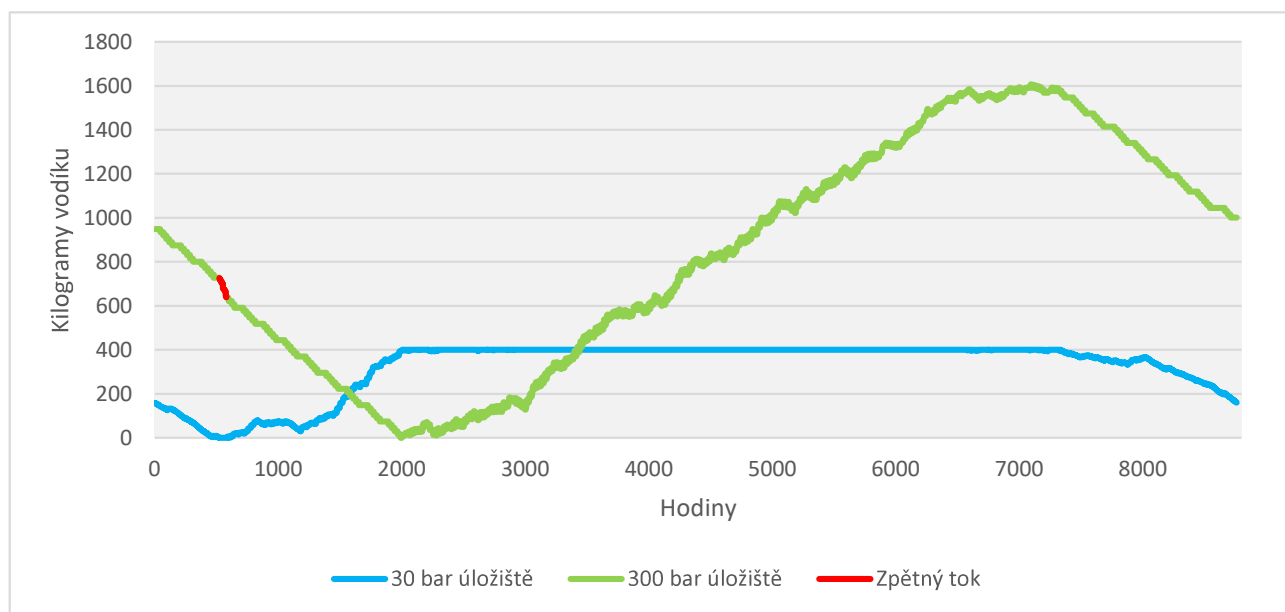


## Optimalizace dlouhodobého ukládání vodíku v ostrovním řešení



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

## NÁZEV VÝSLEDKU

Optimalizace dlouhodobého ukládání vodíku v ostrovním řešení

## 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, Roman Ličbinský, Petr Polanský (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	Předpokládaný výchozí stav ostrovního řešení.....	5
2.1	Zdroj elektrické energie pro výrobu H <sub>2</sub> .....	5
2.2	Výroba H <sub>2</sub> .....	5
2.3	Spotřebiče H <sub>2</sub> .....	6
3	Městská hromadná doprava jako vhodný spotřebič přebytečného H <sub>2</sub> .....	6
4	Spotřeba H <sub>2</sub> ekvivalentního vozidla .....	7
5	Návrh provozu vodíkového autobusu.....	8
6	Návrh optimálního dlouhodobého ukládání H <sub>2</sub> .....	8
7	Nízkotlaké úložiště H <sub>2</sub> .....	9
7.1	Varianta 1 – nadzemní úložiště 480 kg H <sub>2</sub> @ 30 bar.....	10
7.2	Varianta 2 – podzemní úložiště 400 kg H <sub>2</sub> @ 30 bar.....	12
8	Vysokotlaké úložiště 2 185 kg H <sub>2</sub> @ 300 bar a VČS.....	13
9	Kapacitní bilance optimalizovaného zádržného systému vodíku .....	15
10	Uvádění optimalizovaného systému zádrže do provozu .....	17
11	Ekonomické zhodnocení optimalizovaného ostrovního řešení .....	17
11.1	Vstupní náklady.....	17
11.1.1	Vstupy .....	17
11.1.2	Nízkotlaké úložiště .....	18
11.1.3	Vysokotlaké úložiště a VČS.....	18
11.2	Provozní náklady .....	19
11.2.1	Elektřina .....	19
11.2.2	Údržba .....	19
11.2.3	Voda .....	19
11.3	Využití dotačních titulů .....	20
11.4	Dotační varianty.....	21
11.4.1	Varianta OPD.....	21
11.4.2	Varianta IROP .....	21
11.4.3	Varianta OPD+Greengas .....	21
11.4.4	Varianta IROP+Greengas.....	22
11.5	Rozdělení nákladů .....	22
11.5.1	Výroba tepla a elektřiny pomocí palivového článku (Část 1) .....	22

11.5.2	Výroba původně nadbytečného vodíkového paliva (Část 2) .....	23
11.5.3	Výdej a uskladnění vodíku ve VČS (Část 3) .....	23
11.6	Náklady na pořízení vodíkového autobusu .....	24
12	Čistota vodíku .....	24
13	Oblasti ke zohlednění při realizaci .....	26
14	Závěr .....	26
15	Seznam obrázků .....	27
16	Seznam tabulek .....	27
17	Seznam literatury .....	28
18	Seznam zkratk .....	29

## 1 Úvod

Tento dokument popisuje způsob ověření metody optimalizace zamýšlené instalace vodíkové infrastruktury v ostrovní konfiguraci disponující elektrolyzérem, lokální výrobnou energii a spotřebičem vodíku (H<sub>2</sub>), např. palivovým článkem. V případě nadbytku vyráběné energie lokálním zdrojem je nutné zvažovat uskladnění této energie, doplnění vhodných spotřebičů v rámci ostrovního řešení a navržení příslušných technologických opatření za účelem celkové optimalizace provozu vodíkového ostrovního řešení s důrazem na optimalizaci investičních a provozních nákladů navrhovaného řešení.

Pro ověření metody optimalizace vodíkové instalace jsou uvažovány roční přebytky stávající výroby H<sub>2</sub> ve výši jednotek tisíc kg H<sub>2</sub> a zároveň jsou využívány principy rozvoje vodíkových řešení pro akceleraci a podporu vodíkové mobility.

## 2 Předpokládaný výchozí stav ostrovního řešení

Pro účely optimalizace ostrovního řešení využívající vodíkové technologie je uvažována výchozí konfigurace sestávající ze zdroje elektrické energie pro výrobu H<sub>2</sub>, samotné výroby H<sub>2</sub> a spotřebiče H<sub>2</sub>. Za účelem konkrétního ověření metody optimalizace dlouhodobého ukládání vodíku v ostrovním řešení uvažujeme dále v tomto dokumentu následující parametrizaci výchozího řešení.

### 2.1 Zdroj elektrické energie pro výrobu H<sub>2</sub>

Pro ověření metody optimalizace vodíkové ostrovního řešení budeme v tomto dokumentu dále uvažovat, že stávající zdroj elektrické energie pro výrobu H<sub>2</sub> je obnovitelný zdroj energie s případnou sezónní variabilitou a celkovým ročním energetickým výstupem cca 400 MWh.

Tyto požadavky mohou být splněny v podmínkách České republiky např. běžnou instalací fotovoltaické elektrárny se špičkovým výkonem cca 500 kWp v závislosti na konkrétním umístění a orientaci.

V dalších výpočtech bude uvažována konkrétní instalace FVE s dostupným předpokládaným ročním průběhem výroby elektrické energie (s periodou vzorkování 1 h) a o této parametrizaci:

špičkový výkon:	525 kWp,
celkový roční energetický výstup:	394 MWh/rok.

### 2.2 Výroba H<sub>2</sub>

Předpokládá se výroba vodíku pomocí elektrolyzéru o výkonu cca 250 kW a s výstupním tlakem vodíku 30 bar. Uvažujeme, že taková výroba je již součástí výchozího stavu řešení a toto řešení bude dále optimalizováno.

V dalších výpočtech bude uvažován konkrétní elektrolyzátor s dostupným předpokládaným ročním průběhem výroby H<sub>2</sub> a spotřeby elektrické energie (s periodou vzorkování 1 h) a o této parametrizaci:

spotřeba elektrolyzátoru:	54 kWh/kg (při plném zatížení elektrolyzátoru),
celkové roční množství vyrobeného vodíku:	6 670 kg H <sub>2</sub> /rok,
špičkový výkon výroby H <sub>2</sub> :	4,8 kg H <sub>2</sub> /h.

### 2.3 Spotřebiče H<sub>2</sub>

Jako stávající spotřebič v dále optimalizovaném ostrovním vodíkovém řešení uvažujeme palivový článek s elektrickým výkonem 7,5 kW.

Jako konkrétní příklad takového spotřebiče může být uvažován např. palivový článek pokrývající spotřebu (elektrickou a tepelnou) větší administrativní budovy.

V dalších výpočtech bude uvažován palivový článek s dostupným předpokládaným ročním průběhem spotřeby H<sub>2</sub> (s periodou vzorkování 1 h) a o této parametrizaci:

elektrický výkon:	7,5 kWe,
tepelný výkon:	7,5 kWt,
maximální okamžitý odběr H <sub>2</sub> :	0,51 kg H <sub>2</sub> /h,
předpokládaná roční spotřeba H <sub>2</sub> :	1 080 kg.

## 3 Městská hromadná doprava jako vhodný spotřebič přebytečného H<sub>2</sub>

Z uvažovaného výchozího stavu ostrovního vodíkového řešení specifikovaného v kapitole 2 vyplývá, že jediným předpokládaným spotřebičem H<sub>2</sub> je palivový článek o výkonu 7,5 kW. Porovnáním hodnot předpokládané spotřeby H<sub>2</sub> tímto palivovým článkem a předpokládané výroby H<sub>2</sub> definovaným elektrolyzátor ziskáváme přebytek ve výrobě několik tisíc kg H<sub>2</sub> ročně, konkrétně pro námi uvedenou příkladnou parametrizaci až 5 590 kg H<sub>2</sub> ročně.

Vzhledem k legislativou podložené povinnosti nákupu podílu bezemisních vozidel určených pro hromadnou přepravu osob [1,2] se městská hromadná doprava (MHD) jeví jako vhodný spotřebič pro přebývající vodík vyrobený ve vodíkových (ostrovních) řešeních nacházejících se ve městech se zavedenou nebo plánovanou MHD (typicky např. okresní města). MHD bývá v okresních městech často zajišťována autobusovou dopravou sestávající z několika (jednotek až nižších desítek) vozů, které operují na provozovaných linkách ve městě a které mohou být potenciálně vhodným kandidátem pro krytí spotřeby přebývajícího H<sub>2</sub>. Na příkladu vybraného okresního města o populaci 20 000 – 30 000 obyvatel budeme demonstrovat typické uspořádání MHD.

