ročně.

9.2.3 Údržba

Náklady na údržbu kompresorové stanice jsou 1 % z pořizovací ceny ročně. Náklady na údržbu VČS a stacionárního úložiště jsou podle dodavatele rovněž 1 % z nákupní ceny ročně. Náklady na údržbu mobilních vodíkových kontejnerů se běžně předpokládají na 2 % nákupní ceny každý rok provozu [9]. Provozní náklady na údržbu elektrolyzáru jsou rovněž 2 % ročně [10]. Náklady na údržbu baterie jsou 1 % ročně.

9.2.4 Voda

Elektrolyzář spotřebuje cca 9 kg vody na 1 kg vyrobeného vodíku. Jedná se však o demineralizovanou vodu, takže reálná spotřeba je cca 13 kg/kg H₂ [11]. Průměrná cena vodného a stočného v České republice pro rok 2024 je 128 Kč za 1 000 l vody [12]. K ceně vody je ještě nutné přičíst přibližně 25 % nákladů na provoz demineralizační technologie. Tento odhad byl stanoven pro menší systémy s reversní osmózou na základě konzultací s výrobcem těchto zařízení. Tím, že náklady na úpravu vody mají nepatrný vliv na celkovou cenu vyrobeného vodíku, přesné stanovení nákladů na provoz není nutné.

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	
OPEX celkem	2 933 974	3 243 568	3 761 068	Kč/rok
Elektřina – výroba vodíku	1 433 281	1 791 720	1 791 720	Kč/rok
Elektřina – kompresorová stanice	134 361	134 361	0	Kč/rok
Údržba kompresorové stanice	175 000	175 000	0	Kč/rok
Elektřina – VČS + kompresor	134 361	134 361	134 361	Kč/rok
Údržba VČS	288 000	288 000	288 000	Kč/rok
Údržba kontejnerů	197 162	197 162	0	Kč/rok
Transport	201 371	201 371	0	Kč/rok
Údržba stacionárního úložiště	24 000	24 000	24 000	Kč/rok
Údržba elektrolyzáru	103 444	206 888	206 888	Kč/rok
Údržba – baterie + servis	158 361	0	0	Kč/rok

Voda	27 102	27 104	27 104	Kč/rok
Promítnutí OPEX do nákladu H₂	225	249	289	Kč/kg H₂

9.3 Dotace

Výše uvedené ceny nepočítají s dotacemi. Pro navrhované ostrovní řešení existují či jsou v plánu dotační tituly, které mohou pokrýt část nákladů na komponenty vodíkového hospodářství.

Pro vybudování VČS a komponentů nezbytně nutných k jejímu provozu jsou k dispozici výzvy z OP Doprava. Výzvy z roku 2024 byly rozděleny především na čerpací stanice na hlavní síti TEN-T, čerpací stanice v městských uzlech (což s předpokladem umístění VČS ve větším – např. krajském – městě může být splněno) a ostatní čerpací stanice. Předpokládejme dále, že námi diskutovaný příklad je městským uzlem, poté se na navrhované ostrovní řešení vztahuje výzva č. 24 [13]. Tato výzva se souhrnnou alokací 200 milionů korun, poskytuje míru dotace až 85 %, nicméně vyžaduje, aby stanice byla schopná vydávat vodík na tlakové hladině 350 a 700 bar. Čerpací stanice rovněž **musí být veřejná**. Výzva č. 24 byla uzavřena na konci června 2024, z vyjádření Ministerstva dopravy nicméně vyplývá, že se budou do budoucna podobné výzvy opakovat.

Alternativou k programu OP Doprava jsou výzvy, které spravuje Ministerstvo pro místní rozvoj v rámci Integrovaného regionálního operačního programu (IROP). Konkrétně v horizontu za rok 2025, kdy některé z výzev (konkrétně výzva č. 106, končí již 31. 1. 2025) je potenciálně využitelná výzva č. 108 IROP – Plnicí a dobíjecí stanice pro veřejnou dopravu – SC 6.1 (ITI) [14], ve které je možné požádat o dotaci na čerpací stanici na území 3 metropolitních oblastí a 10 aglomerací, do kterých spadá většina obcí v České republice. Souhrnná alokace je pro méně rozvinuté regiony stanovena na 208 milionů korun, pro přechodové regiony na 213 milionů korun. Minimální výše podpory je 5 milionů a maximální 200 milionů. Značnou komplikací je fakt, že o dotaci na čerpací stanici smí požádat pouze dopravce, který musí čerpací stanici sám spravovat a provozovat, další komplikací je podpora ve výši 35 % na způsobilé výdaje v případě méně rozvinutých regionů (tento předpoklad bude dále uvažován v konkrétních výpočtech) a 25 % v případě přechodových regionů. Čerpací stanice dále nesmí být veřejně přístupná. Čerpací stanice může být využívána i jinými typy silničních vozidel provozovanými příjemcem, nebo vozidla provozovanými osobou ovládanou příjemcem či osobou ovládající příjemce dotace. Za osobu ovládající příjemce, kterým je organizace zřizovaná nebo zakládaná krajem nebo obcí, nelze považovat jinou organizaci zřizovanou. Podobně jako u OP Doprava i zde by měla být možnost v rámci programu podpořit skladování a kompresorovou stanici vodíku.

Kromě programů OP Doprava a IROP je do budoucna počítáno s podporou infrastruktury pro skladování a distribuci vodíku v rámci programu GREENGAS v Modernizačním fondu. Podle předběžných informací získaných od SFŽP by v první výzvě tohoto programu měla být k dispozici investiční podpora 45 % uznatelných nákladů (65 % pro malé a 55 % pro středně velké podniky) s maximální mírou podpory 30 milionů € na projekt. Tato výzva umožní nákup zařízení k výrobě, distribuci a skladování vodíku, nicméně neumožňuje podpořit nákup VČS. V případě navrhovaného ostrovního řešení by tedy mohly být podpořeny elektrolyzér, bateriové úložiště, stacionární úložiště, přepravní kontejnery a kompresorová stanice. První výzva by měla být zahájena v lednu 2025 a jelikož se jedná o průběžnou nesoutěžní výzvu je možné podávat projekty do jara 2026.

TABULKA 3 – CENA VODÍKU V OSTROVNÍM ŘEŠENÍ PO ZAPOČTENÍ VŠECH NÁKLADŮ (KČ/KG H₂)

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Cena bez dotací	1 079	906	749
Cena s dotacemi (OPD+Greengas)	598	527	470
Cena s dotacemi (IROP+Greengas)	722	651	594

Ceny uvedené v Tabulka 3 odrážejí provozní režim popsany v kapitole 6, tj. je vyrobeno pouze tolik vodíku, kolik je potřeba pro provoz ostrovního řešení. V případě, že by byl nalezen odběratel pro vodík vyrobený nad rámec potřeb ostrovního řešení by bylo možné rozpočítat investiční náklady na technologie do většího množství vodíku, a tedy snížit ceny za kg H₂. Tabulka 4 ukazuje případ, kdy elektrolyzátor vyrábí maximální množství vodíku v případě kdy není limitován kapacitou úložiště, tedy bez odstávek. Uvedené ceny předpokládají odběr vodíku za výrobní cenu.

TABULKA 4 – CENA VODÍKU V OSTROVNÍM ŘEŠENÍ BEZ ODSTÁVEK ELEKTROLYZÉRU (KČ/KG H₂)

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Cena bez dotací	1 000	643	540
Cena s dotacemi (OPD+Greengas)	565	395	358
Cena s dotacemi (IROP+Greengas)	666	476	439

Je tedy zřejmé, že nalezení odběratele pro vodík vyrobený nad rámec potřeb ostrovního řešení by značně zlepšilo ekonomiku projektu.

9.4 Autobusy

Cena autobusů je uvedena samostatně, neboť se předpokládá, že nákup autobusu bude zajištěn provozovatelem hromadné dopravy. Nákupní cena 12 m vodíkových autobusů se pohybuje kolem 15 500 000,- Kč (dle vysoutěžených cen [15] a informací od výrobců). Při nákupu 2 autobusů by tedy cena byla cca 31 000 000,- Kč. V otázce nákupu lokálně bezemisních vodíkových autobusů je možné využít výzvu č. 39 programu IROP, kde je oprávněným žadatelem kraj, obce či dopravce na základě smlouvy o veřejných službách v přepravě cestujících. Pro méně rozvinuté regiony je míra financování až 85 %, pro přechodové regiony 70 %, na výzvu jsou alokovány 3 miliardy a je otevřena do 31. 12. 2027 nebo do vyčerpání alokace. V roce 2025 až 2026 je chystán další program na podporu nákupu bezemisních vozidel, a to konkrétně v rámci programu TransGov Modernizačního fondu, konkrétní podoba programu, a tedy i zahrnutí autobusů třídy M2, ale zatím není známa. V případě využití výše zmíněné dotace (předpokládejme nyní případ méně rozvinutých regionů) by byla nákupní cena jednoho uvažovaného autobusu cca 2 325 000,- Kč (4 650 000,- Kč za obě vozidla).

