

## PROVEDITELNOST UMÍSTĚNÍ VELKOKAPACITNÍCH ELEKTROLYZÉRŮ V TUZEMSKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH

MARTIN ŠILHAN<sup>a</sup>, VÁCLAV HAKL<sup>b</sup>, JAROSLAV STOKLASA<sup>a</sup> a PAVLA LUKÁŠOVÁ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, <sup>b</sup> ÚJV Řež, a.s. Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, Česká republika  
martin.silhan@cvrez.cz

Došlo 21.7.24, přijato 28.8.24.

Cílem článku je ověřit proveditelnost umístění technologie vodní elektrolýzy o velikosti řádově 100 MWe v areálu tuzemské jaderné elektrárny nebo v jeho blízkosti. Možné umístění elektrolýzérů a distribuce vyrobeného vodíku jsou zkoumány z technologických, logistických a jaderně-bezpečnostních hledisek.

Klíčová slova: jaderný reaktor, vodík, elektrolýzér

### Obsah

1. Úvod
2. Vstupy pro LTE a HTE
3. Synergické efekty umístění elektrolýzérů v jaderné elektrárně
4. Provozní aspekty umístění elektrolýzérů v blízkosti jaderné elektrárny
  - 4.1. Měrné spotřeby médií a energií elektrolýzérem
  - 4.2. Odvod vyrobeného vodíku
  - 4.3. Porovnání prostorových nároků nízko- a vysokoteplotní elektrolýzy
5. Situace na tuzemských jaderných elektrárnách
  - 5.1. Elektrárna Temelín
  - 5.2. Elektrárna Dukovany
  - 5.3. Jaderně-bezpečnostní aspekty
  - 5.4. Umístění elektrolýzérů v rámci nového jaderného projektu
6. Závěr

### 1. Úvod

Vodík je klíčovým prvkem strategie EU k dosažení klimatické neutrality do roku 2050. V kontextu dekarbonizace a přechodu na nízkouhlíkové zdroje bude nutné vyrábět vodík s minimálními emisemi. Vodíková strategie České republiky<sup>1</sup> předpokládá, že v roce 2050 dosáhne tuzemská spotřeba 1160–1835 tis. t nízkouhlíkového vodíku ročně. Tento vodík má být převážně vyráběn procesem vodní elektrolýzy, což si již v roce 2030 vyžádá instalovaný výkon elektrolýzérů 400 MWe. Vzhledem k obrovskému množství energie potřebné k výrobě vodíku se očekává, že významnou roli bude hrát jaderná energetika.

Jaderná elektrárna (JE) je díky nízkým emisím CO<sub>2</sub> a stabilnímu charakteru výroby vhodným zdrojem energie pro elektrolytickou výrobu vodíku. Propojení se zařízením na výrobu vodíku může přinést výhody i pro samotnou JE. Zvyšování podílu intermitentních obnovitelných zdrojů v energetickém mixu vede ke zvyšování fluktuací cen na trhu s elektřinou. Tento trend představuje výzvu pro stávající jaderné bloky, které byly původně navrženy pro výrobu elektřiny v základním zatížení a mají omezené možnosti regulace výkonu. Časté změny výkonu jaderné elektrárny mají rovněž negativní dopad na životnost komponent. Nedostatečnou flexibilitu jaderných bloků je možné kompenzovat přidružením výroby vodíku. Na místo snižování výkonu jaderného bloku v dobách nízkých cen elektrické energie může být pro JE výhodnější využít přebytečnou energii k elektrolytické výrobě vodíku. Vyrobený vodík pak může být skladován a v době vysokého zatížení elektrizační soustavy a vysokých cen elektřiny použit pro zpětnou výrobu elektřiny, například pomocí palivových článků. Alternativně může být vyrobený vodík vtlačěn do plynovodu nebo využit v dopravě či průmyslu. Integrace výroby vodíku tedy přispívá ke zvýšení flexibility dodávek elektrické energie z JE. Přidružení elektrolytické výroby vodíku k JE má i ekonomické výhody, jednou z nich je sdílení technologické infrastruktury<sup>2</sup>. V areálu JE existuje infrastruktura potřebná pro elektrolytickou výrobu vodíku, např. elektrické vedení, systém chladicí vody, demineralizační linka aj. Pokud by umístění velkokapacitního elektrolýzérů v areálu JE nebylo proveditelné, je možné vyvést energii a média ven z areálu a umístit elektrolýzér v bezprostřední blízkosti. Při propojení výroby vodíku s JE přímým elektrickým vedením dochází také k úspoře značné části nákladů na dodávku elektrické energie. Tyto náklady mají nejvyšší podíl na celkových měrných nákladech

dech elektrolyticky vyrobeného vodíku (LCOH – Levelised Cost Of Hydrogen – vyrovnané náklady na výrobu vodíku).