Vybraný vozový park zajišťující MHD ve vybraném městě tvoří sedm autobusů délky 10,5 m, které operují na čtyřech linkách (A, B, C a D). Čtyři autobusy jsou vybaveny pohonem na CNG, zbývající tři vozy disponují klasickým spalovacím dieslovým motorem. Čtyři vozy jsou nasazeny trvale, každý na jednu linku. Pátý autobus slouží k pokrytí špiček na linkách B a C. Dvě vozidla jsou záložní. Stávající

provozní režim autobusů v dané hromadné dopravě je popsán v Tabulka 1. V blízké době je plánována částečná obnova kmenových vozidel.

**TABULKA 1 – DOPRAVNÍ VÝKONY NA JEDNOTLIVÝCH LINKÁCH**

Linka	Délka trasy (km)	Počet jízd v pracovní den	Počet jízd mimo pracovní den	Denní trasa pracovní/nepracovní den (km)
<b>A</b>	5,5 – 13,2	24	12	236/150
<b>B</b>	10	25	14	255/145
<b>C</b>	12	12	0	147/0
<b>D</b>	9	23	14	210/129

## 4 Spotřeba H<sub>2</sub> ekvivalentního vozidla

Spotřeba vodíkového autobusu délky cca 10,5 m a s kapacitou cestujících cca 30 sedících + 35 stojících se zpravidla pohybuje v rozmezí 7–11 kg H<sub>2</sub> / 100 km [3,4]. Pro výpočet spotřeby H<sub>2</sub> bude dále uvažována spotřeba 10,08 kg H<sub>2</sub> / 100 km plynoucí z pilotního testování konkrétního vodíkového autobusu [5] v klimatických podmínkách České republiky během zimního období na trase s častým stoupáním. Tato hodnota spotřeby může být považována za horní odhad hodnoty reálné spotřeby vodíkových autobusů. Je pravděpodobné, že reálná spotřeba může být např. v letním období nebo na trasách s rovinným profilem nižší než uvedená hodnota, avšak v dalších výpočtech bude uvažována právě hodnota 10,08 kg H<sub>2</sub> / 100 km jakožto bezpečný odhad spotřeby vodíkového autobusu.

Na příkladu vybraného okresního města můžeme specifikovat denní nájezd flotily autobusů, který činí 848 km v pracovní dny a 424 km v nepracovní dny + jízda do depa a zpět (cca 5x 2,5 km). Tento nájezd odpovídá spotřebě přibližně 85 kg H<sub>2</sub> v pracovním dni a 42 kg H<sub>2</sub> mimo pracovní den v případě, že by veškeré linky byly operovány vodíkovými autobusy. Celková roční spotřeba H<sub>2</sub> na všech linkách mírně překračuje 26 000 kg H<sub>2</sub>.

Tabulka 2 ukazuje rozdělení spotřeb pro jednotlivé linky v uvažovaném okresním městě.

**TABULKA 2 – ROČNÍ SPOTŘEBA H<sub>2</sub> NA KAŽDÉ Z LINEK**

Linka	Denní spotřeba – pracovní den (kg H <sub>2</sub> )	Denní spotřeba – nepracovní den (kg H <sub>2</sub> )	Roční spotřeba (t H <sub>2</sub> )
<b>A</b>	24	15	7,7
<b>B</b>	25	14	8,0
<b>C</b>	15	0	3,7
<b>D</b>	21	13	6,8

## 5 Návrh provozu vodíkového autobusu

Odečtením roční potřeby H<sub>2</sub> pro provoz palivového článku pro provoz budovy (1 080 kg) od celkového ročního množství vyrobeného H<sub>2</sub> (6 670 kg) je pro provoz autobusové dopravy k dispozici 5 590 kg H<sub>2</sub>/rok. Toto disponibilní množství vodíku nedosahuje celkového množství vodíku potřebného pro provoz celé autobusové flotily MHD okresního města, nicméně odpovídá typicky alespoň trvalému nasazení vybraného množství vodíkových autobusů.

S předpokladem plnění autobusů vodíkem jednou denně mimo dobu služby vozidla můžou být vytvořeny hodinové křivky spotřeby autobusů na jednotlivých linkách a spotřeby palivového článku. Vzájemným prolnutím křivek výroby H<sub>2</sub>, spotřeby v palivovém článku a spotřeby na jednotlivých linkách získáme průběh disponibilního množství vodíku během roku pro provoz autobusů. Pro co nejvyšší využití vyrobeného vodíku v hromadné dopravě může být vypracována varianta celoročního provozu vybraného množství vodíkových autobusů. Navíc lze s výhodou využít flexibility v nasazení vodíkových autobusů na konkrétních různě energeticky náročných linkách s ohledem na aktuální přebytky či nedostatky ve výrobě.

Na diskutovaném příkladě vybraného okresního města s uvažováním ročního přebytku 5 590 kg H<sub>2</sub>/rok a s křivkami stávající výroby a spotřeby definovanými v kapitole 2 implikuje výše uvedený postup provoz jednoho vodíkového vozidla – autobusu. Takový autobus může být v zimním období (konkrétně od září do konce března) nasazen pro obsluhu energeticky méně náročné linky C a v letním období (od dubna do srpna) na obsluhu více energeticky náročné linky B.

V případě striktního nasazení jednoho autobusu (změna linky na začátku září a dubna) by ročně v diskutovaném případě zbývalo cca 80 kg nevyužitého vodíku. Díky flexibilitě období nasazení vozidla na různě energeticky náročné linky se žádný přebytek vodíku řešit nemusí. Stejně tak v případech, kdy vodíku bude aktuální nedostatek (plánovaná/neplánovaná odstávka výroby), je možné autobus po nezbytně krátkou dobu přesunout na energeticky méně náročnou linku C.

## 6 Návrh optimálního dlouhodobého ukládání H<sub>2</sub>

Pro optimalizaci vodíkového ostrovního řešení z pohledu dlouhodobého ukládání H<sub>2</sub> předpokládáme známé a pevně dané rozmístění vodíkové technologie ve výchozím, tj. počátečním, dále optimalizovaném řešení specifikovaném v kapitole 2. Pro další postup uvažujeme pevně dané umístění technologie výroby vodíku, tj. elektrolyzéru, a umístění stávajících spotřebičů H<sub>2</sub>, tj. palivového článku o výkonu 7,5 kW. Umístění výroby elektrické energie, tj. FVE, není pro další postup rozhodující kvůli předpokládanému již existujícímu vodivému propojení výroby elektrické energie a technologie výroby vodíku.

V rámci ověření metody optimalizace dlouhodobého ukládání vodíku budeme nyní blíže diskutovat konkrétní vhodné/optimální možnosti uložení H<sub>2</sub> s ohledem na výrobní křivku v navrhovaném řešení použitého elektrolyzéru a s ohledem na spotřebu:

1. palivového článku o výkonu 7,5 kW specifikovaného v kapitole 2.3,

2. vodíkového autobusu navrženého jako sekundární spotřebič ostrovního vodíkového řešení v kapitole 5.

Pro optimální dlouhodobé ukládání vodíku vyplývá nutnost navrhnout vhodné vlastnosti

1. nízkotlakého úložiště  $H_2$ ,
2. vysokotlakého úložiště  $H_2$ ,
3. vodíkové čerpací stanice (VČS).

Návrh výše uvedených součástí optimalizovaného vodíkového ostrovního řešení je blíže diskutován v kapitolách 7 a 8. Konkrétní příklad návrhu umístění diskutovaných technologií pro vybrané okresní město a výchozí stav vodíkového řešení z kapitoly 2 je zobrazen na [Obr. 1](#), kde je pevně dáno umístění výroby vodíku (poz. 1 na [Obr. 1](#)). Tato lokalita výroby  $H_2$  je návrhově propojena podzemním propojem (poz. 2 na [Obr. 1](#)), který povede vodík na nižší tlakové hladině, s navrhovanou vodíkovou čerpací stanicí (VČS) a navrhovaným vysokotlakým úložištěm (poz. 3 na [Obr. 1](#)).



**OBR. 1 – UKÁZKA MOŽNÉHO NÁVRHU UMÍSTĚNÍ TECHNOLOGIÍ VE VYBRANÉ LOKALITĚ, 1 – VÝROBA VODÍKU, 2 – PODZEMNÍ PROPOJ NÍZKOTLAKÝ, 3 – VODÍKOVÁ ČERPAČÍ STANICE + VYSOKOTLAKÉ ÚLOŽIŠTĚ  $H_2$**

## 7 Nízkotlaké úložiště $H_2$

Pro zajištění dostatečného paliva na provoz palivového článku je třeba uložit část vodíku vyrobeného v létě pro provoz v zimních měsících, kdy výroba elektřiny z FVE dosahuje znatelně menšího objemu. Následující sekce popisují úložiště  $H_2$  pro potřeby palivového článku.