10 Čistota vodíku

Pro provoz vodíkových autobusů s palivovými články je třeba zajistit čistotu palivového vodíku 5.0 (99,999 %) akreditovaným měřením čistoty. Požadovanou čistotu vodíku pro použití v mobilitě dále specifikuje norma ČSN ISO 14687 (656520) [16], která stanovuje maximální přípustné koncentrace nečistot v palivu. Odběrné místo pro kontrolu čistoty by mělo být na hadici VČS. Kontrola čistoty paliva výdejním zařízením je běžná praxe v zahraničních VČS, a i v České republice probíhá snaha

o standardizaci tohoto procesu. Druhé kontrolní místo je v případě transportu vodíku po silnici u stacionárního úložiště. Zde je v návrhu plnicí stanice pro kontejnery zahrnuta laboratoř kontroly kvality H₂, která zajistí čistotu vodíku před transportem, příp. před prodejem třetí straně.

V době vzniku tohoto dokumentu není v ČR legislativa, která by specifikovala, jak často musí být měření čistoty prováděno. Nicméně je velmi pravděpodobné, že s rozšířením stanic vydávajících vodík budou stanovena jasná pravidla. Např. stát Kalifornie vyžaduje kontroly čistoty bezprostředně před spuštěním stanice, každých 6 měsíců od spuštění a po každé, když dojde k zásahu do systému, při kterém by mohlo dojít ke kontaminaci – míněna výměna komponentů systému nebo údržba [17]. Kontrola čistoty před spuštěním a po zásahu je bezesporu nezbytně nutná a měla by probíhat i v našich podmínkách. Pravidelné kontroly jsou pak vhodné, ale pravděpodobně časově i finančně náročné, tudíž jejich frekvence záleží na provozovateli stanice, dokud nedojde k upřesnění ze strany státní správy.

11 Závěr

Tento dokument předkládá a ověřuje návrh vodíkových technologií potřebných k zásobování a plnění vodíkových vozidel příměstské autobusové dopravy. Jsou zde analyzovány tři varianty výroby vodíku pro pokrytí spotřeby vodíkových autobusů. První varianta předpokládá výrobu vodíku umístěno v lokalitě obnovitelného zdroje energie (větší FVE) za využití 110 kW elektrolyzáru a 1 MWh baterie. Druhá varianta počítá s výrobou ve stejné lokalitě, ale s využitím 220 kW. Obě tyto varianty předpokládají transport vodíku z lokality výroby (tj. lokality FVE) pomocí přepravních kontejnerů do vodíkové čerpací stanice umístěné u dopravního terminálu v širším centru hustě obydleného sídla (tj. většího, např. krajského, města). Třetí varianta počítá s přepravou elektřiny přes přenosovou soustavu do 220 kW elektrolyzáru v blízkosti výše zmíněné vodíkové čerpací stanice.

Všechny tři navržené a hodnocené varianty uspokojí spotřebu konkrétně definovaných a diskutovaných autobusových linek po celý rok bez úprav stávajícího provozního režimu.

Dokument také obsahuje ukázkou technologického návrhu vodíkové čerpací stanice v prostorách dopravního terminálu.

Navrhované varianty jsou srovnány z hlediska nákladů na 1 kg H₂. Z tohoto srovnání vychází, že ekonomicky nejefektivnější variantou je vyrábět vodík v lokalitě vodíkové stanice, tedy varianta 3. Je však potřeba vzít v potaz ztíženou realizaci výroby vodíku v prostorách výdejní stanice pohonných hmot oproti realizaci u výroby elektrické energie.

Dokument též obsahuje praktická doporučení pro výstavbu a provoz ostrovního řešení jako např. kontrola čistoty vydávaného paliva či stav inženýrských sítí v potenciální lokalitě ostrovního řešení.

12 Seznam příloh

- Příloha 1 – Režim provozu elektrolyzáru
Příloha 2 – Technický návrh kompresní stanice
Příloha 3 – Technický návrh VČS
Příloha 4 – Prostor pro manipulaci s kontejnery

13 Seznam obrázků

Obr. 1 – Příklad návrhu plochy větší FVE, převzato z [1]	5
Obr. 2 – Časový harmonogram oběhu I	6
Obr. 3 – Časový harmonogram oběhu II	6
Obr. 4 – Graf denní výroby vodíku pro obě varianty	8
Obr. 5 – Diagram ostrovního řešení při umístění výroby vodíku u FVE.....	10
Obr. 6 – Diagram ostrovního řešení při umístění výroby vodíku u VČS.....	10
Obr. 7 – Ukázka umístění navrhované VČS (žlutě) v lokalitě dopravního terminálu.....	11

14 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Denní spotřeby vodíku na diskutovaných obězích dle měsíce (kg H ₂)	7
Tabulka 2 – Vstupní náklady ostrovního řešení	13
Tabulka 3 – Cena vodíku v ostrovním řešení po započtení všech nákladů (Kč/kg H ₂).....	16
Tabulka 4 – Cena vodíku v ostrovním řešení bez odstávek elektrolyzáru (Kč/kg H ₂).....	16

15 Seznam literatury

- [1] Ochodek, T. et al. (2022) [cit. 13. 12. 2024], *Studie proveditelnosti pro výstavbu FVE a výroby H₂ v areálu bývalého vojenského letiště Ralsko*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Dostupné z:
https://liberecky.pirati.cz/documents/358/Studie_proveditelnosti_FVE_Ralsko.pdf
- [2] Muñoz, P. et al. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses, 257, 1-11.
- [3] PwC Česká republika (2023), *Případová studie výstavby elektrolyzáru v České republice*.
- [4] DomyJinak (2020), *Centrální terminál Liberec*. Dostupné z:
https://www.korid.cz/files/file/TRANS-BORDERS/TLBC_portfolio_11_2020_LQ.pdf
- [5] cnb.cz (2024) [cit. 2024-08-05]. Prognóza ČNB – léto 2024. Dostupné z:
<https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza>
- [6] McKenzie, H. et al (2024) Clean Hydrogen Production Cost Scenarios with PEM Electrolyzer Technology. *DOE Hydrogen Program Record*, 24005.

- [7] Krishnan, S. et al (2023) Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks. *International journal of hydrogen energy*, 48 (83), 32313-32330.
- [8] Archery consulting (2024) Low-carbon hydrogen production in the European union: What economic conditions are required to switch to low-carbon hydrogen by 2030?, *The Hydrogen series – part 3 Synthesis*.
- [9] Solomon, M. D. et al (2024) Cost Optimization of Compressed Hydrogen Gas Transport via Trucks and Pipelines. *Energy Technology*, Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ente.202300785>.
- [10] Herenčič, L. et al (2021) Techno-economic and environmental assessment of energy vectors in decarbonization of energy islands. *Energy Conversion and Management*, 236, 114064.
- [11] Madsen, H. T. (2022) [cit. 2024-08-07]. Water treatment for green hydrogen: what you need to know. *Hydrogen Tech World*, Dostupné z: <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>.
- [12] zakra.cz. (2024) [cit. 2024-11-27]. Cena vody (vodné a stočné) v roce 2024. Dostupné z: <https://www.zakra.cz/blog/cena-vody-vodne-a-stocne-v-roce-2024>
- [13] opd3.opd.cz. (2021) [cit. 2024-10-14]. Program Doprava 2021-2027. Dostupné z: <https://www.svs.cz/cz/verejnost/cena-vody/https://opd3.opd.cz/stranka/vyzva-24>
- [14] irop.gov.cz. (2024) [cit. 2024-07-08]. 108. výzva IROP - Plnicí a dobíjecí stanice pro veřejnou dopravu - SC 6.1 (ITI). Dostupné z: <https://www.svs.cz/cz/verejnost/cena-vody/https://irop.gov.cz/cs/vyzvy-2021-2027/vyzvy/108vyzvairop>
- [15] busportal.cz (2021) [cit. 2024-07-29]. V Ústí nad Labem budou jezdit Solaris Urbina na vodík. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/v-usti-nad-labem-budou-jezdit-solaris-urbina-na-vodik-17734>
- [16] ČSN ISO 14687 (656520) Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu, Česká agentura pro standardizaci, publikováno září 2020
- [17] Transportation and Toxics Division California Air Resources Board (2020); Appendix C – Hydrogen refueling station requirements. Dostupné z: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-08/fy1920_ccssolicitation_appc_h2fuelingstation.pdf

16 Seznam zkratk

FVE – Fotovoltaická elektrárna

VČS – vodíková čerpací stanice

DPH – daň z přidané hodnoty

FD ČVUT – Fakulta dopravní Českého vysokého učení technického

OZE – Obnovitelné zdroje elektřiny

RFNBO – Obnovitelná paliva nebiologického původu

NN – Nízké napětí

IROP – Integrovaný regionální operační program

OVĚŘENÍ METODY NÁVRHU VODÍKOVÉ ČERPACÍ STANICE A JEJÍHO ZÁSOBOVÁNÍ Z EXTERNÍ VÝROBNY OBNOVITELNÉHO VODÍKU

PŘÍLOHA 1: REŽIM PROVOZU ELEKTROLYZÉRU



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

NÁZEV PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1: REŽIM PROVOZU ELEKTROLYZÉRU

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility

ZPRACOVATEL

EGÚ Brno, a.s.