Využití jaderné energie pro elektrolytickou výrobu vodíku představuje zajímavé téma. Řada výzkumných projektů se zaměřuje na pokročilé, vysokoteplotní reaktory další generace, jejichž parametry budou velmi dobře kompatibilní s potřebami vysokoteplotní elektrolyzy. Kvůli četným synergickým efektům a možným ekonomickým benefitům pro provoz JE se toto téma řeší rovněž v kontextu vytvoření hybridních systémů na stávajících jaderných elektrárnách. Například evropský projekt NPHyCo (Nuclear Powered Hydrogen Cogeneration) se zabývá posouzením proveditelnosti a konkurenceschopnosti vodíku vyráběného na existujících JE, a to z technického, ekonomického i jaderně-bezpečnostního hlediska. Studie proveditelnosti pro 2 MWe systém elektrolyzérů byla provedena také pro JE Heysham ve Velké Británii<sup>3</sup>. Zároveň bylo ohlášeno několik demonstračních projektů elektrolytické výroby vodíku na stávajících JE. Nízkoteplotní elektrolyzéry o velikosti 1–2 MWe mají být realizovány na JE Davis-Besse, Nine Mile Point a Palo Verde v USA (cit.<sup>4</sup>). V JE Prairie Island v USA se připravuje pilotní projekt pro demonstraci výroby vodíku pomocí vysokoteplotní elektrolyzy.

Areál existující jaderné elektrárny má z hlediska elektrolytické výroby vodíku mnoho předností, ale také přináší mnohá omezení pro umístění elektrolyzéro. Omezení mohou být například jaderně-bezpečnostní povahy či logistické povahy (současné nebo plánované využití volných lokalit uvnitř perimetru JE, existence velmi husté sítě potrubních vedení a elektrovodů, která může komplikovat realizaci nových sítí). V lokalitě určené pro nový jaderný zdroj je možné řadu omezení eliminovat včasným plánováním. Při umístění do zastavovacího plánu JE je třeba respektovat vazby elektrolyzéro a jeho příslušenství na dostupnost médií a energií v lokalitě.

Cílem tohoto článku je ověřit možnost umístění velkokapacitního nízko-, nebo vysokoteplotního elektrolyzéro do areálu JE, případně do jeho těsné blízkosti. Článek bude zaměřen na české jaderné elektrárny, tj. na jadernou elektrárnu Temelín (ETE) a jadernou elektrárnu Dukovany (EDU), které jsou vlastněné a provozované společností ČEZ, a. s. Možné umístění elektrolyzéro, využití energií a médií dostupných v JE a způsob využití vyrobeného vodíku jsou posuzovány z technologických, logistických a jaderně-bezpečnostních hledisek.

## 2. Vstupy pro LTE a HTE

Nízkoemisní vodík lze vyrobit pomocí řady technologií, tento článek se zaměřuje pouze na vodní elektrolyzu, jelikož Vodíková strategie ČR považuje tuto technologii za dominantní do budoucna<sup>1</sup>. Hlavní technologie vodní elektrolyzy představují alkalická elektrolyza (AEL), proton-výměnná elektrolyza (PEM) a vysokoteplotní elektrolyza (HTE). První dvě jsou souhrnně označeny jako nízko-

teplotní elektrolyza (LTE). LTE pracuje při mírně zvýšených teplotách (obvykle do 100 °C), provozní teplota HTE se pohybuje mezi 750–1000 °C. HTE musí být udržována na provozní teplotě (vyžaduje dodávku energie), nebo řízeně odstavena a najeta (proces trvá typicky 10 a více hodin). Vodík vystupující z jednotky HTE je poměrně chladný, typicky mírně nad 40 °C, srovnatelně s vodíkem z LTE, což je výhodné pro jeho další kompresi.

Do procesu LTE vstupuje pouze elektrická energie a voda. Měrná spotřeba elektrické energie AEL / PEM / HTE se obvykle pohybuje okolo 4,5 / 4,5 / 3,6 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (cit.<sup>5–7</sup>). V procesu HTE je část energie dodávána v páře, což snižuje měrnou spotřebu elektrické energie. Přibližně lze uvést, že 1 MWe LTE / HTE vyrobí za hodinu 200 Nm<sup>3</sup> / 300 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Dalším vstupem do LTE je chlazení, u větších elektrolyzérů ve formě chladicí vody. LTE i HTE potřebují k provozu stlačený dusík pro inertizaci komor a stlačený vzduch pro pneumatické ovládací prvky.

Pro ilustraci, vysokoteplotní elektrolyzéro společnosti Sunfire pracuje se vstupní párou o teplotě 150–200 °C a tlaku 3,5–5,5 bar (cit.<sup>7</sup>), pára o těchto parametrech je na JE k dispozici. Nevýhodou HTE je vyšší složitost implementace do stávajícího provozu JE, především kvůli nutnosti propojení JE a výroby vodíku pomocí parovodu.