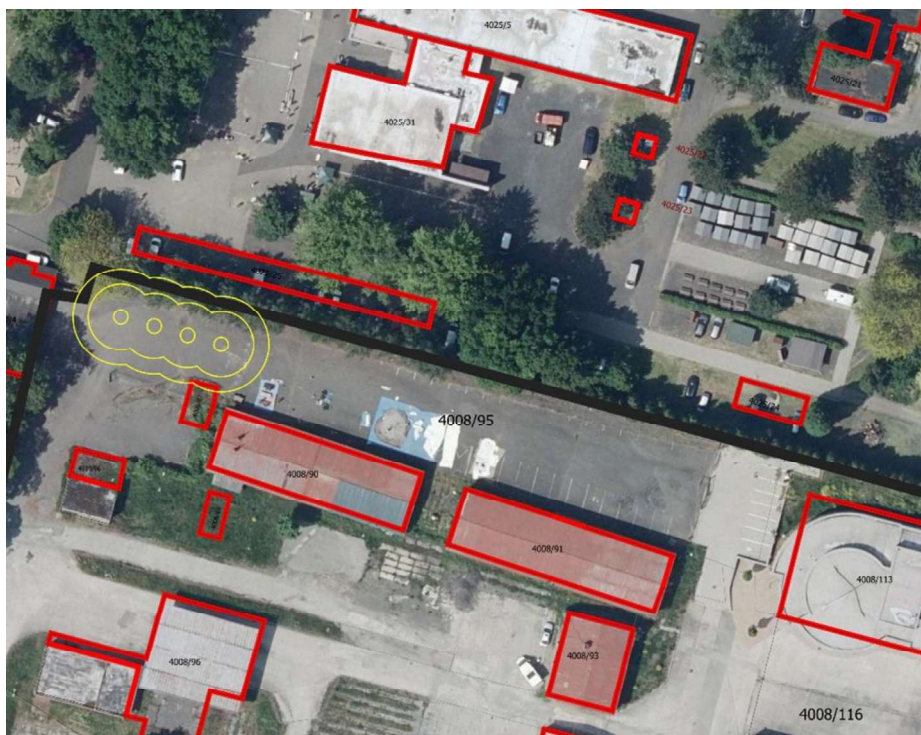
### 7.1 Varianta 1 – nadzemní úložiště 480 kg H<sub>2</sub> @ 30 bar

Prolnutím předpokládaných odběrových křivek stávajícího spotřebiče H<sub>2</sub>, tj. palivového článku o výkonu 7,5 kW a maximální okamžité spotřebě 0,51 kg H<sub>2</sub>/h, plnicího harmonogramu navrhovaného sekundárního spotřebiče, tj. vodíkového autobusu, stejně jako předpokládané hodinové výroby vodíku (pomocí elektrolyzáru) vychází návrh základního úložiště o kapacitě 480 kg a tlaku odpovídajícímu výstupnímu tlaku elektrolyzáru, tj. 30 bar, jako dostačující.

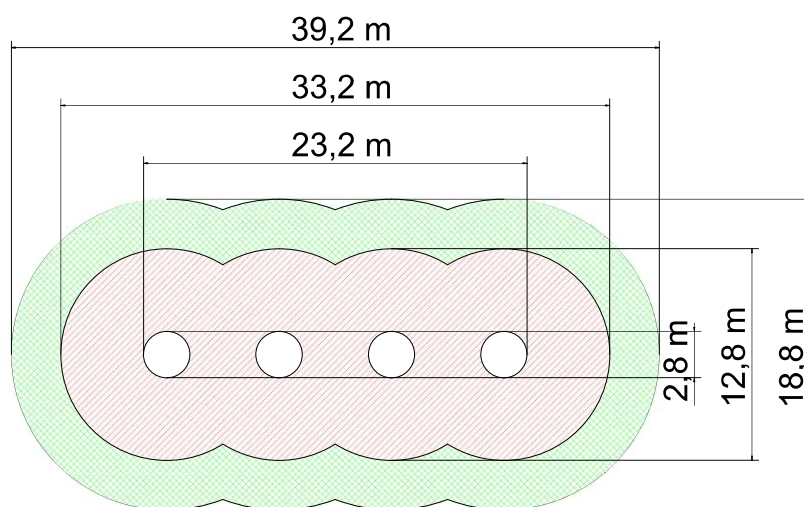
Zůstatkové množství H<sub>2</sub> pro provoz palivového článku je poté garantováno režimem provozu kompresoru pro vysokotlaké úložiště (diskutované detailně dále v kapitole 8), který na svém vstupu používá vodík z tohoto navrhovaného 30 bar úložiště. Provozní režim kompresoru, kdy vstupní tlak pod 25 bar neumožní jeho spuštění, udává využitelné množství nízkotlakého úložiště až 400 kg H<sub>2</sub> (tlakový úbytek ze 30 na 25 bar na 1 tlakovou nádobu odpovídá 20 kg H<sub>2</sub>). Odděleným řízením plnění/vyprazdňování jednotlivých nádob lze dosáhnout hospodárnějšího nakládání s vyrobeným H<sub>2</sub> a dosáhnout limitní úrovně „mrtvého“ množství H<sub>2</sub> 80 kg @ 5 bar. To znamená, že minimální množství H<sub>2</sub> pro palivový článek v době, kdy je elektrolyzáru zcela mimo provoz, odpovídá 320 kg H<sub>2</sub>. Takové množství H<sub>2</sub> umožňuje provozovat uvažovaný (v kapitole 2.3 definovaný) palivový článek po dobu 627 h na plný výkon.

Navrhované nízkotlaké úložiště 480 kg H<sub>2</sub> @ 30 bar může být řešeno např. s využitím čtyř standardizovaných tlakových nádob stabilních (TNS) o vodním objemu 50 m<sup>3</sup> a max. pracovním přetlaku 50 bar, kdy je dosaženo požadované kapacity. Plocha půdorysné zástavby včetně bezpečnostních zón jako příklad dobré praxe, a navrhované umístění pro konkrétní v tomto dokumentu diskutovaný příklad ostrovního řešení ve vybraném okresním městě jsou detailně znázorněny na [Obr. 2](#) a [Obr. 3](#).

*Pozn. 1: Zdrojem elektrické energie pro kompresor budou přebytky z FVE, které nebyly využity k výrobě vodíku, příp. rozvodná síť. Spotřeba kompresoru se tedy neprojeví na objemu vyrobeného vodíku. Při využití navrhované optimalizované konfigurace bude i přes využití síťové elektřiny v kompresoru možné označit vodík vyrobený v ostrovním řešení za plně obnovitelný.*



OBR. 2 – UKÁZKA MOŽNÉHO NÁVRHU UMÍSTĚNÍ ZÁSOBNÍKŮ 480 KG H<sub>2</sub> @ 30 BAR (ŽLUTĚ) VE VYBRANÉ LOKALITĚ<sup>1</sup>



Přibližná plocha Zóny I (m <sup>2</sup> )	425
Přibližná plocha Zóny II (m <sup>2</sup> )	737

OBR. 3 – UKÁZKA MOŽNÉ REALIZOVATELNÉ PLOCHY ÚLOŽIŠTĚ 480 KG H<sub>2</sub> @ 30 BAR – MEZERY 4 M, VČETNĚ BEZPEČNOSTNÍCH ZÓN

<sup>1</sup> Zdroj podkladové mapy: Ortofoto – ČÚZK

*Pozn. 2: Bezpečnostní zóna I je prostor s nebezpečím vzniku požáru a výbuchu od skladovacích a tlakových zařízení, tedy se zde nesmí nacházet zdroje tepla, otevřené ohně a technologie CNG a LNG. Bezpečnostní zóna II je odstupová vzdálenost od čerpací stanice nebo úložiště pohonných hmot, staveb z hořlavých hmot, sání vzduchotechnických zařízení, komunikací s veřejným provozem a parkovišť.*

*Pozn. 3: Revizní kontrola tlakových zásobníků: V současnosti probíhají aktivity vedoucí ke změnám v provádění revizních zkoušek tlakových nádob. Snaha je přejít z tlakové zkoušky vodou na ultrazvukovou kontrolu únavy materiálu nádob. Ultrazvuková zkouška má jednoznačné výhody ve formě snížení nákladů, a hlavně odpadající nutnosti velkou část vyrobeného vodíku vypustit/odčerpat, revidovanou nádobu naplnit vodou, po provedení revize vodu vypustit a opětovně nádobu vyčistit tak, aby uskladněný vodík vykazoval požadovanou čistotu.*

Vzhledem k výšce použitých tlakových nádob stabilních, která např. pro námi navrhované ukázkové řešení dosahuje 8 m, a nutnosti předpokladu provádění revizních úkonů ultrazvukem, je doporučeno kolem navrhovaného řešení nízkotlakého úložiště ponechat větší manipulační prostor – cca 4 m mezi nádobami – pro bezproblémový přístup vysokozdvíhací plošiny k inspekčním bodům. Celková zastavěná plocha včetně bezpečnostní zóny je v takovém případě pro ukázkové navrhované konkrétní řešení ([Obr. 3](#)) cca 737 m<sup>2</sup>.

## **7.2 Varianta 2 – podzemní úložiště 400 kg H<sub>2</sub> @ 30 bar**

Za účelem optimalizace investičních nákladů (CAPEX) a provozních nákladů (OPEX) navrhovaného vodíkového řešení, kde navrhované řešení sestává taktéž z vysokotlakého úložiště, vodíkové čerpací stanice a podzemního propoje s danou lokalitou výroby vodíku/nízkotlakým úložištěm, je navržena taktéž hospodárnější varianta 2.

V případě, že vzdálenost mezi lokalitou výroby vodíku a lokalitou umístění vysokotlakého úložiště dosahuje řádově stovek metrů a více, je možné a výhodné řešit nízkotlaké úložiště jako úložiště podzemní. Varianta 2 tedy navrhuje zásobu vodíku na tlaku 30 bar řešit jako podzemní úložiště pomocí vhodně dimenzovaného propojovacího potrubí (poz. 2 na [Obr. 1](#)) mezi výrobou vodíku a vysokotlakým úložištěm.

V diskutovaném konkrétním příkladě vodíkového ostrovního řešení ([Obr. 1](#)) můžeme uvažovat vzdálenost mezi lokalitami výroby vodíku a vysokotlakého úložiště rovnou cca 435 metrům. Tato vzdálenost umožňuje realizaci podzemního nízkotlakého úložiště pomocí potrubního propoje o dimenzi DN 400 PN 40. Do jednoho výkopu s povrchovou roztečí 0,5 m lze položit v takovém případě tři stejná potrubí, která částečně nahrazují čtyři nadzemní zásobníky o velikosti 50 m<sup>3</sup> @ 50 bar uvažované ve variantě 1 (kap 7.1). Vodní objem jedné linie dosahuje při dané délce a průměru potrubí téměř 55 m<sup>3</sup>, celkem tedy 165 m<sup>3</sup>. V objemu potrubí se při tlaku 30 bar zadrží celkem cca 400 kg vodíku. Při poklesu tlaku na 25 bar chodem kompresoru je v úložišti zbytkové množství cca 335 kg H<sub>2</sub> a při limitním tlaku 5 bar cca 70 kg H<sub>2</sub> (tedy cca 23 kg v jedné linii). Tedy pro provoz palivového článku je k dispozici 265 kg H<sub>2</sub> (520 h při provozu na plný výkon). Další potřebné množství vodíku pro provoz palivového článku bude zadrženo v zásobníku 300 bar, viz popis dále. Situace možného provedení je v souladu s [Obr. 1](#), včetně bezpečnostního pásma 15 m na každou stranu od plynovodu. Výhodou tohoto multifunkčního řešení je náhrada kontroverzně působících

a nepřehlédnutelných tlakových nádob stabilních, které jsou z principu zranitelnější než podzemní instalace.