AUTORSKÝ TÝM

Ing. Jan Poláček, Ing. Zdeněk Příbyl (EGÚ Brno, a.s.)

ÚVOD

Součástí řešení dílčího projektu „Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility“ je návrh provozu elektrolyzáru pro jednotlivé navržené lokality na základě požadovaných parametrů. Řešená část zahrnuje zdroj elektrické energie, připojení elektrolyzáru k síti, případně baterii, výrobu vodíku, jeho skladování a případnou přepravu. Parametry jsou specifické pro každou z lokalit. V tomto dokumentu je řešena **lokalita Liberec**. Zadané parametry pro řešení jsou následující:

Zdroj FVE:

- Instalovaný výkon zdroje: 103 980,8 kWp.
- Umístění zdroje: Letiště Hradčany, Ralsko (GPS: 14.7327750, 50.6194825).
- Předpokládá se, že velikost elektrárny umožní do 31.12.2029 (platí měsíční korelace) nepřetržitý provoz přes PPA (Power Purchase Agreement). Od tohoto data předpokládáme navýšení výkonu elektrolyzáru, nebo doplnění o baterii zajišťující nepřetržitý provoz elektrolyzáru původního výkonu.
- Rovněž předpokládáme, že odběr elektrické energie z FVE pro elektrolyzáru bude mít 100 % prioritu.

Vodíková čerpací stanice (VČS):

- Umístění čerpací stanice: Nový dopravní terminál, vlakové a autobusové nádraží (GPS: 15.0456792, 50.7622164).
- Obsluha dvou autobusů. Autobusy jezdí v pracovní dny, o víkendech a státní svátky nejedí.
- Potřeba 13 000 kg H₂ ročně.

Elektrolyzáru:

- Uvažujeme dvě varianty umístění elektrolyzáru:
 - 1) v blízkosti FVE s přímým připojením,
 - 2) v blízkosti čerpací stanice s připojením přes distribuční síť (PPA).
- Během víkendů elektrolyzáru vyrábí za účelem doplnění vodíku do skladovací kapacity podle potřeby. Státní svátky v modelu zanedbáváme (předpokládáme, že autobusy jezdí pondělí až pátek, bez ohledu na státní svátek).
- Celá jednotka elektrolyzáru sestává z kontejnerového řešení, ve kterém se nachází elektrolyzáru, měnič, zařízení pro čištění vody, separátor, sušení plynu, čidla a další potřebné komponenty tak, aby vstupem byla elektrická energie a voda, a výstupem vyroben vodík o tlaku v rozsahu 20–30 bar a kyslík.
- Investiční náklady na elektrolyzáru do velikosti 500 kW uvažujeme 1837 €/kWh.
- Uvažujeme životnost elektrolyzáru 20 let (což přibližně odpovídá životnosti FVE),

přičemž v 7. a 14. roce dochází ke výměně potřebných komponentů v elektrolyzáru. Náklady na každou výměnu činí 35 % z CAPEX.

- Náklady na údržbu jsou započteny v modelu a činí 1,5 % ročně z celkové ceny elektrolyzáru. V této ceně jsou zahrnuty všechny náklady související s provozem samotného zařízení elektrolyzáru.
- Účinnost elektrolyzáru předpokládáme 60,61 %, což je 55 kWh/kg vodíku. V této hodnotě je zahrnuta vlastní spotřeba celé jednotky.

Uskladnění vodíku:

- Návrh a kapacita skladování je navržena pro optimální provoz elektrolyzáru a zabezpečení poptávky, v tlakové nádrži u čerpací stanice, případně u elektrolyzáru. Celková kapacita skladování je pro každou z variant uvažována 320 kg vodíku. Na základě velikosti skladu je pomocí modelu spočtena roční produkce vodíku v kilogramech. Ta vychází z dat o spotřebě autobusů v jednotlivých dnech v roce a z dat dostupné elektrické energie z FVE.

Bateriový systém – Battery Energy Storage System (BESS):

- Pro sestavu s malým elektrolyzárem je navržen BESS s výkonem 1000 kW a využitelnou kapacitou 1000 kWh. Tyto parametry zaručují dostatečnou dynamiku nabíjení pro potřeby výroby vodíku „na čáře“ i v zimních měsících.
- BESS má garantovanou životnost 10 let. Při předpokládané životnosti celého systému 20 let uvažujeme o 1 výměně bateriového systému.
- Kapitálové náklady na tento typ BESS jsou 880 €/kWh.
- Roční náklady na servis a údržbu jsou 1 % ročně z kapitálových nákladů.

Cena vodíku:

- V ceně tohoto dílčího řešení jsou zahrnuty CAPEX a OPEX náklady na elektrolyzáru, případně baterii, náklady na elektrickou energii: silovou složku + distribuční poplatky a poplatek za rezervovanou kapacitu (cena za použití sítí, příspěvek POZE, systémové služby a platba OTE).
- Uvedené řešení počítá se skladováním, případně dopravou pomocí traileru do místa VČS. Náklady na kompresi, skladování a VČS pro plnění autobusů tento model nezohledňuje.
- Cena rovněž nezahrnuje náklady na pořízení pozemku a další nezbytné investice, které budou upřesněny na základě konkrétní investice.

Z výše uvedeného byly pro modelování provozu vybrány 4 základní varianty. Jedná se o kombinaci dvou velikostí elektrolyzáru (menší a větší), a dvou lokalit umístění elektrolyzáru (uFVE a u plnicí stanice):

- 1) Malý elektrolyzátor s připojením přímo u FVE (potřeba baterie a transportu H_2)
 - 2) Velký elektrolyzátor s připojením přímo u FVE (potřeba transportu H_2)
 - 3) Malý elektrolyzátor u čerpací stanice (potřeba baterie)
 - 4) Velký elektrolyzátor u čerpací stanice
- Malý elektrolyzátor počítá s téměř nepřetržitým provozem i během víkendů a noci. Proto vyžaduje propojení s baterií.
 - Velký elektrolyzátor je bez baterie, vyrábí v době dostatečné produkce FVE během dne, a to i o víkendech.
 - Umístění při FVE počítá s přímým připojením elektrolyzátoru na fotovoltaiku. Bude ale potřeba řešit transport vyrobeného vodíku pomocí trailerů z místa výroby do lokality VČS. Vzdálenost mezi FVE a VČS je 46,1 km, po silnici 270 a E442.
 - Umístění výroby vodíku přímo v místě VČS nevyžaduje transport vodíku, ale počítá s náklady na využití přenosu elektrické energie – rezervovaná kapacita.

V následující části budou popsány výsledky modelu pro malý a velký elektrolyzátor, stejně jako umístění elektrolyzátoru u FVE a VČS. V závěru bude určena cena pro každou variantu.