Výhodou HTE je výše zmíněná vyšší energetická účinnost, dodání části energie v teple (které je typicky levnější než elektřina) a absence vodního chlazení. Mezi výhody LTE lze zařadit vyšší schopnost reagovat na požadavky na změnu výkonu, nižší investiční náklady a vyšší životnost než u HTE. Životnost aktivních částí elektrolyzéro je 80 / 60 / 22 tis. hodin (cit.<sup>8,9</sup>). Investiční náklady pro AEL / PEM / vysokoteplotní elektrolyzéro představují 12,5 / 18,8 / 20 mil. Kč/MWe (cit.<sup>8</sup>). Podle cit.<sup>8</sup> jsou náklady na výrobu vodíku při poměrně nízké ceně elektrické energie o 1500 Kč nižší u HTE než u LTE. Vyšší investiční náklady HTE jsou díky vyšší účinnosti oproti LTE částečně kompenzovány nižšími náklady na vstupní elektrickou energii. S rostoucí cenou elektřiny tedy ekonomická efektivita nasazení HTE roste.

## 3. Synergické efekty umístění elektrolyzéro v jaderné elektrárně

Umístění elektrolyzéro v JE nabízí řadu možných synergických efektů: přímou dodávku elektřiny, dodávku páry, demineralizované vody (demivody), pitné vody, chladu (ve formě cirkulační chladicí vody), tlakového vzduchu a dusíku, odvod odpadních vod, zajištění ostrahy a pochůzkové činnosti. Nejdůležitější požadavek představuje umístění elektrolyzéro v blízkosti systému vyvedení elektrického výkonu uvnitř nebo vně areálu JE, protože je obtížné technicky realizovatelné zajistit přívod vysokých elektrických příkonů do jiných částí areálu JE. Z technologického hlediska je klíčové zajištění dodávky chladicí vody a demivody. Z ekonomického hlediska se nejedná o významné položky v celkových LCOH. Ještě

menší váhu má z pohledu provozní ekonomiky zajištění přívodu dusíku a stlačeného vzduchu. Obojí lze zajistit dodáním svazků tlakových lahví, pokud by nebyly k dispozici rozvody uvedených plynů, případně by se toto propojení ukázalo jako finančně nevýhodné.

**Přímá dodávka elektrické energie** je klíčová pro ekonomickou efektivitu výroby vodíku, jelikož platby za elektrickou energii představují značnou část LCOH. Dodávka elektrické energie přímým vedením z JE není zatížena regulovanými poplatky spojenými s distribucí a přenosem elektrické energie, čímž dochází k významné úspoře provozních nákladů. Elektrolyzátor pro svoji funkci potřebuje napájení pomocí stejnosměrného proudu. Ačkoliv se v JE nacházejí rozvodny se stejnosměrným proudem, nelze do nich elektrolyzátor připojit, neboť slouží pouze k bezpečnostním účelům. Pro napájení elektrolyzátorů jsou v areálu JE k dispozici střídavé zdroje, a to vedení 400 kV (vyvedení výkonu bloků) či odbočkové transformátory zajišťující napájení vlastní spotřeby bloků, existuje-li zde dostatečná rezerva výkonu. Pro dodávku elektrické energie do elektrolyzátoru je dále nutné zajistit transformaci napětí na vhodnou napěťovou hladinu a usměrnění.

**Demivoda** představuje hlavní surovinu pro elektrolyzátor. Některé elektrolyzátor mají přísné požadavky na kvalitu vstupní vody, proto může být vyžadováno dodatečné čištění demivody dostupné v JE. V případě nedostatku demivody může být nahrazena pitnou vodou, která je obvykle také upravena přímo v elektrolyzátoru. Využití demivody je preferováno kvůli vyšší ceně a tvrdosti pitné vody.

**Pára, potřebná pro chod HTE**, je na tuzemských jaderných elektrárnách dostupná o teplotách maximálně 278,5 °C / 259 °C pro ETE / EDU. Za účelem dosažení provozní teploty vysokoteplotní elektrolyzy (přibližně 800 °C) je třeba páru dále dohřát. Zvýšení teploty páry je zajištěno elektrickým ohřevem, který probíhá přímo ve vysokoteplotním elektrolyzátoru.

**Odvod odpadních vod** z elektrolyzy je možné převést ve stávajících čistírnách odpadních vod na JE. Odpadní vodu z elektrolyzy představují především: retentát (vyskytne se pouze v případě, kdy kvalita demivody nedostačuje pro vstup do elektrolyzátoru), úniky roztoku KOH (pouze u alkalických elektrolyzátorů), popř. další kondenzáty.

**Chladicí voda** je klíčové médium pro chlazení nízkoteplotních elektrolyzátorů a některých typů vodíkových kompresorů. Pro chlazení lze využít stávající systémy cirkulační chladicí vody, u kterých nedochází k potenciální jaderné kontaminaci. Ohřátou chladicí vodu je ideální využít v nejaderné části technologie.