V souladu s Nařízením vlády č. 192/2022 Sb. [6] se na TNS vztahují mnohé povinnosti, jako jsou roční provozní revize, periodické kontroly, jmenování pracovníka odpovědného za provoz TNS, vedení provozního deníku, udržování TNS v dobrém technickém stavu, včetně povrchových ochran. Je nutné zajistit takovou instalaci TNS, aby je bylo možno kontrolovat a servisovat. Naproti tomu položená potrubí sice také vyžadují odbornou péči při návrhu a provádění stavby z vhodných materiálů, ale následně po mnoho dalších let nepotřebují „každodenní“ péči. Kontrola těsnosti potrubí se dá provést poměrně snadno kontrolou na pokles tlaku, protože v zemi je měřená linie na stálé teplotě. V uvažovaném případě lze řídicím systémem nastavit automatické provádění této kontroly, neboť celý systém může být vybaven servoovládáním povelovaným tímto řídicím systémem. Lze tedy vždy jednu linii po dobu zkoušky odstavit a zkontrolovat ji na pokles tlaku s následným vyhodnocením stavu.

Technologicky lze takto navrhované podzemní úložiště řešit např. za použití trubek s předem vytvořenou izolací pro uložení do země se zpevněnou vrstvou z ergelitu (trubky jsou „obetonované“). Takové provedení je vhodné pro uložení i pod zátěžové plochy (jako je např. parkoviště) a je prověřeno i ze strany provozovatele plynárenské distribuční soustavy v ČR (společnosti GasNet).

## 8 Vysokotlaké úložiště 2 185 kg H<sub>2</sub> @ 300 bar a VČS

Pro provoz sekundárního spotřebiče H<sub>2</sub>, tedy navrhovaného vodíkového autobusu, v zimních měsících je rovněž nutné uložit významnou část vodíku vyrobeného během letního období, kdy je produkce elektrické energie z předpokládané FVE významně vyšší. Na základě provozního režimu popsaného v kap. 5 byla určena nutná minimální kapacita úložiště na cca 1600 kg H<sub>2</sub>.

Vysokotlakou část vodíkové zásoby je vhodné umístit spolu s technologií vodíkové čerpací stanice (VČS) na jedno funkční místo. Rovněž tato situace je znázorněna na [Obr. 1](#). Řešení umožňuje dopravní obslužnost pro autobusy s definovanou délkou a umožňuje plnění vodíkem vozů s plnicím konektorem umístěným na levé nebo pravé straně.

Jako příklad dobré praxe je možné navrhované vysokotlaké úložiště na tlaku 300 bar řešit umístěním např. do kontejneru se svazkem 109 lahví o objemu 163 litrů s maximálním provozním tlakem 300 bar v množství 6 kusů stohovaných vždy dva na sobě. Hmotnost jedné sestavy by v takovém případě byla 30 tun, stavební plocha pro umístění kontejnerů musí mít pro takový příklad únosnost nejméně 4 t/m<sup>2</sup>. Toto řešení by poskytlo ve stejném rozměru vyšší než nutnou kapacitu, která je v přepočtu 2 000 kg vodíku při tlaku 270 bar (viz **Technická poznámka 1**) a 15 °C. Navrhované řešení je konzervativní, tedy s kapacitní rezervou, která pokryje případné výpadky ve spotřebě vodíku (například servis autobusu, poruchy a podobně). Také může zpětně zásobovat zádrž na tlaku 30 bar automatickým přepuštěním přes redukční ventil, jestliže poklesne tlak pod nastavenou mez, například 10 bar.

V takto navrhovaném řešení je výhodně sdružena funkce VČS a vysokotlakého zásobníku, kdy kompresorová jednotka s minimálním výkonem 5 kg vodíku za hodinu @ 500 bar při vstupním tlaku cca 30 bar obslouží jak skladování, tak i vlastní plnění vozů vodíkem na 350 bar. Příklad modelu řešení takové sestavy VČS a vysokotlakého úložiště je na [Obr. 4](#). Zadrž vodíku v potrubním propoji je při této konfiguraci ostrovního řešení zároveň vyrovnávacím objemem, který koriguje okamžitý rozdíl mezi výkonem výroby vodíku elektrolyzérem a výkonem kompresoru. Navrhovaná VČS pro svoji funkci potřebuje zadrž vodíku na vyšší tlakové hladině, např. v našem případě konkrétně na hladině 500 bar. Ta může být zajištěna např. svazkem vodíkových tlakových lahví o přibližně 5 m<sup>3</sup> vodního objemu. Přepočítaná zadrž na hladině 500 bar je cca 150 kg vodíku. Řídicí systém může v navrhované konfiguraci s výhodou provádět management plnění zásobníků na všech třech tlakových úrovních a optimalizovat zadrž vodíku.



**OBR. 4 – PŘÍKLAD MODELU KOMBINOVANÉ SESTAVY VODÍKOVÉ ČERPACÍ STANICE A VYSOKOTLAKÉHO ÚLOŽIŠTĚ**

**Technická poznámka 1:** Mluvíme o tlakové zásobě vodíku na hladině 300 bar, ale ve skutečnosti s ohledem na to, že použité tlakové lahve v kontejneru jsou jednoplášťové a mají maximální pracovní tlak 300 bar, je dovolené plnění pouze na 270 bar. Zbýlých 30 bar je bezpečnostní rezerva na změnu atmosférických podmínek o 10 %, což je cca 30 K. Takové situace v podmínkách ČR skutečně nastávají, na příklad v září je ráno kolem 0 °C, odpoledne může být i přes 30 °C. Toto pravidlo návrh respektuje jak pro 300 bar, tak i pro svazek lahví s maximálním provozním tlakem 555 bar.

**Technická poznámka 2:** V úvaze a v popisu se vychází z plynárenských pravidel pro stavbu potrubí TPG 702 04, a z Energetického zákona č. 458/2000 Sb. pro stanovení bezpečnostního pásma plynárenské trasy. Druhá, a asi jednodušší na požadavek bezpečnostního pásma, je možnost se na potrubí dívat jako na potrubí s technickým plynem. V obou případech se bude jednat o třídu potrubí, k němuž se musí vyjádřit organizace dozoru.

Na příkladu modelu kombinovaného skladu vodíku a VČS ([Obr. 4](#)) jsou zobrazeny všechny nezbytné technologické prvky. V popředí kompresorová jednotka s řídicím systémem, s kontrolou koncentrace vodíku ve vzduchu, s ventilací a s chlazením vodíkového kompresoru. Svazek dusíkových lahví slouží pro inertizaci procesu v případě potřeby, doplnění dusíku v systému kompresorové jednotky a pro pohon servoventilů priority panelu. Kompresorová jednotka je umístěna v zóně ohraničené protipožární zdí s výškou přibližně 3,5 m, která zároveň plní i funkci protihlukové zábrany vůči obytným objektům v asi 30 m vzdáleném místě. Kompresorová jednotka může být vybavena hydraulickým pohonem multiplikátorů, což je řešení, které výrazně potlačuje provozní hluk jednotky. Také pohon servoventilů stlačeným dusíkem namísto vzduchového kompresoru se sušičkou může být dalším vhodným opatřením proti hluku. Vybavení sestavy protipožární stěnou zkracuje vzdálenosti mezi jednotlivými prvky instalace, a může být zároveň nosnou podpěrrou pro umístění priority panelu. Ten, v takovém případě, může obsluhovat např. 8 sekcí tlakové kaskády. Každý skladovací kontejner je považován za jednu sekci a tlaková zásoba na hladině 500 bar (malý svazek červených lahví za protipožární stěnou) může být rozdělen na dvě sekce. Zásobník 500 bar je v navrhovaném řešení schopný dostatečně kompenzovat sníženou kapacitu zásobníků na hladině 300 bar. Skříň umístěná před zásobníkem 500 bar obsluhuje prvky, které navíc umožní do systému naplnit vodík získaný z vnějšího zdroje v případě výpadku vlastní výroby vodíku, případně umožní vodík přepustit do přepravního prostředku v případě, že vlastní spotřeba je nižší a o vodík je zájem.

Výdejní zařízení může být jako kompaktní jednotka umístěno na kompresorové jednotce s jednoduchým přístřeškem proti atmosférickým vlivům. Plnicí hadice s bezpečnostní spojkou by měla být dlouhá několik metrů, např. cca 5 m. Výdejní zařízení může být taktéž vybaveno obchodním měřením vydaného vodíku, nicméně v navrhované konfiguraci vodíkového ostrovního řešení není tato potřeba, neboť vydaný vodík může být registrován na základě přístupového systému řidič/vozidlo. Výkon plnění vodíku navrhované sestavy převyšuje základní požadavky na VČS, kterými bylo pro uvedený diskutovaný příklad ostrovního řešení ve vybraném okresním městě plnění autobusu jednou za den asi 30 kg vodíku na tlak 350 bar a čas plnění bez chlazení vodíku asi 30 minut. Technologicky je možné s navrhovanou vodíkovou infrastrukturou plnit až 4 vodíkové autobusy daných parametrů, bude-li pro ně zajištěn dostatek vodíku. VČS je technologicky schopna v případě budoucí potřeby obhospodařit i plnění osobních vozů tlakem 350 bar, což pro většinu současně vyráběných vodíkových osobních vozů (s ohledem na v praxi používané nádrže v těchto vozidlech) představuje dojezd přes 300 km.