MALÝ ELEKTROLYZÉR

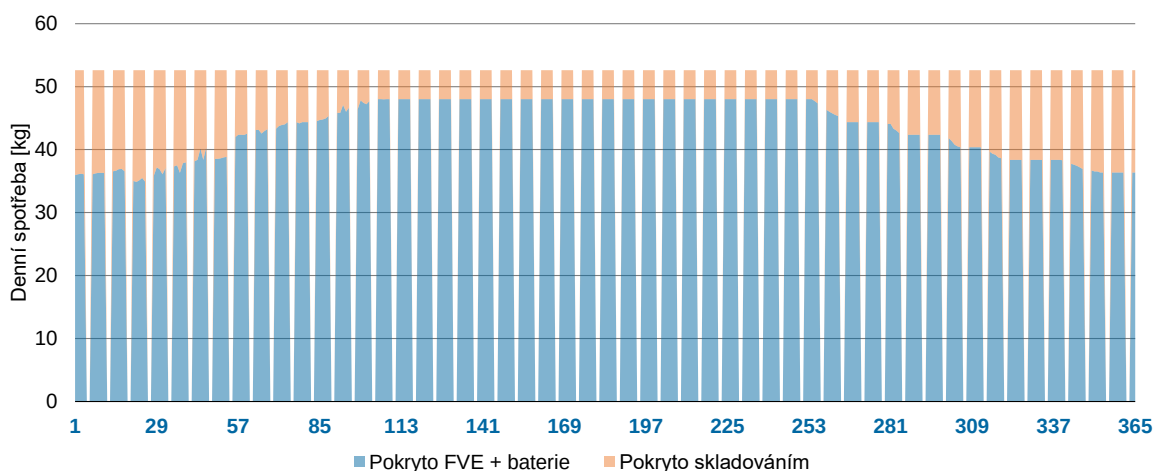
První návrh je elektrolyzátor s co nejmenším výkonem, dimenzovaný tak, aby jeho nepřetržitá výroba během noci i víkendů dodávala potřebné množství pro vodíkovou čerpací stanici. Výhodou jsou nižší náklady na elektrolyzátor a jeho maximální využití v čase. Nevýhodou je nutnost instalace baterie pro výrobu mimo dobu osvitu FVE.

Byl zvolen **PEM elektrolyzátor s výkonem 110 kW, s produkcí H_2 2,0 kg/hod a výstupním tlakem 30 bar**. Menší elektrolyzátor nedokáže vyrobit požadované množství vodíku za 24 hodin, ale díky víkendům, kdy autobusy nejezdí, může vyrábět do zásoby a dojde k naskladnění vodíku.

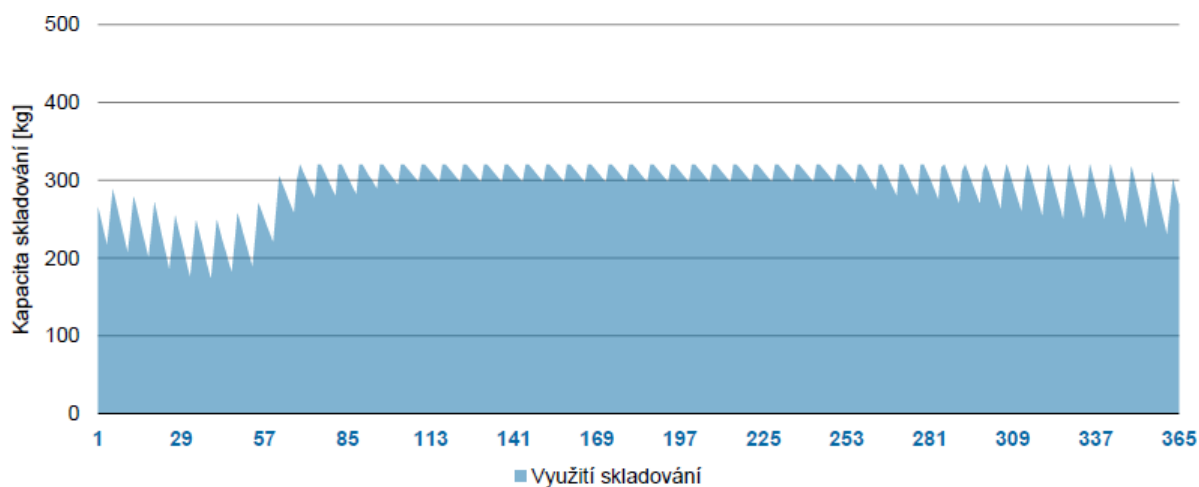
Bateriové uložení (BESS) je zvoleno s výkonem 1 MW a s kapacitou 1 MWh. Uskladnění 320 kg vodíku je dostačující pro nepřetržitý provoz elektrolyzátoru.

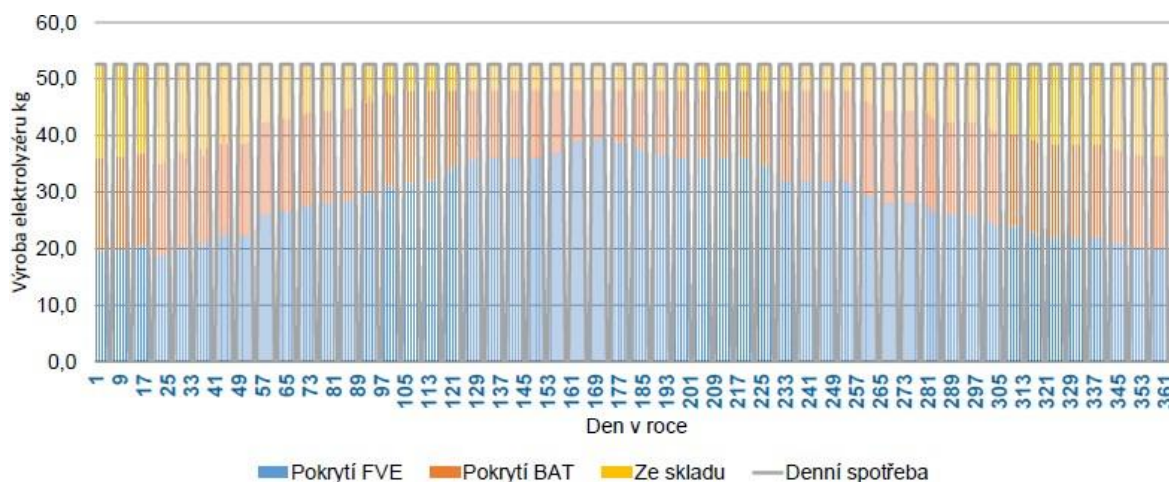
Uvažujeme elektrickou energii FVE pomocí PPA kontraktů. Vyšší náklady na elektrolyzátor s BESS mohou být vykompenzovány nižší cenou elektrické energie, protože baterie může být (zejména v letních měsících) dobíjena právě v hodinách, kdy bude výkupní cena elektrické energie nižší. To snižuje celkovou roční průměrnou cenu. Předpokládáme proto cenu elektrické energie v PPA kontraktu 75 €/MWh.

Výsledky modelu, jako je průběh výroby, pokrytí spotřeby a využití baterie a skladování, jsou znázorněny na následujících obrázcích.

**Obrázek 1: POKRYTÍ DENNÍ SPOTŘEBY Z FVE + BATERIE A SKLADOVÁNÍ**

Model počítá se začátkem výroby od začátku kalendářního roku, tedy v zimním období, kdy je výroba FVE nedostatečná. Elektrolyzátor nedokáže vyrobit potřebný vodík pouze při rozjezdu řešení. Potřebné množství vodíku pro rozjezd bude nakoupeno.