Zajištění přívodu **tlakového dusíku i tlakového vzduchu** do všech částí areálu JE je technicky realizovatelné. Mnoho ovládacích prvků elektrolyzátorů funguje z bezpečnostních důvodů na pneumatické bázi. Potřebu tlakového vzduchu lze také řešit vybudováním kompresní stanice stlačeného vzduchu. Elektrolyzátor potřebují dodávky dusíku pro inertizaci prostor, kde dochází k vývoji vodíku, např. při odstávkách. Spotřeba dusíku pro inertizaci elektrolyzátoru i tlakového vzduchu pro pneumatické

ovládací prvky elektrolyzátoru je nízká. Spotřeba dusíku má nárazovou povahu, a lze ji zajistit formou akumulace dusíku v tlakové nádobě.

Každá JE má zajištěné **služby požární ochrany a ostrahy**. Pro provoz elektrolyzátorů je vhodné zajistit občasnou pochůzkovou kontrolou, kterou je na JE možné poskytnout stávajícím personálem.

Kromě využívání infrastruktury JE pro výrobu vodíku lze naopak i vyrobený vodík v zanedbatelné míře využít při provozu JE pro chlazení statorů elektrických generátorů. Další využití vodíku v tuzemských JE v současné době není. Kromě vodíku produkují elektrolyzátor i kyslík (osminásobnou hmotnost než vodík). Při provozu tuzemských JE není kyslík využíván. V zanedbatelném množství je kyslík na JE využíván pro řezání kovů a kalibraci měřidel, ale vzhledem k nízké spotřebě není ekonomické uvažovat o budování zařízení pro skladování a výdej kyslíku. Pro úplnost dodáváme, že další (v ČR nepoužívané) koncepty JE kyslík využívají při procesu chemické úpravy vody. Kyslík však může být v budoucnu využitelný pro výrobu elektriny, jelikož spalováním vodíku v kyslíkové atmosféře vzniká jen vodní pára. Kyslík je možné vypouštět volně do atmosféry.

## 4. Provozní aspekty umístění elektrolyzátoru v blízkosti jaderné elektrárny

### 4.1. Měrné spotřeby médií a energií elektrolyzátorem

V tab. I jsou souhrnně prezentovány spotřeby jednotlivých médií a energií pro LTE a HTE včetně potřebné plochy pro umístění zařízení. Proces vodní elektrolyzy je endotermický, je však nutné odvést teplo vznikající kvůli ohmickým a faradayovským ztrátám. Spotřeba cirkulační chladicí vody pro 1 MWe LTE je zhruba 18 m<sup>3</sup>/t vodíku (cit.<sup>10</sup>). Vzhledem k vysoké provozní teplotě HTE se zařízení uchladí okolním vzduchem, nespoteřovává tedy chladicí vodu. Další potřeba chlazení je pro kompresi vodíku, velké vodíkové kompresory pracují obvykle bez potřeby vodního chlazení. Pro 100 MWe LTE i HTE jednotku je odhadovaná dodávka demivody 18 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, dodávka chladicí vody pro 100 MWe LTE je 40 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Pokud je použita na vstupu pitná voda, je její spotřeba vyšší z důvodu nutnosti zpracování na kvalitu demivody. Zpracování spočívá především ve snížení obsahu rozpuštěných solí, při běžně používaných osmotických procesech vznikne významné množství retentátu. LTE o příkonu 1 MWe zabere plochu cca 60 m<sup>2</sup>. 100 MWe LTE / HTE vyrobí průměrně 20 / 30 tis. Nm<sup>3</sup> vodíku za hodinu a zabere plochu 6 / 11 tis. m<sup>2</sup> (prostorové nároky jsou podrobněji rozepsány v další části).

### 4.2. Odvod vyrobeného vodíku

Pro přepravu velkého množství vodíku přichází v úvahu potrubní přeprava stlačeného vodíku, případně zkapanění vodíku, a jeho přeprava v kapalné formě. Pro

Tabulka I  
Měrné spotřeby médií, energií a plochy pro LTE a HTE

|  | LTE | HTE | Poznámka   |
|--|-----|-----|--|
| Spotřeba cirkulační chladicí vody, kg/kg vodíku            | 18  | –   |  |
| Spotřeba demivody, kg/kg vodíku                            | 9   | 9   | u HTE ve formě páry                                      |
| Spotřeba pitné vody, kg/kg vodíku                          | 59  | 59  | u HTE ve formě páry                                      |
| Výroba vodíku, Nm <sup>3</sup> /hodina pro 1 MWe           | 200 | 300 |  |
| Spotřeba elektřiny, kWh(AC)/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> | 4,5 | 3,6 | u LTE uveden průměr mezi PEM a alkalickým elektrolyzérem |
| Měrná plocha, m <sup>2</sup> /MWe vč. příslušenství        | 60  | 110 | možná mírná deprese s rostoucím příkonem                 |

odběr vyrobeného vodíku je proto klíčová blízkost dostatečně dimenzované sítě zemního plynu, popřípadě blízkost spotřebitele vodíku. Vzhledem k potenciálním objemům vodíku uvažujeme v tomto případě prakticky jen o vtlačení vyrobeného vodíku do plynovodu (sítě zemního plynu nebo vodíkovodu).