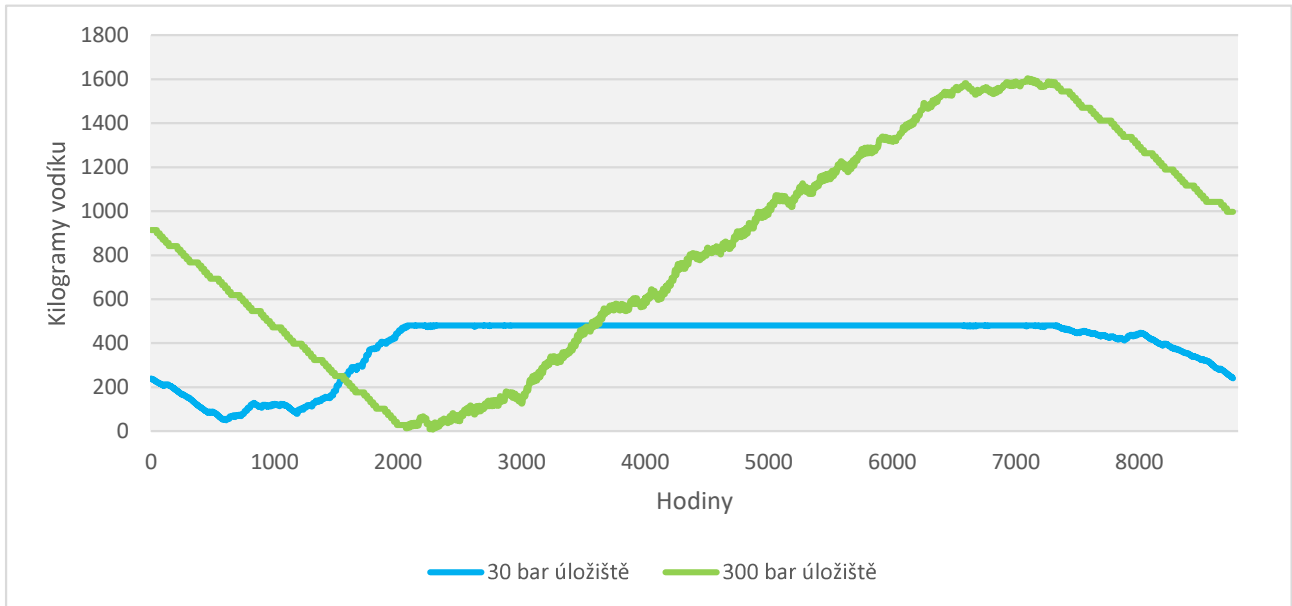
## 9 Kapacitní bilance optimalizovaného zádržného systému vodíku

Tlaková hladina 30 bar realizovaná tlakovými nádobami stabilními (varianta 1):	480 kg
Tlaková hladina 30 bar realizovaná potrubními propoji (varianta 2):	400 kg
Tlaková hladina 270 bar realizovaná 6 ks kontejnerů 17,8 m <sup>3</sup>	2 000 kg
Tlaková hladina 500 bar realizovaná svazkem lahví ve VČS	150 kg
<b>Celkem vodíku v systému (varianta 1)</b>	<b>2 630 kg</b>

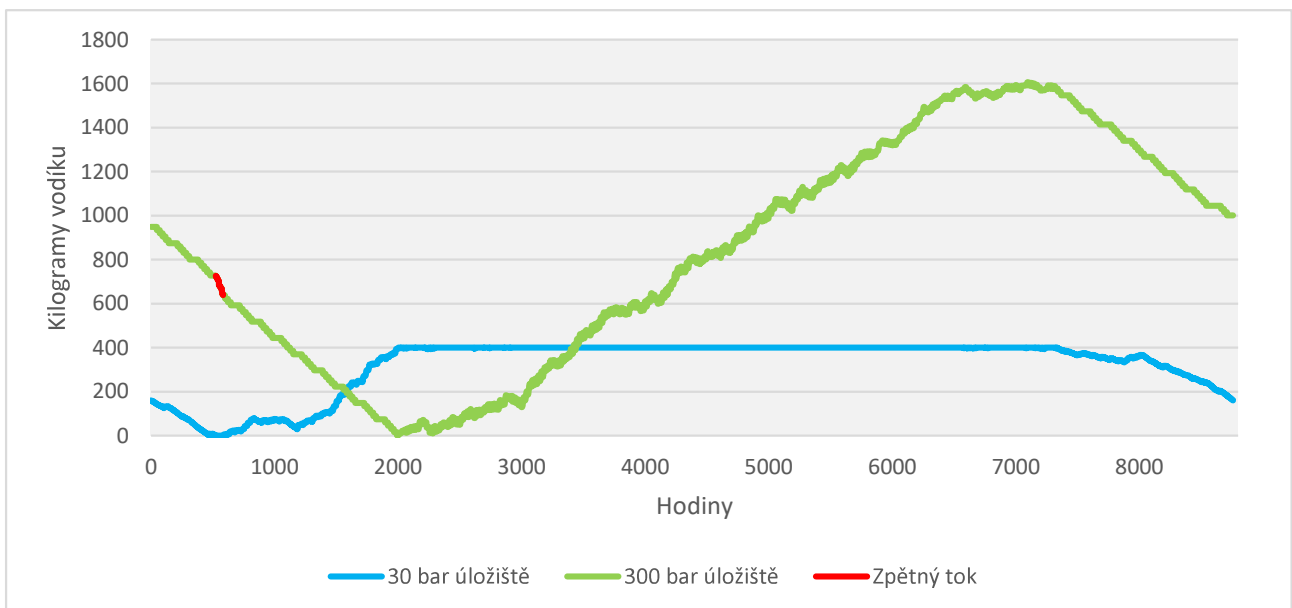
**Celkem vodíku v systému (varianta 2)**

**2 550 kg**

Na základě dostupných křivek spotřeby a výroby vodíku (viz kapitola 2) a předpokládané spotřeby dodatečného spotřebiče H<sub>2</sub>, tj. navrhovaného vodíkové autobusu, byla provedena simulace stavu naplnění optimalizovaného zádržného systému vodíku pro variantu 1 (Obr. 5) a variantu 2 (Obr. 6)



**OBR. 5 – STAV ZÁSOBNÍKU V PRŮBĚHU ROKU – VARIANTA 1**



**OBR. 6 – STAV ZÁSOBNÍKU V PRŮBĚHU ROKU – VARIANTA 2**

Červeně označená data v Obr. 6 značí situaci, kdy vodík v podzemním úložišti nestačí pro zásobování paliva pro palivový článek a je tedy potřeba využít vodík uložený ve vysokotlakém úložišti. Je zřejmé, že tato situace nastává pro diskutovaný příklad ostrovního řešení ve vybraném okresním městě s variantou úložiště 2 pouze krátce. Jedná se o cca 31 kg H<sub>2</sub> ročně.

## 10 Uvádění optimalizovaného systému zadržky do provozu

S ohledem na celkový objem zadržky navrhované konfigurace vodíkového ostrovního řešení a s ohledem na typicky nižší hladinové výkony zdrojů vodíku, může být v praxi problematické uvádění takového systému do provozu. Konkrétně pro diskutovaný příklad v tomto dokumentu je při celkovém objemu navrhované zadržky 2 550 kg vodíku a při maximálním hodinovém výkonu zdroje vodíku 4,8 kg/h celková doba plnění cca 530 hodin. To je nepraktická doba, kterou lze zkrátit dovozem vodíku a jeho přepuštěním do systému pomocí ventilového bloku umístěného ve skříni u VČS, viz popis výše. Obdobně pomocí tohoto zapojení lze vodík předat do transportního prostředku a místo může být dodavatelem vodíku. Tyto funkce pro realizaci VČS musí být předem zadány.

Příprava systému pro plnění vodíkem s čistotou vhodnou pro palivové články, zbavení celého objemu všech nežádoucích reziduí a zajištění bezpečnosti při operaci by mělo být samostatným dokumentem v rámci realizační dokumentace plánovaných staveb.

## 11 Ekonomické zhodnocení optimalizovaného ostrovního řešení

Tato sekce se zabývá vyhodnocením předpokládané ceny 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 vývoje není předmětem tohoto dokumentu. Pro následující výpočty byly uvažovány kurzy 1 EUR = 25,46 Kč, 1 USD = 23,51 Kč.

Pro lepší přehlednost je v rámci ověření metody optimalizace dlouhodobého ukládání vodíku v ostrovním řešení toto ekonomické zhodnocení provedeno na konkrétním diskutovaném příkladu ostrovního řešení ve vybraném okresním městě. Postup výpočtu zůstává analogický pro obdobná řešení.

### 11.1 Vstupní náklady

#### 11.1.1 Vstupy

Zdroj elektrické energie, tj. uvažovaná FVE, technologie výroby H<sub>2</sub>, tj. elektrolyzér, a stávající spotřebič H<sub>2</sub>, tj. palivový článek, jsou součástí předpokládaného výchozího stavu řešení a jejich pořizovací a provozní náklady jsou tak v době navrhované optimalizace řešení předpokládány již jako plně pokryty. Nicméně náklady na jejich vybudování a provoz tvoří významnou složku konečné ceny vodíku. Z tohoto důvodu budou do výpočtu taktéž zařazeny. Předpokládaná doba životnosti pro komponenty uvažované v ostrovním řešení je 20 let. Níže uvedené náklady jsou vztaženy na 10 let

tak, aby navrhované optimalizované ostrovní řešení mohlo v druhé polovině životnosti generovat zisk pro případné pozdější obnovení technologií.

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 USD/kW, tedy cca 47 000 Kč, tato cena obsahuje náklady na celý systém (čištění vody, sušení vodíku, instalace atd.) [7,8,9].

Palivový článek s výkonem 7,5 kWe (7,5 kWt) je na trhu k dispozici za 60 000 USD, tj. cca 1 410 000 Kč [10].

#### 11.1.2 Nízkotlaké úložiště

Podle normativu nákladů na výstavbu činí cena jednoho běžného metru potrubí DN 400 PN 40 se všemi náležitostmi 9 600 Kč bez DPH. Náklady na přípravu (čištění) potrubí jsou odhadnuty na 1 000 000 Kč.

Cena 1 ks zásobníku 50 m<sup>3</sup> @ 50 bar, včetně dopravy, nákladů na stavební připravenost, manipulační techniku a vlastní montáž činí dle anonymizovaných nabídek na současném trhu přibližně 5 500 000 Kč / 1 ks.

#### 11.1.3 Vysokotlaké úložiště a VČS

Dle současných anonymizovaných nabídek na trhu se cena úložiště stávajícího z 6 kontejnerů s maximálním pracovním tlakem 300 bar může pohybovat kolem hodnoty 25 900 000 Kč. Cena navrhované VČS zahrnující všechny komponenty popsané v kapitole 8 (vyjma vysokotlakého úložiště), kompresor na 500 bar a stavební práce, může být dle renomovaného dodavatele čerpacích stanic stanovena na 21 500 000 Kč.

K nákladům popsaných v sekcích 11.1.2 a 11.1.3 by měly být připočítány taktéž náklady na technické práce, montáž a dopravu v celkové ceně 5 550 000 Kč (tyto náklady jsou dále rovnoměrně rozloženy mezi VČS, vysokotlaké úložiště a podzemní propoj).

K cenám všech vstupů uvedených výše je přičteno 10 % na pokrytí dodatečných výdajů a financování navýšení v důsledku nepřesné kalkulace ceny. Cena všech vstupů by dále měla být navýšena o kumulativní inflaci v závislosti na očekávané době zahájení výstavby navrhovaného ostrovního řešení. Pro naši ukázkovou kalkulaci uvažujeme zahájení výstavby v roce 2025 a tedy navýšení ceny všech vstupů o 2 %, což je očekávaná meziroční inflace [11].

Přehled vstupních nákladů pro ostrovní řešení v obou uvažovaných variantách znázorňuje Tabulka 3.