**Obrázek 2: Průběh využití skladování**

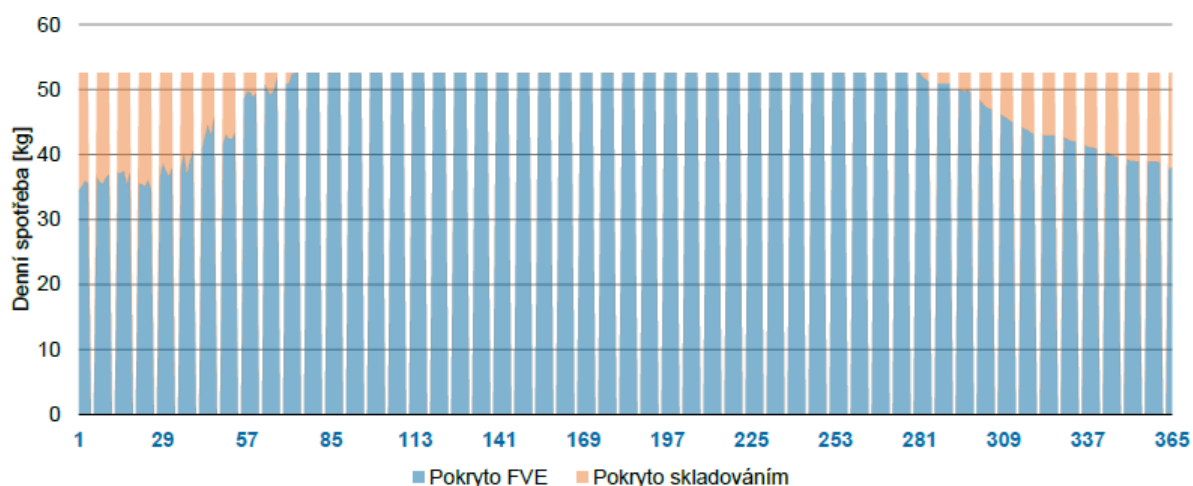


Obrázek 3: Výroba elektrolyzáru, denní spotřeba a pokrytí během roku

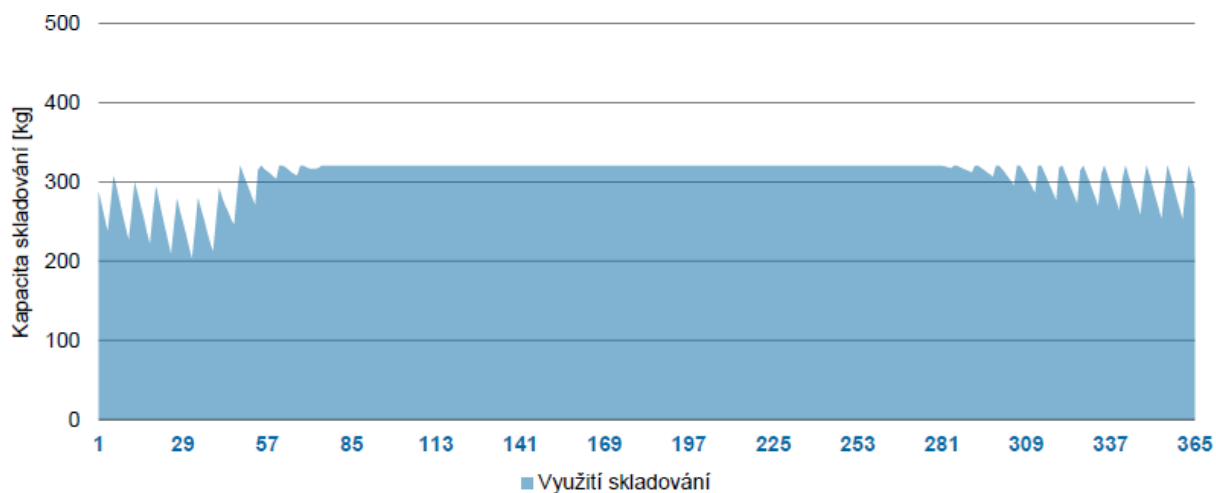
VĚTŠÍ ELEKTROLYZÉR

Velký elektrolyzátor je dimenzován na výrobu vodíku pouze během produkce FVE. Tato sestava nepotřebuje bateriové úložiště. Větší výkon elektrolyzátoru zajistí dostatečné množství vodíku během několika hodin během dne, v závislosti na výkonu FVE. V tomto řešení uvažujeme **PEM elektrolyzátor s výkonem 220 kW**, schopný reagovat na fluktuaci výkonu. Vyšší náklady na elektrolyzátor jsou vykompenzovány absencí baterie. **Produkce vodíku je v čase výroby 4,0 kg/hod.** Opět uvažujeme skladování o velikosti 320 kg.

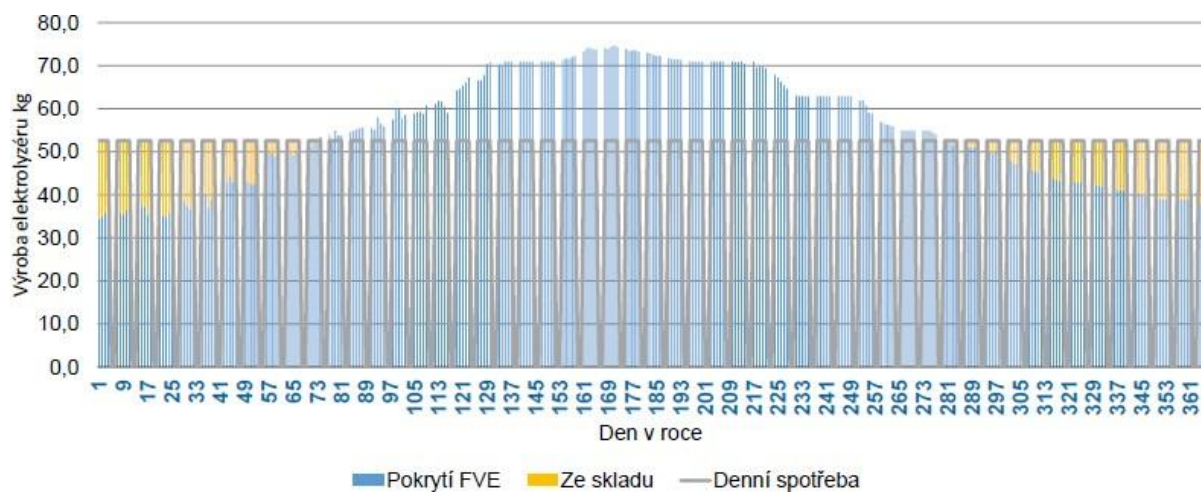
Výsledky modelu, jako je průběh výroby, pokrytí spotřeby a využití skladování, jsou znázorněny na následujících obrázcích.



Obrázek 4: Pokrytí denní spotřeby z FVE a skladování

**Obrázek 5: Průběh využití skladování**

Celkový provoz elektrolyzátoru a skladování během jednoho roku, se začátkem výroby první den v roce, je znázorněn na následujícím obrázku.

**Obrázek 6: Výroba elektrolyzátoru, denní spotřeba a pokrytí během roku**

UMÍSTĚNÍ ELEKTROLYZÉRU U FVE

U uvedených variant (velký a malý elektrolyzátor) lze kombinovat umístění samotné výroby vodíku. V prvním případě se jedná o umístění přímo u fotovoltaické elektrárny, ve druhém v místě vodíkové čerpací stanice.

V případě elektrolyzátoru u FVE bude nutné zajistit transport vyprodukovaného vodíku k místu VČS, s čímž jsou spojeny další náklady, které ale v tomto modelu nejsou započteny. Předpokládáme, že u elektrolyzátoru bude vždy připojen zásobník.

UMÍSTĚNÍ ELEKTROLYZÉRU U VČS

Druhou možností je umístění elektrolyzátoru v místě VČS. Nebude potřebný transport pomocí trailerů. Předpokládáme využívání elektrické energie z FVE, a její distribuci zprostředkovanou distributorem elektrické energie pomocí PPA kontraktů – náklady na rezervovaný výkon.

Uvažujeme statický sklad v tlakové nádrži u čerpací stanice.

VÝSLEDNÁ CENA A SHRNUTÍ

Cílem bylo navrhnout, namodelovat a spočítat provozní režimy výroby obnovitelného vodíku pro ostrovní řešení v lokalitě Liberec. Varianta s malým elektrolyzátoru je doplněna bateriovým systémem.

Elektrická energie je zajištěna pomocí PPA kontraktů. Cena elektrické energie pro velký elektrolyzátor je 100 €/MWh. Cena elektrické energie prostřednictvím PPA kontraktu pro malý elektrolyzátor s BESS je nižší z důvodu odběru během denních špiček a je 75 €/MWh, čímž se částečně kompenzuje vysoká cena BESS. Umístění u VČS navíc vyžaduje provozní náklady za rezervovanou kapacitu.

Výsledné ceny za 1 kg vodíku jednotlivých řešených variant jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Hodnoty řešené složky ceny vodíku na základě velikosti elektrolyzátoru a jeho umístění

	U FVE	U VPS
Malý elektrolyzátor + BESS	332,1 Kč	395,9 Kč
Velký elektrolyzátor	211,2 Kč	294,7 Kč

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: POKRYTÍ DENNÍ SPOTŘEBY Z FVE + BATERIE A SKLADOVÁNÍ	26
Obrázek 2: Průběh využití skladování	26
Obrázek 3: Výroba elektrolyzéru, denní spotřeba a pokrytí během roku	27
Obrázek 4: Pokrytí denní spotřeby z FVE a skladování	27
Obrázek 5: Průběh využití skladování	28
Obrázek 6: Výroba elektrolyzéru, denní spotřeba a pokrytí během roku	28

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hodnoty řešené složky ceny vodíku na základě velikosti elektrolyzéru a jeho umístění	29
---	----

SEZNAM ZKRATEK

PPA – Smlouva o dodávce obnovitelné energie (Power purchase agreement)

RFNBO – Obnovitelná paliva nebiologického původu (Renewable fuels of non-biological origin)

FVE – Fotovoltaická elektrárna

BESS – Bateriový systém (Battery Energy Storage System)

CAPEX – investiční náklady (Capital expenditure)

OPEX – Operační náklady (Operational expense)