Provozovatel tranzitní sítě zemního plynu, společnost NET4GAS, uvažuje o napojení lokality ETE na tranzitní síť zemního plynu do roku 2050. NET4GAS dále očekává, že kolem roku 2050 se jedna větev tranzitního plynovodu přestaví na přepravu čistého vodíku a kapacita přepravy vodíku dále výrazně vzroste. Vzdálenost areálů ETE a EDE od tranzitního plynovodu je cca 1 a 10 km. V bezprostřední blízkosti EDU se nachází pouze středotlakový plynovod s omezenou kapacitou vtlačení. Vyrobený vodík lze přimíchávat do plynovodní sítě v různých objemových procentech. Povolená procenta obsahu vodíku budou v budoucích letech růst až k 20 %, v závislosti na koncentraci vodíku jsou plynovody a spotřebiče možné používat až po zavedení různých stupňů úprav<sup>1</sup>. Vodík je v tomto případě dodáván společně se zemním plynem koncovým odběratelům připojeným k plynovodu. Výhodou tohoto přístupu je využití stávající infrastruktury.

Spotřeba zemního plynu v České republice činí cca 9 mld m<sup>3</sup>/rok (cit.<sup>11</sup>), při 20% přimíchávání by bylo možné vtlačit 1,8 mld m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/rok, to odpovídá 162 tis. tun vodíku za rok. Hypotetický elektrolyzátor o příkonu 100 MWe by při koeficientu využití 50 % (a měrné spotřebě elektřiny 4 kWh/Nm<sup>3</sup> vodíku) vyrobil cca 10 tis. tun vodíku za rok, což je výrazně méně, než limit kapacity (celého) tranzitního plynovodu. Z pohledu kapacity plynovodu nepředstavuje nasazení 100 MWe elektrolyzátoru zásadní problém. Alternativní možností pak je budoucí přebudování produktovodu ČEPRO, a.s., který se nachází poblíž ETE i EDU, na přepravu plynného vodíku.

I při přímém napojení elektrolyzátoru na tranzitní síť zemního plynu je třeba počítat se zásobníkem vodíku. Zásobník bude sloužit ke kompenzaci odchylek mezi výrobou a odbytem vodíku či pro potřeby odstávky elektrolyzátoru nebo odběru vodíku. Zásobník dále umožní realizaci případných méně významných odběrů vodíku, například pro vodíkovou čerpací stanici. Pro akumulaci vodíku vyráběného 100 MWe elektrolyzátorem (plně zatíže-

ným) po dobu 10 hodin je nutné uvažovat zásobník o objemu 2,2·10<sup>5</sup> Nm<sup>3</sup> (cca 20 tun) vodíku. Pro úplnost uvádíme, že elektrolyzátor vyprodukuje 8× (m/m) více kyslíku než vodíku, pro vyrobený kyslík v areálu JE není prakticky žádné využití, je možné jej vypouštět volně do atmosféry.

#### 4.3. Porovnání prostorových nároků nízkotepelných a vysokoteplotních elektrolyzátů

Obecně bez bližší specifikace konfigurace technologie uvažujeme s tím, že: 1 MWe LTE s příslušenstvím zabírá plochu 60 m<sup>2</sup>, 1 MWe HTE s příslušenstvím zabírá plochu 110 m<sup>2</sup>. U stavebního objektu elektrolyzátoru se předpokládá výměra 6 000 m<sup>2</sup>/11 000 m<sup>2</sup> pro 100 MWe LTE / HTE jednotku. Požadavek na snížení měrné plochy je možné realizovat, avšak na úkor investičních nákladů. Kromě samotného elektrolyzátoru se v komplexu výroby vodíku nacházejí také transformátory, usměrňovače, kompresory, chladiče, zásobníky vodíku, systémy řízení a kontroly a další pomocné systémy, např. protipožární ochrana. Vhodná je i plocha pro manipulaci vozidel. Na základě vizualizací různých pilotních projektů velkokapacitních výroben vodíku lze odhadnout celkovou plochu areálu pro výrobu vodíku zhruba 2× větší, než je plocha samotného elektrolyzátoru s příslušenstvím. Konkrétní hodnota je závislá na místních podmínkách a vlastním konceptu zařízení. Například systém chlazení se může nacházet na jiném místě (využití infrastruktury JE). Dalším prostorově náročným prvkem jsou zásobníky, jejichž kapacita, a tedy jimi zastavěná plocha, závisí na způsobu využití vyrobeného vodíku.