**TABULKA 3 – VSTUPNÍ NÁKLADY OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ**

	Varianta 1	Varianta 2	
<b>CAPEX celkem</b>	<b>134 524 920</b>	<b>119 217 100</b>	<b>Kč</b>
Elektrolyzér	11 755 000	11 755 000	Kč
Výměna komponent elektrolyzéro	8 228 500	8 228 500	Kč
Palivový článek	1 410 600	1 410 600	Kč
Nadzemní nízkotlaké úložiště	22 000 000	0	Kč
Podzemní úložiště / propoj	7 028 333	15 385 000	Kč
Vysokotlaké úložiště	27 750 000	27 750 000	Kč
VČS	23 350 000	23 350 000	Kč
<b>Promítnutí CAPEX do ceny H<sub>2</sub></b>	<b>1 707</b>	<b>1 478</b>	<b>Kč/kg H<sub>2</sub></b>

## 11.2 Provozní náklady

### 11.2.1 Elektřina

Jediným předpokládaným zdrojem elektřiny pro výrobu vodíku je FVE. Cena elektrické energie může být uvažována jako prodejní cena obnovitelné elektřiny bez dalších poplatků za používání sítě. Ve výpočtu je uvažována cena obnovitelné elektřiny 100 EUR/MWh, tj. 2,55 Kč/kWh. Množství roční spotřebované energie v elektrolyzéro bylo získáno z průběhu spotřeby diskutovaného v kapitole 2.2.

Elektřina potřebná k provozu VČS se odebírá z přebytků výroby FVE, příp. elektrické sítě. Vzhledem k tomu, že chybí informace o přesném množství dostupné elektřiny z přebytků (přebytky předpokládané FVE mohou být využity i pro jiné účely než napájení navrhovaného ostrovního řešení), stejně jako časový průběh chodu kompresoru, je ve výpočtu uvažován pouze provoz s využitím elektrické sítě. Hlavním spotřebičem je kompresor na 500 bar. Dle informací od renomovaného dodavatele je spotřeba VČS uvažované v ostrovním řešení 32 MWh/rok. Cena elektřiny ze sítě je uvažována 90 EUR/MWh, tj. 2,29 Kč/kWh.

### 11.2.2 Údržba

Elektrolyzér a palivový článek vyžadují údržbu. Roční náklady na údržbu byly uvažovány jako 2 % z pořizovací ceny. Pro podzemní propoj, nadzemní úložiště a VČS jsou uvažovány roční náklady 1 % z pořizovací ceny [12].

### 11.2.3 Voda

Elektrolyzér spotřebuje cca 9 kg vody na 1 kg vyrobeného vodíku. Jedná se však o demineralizovanou vodu, takže reálná spotřeba je cca 13 kg/kg H<sub>2</sub> [13]. Průměrná cena vodného a stočného v České republice pro rok 20245 je 128 Kč za 1 000 l vody [14]. 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.

Provozní náklady jsou rovněž navýšeny o 2 % meziroční celkovou inflaci dle predikce ČNB [11].

Přehled provozních nákladů pro ostrovní řešení v obou uvažovaných variantách znázorňuje Tabulka 4.

**TABULKA 4 – PROVOZNÍ NÁKLADY OSTROVNÍHO ŘEŠENÍ**

	Varianta 1	Varianta 2	
<b>OPEX celkem</b>	<b>2 055 449</b>	<b>1 916 287</b>	<b>Kč/rok</b>
Elektrina – výroba vodíku	917 293	917 293	Kč/rok
Elektrina – VČS + kompresor	73 325	73 325	Kč/rok
Údržba elektrolyzéro	235 100	235 100	Kč/rok
Údržba palivového článku	28 212	28 212	Kč/rok
Údržba VČS + úložiště + propoj	745 783	609 350	Kč/rok
Voda	15 433	15 433	Kč/rok
<b>Promítnutí OPEX do ceny H<sub>2</sub></b>	<b>308</b>	<b>287</b>	<b>Kč/kg H<sub>2</sub></b>

### 11.3 Využití dotačních titulů

Výše uvedené ceny nepočítají s využitím existujících dotačních titulů na výstavbu vodíkových řešení. Pro navrhované ostrovní řešení existují či jsou v plánu dotační tituly, které mohou pokrýt část nákladů na skladování vodíku a čerpací stanici.

Jak již bylo uvedeno, předpokladem tohoto dokumentu je, že komponenty uvažované ve výchozím stavu řešení a popsané v kapitole 2 mají zajištěné financování alespoň investičních nákladů. Nicméně v předchozí kapitole jsou i tyto náklady zahrnuty do výpočtu vzhledem k významnému podílu na finálních nákladech celého navrhovaného optimalizovaného řešení. Pro další konkretizované výpočty na příkladu diskutovaného ostrovního vodíkového řešení v okresním městě budeme předpokládat výši míry dotace dosahující 95 % nákladů. Tato hodnota se bude týkat investičních nákladů na elektrolyzér, palivový článek a nízkotlaké úložiště. Ve variantě 1 jde o čtyři TNS, ve variantě 2 o podzemní úložiště. Uvedená míra podpory je dosažitelná např. z Operačního programu Spravedlivá transformace [15].

Pro vybudování navrhované vodíkové čerpací stanice optimalizující využití ostrovního řešení a komponentů nezbytně nutných k provozu navrhované VČS jsou k dispozici výzvy z OP Doprava, u kterých je míra dotace až 70 % nákladů. Výzvy z roku 2024 byly rozděleny především na čerpací stanice na hlavní síti TEN-T, čerpací stanice v městských uzlech (vybrané okresní město nemusí spadat do této kategorie) a ostatní čerpací stanice. Právě výzva k ostatním čerpacím stanicím se souhrnnou alokací 120 milionů korun, výzva č. 25 [16] umožňuje oproti dalším výzvám vystavět čerpací stanici s libovolným tlakem na výdeji, čerpací stanice nicméně **musí být veřejná**. Ačkoliv výzva č. 25 byla uzavřena na konci června 2024, z vyjádření Ministerstva dopravy vyplývá, že se budou do budoucna podobné výzvy opakovat. Taková dotace by pokryla komponenty popsané v kapitole 8, tedy vysokotlaké úložiště na 300 bar i 500 bar, kompresor a samotnou VČS. Ve variantě 1 se předpokládá, že podzemní propoj bude vybudován při výstavbě VČS, nicméně v současnosti není známo, zda se jedná o uznatelný náklad pro účely dotace, proto níže uvedené výpočty zohledňují jeho nedotovanou cenu.

Alternativou k programu OP Doprava jsou výzvy, které spravuje Ministerstvo pro místní rozvoj v rámci Integrovaného regionální 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) [17], ve které je možné

zažádat o dotaci na čerpací stanici ve 3 metropolitních oblastech ČR a vybraných (10) aglomeracích ČR, kdy většina okresních měst spadá do právě jedné z definovaných aglomerací. Souhrnná alokace je pro méně rozvinuté regiony stanovena na 208 milionů korun, pro přechodové regiony 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 % v případě méně rozvinutých regionů (tento příklad bude dále uvažován v konkrétních výpočtech) a 25 % v případě přechodového regionu na způsobitelné výdaje. 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 zakládána 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 EUR na projekt. Tato výzva umožní nákup zařízení k výrobě, distribuci a skladování vodíku, nicméně neumožňuje podpořit nákup VČS. První výzva by měla být zahájena na podzim 2024 a jelikož se jedná o průběžnou nesoutěžní výzvu je možné podávat projekty do jara 2026. Vzhledem k uvažované míře dotace 95 % pokrytí investičních komponent navázaných přímo na výrobu, tedy vzhledem k vyšší míře dotace a nemožnosti uznání nákladů na VČS, připadá v úvahu pro tuto výzvu pouze proplacení investičních nákladů na podzemní propoj ve variantě 1, případně nákladů na vysokotlaké úložiště, bude-li k výstavbě VČS použit program IROP.

#### **11.4 Dotační varianty**

Ve všech níže uvažovaných variantách se předpokládá, že je zajištěno 95% hrazení nákladů na následující položky: CAPEX FVE, CAPEX elektrolyzéry a CAPEX palivového článku. Pro variantu 1 se počítá s hrazením CAPEXu nízkotlakého úložiště, ve variantě 2 pak CAPEXu podzemního úložiště.

##### **11.4.1 Varianta OPD**

V této variantě se počítá s využitím dotací z programu OPD na pokrytí CAPEXu vysokotlakého úložiště a VČS (včetně kompresoru a 500 bar úložiště). Jedná se tedy o veřejnou VČS.

##### **11.4.2 Varianta IROP**

V této variantě se počítá s využitím dotací z programu IROP na pokrytí CAPEXu vysokotlakého úložiště a VČS (včetně kompresoru a 500 bar úložiště). Jedná se tedy o soukromou VČS.

##### **11.4.3 Varianta OPD+Greengas**

V této variantě se počítá s využitím dotací z programu OPD na pokrytí CAPEXu vysokotlakého úložiště a VČS (včetně kompresoru a 500 bar úložiště). Ve variantě 1 je pak pokryt CAPEX podzemního propoje (ve variantě 2 by tato kombinace vyšla draž). Je počítáno s 45 % mírou podpory, neboť žadatelem může být dopravce.

**11.4.4 Varianta IROP+Greengas**

V této variantě se počítá s využitím dotací z programu IROP na pokrytí CAPEXu VČS (včetně kompresoru a 500 bar úložiště). Z programu Greengas je pokryt CAPEX vysokotlakého úložiště a ve variantě 1 také CAPEX podzemního propoje. Je počítáno s 45 % mírou podpory, neboť žadatelem může být dopravce.

**TABULKA 5 – CENA VODÍKU V OSTROVNÍM ŘEŠENÍ PO ZAPOČTENÍ VŠECH NÁKLADŮ**

	Varianta 1	Varianta 2
Cena bez dotací	2 015 Kč/kg H <sub>2</sub>	1 765 Kč/kg H <sub>2</sub>
Cena s dotacemi (OPD)	852 Kč/kg H <sub>2</sub>	707 Kč/kg H <sub>2</sub>
Cena s dotacemi (IROP)	1 153 Kč/kg H <sub>2</sub>	1 008 Kč/kg H <sub>2</sub>
Cena s dotacemi (OPD+Greengas)	799 Kč/kg H <sub>2</sub>	707 Kč/kg H <sub>2</sub>
Cena s dotacemi (IROP+Greengas)	1 053 Kč/kg H <sub>2</sub>	961 Kč/kg H <sub>2</sub>

**11.5 Rozdělení nákladů**

Tabulka 5 obsahuje cenu H<sub>2</sub> po započtení všech komponentů, připadajících na ostrovní řešení (vyjma navrženého autobusu). Nicméně tato cena se nerovná ceně vodíkového paliva na výdejní pistolí VČS. Z pohledu případného provozovatele MHD část navrženého vodíkového ostrovního řešení zabývající se výrobou elektrické energie z FVE (případně tepelné energie při uvažování termicko-fotovoltaických článků), respektive výrobou a potřebou H<sub>2</sub> pro provoz palivového článku obsaženého ve výchozí konfiguraci, nesouvisí s provozováním autobusu, a tudíž nelze očekávat, že by spotřebitel paliva platil veškeré takto vzniklé náklady. Pro přehledné a férové rozdělení nákladů je vhodné separovat cenu vodíku do tří částí.