POZE – Podporované zdroje energie

OVĚŘENÍ METODY NÁVRHU VODÍKOVÉ ČERPACÍ STANICE A JEJÍHO ZÁSOBOVÁNÍ Z EXTERNÍ VÝROBNY OBNOVITELNÉHO VODÍKU

PŘÍLOHA 2:

TECHNICKÝ NÁVRH KOMPRESNÍ STANICE



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

NÁZEV PŘÍLOHY

Příloha 2: Technický návrh kompresní stanice

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

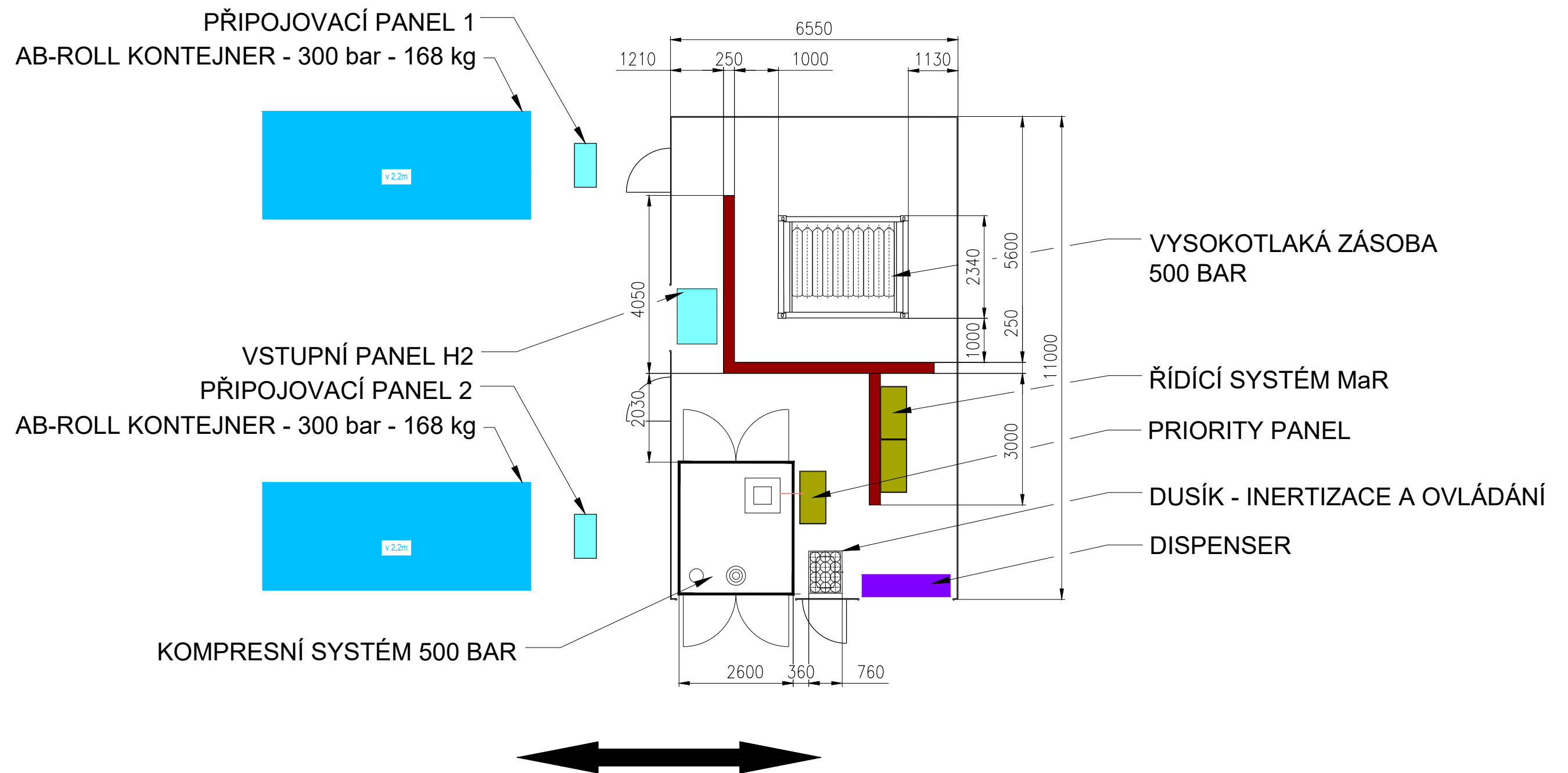
Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility

ZPRACOVATEL

APT, spol s.r.o.

AUTORSKÝ TÝM

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



TECHNOLOGICKÁ DISPOZICE

M 1:100

OVĚŘENÍ METODY NÁVRHU VODÍKOVÉ ČERPACÍ STANICE A JEJÍHO ZÁSOBOVÁNÍ Z EXTERNÍ VÝROBNY OBNOVITELNÉHO VODÍKU

PŘÍLOHA 3:

TECHNICKÝ NÁVRH VČS



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

NÁZEV PŘÍLOHY

Příloha 3: Technický návrh VČS

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

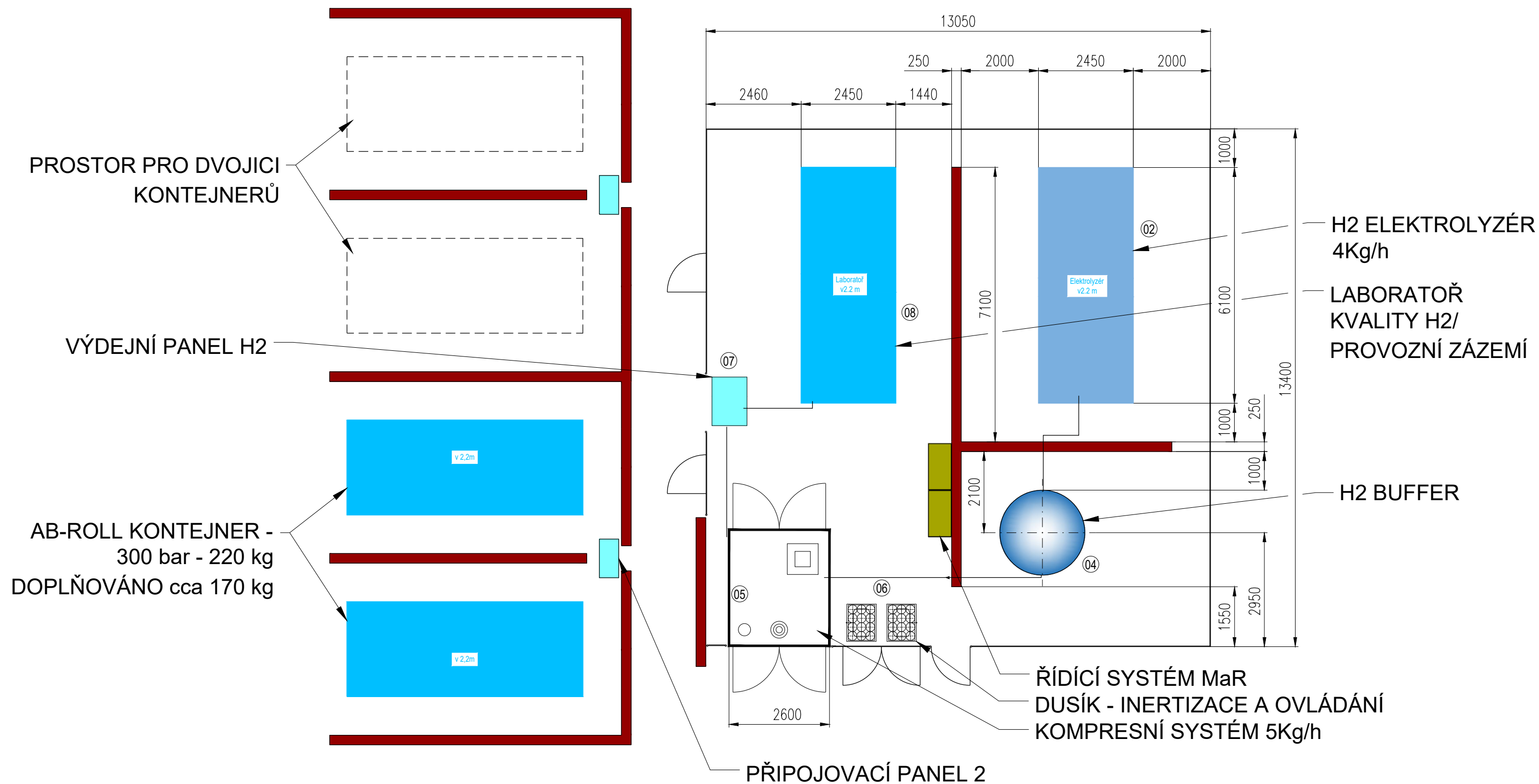
Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility

ZPRACOVATEL

APT, spol s.r.o.