## 5. Situace na tuzemských jaderných elektrárnách

Umístění výroby vodíku přímo ve střeženém prostoru v blízkosti jaderných bloků představuje komplikaci z důvodu možného zavedení rizikového prvku, který by mohl ovlivnit jadernou bezpečnost bloků. Toto umístění vyžaduje provedení složitých projektových a bezpečnostních analýz, které musí prokázat zachování jaderné bezpečnosti. Další možností je využití lokalit mimo střežený



prostor. Znamé neblokované pozemky v blízkosti JE v majetku ČEZ jsou lokality Křtěnov u ETE a Suchá louka u EDU. Využití těchto vytipovaných lokalit by znamenalo nutnost přivedení médií a energií z areálu JE do prostoru výroby vodíku či výstavbu vlastního zdroje. Finální rozhodnutí by vycházelo z podrobné technicko-ekonomické analýzy. V případě některých vstupů, např. tlakového dusíku a vzduchu, může být výhodnější vybudovat vlastní zdroj média v dané lokalitě (zásobník, tvořený tlakovou nádobou, nebo svazkem tlakových nádob). Naopak u dodávky elektrické energie je přímá dodávka z JE z ekonomického hlediska kritická. Při vybudování přípojky k vyvedení výkonu bloků či k rozvodně vlastní spotřeby JE není nutné hradit regulované poplatky spojené s distribucí elektrické energie. Teoreticky lze výrobu vodíku napájet z rozvodny Kočín, resp. Slavětice, v případě ETE, resp. EDU. V tomto případě však nedochází k úspoře na regulovaných poplatcích. Ostatní synergické efekty výstavby výroby vodíku v blízkosti jaderné elektrárny nemají z ekonomického hlediska dostatečnou váhu, aby tyto poplatky vykompenzovaly. Jinými slovy, nemá smysl uvažovat o jiném než přímém napájení z rozvodů JE.

### 5.1. Elektrárna Temelín

V areálu ETE je možné vybudovat přípojku k vedení 400 kV (vyvedení výkonu bloků) či k rozvodně vlastní spotřeby. Dále se v areálu ETE nachází chemická úpravná vody, která slouží k výrobě demivody iontovou výměnou a reverzní osmózou. Demivoda je po ETE rozvedena po-

trubními mosty, z nichž je možné realizovat odbočku pro dodávku do elektrolyzérů. Potřebné chlazení může zajistit stávající oběh cirkulační chladicí vody o teplotě ochlazené vody 12 °C (zima) až cca 27 °C (léto) a tlaku cca 300 kPa.

Pro variantu umístění výroby vodíku mimo areál ETE byla vytipována lokalita Křtěnov, která se nachází zhruba 0,2 km vzdušnou čarou od okraje areálu. Bezprostřední blízkost tranzitního plynovodu v této lokalitě představuje výhodu z hlediska možného vtlačení vyrobeného vodíku. Využitelná plocha v této lokalitě činí ca 26 ha, viz obr. 1.

### 5.2. Elektrárna Dukovany

V areálu EDU je možné vybudovat přípojku k vedení 400 kV (vyvedení výkonu bloků) či k rozvodně vlastní spotřeby. Dále se v areálu nachází chemická úpravná vody, která slouží k výrobě demivody. Na EDU je k dispozici dostatečná rezerva demivody. Demivoda je rozvedena potrubními kanály, z nichž je možné kdekoli realizovat odbočku. Chlazení může zajistit stávající oběh cirkulační chladicí vody o teplotě ochlazené vody 12,5 °C (zima) až cca 33 °C (léto) a tlaku cca 300 kPa. Vybudování odbočky ze systému cirkulační chladicí vody v EDU pro novou výrobu vodíku by však bylo technicky složité a ekonomicky nákladné.

Pro variantu umístění výroby vodíku mimo areál EDU byla vytipována lokalita Suchá louka, která se nachází zhruba 0,5 km vzdušnou čarou od okraje areálu. Využitelná plocha v této lokalitě činí zhruba 40 ha. Určitou nevýhodou je bezprostřední blízkost obce, viz obr. 2.



Obr. 1. Možné umístění elektrolyzérů mimo střežený prostor ETE (Lokalita Křtěnov)



Obr. 2. Možné umístění elektrolyzéro mimo střežený prostor EDU (Lokalita Suchá louka)

### 5.3. Jaderně-bezpečnostní aspekty

Při posuzování přípustnosti umístění velkokapacitního elektrolyzéro (řádové velikosti 100 MWe) do zón v zastavovacím plánu JE je třeba stanovit, jaký vnější vliv z hlediska jaderné bezpečnosti a z hlediska navýšení požadavků na projekt (dle § 46 Atomového zákona 263/2016 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení a projektování jaderného zařízení) představuje vlastní technologie elektrolyzéro a jeho příslušenství. Tyto dodatečné vnější vlivy musí být jasně identifikovány a jejich účinky vyhodnoceny a projekt musí zajistit odolnost a ochranu jaderného zařízení proti nebezpečí plynoucímu z těchto vnějších vlivů. Účinky vnějších vlivů musí být zohledněny v návrhu generelu a dispozice stavebních objektů a zařízení elektrárny.