**11.5.1 Výroba tepla a elektřiny pomocí palivového článku (Část 1)**

Tato část se skládá z FVE, elektrolyzér, palivového článku a nízkotlakého úložiště při 30 bar. Ve variantě 1 se jedná o nadzemní TNS, ve variantě 2 se jedná o podzemní úložiště. Jelikož tato část projektu sdílí některé prvky s následující částí jsou ceny této části započteny poměrově.

Cena vodíku v části 1 je tedy cenou vodíku spotřebovaného v palivovém článku, včetně investičních a provozních nákladů na palivový článek a poměrné části na úložiště.

**TABULKA 6 – PODÍLY NA NÁKLADECH V ČÁSTI 1**

Komponenta	Podíl na ceně komponenty	
	Varianta 1	Varianta 2
FVE	16 % <sup>1</sup>	
Elektrolyzér	16 % <sup>1</sup>	
Palivový článek	100 %	
Nadzemní nízkotlaké úložiště	100 %	0 % <sup>2</sup>
Podzemní propoj/úložiště	0 % <sup>3</sup>	66 % <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Množství vodíku spotřebovaného v palivovém článku/celkové množství vodíku ≈ 16 %

<sup>2</sup> V této variantě nefiguruje

<sup>3</sup> V této variantě je propoj součástí VČS

<sup>4</sup> Pro zásobování VČS by stačilo jedno potrubí místo tří v této variantě

### 11.5.2 Výroba původně nadbytečného vodíkového paliva (Část 2)

Tato část se skládá z FVE, elektrolyzérů a ve variantě 2 také z podzemního úložiště. Sdílené komponenty jsou opět započteny poměrově.

Cena vodíku v části 2 je cenou vodíku, který přebývá po uspokojení nároků palivového článku. Jedná se o cenu vodíku poskytovaného provozovateli VČS.

**TABULKA 7 – PODÍLY NA NÁKLADECH V ČÁSTI 2**

Komponenta	Podíl na ceně komponenty	
	Varianta 1	Varianta 2
FVE	84 % <sup>1</sup>	
Elektrolyzér	84 % <sup>1</sup>	
Podzemní propoj/úložiště	0 % <sup>3</sup>	34 % <sup>4</sup>

### 11.5.3 Výdej a uskladnění vodíku ve VČS (Část 3)

Tato část se skládá z navrhovaného vysokotlakého úložiště vodíku při 300 bar, z navrhovaných technologií samotné VČS včetně kompresoru a 500 barového úložiště a ve variantě 1 také podzemního propoje.

Cena vodíku v části 3 je cenou za využití vodíkového paliva získaného v části 2 ve vodíkové čerpací stanici.

**TABULKA 8 – PODÍLY NA NÁKLADECH V ČÁSTI 3**

Komponenta	Podíl na ceně komponenty	
	Varianta 1	Varianta 2
Vysokotlaké úložiště	100 %	
VČS	100 %	
Podzemní propoj/úložiště	100 % <sup>3</sup>	0 %

Cenu vodíku na výdejní pistolí VČS tvoří součet nákladů z částí 2 a 3. Pokrytí nákladů na výstavbu a provoz části 1 je předpokládáno za vyřešené a financované pomocí existujícího provozovatele této již na začátku optimalizace existující části finálního optimalizovaného vodíkového ostrovního řešení.

**TABULKA 9 – ROZDĚLENÍ NÁKLADŮ PRO VARIANTU 1 V RŮZNÝCH DOTAČNÍCH VARIANTÁCH (KČ/KG H<sub>2</sub>)**

	Nedotovaná cena	OPD	IROP	OPD+Greengas	IROP+Greengas
Část 1	514	110	110	110	110
Část 2	432	275	275	275	275
Část 3	1 069	468	768	414	668
<b>Cena na VČS</b>	<b>1 501</b>	<b>743</b>	<b>1 043</b>	<b>689</b>	<b>943</b>

**TABULKA 10 – ROZDĚLENÍ NÁKLADŮ PRO VARIANTU 2 V RŮZNÝCH DOTAČNÍCH VARIANTÁCH (KČ/KG H<sub>2</sub>)**

	Nedotovaná cena	OPD	IROP	OPD+Greengas	IROP+Greengas
Část 1	295	80	80	80	80
Část 2	527	286	286	286	286
Část 3	943	341	642	341	596
<b>Cena na VČS</b>	<b>1 470</b>	<b>627</b>	<b>928</b>	<b>627</b>	<b>882</b>

Z výše uvedených tabulek je zřejmé, že nejnižší cena na 1 kg H<sub>2</sub> by nastala při volbě varianty 2 a využití dotačního programu OPD. Tato varianta ovšem vyžaduje provoz veřejné čerpací stanice. Pravděpodobně nejpřímochařejší cestou ke snížení nákladů na kg paliva je vyrobit větší množství vodíku. Navrhované řešení toto umožňuje, neboť výrobní kapacita elektrolyzéry je dle uvažovaného provozního režimu využita z méně než 20 %. Obzvláště zvýšení výroby vodíku v zimních měsících, např. využitím energie z větrných elektráren, by umožnilo skladovat na toto období menší množství vodíku, a tedy by potenciálně mohlo stačit menší vysokotlaké úložiště. Nicméně změna vstupních parametrů by pravděpodobně ovlivnila parametry dalších komponent ostrovního řešení a musí tedy být prováděna obezřetně.

### 11.6 Náklady na pořízení vodíkového autobusu

Cena předpokládaného pořizovaného vodíkového autobusu je uvedena samostatně, neboť se předpokládá, že nákup autobusu by byl zajištěn provozovatelem hromadné dopravy. Navíc investiční cena autobusu nemá vliv na konečnou kalkulaci ceny za kg vyrobeného H<sub>2</sub> a je proto v tomto dokumentu uvedena pouze okrajově pro úplnost investičních akcí. Cena vhodného vodíkového autobusu splňující výše definované požadavky se na trhu pohybuje kolem částky 625 000 EUR, tedy cca 15 900 000,- 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 a předpokladu lokalizace navrhovaného řešení v oblastech méně rozvinutých regionů by byla nákupní cena uvažovaného autobusu cca 2 400 000,- Kč, v případě přechodových regionů 4 800 000,- Kč.

## 12 Čistota vodíku

Oba předpokládané koncové spotřebiče pro vodík vyrobený v ostrovním řešení jsou palivové články – stacionární uvažovaný ve výchozím stavu navrhovaného řešení a mobilní v pohonném ústrojí vodíkového autobusu. Pro palivové články lze používat pouze vodík o čistotě 5.0 (99,999 %). Požadovanou čistotu vodíku pro použití v mobilitě blíže specifikuje norma ČSN ISO 14687 (656520) [18] nebo ČSN EN 17124 [19], která stanovuje maximální přípustné koncentrace nečistot v palivu.

Technologická sestava elektrolyzátoru bývá standardně vybavena zařízením pro vysušení a dočištění vodíku. Předpokládejme tedy, že vodík vystupující z výrobního zařízení splňuje požadavky čistoty. Nicméně, čistotu vodíku je nutno zajistit a spotřebiteli garantovat i na konci vodíkového řetězce. Toho lze dosáhnout pouze akreditovaným měřením čistoty H<sub>2</sub>.

První a základní odběr vzorku vodíku pro analýzu čistoty by měl proběhnout na výdejní pistolí VČS. Kontrola čistoty paliva na výdejním zařízení je běžná praxe v zahraničních VČS, a i v České republice probíhá snaha o standardizaci tohoto procesu. Toto odběrové místo je na konci celého vodíkového řetězce, tedy když vodík na výdejní pistolí splní všechny požadavky na minimální čistotu, splní je i na každém předchozím článku řetězce.

V případě, že analýza odhalí nečistoty mimo povolený rozsah, je nutné na základě druhu znečištění určit nejpravděpodobnější zdroj nečistoty v technologickém řetězci. Následně je potřeba provést další odběr vzorku pro analýzu na vedlejších odběrových místech umístěných mezi komponenty, které mohou být potenciálním zdrojem znečištění. Odběrné body je nezbytné definovat a zpracovat již do návrhu projektu.

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 pokaždé, když dojde k zásahu do systému, při kterém by mohlo dojít ke kontaminaci – míněna výměna komponentů systému nebo údržba [20]. 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.

Dle Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2023/1804 ze dne 13. září 2023 o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva a o zrušení směrnice 2014/94/EU (AFIR) [21] musí všechny nové, příp. rekonstruované VČS vydávající palivo pro silniční vozidla splňovat následující požadavky:

- Splňovat požadavky na interoperabilitu a na palivový algoritmus podle normy EN 17127:2020 (nahrazena normou ČSN EN 17127 (697280) [22]).
- Splňovat požadavky na kvalitu vydávaného vodíku dle normy EN 17124:2020 (nahrazena normou ČSN EN 17124 (697281) [19]).
- Konektory musí splňovat normu EN ISO 17268:2020 (nahrazena normou ČSN EN ISO 17268 (656521) [23]).

Výše uvedené nařízení zatím nebylo transponováno do českého právního systému, nicméně transpozice je pouze otázkou času, tudíž je třeba, aby plánované stanice vyhovovaly všem výše uvedeným požadavkům, což by mělo být zohledněno už v projektové části výstavby.