AUTORSKÝ TÝM

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



TECHNOLOGICKÁ DISPOZICE

M 1:100

OVĚŘENÍ METODY NÁVRHU VODÍKOVÉ ČERPACÍ STANICE A JEJÍHO ZÁSOBOVÁNÍ Z EXTERNÍ VÝROBNY OBNOVITELNÉHO VODÍKU

PŘÍLOHA 4:

PROSTOR PRO MANIPULACI S KONTEJNERY



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

NÁZEV PŘÍLOHY

Příloha 4: Prostor pro manipulaci s kontejnery

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Metodika rozvoje ostrovních řešení pro akceleraci vodíkové mobility (DP001)

ZPRACOVATEL

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

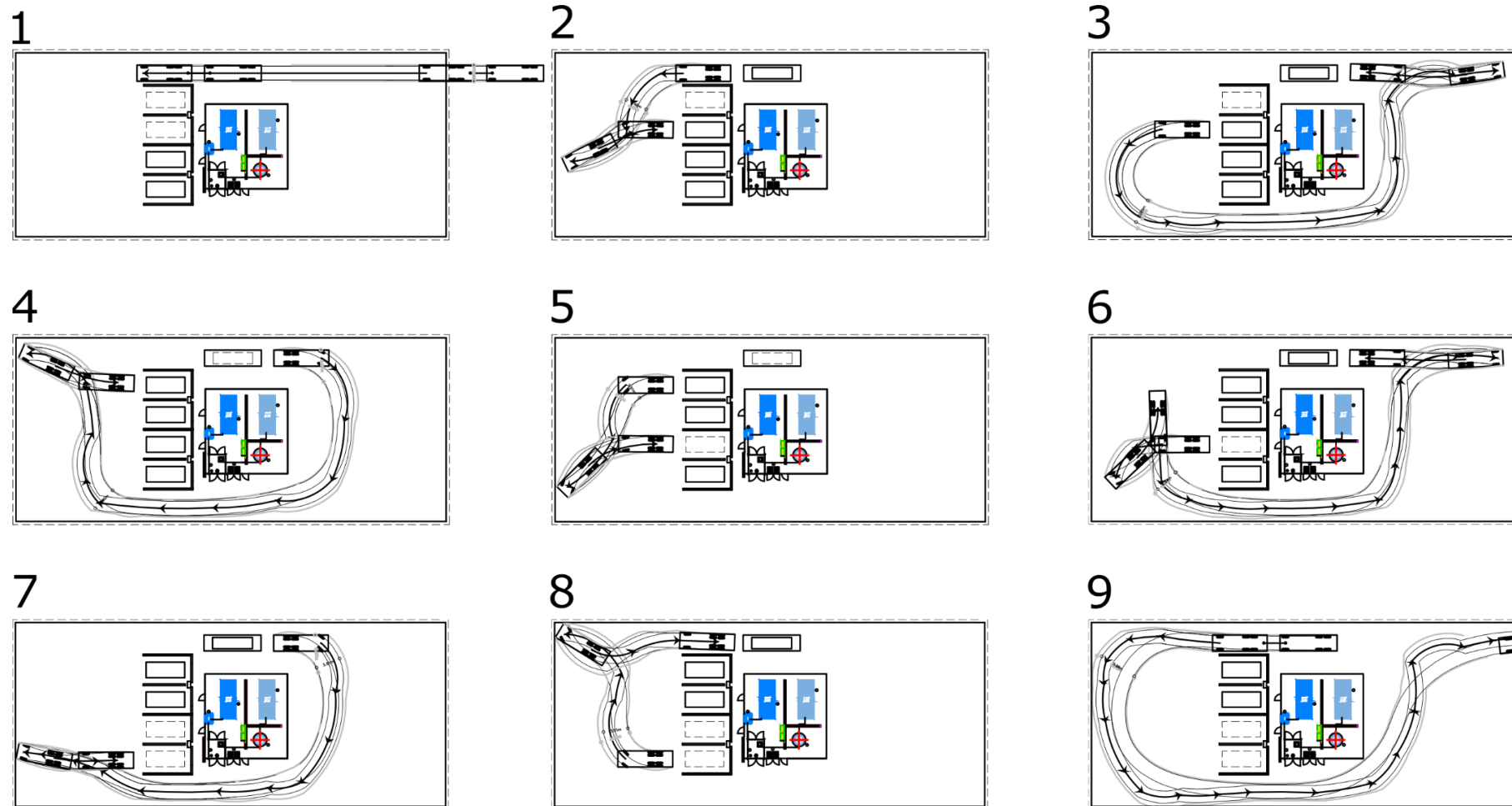
AUTORSKÝ TÝM

Lucie Vyskočilová, Vojtěch Přikryl, Bronislav Vahalík (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.)

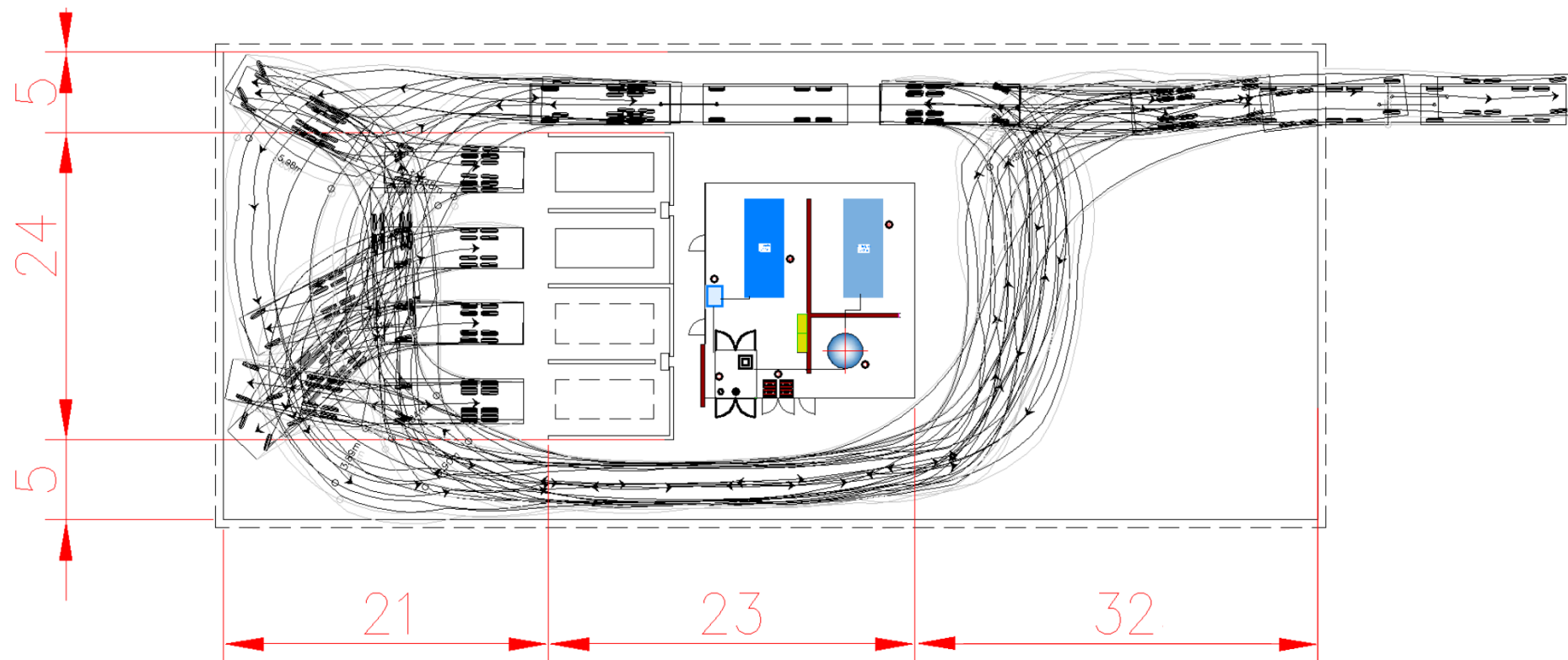
PROSTOR PRO MANIPULACI S KONTEJNERY

Postup při manipulaci s kontejnery při jejich zavážení ke kompresní stanici popisuje Obrázek 1:

1. Nákladní vůz s hákovým nakladačem přijede s dvěma prázdnými AB-Roll kontejnery – jeden naložený na vozidle, druhý na vleku. U stanice stojí dva plné kontejnery ve dvou kójech, další dvě kóje jsou prázdné
2. Vozidlo se odpojí od vleku a složí první prázdný kontejner do první prázdné kóje
3. Prázdné vozidlo přejede k vleku a přetáhne kontejner z vleku na vozidlo
4. Vozidlo složí kontejner do druhé prázdné kóje
5. Vozidlo naloží první z plných kontejnerů
6. Vozidlo přejede k vleku a přetáhne na něj plný kontejner
7. Vozidlo naloží druhý plný kontejner
8. Vozidlo přejede k vleku, který se připojí do závěsu
9. Vozidlo odjíždí s dvěma plnými kontejnery. U kompresní stanice zůstávají dva prázdné kontejnery a dvě volné kóje



Obrázek 1: MANIPULACE S KONTEJNERY V AREÁLU KOMPRESNÍ STANICE

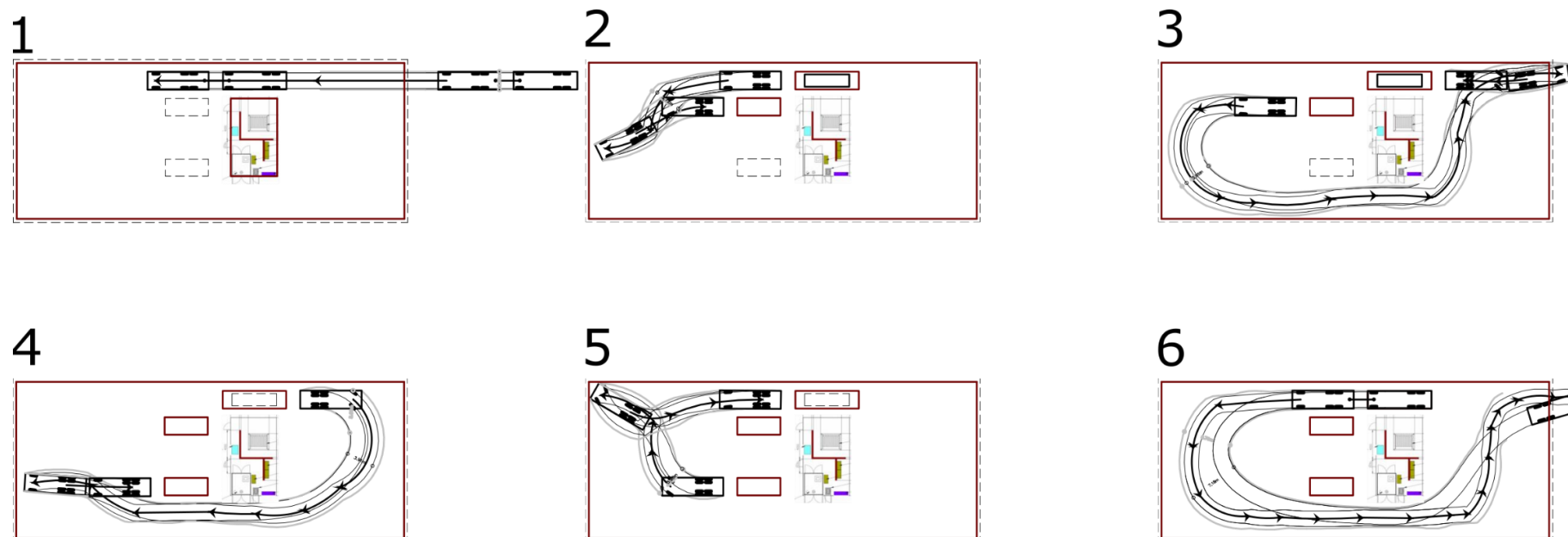


Obrázek 2: POTŘEBNÝ Manipulační prostor U kompresní stanice

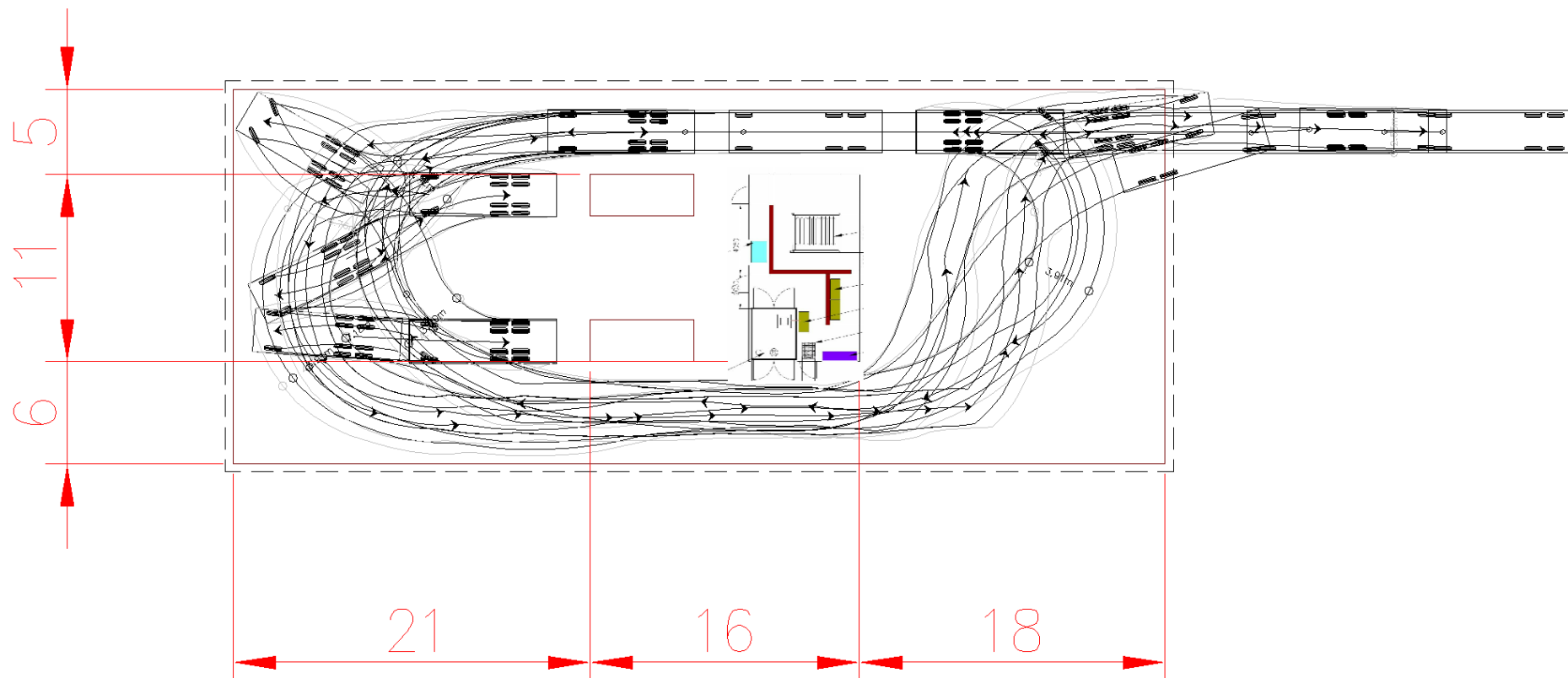
Postup při manipulaci s kontejnery při jejich zavážení ke vodíkové čerpací stanici popisuje Obrázek 3:

1. Nákladní vůz s hákovým nakladačem přijede s dvěma plnými AB-Roll kontejnery – jeden naložený na vozidle, druhý na vleku. U stanice jsou dvě prázdné kóje
2. Vozidlo se odpojí od vleku a složí první plný kontejner do prázdné kóje
3. Prázdné vozidlo přejede k vleku a přetáhne kontejner z vleku na vozidlo
4. Vozidlo složí druhý kontejner do druhé prázdné kóje
5. Vozidlo přejede k vleku, který se zapojí do závěsu
6. Vozidlo s vlekem odjíždí

Obrázek 3 popisuje situaci, kdy vozidlo přijíždí z kompresní stanice s párem plných kontejnerů. V případě, že vozidlo přijíždí naložit prázdné kontejnery, aby je odvezl na výměnu za plné ke kompresní stanici je postup analogický. Tento dokument předpokládá, že nejprve dojde k naložení prázdných kontejnerů u stanice, poté budou tyto složeny u výroby a druhý pár plných kontejnerů bude převezen ke stanici. Tento postup je vhodný, protože minimalizuje dobu, po kterou výroba nemá možnost ukládat vyrobený vodík do kontejnerů a zároveň minimalizuje potřebný prostor u vodíkové čerpací stanice.



Obrázek 3: Manipulace s kontejnery v areálu VČS



Obrázek 4: POTŘEBNÝ Manipulační prostor U VČS