Vzhledem k tomu, že vodík je za určitých parametrů výbušný a hořlavý, jeho výroba a skladování v areálu JE (nebo v blízkosti) může mít negativní vliv na zajištění stanovené míry jaderné bezpečnosti. Z hlediska vnitřních vlivů představuje velkokapacitní elektrolyzéro zdroj zejména výbuchů a požárů a škodlivých účinků jejich zplodin. Dále se působením produktovodů při jejich poškození mohou uvolňovat látky snadno hořlavé, výbušné. Z hlediska bezpečnosti jsou pro umístění elektrolyzéro následující zóny nepřipustné bez přijetí zásadních projektových opatření, která zajistí, že nedojde ke snížení bezpečnosti bloku z hlediska jaderné, technické a radiační bezpečnosti:

- Zóna hlavní výroby – hlavní výrobní blok (HVB)
- Zóna hlavní výroby – vně HVB
- Zóna systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti vně HVB

Pro případné umístění elektrolyzéro v těchto zónách by muselo být posouzeno, jak může jeho umístění a působení ovlivnit plnění bezpečnostních funkcí a vyhodnotit umístění elektrolyzéro jako nový vnější vliv z hlediska působení: a) vlivu tlakové vlny na vstupy systémů vzduchotechniky bloku, b) vlivu tlakové vlny a zplodin hoření na nasávaný vzduch pro vzduchotechnické systémy blokové a nouzové dozorny, c) vlivu letících trosk a projektilů vyvolaných explozí na stavební objekty jaderného zařízení a v nich umístěné zařízení, d) vlivu tlakové vlny a letících trosk a projektilů na systémy vyvedení elektrického výkonu a rezervního napájení, e) vliv otřesů, které mohou čidla bezpečnostních systémů vyhodnotit jako zemětřesení/seismicita a automaticky odstavit reaktor.

V ostatních zónách JE je umístění elektrolyzéro možné při respektování vybraných požadavků, plynoucích z potřeby zajistit neovlivnění některých funkcí zařízení a staveb umístěných v těchto zónách.

Umístění elektrolyzéro mimo střežený prostor je vhodné provést v dostatečné vzdálenosti od hlavního výrobního bloku JE a systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti vně hlavního výrobního bloku. Dodatečné vnější ohrožení v případě ETE vyvolané elektrolyzéro tak nebude výrazné a nebude vyžadovat významné projektové změny na blocích ETE, neboť projekt JE má již implementována opatření plynoucí z umístění tranzitního plynovodu. Vznik případných dalších vnějších vlivů na jaderné bloky vyvolaných lidskou činností bude muset být posouzen. Umístění mimo střežený prostor nepředstavuje riziko pro fyzickou ochranu střeženého prostoru. Havarijní připravenost JE nebude instalací elektrolyzéro ovlivněna.

#### 5.4. Umístění elektrolyzáru v rámci nového jaderného projektu

Možnosti umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ (nový jaderný zdroj) nebo SMR (small and medium reactors – malé a střední reaktory) je dáno konkrétním projektem NJZ a SMR a případnými požadavky na projekt. Pro některé projekty NJZ a SMR může být již umístění elektrolyzáru součástí nabídky, nebo může být požadováno v zadávací dokumentaci tendru jako možná modifikace nabízených projektů. Pokud je umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ a SMR již součástí nabízeného projektu, projektant má v takovém případě již vyřešené dispoziční umístění v rámci střeženého prostoru a napojení na zdroje médií v areálu již v úvodním projektu. Umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ a SMR má již vyřešené vlivy na jadernou bezpečnost, na fyzickou bezpečnost a také provozní a provozně ekonomické aspekty synergie obou zařízení. Pokud je uvažováno umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ a SMR jako modifikace již nabízeného projektu jaderného zařízení před začátkem jeho výstavby a dodávky jednotlivých technologických celků, jsou investiční náklady na změnu projektu řádově nižší než úprava již provozovaného jaderného bloku. Jde například o zvýšení kapacity napájení vlastní spotřeby bloku respektující příkon instalovaného elektrolyzáru a také nároky na dodávky médií a na systémy odvodu tepla. V době přípravy rukopisu nebyl dodavatel SMR znám.

## 6. Závěr

Výrobě vodíku pomocí jaderné energie je věnována pozornost na celém světě, nejen na poli výzkumu a vývoje, ale i mezi provozovateli JE. Existuje řada studií a projektů zaměřených jak na pokročilé, vysokoteplotní reaktory další generace, jejichž parametry budou velmi dobře kompatibilní s potřebami vysokoteplotní elektrolyzy, tak na posouzení proveditelnosti a ekonomické efektivity výroby vodíku na stávajících JE. V USA již byly ohlášeny 4 pilotní projekty, které mají přímo na stávajících JE demonstrovat výrobu vodíku pomocí LTE i HTE.