## 13 Oblasti ke zohlednění při realizaci

Při realizaci navrhovaného vodíkové ostrovního řešení nebo řešení jemu podobného je třeba zohlednit již před samotnou realizací další a z praktického hlediska významné konkrétní oblasti typicky závislé na dané vybrané lokalitě. Mezi tyto oblasti se mj. řadí:

1. *Existující inženýrské sítě* – při návrhu projektu je důležité brát zřetel na již existující inženýrské sítě v dané lokalitě a jejich ochranná pásma. Zvláště nutné je jejich existenci reflektovat při návrhu případného podzemního propoje.
2. *Elektrická přípojka pro VČS* – ačkoliv předpokládáme napájení vodíkové čerpací stanice (včetně kompresoru) z přebytků FVE, při nedostatku této energie jsou zařízení napájena z elektrické sítě. Při plánování je proto nutné zajistit připojení uvedených technologií k elektrické síti i ke zmíněnému OZE. S výhodou je možné při realizaci využít např. výkop pro společné vedení podzemního vodíkového propoje a elektrické sítě.
3. *Hluková studie* – je potřeba zpracovat hlukovou studii ohledně práce kompresorové jednotky ve VČS, stanovit, které objekty jsou chráněné ve smyslu Nařízení vlády o ochraně proti hluku č. 272/2011 Sb., případně jestli nejsou v místě i nějaké chráněné zóny. Provoz kompresoru je v navrhovaném řešení předpokládán mezi 6–22 h, a to včetně dnů pracovního klidu.
4. *Harmonogram výstavby vstupů* – aby bylo možné sestavit odhadovaný časový harmonogram pro výstavbu ostrovního řešení a popsat průběh výstavby, je v případě, že výchozí stav popsáný v kapitole 2 je ve fázi výstavby, třeba znát harmonogram této výstavby. Je důležitá vazba na ostatní části projektu pro efektivní výstavbu ostrovního řešení. Stejně důležitá je koordinace časového harmonogramu s případným dopravcem.

## 14 Závěr

Tento dokument ověřuje proveditelnost navržených metod optimalizace vodíkových ostrovních řešení s důrazem na způsoby jeho dlouhodobého ukládání. Jsou ověřeny metody pro optimální rozšíření stávajících vodíkových ostrovních řešení za účelem efektivního využití přebytků ve výrobě H<sub>2</sub>. Ukazuje se, že přebývající vodík lze vhodně spotřebovat v městské hromadné dopravě díky možnosti nasazení moderních autobusů na vodíkové palivové články do celoročního provozu na kombinovaných trasách autobusových linek (např. výhodná kombinace méně energeticky náročných linek v zimních měsících s energeticky náročnějšími linkami v letních měsících vyplývající ze sezónní proměnlivosti výdaje OZE). Takto vhodně navržený provozní režim může zajistit využití téměř všeho dostupného vodíku, a zároveň zachovat dostatečnou pružnost pro případné výkyvy ve vyrobeném množství či spotřebě H<sub>2</sub>.

Vzhledem k nepravdělnosti výroby vodíku způsobené propojením uvažovaného elektrolyzéry s FVE je třeba uskladnit významnou část vyrobeného vodíku pro potřebu v zimních měsících. Sklad vodíku je rozdělen na nízkotlakou část, která zásobuje stacionární palivový článek a vysokotlakou část pro potřeby navrhované vodíkové autobusové dopravy. Návrh optimalizace vodíkového ostrovního řešení předkládá dvě varianty uskladnění na nízkém tlaku. Varianta 1 počítá s nadzemním úložištěm v tlakových nádobách stabilních, ve variantě 2 by došlo k rozšíření podzemního propoje mezi

výrobou vodíku a vodíkovou čerpací stanicí. Propoj by se tak stal podzemním úložištěm vodíku. Na základě nákladového zhodnocení obou variant se navržená varianta 2 jeví jako ekonomicky výhodnější s méně náročnou údržbou.

Zvolená metoda optimalizace stávajícího vodíkového ostrovního řešení navrhuje doplnění vodíkové čerpací stanice kombinované s vysokotlakým úložištěm. V dokumentu je detailně ověřeno možné řešení pro zajištění vodíku jako paliva pro vodíkovou mobilitu aplikovanou pro potřeby městské hromadné dopravy v typickém sídle o velikosti např. okresního města. Takto navrhované a ověřované řešení vychází z technologií dostupných na trhu, z praktických zkušeností z dříve realizovaných projektů v ČR jakožto příkladů dobré praxe. V případě budoucího rozšíření výroby vodíku je navrhované řešení dostatečné pro provoz více vodíkových vozidel (např. autobusů).

Ověření metod optimalizace je provedeno taktéž z ekonomické stránky, kdy dokument udává postup a konkretizuje výpočty nákladů pro zvolený příkladě vodíkového ostrovního řešení ve vybraném okresním městě. Dokument ověřuje proveditelnost rozšíření stávající infrastruktury z hlediska hodnocení nákladů na 1 kg H<sub>2</sub> za předpokladu odpisu technologií po 10 letech provozu, tj. v polovině jejich předpokládané životnosti. Zhodnocení uvažuje ceny platné v době vzniku dokumentu a nezabývá se jejich budoucím vývojem, uvažuje však inflační navýšení cen. Pro obě navrhované varianty nízkotlakého úložiště se ukazuje, že bez příspěvku dotačních titulů je cena vodíku nekonkurenceschopná v porovnání s cenou ostatních běžně používaných paliv. Z tohoto důvodu dokument popisuje a ověřuje současný a předpokládaný stav dotačních titulů relevantních pro navrhované ostrovní řešení.

## 15 Seznam obrázků

Obr. 1 – Ukázka možného Návrhu umístění technologií ve vybrané lokalitě, 1 – výroba vodíku, 2 – podzemní propoj Nízkotlaký, 3 – vodíková čerpací stanice + vysokotlaké úložiště H <sub>2</sub> .....	9
Obr. 2 – Ukázka možného Návrhu umístění zásobníků 480 kg H <sub>2</sub> @ 30 bar (žlutě) ve vybrané lokalitě .....	11
Obr. 3 – Ukázka možné realizovatelné Plochy úložiště 480 kg H <sub>2</sub> @ 30 bar – mezery 4 m, včetně bezpečnostních zón.....	11
Obr. 4 – Příklad Modelu kombinované sestavy vodíkové čerpací stanice a vysokotlakého úložiště	14
Obr. 5 – Stav zásobníku v průběhu roku – varianta 1 .....	16
Obr. 6 – Stav zásobníku v průběhu roku – varianta 2 .....	16

## 16 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Dopravní výkony na jednotlivých linkách .....	7
Tabulka 2 – Roční spotřeba H <sub>2</sub> na každé z linek.....	7
Tabulka 3 – Vstupní náklady ostrovního řešení .....	19
Tabulka 4 – Provozní náklady ostrovního řešení .....	20
Tabulka 5 – Cena vodíku v ostrovním řešení po započtení všech nákladů.....	22

Tabulka 6 – Podíly na nákladech v části 1 .....	22
Tabulka 7 – Podíly na nákladech v části 2 .....	23
Tabulka 8 – Podíly na nákladech v části 3 .....	23
Tabulka 9 – Rozdělení nákladů pro variantu 1 v různých dotačních variantách (Kč/Kg H <sub>2</sub> ) .....	23
Tabulka 10 – Rozdělení nákladů pro variantu 2 v různých dotačních variantách (Kč/Kg H <sub>2</sub> ) .....	24

## 17 Seznam literatury

- [1] Evropský parlament a rada. (2009). Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/33/ES ze dne 23. dubna 2009 o podpoře čistých a energeticky účinných silničních vozidel (Text s významem pro EHP). Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32009L0033>
- [2] Evropský parlament a rada. (2019). Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1161 ze dne 20. června 2019, kterou se mění směrnice 2009/33/ES o podpoře čistých a energeticky účinných silničních vozidel (Text s významem pro EHP). Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=PT>
- [3] Bravo Diaz, L., and L. Boillot. "Historical Analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects." (2024).
- [4] Caponi, Roberta, et al. "Hydrogen refueling stations and fuel cell buses four year operational analysis under real-world conditions." *International Journal of Hydrogen Energy* 48.54 (2023): 20957-20970.
- [5] Šefr, V. (2022). CaetanoBus H2.City Gold [PowerPoint slides].
- [6] Vláda ČR. (2022). Nařízení vlády o vyhrazených technických tlakových zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2022-192>
- [7] McKenzie, H. et al (2024) Clean Hydrogen Production Cost Scenarios with PEM Electrolyzer Technology. *DOE Hydrogen Program Record*, 24005.
- [8] Krishnan, S. et al (2023) Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks. *International journal of hydrogen energy*, 48 (83), 32313-32330.
- [9] 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*.
- [10] Made-in-China. (2024) [cit. 2024-06-14]. High Efficient Fuel Cell Heater 7.5kw Heat +5kw Power CE Certified Popular in German Market. Dostupné z <https://huadehydrogen.en.made-in-china.com/product/RnfYWqJUFTVc/China-High-Efficient-Fuel-Cell-Heater-7-5kw-Heat-5kw-Power-CE-Certified-Popular-in-German-Market.html>
- [11] cnb.cz (2024) [cit. 2024-08-05]. Prognóza ČNB – léto 2024. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza>

- [12] Herenčić, L. et al (2021) Techno-economic and environmental assessment of energy vectors in decarbonization of energy islands. *Energy Conversion and Management*, 236, 114064.
- [13] 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>.
- [14] 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>
- [15] opst.cz. (2022) [cit. 2024-12-03]. Operační program Spravedlivá transformace. Dostupné z: <https://opst.cz/kraj/ustecky-kraj>
- [16] opd3.opd.cz. (2021) [cit. 2024-07-08]. Program Doprava 2021-2027. Dostupné z: <https://opd3.opd.cz/stranka/vyzva-25>
- [17] 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://irop.gov.cz/cs/vyzvy-2021-2027/vyzvy/108vyzvairop>
- [18] ČSN ISO 14687 (656520) Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu, Česká agentura pro standardizaci, publikováno září 2020.
- [19] 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, Česká agentura pro standardizaci, publikováno září 2022.
- [20] Transportation and Toxics Division California Air Resources Board (2020); Appendix C – Hydrogen refuelling station requirements. Dostupné z: [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-08/fy1920\\_ccssolicitation\\_appc\\_h2fuelingstation.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-08/fy1920_ccssolicitation_appc_h2fuelingstation.pdf)
- [21] Evropský parlament a rada. (2023). Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2023/1804 ze dne 13. září 2023 o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva a o zrušení směrnice 2014/94/EU (Text s významem pro EHP). Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/cs/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1804>
- [22] ČSN ISO 17127 (697280) Venkovní výdejní vodíkové čerpací stanice na plynný vodík s plnicími protokoly, Česká agentura pro standardizaci, publikováno srpen 2024.
- [23] ČSN EN ISO 17268 (656521) Plynný vodík – Spojovací zařízení pro doplňování paliva pro pozemní vozidla na plynný vodík, publikováno červenec 2022.

## 18 Seznam zkratk

FVE – fotovoltaická elektrárna

MHD – městská hromadná doprava

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)