Mezi jadernou energetickou výrobou a elektrolyzní výrobou vodíku existují četné synergie, velmi důležitá je přímá dodávka silové elektrické energie pro elektrolyzáru a možné vtlačení elektrolyticky vyrobeného vodíku do blízkého tranzitního potrubí zemního plynu. Bez významu není ani dodávka páry pro vysokoteplotní elektrolyzáru. Při případném umístění elektrolyzáru v dispozici ETE a EDU je možné využít i stávající chladicí věže pro odvod zbytkového tepla elektrolyzáru.

Kromě synergií existují i mnohé komplikace, a to jaderně-bezpečnostní nebo logistické. První skupina vychází ze skutečnosti, že v areálu JE jsou přítomna bezpečnostní omezení, která mohou kolidovat s potenciálním nebezpečím výroby a skladování vodíku. Další druhy omezení jsou zapříčiněny vysokou hustotou různých inženýrských sítí v areálu jaderné elektrárny. Mnoho kompli-

kací odpadne, pokud je elektrolyzáru umístěn vně střeženého prostoru jaderné elektrárny s tím, že energie a média jsou vyvedeny z areálu jaderné elektrárny. Pro umístění elektrolyzáru byly vytipovány lokality vně střeženého prostoru JE.

Významné nákladové položky na implementaci elektrolyzáru do JE představují například: elektrolyzáru, vybudování souvisejících sítí (které může být v areálu existující JE komplikované), náklady na vyvedení vodíku (jedná se o liniovou stavbu), připojení elektrolyzáru k jadernému bloku (nepovažujeme za pravděpodobné, že akcí bude možné provést během plánované odstávky JE), zvýšené náklady u technologií v JE (zařízení, certifikovaná pro provoz v JE, jsou obvykle několikanásobně dražší než analogická zařízení fungující mimo JE). Implementace vodíkových technologií do JE je řádově snazší, pokud je na ni pamatováno již ve fázi projektování jaderného bloku, ať už velkého zdroje, nebo malého modulárního reaktoru.

*Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.*

## LITERATURA

1. Vodíková strategie České republiky aktualizace 2024 schválená vládou, dostupné z <https://www.mpo.gov.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-aktualizace-2024-schvalena-vladou--282165/>, staženo 6. 8. 2024.
2. Nuclear hydrogen projects to support clean energy transition: Updates on international initiatives and IAEA activities, Constantin A.: Int. J. Hydrogen Energy, 54, 768 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.250>
3. H2H Feasibility Report, dostupné z [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/866374/Phase\\_1\\_-\\_EDF\\_-\\_Hydrogen\\_to\\_Heysham.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/866374/Phase_1_-_EDF_-_Hydrogen_to_Heysham.pdf), staženo 6. 8. 2024.
4. Nuclear Power Plants Gearing Up for Clean Hydrogen Production, dostupné z <https://www.energy.gov/ne/articles/3-nuclear-power-plants-gearing-clean-hydrogen-production>, staženo 6. 8. 2024.
5. Sunfire HYLINK alkaline Factsheet, dostupné z [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte\\_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline\\_202403.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline_202403.pdf), staženo 6. 8. 2024.
6. Key features of PEM electrolyser, dostupné z <https://nelhydrogen.com/product/m-series-electrolyser/>, staženo 6. 8. 2024.
7. Sunfire HYLINK SOEC Factsheet, dostupné z [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte\\_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC\\_2023Nov.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC_2023Nov.pdf), staženo 6. 8. 2024.
8. Electrolysis technologies and LCOH: current state and prospects for 2030, dostupné z <https://>



- hydrogentechworld.com/electrolysis-technologies-and-lco-h-current-state-and-prospects-for-2030, staženo 6. 8. 2024.
9. Solid Oxide Electrolysis: A Technology Status Assessment, dostupné z <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2023/11/15092028/solid-oxide-electrolysis-report.pdf>, staženo 6. 8. 2024.
  10. Water treatment for green hydrogen: what you need to know, dostupné z <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>, staženo 6. 8. 2024.
  11. Dodávky a nákup zemního plynu, <https://www.plyn.cz/dodavky-a-nakup-zemniho-plynu>, staženo 6. 8. 2024.

**M. Šilhan<sup>a</sup>, V. Hák<sup>b</sup>, J. Stoklasa<sup>a</sup>, and P. Lukášová<sup>a</sup>** (<sup>a</sup> *Research Centre Řež*, <sup>b</sup> *ÚJV Řež, Czech Republic*): **Feasibility of Placing Large-Scale Electrolyzers in Domestic Power Plants**

The aim of the article is to verify the feasibility of placing large-scale (up to 100 MWe) water electrolysis technology unit inside, or in the proximity of a domestic nuclear power plant. The possible location is investigated from technological, logistic and nuclear-safety points of view.

Keywords: nuclear reactor, hydrogen, electrolyzer



Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs>), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.